

**Veranderingen in gemiddelde
zeeniveaus in de Nederlandse
kustwateren**



Veranderingen in gemiddelde zeeniveaus in de Nederlandse kustwateren

ir. D. Dillingh

1206182-000

Titel

Veranderingen in gemiddelde zeenniveaus in de Nederlandse kustwateren

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Waterdienst

Project

1206182-000

Kenmerk

1206182-000-ZKS-0003

Pagina's

86

Trefwoorden

Zeespiegelstijging, hoogwaterstijging, laagwaterstijging, zeenniveaus.

Samenvatting

Het rapport presenteert voor alle peilmeetstations in het kustgebied de beschikbare tijdreeksen t/m 2010 van jaargemiddelden van hoogwaterstanden, laagwaterstanden, gemiddelde zeestand (mean sea level) en tijverschil in de vorm van figuren met de jaargemiddelden als functie van het jaartal en een berekende niet-lineaire trendlijn door deze datapunten.

Voor zo zuiver mogelijke tijdreeksen voor trendanalyses van jaargemiddelde zeenniveaus zijn deze gecorrigeerd voor het effect van de NAP-aanpassing op 1 januari 2005 door het corrigeren van de waarden van vóór 2005 tot NAP-waarden zoals die zouden zijn geweest na 2005.

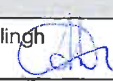
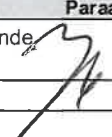
Het was noodzakelijk niet-lineaire trendanalyses toe te passen. Gebruik is gemaakt van de zogenaamde Whittaker smoother, ook wel aangeduid als penalized least sum of squares (PLSS). Deze methode kan goed omgaan met trendveranderingen, hiaten en discontinuïteiten.

Er is uitvoerig aandacht besteed aan de invloed van de bekende 18,6-jarige cyclus in de tijdreeksen van gemiddelde zeenniveaus, de zogenaamde knopencyclus. Niet alleen de lineaire trend wordt erdoor beïnvloed. Het blijkt dat ook de toegepaste PLSS-trendlijn aan het eind van de tijdreeks gevoelig is voor deze periodieke component. Om die reden zijn alle tijdreeksen gecorrigeerd voor de 18,6-jarige cyclus, alvorens de definitieve PLSS-trendlijn te berekenen.

Vrijwel alle tijdreeksen zijn beïnvloed door uitgevoerde werken. Dat maakt het lastig om algemeen geldende conclusies te trekken uit de tabellen met berekende gemiddelde stijgsnelheden over de tijdvakken 1900-2010, 1933-2010 en 1971-2010.

Tot nu toe werd er vanuit gegaan dat voor de Hollandse en Waddenzeekust de stijging van de gemiddelde hoogwaterstanden gemiddeld ongeveer 5 cm/eeuw meer bedraagt dan die van de gemiddelde zeestand. Deze extra hoogwaterstijging wordt in rekening gebracht bij aanleg of verbetering van primaire waterkeringen, bovenop de in het kustgebied vigerende scenario's voor zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust voor de komende eeuw.

Uit de analyses van het onderhavige rapport komt een genuanceerder beeld naar voren. Deze analyses geven aanleiding om het in rekening brengen van een toeslag voor extra hoogwaterstijging ten opzichte van de gemiddelde zeespiegel voortaan achterwege te laten. Alleen voor Bath en omgeving lijkt een extra toeslag van 25 cm/eeuw vooralsnog gerechtvaardigd.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
v3	18 sept. 2013	ir. D. Dillingh		ir. J.G. de Ronde		drs. F.M.J. Hoozemans	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doel van onderhavige studie	2
1.3 Werkwijze	2
1.4 Afbakening	2
1.5 Leeswijzer	3
2 Nederlandse waterstandsdata	5
2.1 Relatieve zeespiegelstijging	5
2.2 Het Normaal Amsterdams Peil (NAP)	6
2.3 Geologische achtergronden	7
2.5 Correctie data voor de NAP-publicatie van 2005	9
2.7 Beschikbaarheid van de data	12
3 Methode trendanalyses	15
3.1 De 18,6- jarige cyclus in de tijdreeksen van jaargemiddelde zeeniveaus	15
3.2 Het effect van een periodiek signaal in de tijdreeksen op de lineaire trend	17
3.3 Keuze van de analysemethode	19
3.4 Het effect van een periodiek signaal in de tijdreeksen op de PLSS-trend	21
3.5 Verbeterde analysemethode	22
3.6 Nabeschouwing	24
4 Resultaten van de trendanalyses	25
4.1 Verloop trendlijnen	25
4.2 Stijgsnelheden gemiddelde zeeniveaus	26
4.2.1 Gemiddelde stijgsnelheden voor drie tijdvakken	26
4.2.2 Trendverschillen tussen de onderscheiden periodes:	28
4.2.3 Zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust	30
4.2.4 Trendverschillen tussen de zeeniveaus	31
5 Samenvatting en conclusies	35
6 Literatuur	37
Bijlage(n)	
A Overzichtskaart peilmeetstations Nederlandse kustwateren	A-1
B Een beknopte geschiedenis van het NAP	B-1
C Verloop jaargemiddelde zeeniveaus per peilmeetstation	C-1
D Correctie knopencyclus voor de zeeniveaus van Vlissingen	D-1
E Berekende 18,6-jarige cycli voor Vlissingen (voorbeeld)	E-1
F Amplitudes knopencycli en correcties PLSS-waarden 2010	F-1

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Bij veel onderzoeken en projecten, bijvoorbeeld op het gebied van bescherming tegen overstroming, is informatie over zeespiegelstijging gewenst. Vaak gaat de belangstelling niet alleen uit naar zeespiegelstijging, maar ook naar veranderingen in gemiddelde hoog- en laagwaterstanden en in het gemiddelde tijverschil. Niet alleen de zeespiegel stijgt, maar ook het getij verandert, vooral als gevolg van menselijke ingrepen (Afsluitdijk, Deltawerken, baggerwerken, in- en ontpolderingen) en daarmee gepaard gaande morfologische ontwikkelingen.

In 1994 is voor het laatst voor alle peilmeetstations in de Nederlandse kustwateren gerapporteerd over de ontwikkelingen in de tijd van alle bovengenoemde karakteristieke parameters van het getij (Dillingh en Heinen, 1994). Het algemene beeld was dat de gemiddelde hoogwaterstanden sneller en de gemiddelde laagwaterstanden langzamer waren gestegen dan de gemiddelde zeestanden. Een belangrijk resultaat was destijds de bevestiging van de conclusie in De Ronde en Vogel (1988), dat de stijging van de gemiddelde hoogwaterstanden langs de Noordzee- en Waddenzeekust gemiddeld globaal 5 cm/eeuw meer bedroeg dan die van de gemiddelde zeestand. Deze extra hoogwaterstijging diende in rekening te worden gebracht bij aanleg of verbetering van primaire waterkeringen, bovenop de in het kustbeleid vigerende scenario's voor zeespiegelstijging (stijging gemiddelde zeestand) langs de Nederlandse kust voor de komende eeuw (Min V&W, 2000, en TAW, 2002). Voor de Westerschelde en het Eems-Dollard estuarium werden hogere stijgsnelheden gevonden.

Sindsdien is wel met de cyclus van de Wet op de Waterkering (in 2009 opgegaan in de Waterwet) aandacht gegeven aan de stijging van de gemiddelde zeespiegel en de gemiddelde hoogwaterstanden met het oog op het actualiseren van de hydraulische randvoorwaarden. Het gaat daarbij om de toets- (dijken) en rekenpeilen (duinen) langs de kust en de estuaria. De meest recente rapportage in dit kader ten tijde van het opstellen van onderhavige rapportage is te vinden in Dillingh en De Lima Rego (2010).

Een recente uitgebreide studie naar zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust vond plaats naar aanleiding van de vraag met hoeveel zeespiegelstijging nu en in de nabije toekomst rekening moet worden gehouden met het oog op de benodigde suppletiehoeveelheden, teneinde het kustsysteem (kustfundament plus Waddenzee en Westerschelde) met de zeespiegelstijging mee te kunnen laten groeien (Dillingh et al., 2010). Geconcludeerd werd dat er nog geen sprake was van een systematische versnelling van de zeespiegelstijging in de Nederlandse kustwateren. De lineaire stijging berekend over de periode 1890-2008 bedroeg 19 cm per eeuw, met een bijbehorende betrouwbaarheidsband van 17 – 20 cm per eeuw. Het referentievlak daarbij is niet het NAP, maar bovenkant van het pleistoceen waarop de ondergrondse merken van het NAP zijn gefundeerd. De berekende stijgsnelheden van de gemiddelde zeenniveaus leveren dus niet de snelheid ten opzichte van het NAP zoals dat thans is opgehangen aan een cluster van stabiele ondergrondse merken op de Veluwe, maar ten opzichte van wat op de lokale nulpaal is aangegeven en dus ten opzichte van de lokale bovenkant van het pleistoceen (zie par. 2.5).

Voor de studie van 1994 waren data beschikbaar tot en met 1992. Voor onderhavige studie zijn data door Rijkswaterstaat beschikbaar gesteld tot en met 2010. Met 18 jaar nieuwe gegevens en de beschikbaarheid van nieuwe trendanalyse technieken bestaat de behoefte de integrale analyse voor alle peilmeetstations in de kustwateren opnieuw uit te voeren. Daarmee wordt een actueel overzicht verkregen van de lange termijn ontwikkelingen in de gemiddelde waterstanden in de kustwateren vanaf het begin van de waarnemingsreeksen tot en met het jaar 2010.

1.2 Doel van onderhavige studie

Het overzichtelijk presenteren van de beschikbare tijdreeksen van jaargemiddelde zeeniveaus: gemiddelde zeestanden (in de internationale literatuur aangeduid als mean sea level), hoogwaterstanden en laagwaterstanden, en de bijbehorende trends, van alle peilmeetstations in de Nederlandse kustwateren. Ook de tijverschillen worden gepresenteerd. Nagegaan wordt of de conclusies van destijds (1994) met betrekking tot de verschillen in stijgsnelheden tussen de verschillende zeeniveaus nog steeds geldig zijn.

Er zal kort aandacht worden gegeven aan de vraag of er al een versnelde zeespiegelstijging is te zien, omdat dit een vraag is die door velen gesteld zal worden bij het lezen van dit rapport.

1.3 Werkwijze

Als eerste stap wordt de beschikbare dataset nader beschouwd. De centrale vraag daarbij is of de tijdreeksen nog op de één of andere manier voorberekt moeten worden alvorens ze te analyseren.

De tweede stap is de keuze voor een trendanalysemethode, lineair of niet-lineair. Deze keuze is niet evident en heeft veel invloed op de resultaten van de analyses.

Vervolgens worden voor een aantal goedgekozen tijdvakken de waarden afgelezen volgens de berekende lijnen voor de beschouwde zeeniveaus. Hieruit kunnen de gemiddelde stijgsnelheden gedurende die perioden worden afgeleid en kan worden bestudeerd hoe de stijgsnelheden voor de verschillende zeeniveaus zich ten opzichte van elkaar verhouden.

1.4 Afbakening

In Dillingh et al (2010) is uitgebreid onderzocht of er al sprake is van een versnelde zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Dat onderzoek wordt hier niet herhaald, alleen aangehaald.

De keuze voor de trendanalysemethode beperkt zich tot eerder in dit kader toegepaste methodes. Men zou apart onderzoek kunnen doen naar de toepassing van uitgekende filtertechnieken om zoveel mogelijk de periodieke signalen uit de tijdreeksen te verwijderen alvorens een trend te bepalen. Een dergelijk onderzoek valt buiten het kader van deze studie.

In Dillingh en Heinen (1994), waarvan het onderhavige rapport min of meer een actualisering vormt, is voor het eerst aandacht gegeven aan toeslagen op het ontwerppeil 1985 ten behoeve van de hydraulische randvoorwaarden voor het toetsen van de primaire waterkeringen, en aan overhoogten bij aanleg of verbetering van primaire waterkeringen.

De ontwerppeilen 1985 (Philippart et al, 1995) zijn de ontwerppeilen na hernieuwd statistisch en fysisch onderzoek en zijn geldig voor de hydrologische toestand in 1985.

Het aanbrengen van overhoogten bij aanleg of verbetering met het oog op toekomstige stijging van de gemiddelde hoogwaterstand is bedoeld om de waterkering gedurende zijn ontwerplevensduur (periode tot het volgende geplande herstel) aan de gestelde eisen te laten blijven voldoen. De aanpassing van de ontwerppeilen 1985 aan de stijging van het gemiddelde hoogwater geschiedt thans elke 6 jaar (voorheen 5 jaar) in het kader van de periodieke toetsing van de primaire waterkeringen en de bijbehorende hydraulische randvoorwaarden conform de Waterwet (2009). De aangepaste ontwerppeilen worden dan ook toetspeilen genoemd. Hierover wordt steeds apart gerapporteerd (Dillingh en de Lima Rego, 2010).

Voor het bepalen van de benodigde overhoogten zijn, sinds het verschijnen van de assessmentrapporten van het IPCC, scenario's voor toekomstige zeespiegelstijging - en aanpassing daarvan voor de Nederlandse situatie door het KNMI - beschikbaar. Alleen voor het toekomstige verschil in stijgsnelheid tussen de gemiddelde zeespiegel (gemiddelde zeestand) en de gemiddelde hoogwaterstand dient dan nog een uitspraak te worden gedaan.

In Heinen en Hoogkamer (1993) zijn relaties gelegd tussen de zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust en de verandering in meteorologische parameters: luchtdrukken van drie meetstations rond de Noordzee (lokale effecten) en drie rond de Noord-Atlantische Oceaan (grootschalige effecten), waarmee impliciet de windinvloed is meegenomen. Een dergelijke zoektocht naar verklarende mechanismen achter de waargenomen zeespiegelfluctuaties wordt hier niet uitgevoerd.

Het onderhavige onderzoek beperkt zich dus tot het overzichtelijk weergeven van de (voorbewerkte) tijdreeksen van de onderscheiden jaargemiddelde gemeten zeeniveaus en hun berekende trendlijnen, alsmede een analyse van de verschillen in de gemiddelde waargenomen stijgsnelheden.

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de Nederlandse waterstandsdata. De verandering in het nationale referentievlak voor hoogtemetingen, het NAP, met ingang van 2005 is van belang. Voor de beoordeling van de kwaliteit van de data wordt daarnaast ingegaan op de bepalingswijze van de gemiddelde zeeniveaus door de jaren heen en de beschikbaarheid van de data.

In hoofdstuk 3 wordt vervolgens de gekozen methode voor het berekenen van de trends in de tijdreeksen besproken. Een belangrijk punt van aandacht is de invloed van een 18,6-jarige cyclus in de tijdreeksen op het analyseresultaat.

In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de trendanalyses (figuren en tabellen) besproken.

De belangrijkste bevindingen worden in hoofdstuk 5 samengevat.

2 Nederlandse waterstandsdata

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op wat er nu eigenlijk gemeten wordt en hoe de door Rijkswaterstaat beschikbaar gestelde bestanden tot stand zijn gekomen. In Dillingh et al (2010) is hier al uitvoerig op ingegaan. De bevindingen zullen in dit hoofdstuk voor een deel beknopt worden herhaald voor de zelfstandige leesbaarheid van het onderhavige rapport.

2.1 Relatieve zeespiegelstijging

Absolute zeespiegelstijging is de werkelijke verhoging van de zeespiegel ten opzichte van het centrum van de aarde door vermeerdering van de hoeveelheid water in de oceanen, wijzigingen in de bodem van de oceaانبekkens en uitzetting als gevolg van temperatuurstijging. Relatieve zeespiegelstijging is de stijging van de zeespiegel ten opzichte van een referentievlak, en is dus de lokale som van de werkelijke zeespiegelstijging en de daling (meestal in de Nederlandse situatie) van het referentievlak. Dat referentievlak kan bijvoorbeeld de hoogte van het maaiveld van het achterland zijn, maar ook het aan het land verbonden nationale of lokale referentievlak. In Nederland is het NAP (Normaal Amsterdams Peil) het nationale referentievlak (zie paragraaf 2.2). Ten opzichte van dit referentievlak worden al gedurende ruim 300 jaar waterstanden gemeten.

Als men de werkelijke (absolute) zeespiegelstijging wil weten ter plaatse van een peilmeetstation moet men dus loskomen van het landgebonden referentievlak. Tegenwoordig kan dat door gebruik te maken van navigatiesatellieten, bijvoorbeeld GPS (Global Positioning System). Hiermee kan de verticale beweging van het referentievlak worden bepaald. In de wereld wordt dat dan ook in toenemende mate toegepast. Vanaf 1993 zijn meetgegevens van de zeespiegel beschikbaar vanuit satellieten. Satellieten meten het wateroppervlak ten opzichte van hun positie in hun omloopbaan in een ellipsoïde. De gevonden stijgsnelheden zijn dus absoluut. De satellietmetingen zijn echter minder geschikt om te bepalen wat er langs een kust aan de hand is. Dat heeft te maken met de "footprint" op het aardoppervlak van het signaal dat de satelliet uitzendt. Die footprint is al gauw enige tientallen kilometers groot, waardoor langs de kust de satellietmetingen worden vervuild, omdat het vaste land binnen de footprint valt. Peilmeetstations geven daar dus de beste informatie.

Het begrip gemiddelde zeespiegel kent geen eenduidige definitie. Afhankelijk van het doel en de lengte van de beschikbare meetreeks wordt gemiddeld over één of meer getijcycli, een maand, een jaar of nog langer. Gebruikelijk in studies over zeespiegelstijging is middeling over een kalenderjaar. Er zijn echter ook nog natuurlijke klimaatschommelingen en astronomische getijcycli met langere perioden. Dat betekent dat langere meetreeksen dan deze perioden nodig zijn om deze cycli te kunnen identificeren. Dat is wel van belang om te voorkomen dat een waargenomen versnelde zeespiegelstijging ten onrechte wordt toegeschreven aan een versterkt broeikas effect.

Met het middelen van beschikbare en geschikte metingen van de zeespiegel over een kalenderjaar worden tijdreeksen van jaargemiddelde zeestanden verkregen. Over het algemeen laten dergelijke tijdreeksen behoorlijke fluctuaties zien van jaar tot jaar. Onder zeespiegelstijging wordt hier verstaan de helling van de trendlijn door de jaargemiddelde zeestanden. Met deze trendlijn worden de toevallige en astronomisch bepaalde fluctuaties zo goed mogelijk uitgefilterd.

2.2 Het Normaal Amsterdams Peil (NAP)

Het nationale referentievlak voor de hoogteligging op het land, het NAP (Normaal Amsterdams Peil), is formeel vastgelegd door de halve bolvormige bovenkant van een bronzen bout in de kop van een 22 m lange op een pleistocene zandlaag gefundeerde betonpaal onder de Dam in Amsterdam. Voor de landelijke verspreiding van het NAP-vlak bestaat een netwerk van ondergrondse merken (regionale referentiepunten). Dit zijn palen of buizen die in geologisch stabiele gebieden heel goed in het pleistoceen gefundeerd zijn en waarvan de hoogten zijn bepaald met een zogenaamde primaire waterpassing. Er wordt nog onderscheid gemaakt tussen zogenaamde primaire en secundaire ondergrondse merken. Een primair ondergronds merk bestaat uit een groepje van vier zuilen van beton of graniet op een betonnen fundering met een onderlinge afstand van 10-20m. Ze zijn geplaatst in de periode 1926-1940 (2e Nauwkeurigheidswaterpassing, zie ook bijlage B). Een secundair ondergronds merk bestaat uit een enkele paal. De hoogten van de gewone peilmerken (ca. 30.000) voor het dagelijks gebruik, en aangebracht in bestaande bouwwerken waarvan de fundering niet altijd stabiel is, worden door middel van waterpassingen afgeleid uit de hoogten van ondergrondse merken.

In en rond peilmeetstations langs kust, estuaria, meren en grote rivieren zijn de afgelopen decennia (vanaf halverwege de zestiger jaren) nulpalen geplaatst, bedoeld als een stabiel referentiepunt voor de waterstandsmetingen. Deze nulpalen zijn gefundeerd op het pleistoceen en vervullen dus dezelfde functie als de ondergrondse merken. Ze maken deel uit van het primaire net van het NAP. De instandhouding van het NAP is thans ondergebracht bij de dienst RWS Centrale Informatievoorziening (CIV). Begin 2004 kende het primaire net van het NAP 362 hoofdpunten: 295 ondergrondse merken en 67 nulpalen (De Bruijne et al., 2005).

De onderlinge hoogteverschillen van de ondergrondse merken worden bepaald met een zogenaamde primaire waterpassing, meestal aangeduid met nauwkeurigheidswaterpassing (NWP). Na de 4e NWP (1965-1978) werd het al eerder vermoede bestaan van bewegingen aangetoond. Na analyse van de resultaten van de 5e NWP (1996-1999) is vast komen te staan dat er verschillen bestaan tussen de formeel bestaande hoogtes van de ondergrondse merken en de werkelijke hoogtes uit de recente metingen ten opzichte van het NAP. De oorzaak hiervan wordt voornamelijk gezocht in de onderlinge beweging van de ondergrondse merken, al kunnen ook fouten in de nauwkeurigheidswaterpassingen mogelijk een (kleine) rol gespeeld hebben.

Omdat de bestaande situatie ongewenst was, werd besloten een nieuwe NAP-publicatie uit te brengen, die de werkelijke hoogteverschillen in Nederland weer correct weergeeft (Brand et al, 2004). Op 1 januari 2005 is de nieuwe NAP-publicatie ingevoerd en zijn de hoogtes van de NAP-bouten en -peilmerken aangepast, ook die van bovengenoemde bout onder de Dam in Amsterdam. De publicatie verloopt volledig via internet (www.rdnap.nl). In bijlage B wordt een beknopte geschiedenis gegeven van het NAP.

Over de afgelopen 100 jaar wordt langs de Nederlandse kust een gemiddelde zeespiegelstijging ten opzichte van het NAP gemeten van gemiddeld bijna 20 cm/eeuw. De bodembeweging van de bovenkant van het pleistoceen zit dus impliciet in de meetreeksen. Hoeveel die precies bedraagt is niet helemaal duidelijk en is per station verschillend, maar is langs de Nederlandse kust niet meer dan hooguit 2-4 cm per eeuw (daling) met een lokaal maximum van ca. 10 cm/eeuw (bv. door de gaswinning in Noord-Holland, zie Barends et al., 2008).

2.3 Geologische achtergronden

Om te kunnen beschikken over een plausibele geologische verklaring voor de bewegingen van de ondergrondse merken van het NAP is samenwerking gezocht met de geologische wereld.

Grofweg zijn drie soorten geologische processen verantwoordelijk voor de beweging van de ondergrond: compactie, isostasie en tektoniek. Daarnaast heeft lokaal de delfstofwinning invloed en, afhankelijk van het type ondergronds merk, de negatieve kleeft door zettingen van holocene lagen. Negatieve kleeft is de neerwaarts gerichte schuifkracht op een fundering als gevolg van het zakken van de grond eromheen.

Compactie is de dikteverandering van lagen, bijvoorbeeld als gevolg van belasting, verandering van de stijghoogte van het grondwater of delfstofwinning (olie, gas). Vooral de compactie van Tertiaire kleipakketten, dus onder de Pleistocene zanden gelegen, speelt een rol bij de huidige bodemdaling door hun grote dikte en langzame ontwatering. De bijdrage hiervan aan de huidige bodemdaling in het Nederlandse kustgebied wordt thans op basis van modelberekeningen geschat op 0,4 tot 1,2 cm per eeuw (Barends et al, 2008, bijdrage Kooi).

Isostasie betreft het evenwicht van de lithosfeer (aardkorst en onderliggende ca. 100 km dikke buitenste schil van de aardmantel) en de onderliggende minder harde asthenosfeer. Belangrijk voor Nederland is de belastingverlaging door het afsmelten van de ijskappen aan het eind van de laatste ijstijd, waardoor Scandinavië nog steeds wordt opgeheven en Nederland deels daalt, alsmede de extra belasting door de ermee samenhangende zeespiegelstijging. Een veel gebruikte term in dit kader was "post glacial rebound", maar tegenwoordig wordt vooral de term "glacial isostatic adjustment" (GIA) gebruikt.

Ook afgezette dikke sedimentpakketten vormen een belasting voor de lithosfeer. Voor de Nederlandse kust wordt de bijdrage van de isostasie aan de bodemdaling geschat op 1 tot 3 cm/eeuw.

Tektoniek tenslotte heeft betrekking op de interne vervormingen van de lithosfeer als gevolg van de dynamiek in het binnenste van de aarde, die al dan niet langs breuklijnen plaatsvindt.

2.4 De NAP-publicatie van 2005

De nieuwe NAP-publicatie van 2005 heeft gevolgen voor de tijdreeksen van de verschillende zeeniveaus. De nulpalen bij de peilmeetstations hebben alle per 1 januari 2005 een nieuwe NAP-hoogte gekregen. Dat betekent dus dat er dan in beginsel een discontinuïteit optreedt in de hoogtegegevens van de waterstanden, die niets te maken heeft met veranderingen in de waterstanden zelf, maar alleen veroorzaakt wordt door een verandering in de lokale waarde van de hoogte van het referentievlak. De veranderingen in de NAP-waarden voor de (buiten op de) nulpalen van de peilmeetstations langs de kust zijn gegeven in tabel 2.1.

Figuur 2.4.1 geeft de hoogteverschillen van alle punten van het primaire net vóór en na de NAP-publicatie van 1-1-2005. In de figuur komt goed tot uiting dat Nederland in grote lijn afloopt in de richting van de Noordzee, volgens een kanteling om een noordoost-zuidwest gerichte as. Daar bovenop zijn ook kleinschaliger bewegingen te zien waarin bekende tektonische structuren te herkennen zijn, zoals de Peelhorst, de Roerdaalslenk en het Zuiderzeebassin. Recente bodemdaling vanwege de gaswinning in Groningen is in Figuur 2.4.1 buiten beschouwing gelaten.

Tabel 2.1 Hoogtewijzigingen van de nulpalen bij de kuststations met ingang van 1 januari 2005 (data geleverd door RWS)

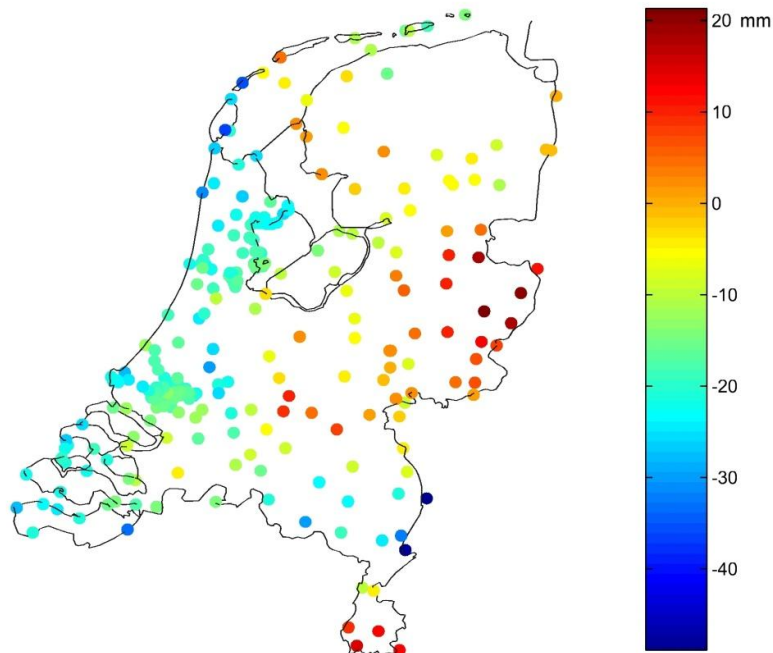
Station	1 ^e waterpassing nulpaal	Hoogte t.o.v. oude NAP [mm]	Hoogte t.o.v. nieuwe NAP [mm]	verschil [mm]
Bath	29-8-1992	4106,4	4089,3	-17,1
Bergse Diepsluis west	15-2-1989	7363,1	7348,3	-14,8
Brouwershavense Gat 08	1-1-1978	2963,1	2933,9	-29,2
Cadzand	8-1-1988	6070,0	6042,6	-27,4
Delfzijl	1-1-1978	4285,3	4277,1	-8,2
Den Helder	15-6-1970	6270,7	6253,9	-16,8
Den Oever	1-1-1981	4940,7	4915,4	-25,3
Eemshaven	1-1-1978	3791,4	3781,4	-10,0
Haringvliet 10	27-9-1984	829,0	808,0	-21,0
Hansweert	1-1-1965	4758,7	4744,8	-13,9
Harlingen	1-1-1966	6992,5	6986,0	-6,5
Hoek van Holland	1-1-1969	4854,8	4827,1	-27,7
Huibertgat	15-9-1982	2651,8	2635,0	-16,8
IJmuiden	1-1-1980	4471,3	4449,5	-21,8
Kornwerderzand	1-1-1981	5268,0	5270,5	2,5
Krammersluizen west	7-9-1992	6011,0	6001,8	-9,2
Lauwersoog	1-1-1969	6948,5	6936,0	-12,5
Nes	7-4-1986	3772,2	3761,1	-11,1
Nieuwe Statenzijl	5-12-1994	8060,9	8057,7	-3,2
Oudeschild	15-6-1970	6738,3	6718,0	-20,3
Petten	20-9-1997	6584,1	6553,0	-31,1
Roompot binnen	8-1-1988	5936,0	5906,4	-29,6
Roompot buiten	8-1-1988	5936,0	5906,4	-29,6
Scheveningen	15-6-1970	6502,0	6489,8	-12,2
Schiermonnikoog	11-3-1986	2355,9	2346,2	-9,7
Stavenisse	1-1-1982	7161,2	7140,8	-20,4
Terneuzen	1-1-1967	7319,1	7298,0	-21,1
Terschelling Noordzee	19-9-1989	3527,9	3503,6	-24,3
Texel Noordzee	19-9-1989	2661,1	2642,4	-18,7
Vlieland haven	1-1-1981	6818,4	6796,7	-21,7
Vlissingen	31-8-1982	4699,8	4670,1	-29,7
Westkapelle	1-1-1979	7503,7	7481,9	-21,8
West-Terschelling	15-6-1970	6764,2	6742,8	-21,4
Wierumergronden	15-9-1982	2651,8	2635,0	-16,8

Opmerkingen:

De stations Nes en Schiermonnikoog hebben geen nulpaal. De hoogtewijzigingen zijn ontleend aan die van het dichtstbijzijnde ondergrondse merk van de CIV, vergelijkbaar met een nulpaal, maar verder van het peilmeetstation.

De hoogtewijzigingen van de meetpalen Haringvliet 10, Texel Noordzee, Terschelling Noordzee en Wierumergronden zijn ontleend aan respectievelijk paal 42F101 en de punten 1D002, 9B075 en 0G083.

Het huidige NAP (dus van na 2005) is opgehangen aan een cluster van stabiele ondergrondse merken op de Veluwe (Brand, 2002). De overige ondergrondse merken en nulpalen worden hierop aangesloten, ook die van Amsterdam. Uit studies is gebleken dat de verticale beweging van deze stabiele ondergrondse merken op de Veluwe ten opzichte van het middelpunt van de aarde nagenoeg nul is (zie bijvoorbeeld Dillingh et al, 2010). Permanente GPS-metingen en zwaartekrachtmetingen moeten deze conclusie nog toetsen. De tijdreeksen daarvoor zijn nog te kort voor een betrouwbare uitspraak.



Figuur 2.4.1. De verschillen tussen de hoogten van het primaire net voor en na de NAP-publicatie van 1-1-2005. De figuur geeft een redelijke indicatie voor de relatieve bewegingen die hebben plaats gevonden (uit: Barends et al, 2008, blz. 38).

2.5 Correctie data voor de NAP-publicatie van 2005

Behalve Kornwerderzand hebben alle nulpalen van de peilmeetstations in het kustgebied (zie tabel 2.1) formeel een lagere NAP-hoogte gekregen op 1 januari 2005. Dat betekent dus dat de (NAP-bouten op de) nulpalen een lagere hoogte hebben gekregen ten opzichte van de stabiele ondergrondse merken op de Veluwe, waaraan het NAP thans is opgehangen. Door deze NAP aanpassing hebben de waterstanden, en dus ook de gemiddelde zeeniveau's (hoogwater, laagwater, gemiddelde zeestand) vanaf 2005 een lagere waarde. Dergelijke aanpassingen van het NAP beïnvloeden de resultaten van trendanalyses op de tijdreeksen van de gemiddelde zeeniveau's.

Voor zo zuiver mogelijke tijdreeksen voor trendanalyses zijn de jaargemiddelde zeeniveaus van vóór 2005 gecorrigeerd voor het effect van de NAP-publicatie van 2005 door bij de waarden van vóór 2005 het verschil volgens de laatste kolom van tabel 2.1 op te tellen, inclusief het teken (+ of -). Dat betekent dus dat de waarden van vóór 2005 verlaagd zijn, behalve voor Kornwerderzand.

Voor elk meetpunt zijn nu jaargemiddelde zeeniveaus verkregen ten opzichte van de bovenkant van het pleistoceen. Dat geldt in ieder geval vanaf de plaatsing van de lokale nulpaal; daarvoor is dat minder duidelijk en helaas niet meer te achterhalen. De bewegingen van de bovenkant van het pleistoceen zijn niet gestopt met de aanpassing van 2005.

In 2005 zijn de lokale NAP-waarden weer op elkaar afgestemd tot één NAP-vlak. Daarna zullen ze weer langzaam uit elkaar gaan tot de volgende correctieslag. De stijgsnelheden van de gemiddelde zeeniveaus die worden afgeleid uit de gecorrigeerde tijdreeksen leveren dus niet de snelheid ten opzichte van het NAP zoals dat is opgehangen aan een cluster van

stabiele ondergrondse merken op de Veluwe, maar ten opzichte van wat op de lokale nulpaal is aangegeven en dus ten opzichte van de lokale bovenkant van het pleistoceen.

De uitspraak dat we in Nederland onze waterstanden meten ten opzichte van het NAP verdient dus enige nuancering en moet in het licht worden gezien van wat hier over het NAP gezegd is.

Opgemerkt moet worden dat in de praktijk de nieuwe merkhogten van de nulpalen pas werden toegepast bij de eerstvolgende nulpuntsverificatie van het betreffende peilmeetstation en daarbij werden verwerkt in de procedure zoals die gebruikelijk is voor voldoende grote verschillen. Deze verschillen worden uitgesmeerd over een langere periode en in hele cm's vanaf het begin van het jaar tot de verstelling van het nulpunt. Dit is voor elk meetpunt verschillend en moeilijk terug te berekenen. Om die reden is hier als vereenvoudigd model aangenomen dat de jaargemiddelde standen voor alle stations met ingang van 2005 een sprong vertonen die gelijk is aan de voor dat station geldende NAP-hoogtewijziging.

Pogingen in het verleden om van alle peilmeetstations langs de kust de tijdreeksen van jaargemiddelde zeestanden vóór het plaatsen van de nulpalen te corrigeren voor bodemdaling zijn gestrand om de volgende redenen:

1. In de loop der jaren zijn de peilmeetstations steeds via andere peilmerken aan het NAP-net aangesloten. Er zijn niet veel identieke punten te vinden, d.w.z. trajecten die gedurende langere tijd meerdere malen zijn gemeten, waardoor een deformatie-analyse zou kunnen worden uitgevoerd;
2. De eerste ondergrondse merken werden in het oosten van het land geplaatst, omdat daar het stabiele pleistoceen dicht aan het oppervlak ligt. In de loop van de jaren zijn er steeds meer ondergrondse merken in het westen geplaatst, die daarmee vastleggingspunt voor de peilmeetstations werden. De peilmeetreeksen geven daardoor in de loop van de jaren het zeeniveau t.o.v. steeds andere ondergrondse merken tot het plaatsen van de nulpalen bij de stations.
3. Het idee dat het pleistoceen perfect stabiel zou zijn heeft ertoe geleid dat er relatief weinig is gewaterpast. Er zijn daarom weinig gegevens beschikbaar voor een goede analyse.
4. De originele waterpasgegevens van de periode 1926 tot ongeveer 1970 zijn niet in digitale vorm beschikbaar: staan op microfilm of zijn niet meer te vinden.

Voor de verbetering van de kwaliteit van de trendanalyses in de toekomst wordt aanbevolen de waterhoogten niet alleen t.o.v. het NAP op te slaan, maar ook t.o.v. de NAP-bout zelf in de nulpalen. Voor trendanalyses is een dergelijke reeks zuiverder en niet iedereen is zich bewust van de veranderingen in het NAP. Het is dus van groot belang alle veranderingen van de NAP-bout van zo'n nulpaal goed bij te houden en vast te leggen.

De PSMSL (Permanent Service for Mean for Mean Sea Level), een instantie in Engeland, die gegevens van gemiddelde zeestanden verzameld over de hele wereld, reduceert geleverde data tot een gemeenschappelijk referentievlak dat overal ongeveer 7000 mm beneden de gemiddelde zeespiegel ligt. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de geschiedenis van het lokale referentievlak, bij voorkeur een bout in een rots, doorgegeven door de data leverende instantie. Men spreekt dan van RLR-data (Revised Local Reference). Deze data zijn geschikt voor trendanalyses en tijdreeksanalyses. Zonder deze geschiedenis informatie krijgen de data de kwalificatie "Metric only" en worden ze niet geschikt bevonden voor tijdreeks- en trendanalyses. De door Nederland geleverde meetreeksen behoorden tot voor kort bij de "Metric only" data. Dat was jammer, want Nederland heeft lange peilmeetreeksen, en de peilmeetstations en de bijbehorende gegevensverwerking zijn van zeer hoge kwaliteit.

Sinds het doorgeven van de NAP-wijzigingen van 2005 aan de PSMSL hebben de Nederlandse data na datamodellering door de PSMSL alsnog “RLR”-status gekregen.

Nederland kent langs de kust geen rotsen, maar de bouten in de nulpalen vervullen dezelfde rol. Het is dan ook aan te bevelen om naast de hoogten ten opzichte van het NAP, die altijd gewenst zullen blijven, ook waterstanden te meten en op te slaan ten opzichte van de bouten in de nulpalen. Deze reeksen worden dan niet “vervuild” door aanpassingen van de NAP-hoogten. Nog beter is het om de peilmeetstations, in ieder geval de hoofdpeilmeet-stations, ook te voorzien van permanente GPS-hoogtemetingen, dan wel op een andere manier in de absolute hoogtemeting daarvan te voorzien.

In Saarloos (1951) werd al opgemerkt dat “wil men een plaatselijk bodemdalingsgetal leren kennen (DD: ten opzichte van de gemiddelde zeespiegel) dan heeft men de waterstanden nodig aan peilschalen, die onwrikbaar in de bodem zijn bevestigd en die hun onwrikbare stand tot in een verre toekomst behouden”.

2.6 De bepalingswijze van de gemiddelde zeeniveaus

In de loop van de jaren zijn de gemiddelde zeestanden op verschillende manieren berekend. Achtereenvolgens kunnen genoemd worden:

1. Halftijstanden plus een correctie
2. 6-uurlijkse standen (2, 8, 14 en 20 uur)
3. 3-uurlijkse standen (2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23 uur)
4. Alle uurstanden
5. Alle 10-minutenstanden

Ad 1. Voordat de peilmeetstations rond 1884 uitgerust werden met een peilschrijver, waardoor het verloop van de waterstand met behulp van een pen op een langzaam draaiende trommel, waarop een registratieblad was bevestigd, werd overgebracht, werden waterstanden door een waarnemer afgelezen van een peilschaal en werden de gemiddelde zeestanden berekend uit de waargenomen daghoog- en daglaagwaters (waargenomen tussen 6 en 18 uur). Alle daghoogwaters en daglaagwaters in een jaar werden gemiddeld. Het verschil tussen deze gemiddelden was de gemiddelde halftijstand. Hierop werd een (per station verschillende) correctie toegepast voor het bepalen van de gemiddelde zeestand, afhankelijk van de lokale vorm van de getijkromme. In de periode 1921...1935 werden voor een aantal stations de gemiddelde zeestanden ook nog berekend uit halftijstanden met een correctie, waarbij de halftijstanden werden berekend uit alle hoog- en laagwaters (dag en nacht), ondanks dat er registraties en dus uurwaarnemingen beschikbaar waren.

Ad 2. In de periode 1884...1922 werden de gemiddelde zeestanden hoofdzakelijk bepaald uit vier waarnemingen per dag, die werden afgelezen van de registratiebladen voor de tijdstippen 2, 8, 14 en 20 uur. Alle waarden werden over een kalenderjaar gemiddeld.

Ad 3. In de periode 1931...1970 werden de gemiddeld zeestanden over het algemeen bepaald uit acht waarnemingen per dag, afgelezen van de registratiebladen op de tijdstippen 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20 en 23 uur.

Ad 4. Van alle getijstations zijn de registratiebladen vanaf 1-1-1971 gedigitaliseerd op uurwaarden. Deze waarden, 24 per etmaal, zijn opgeslagen in elektronische bestanden. Jaargemiddelde zeestanden kunnen hiermee eenvoudig worden berekend door middeling over alle beschikbare uurwaarden.

Ad 5. In 1987 zijn de peilschrijvers vervangen door digitale niveaumeters, waarmee de inwinning van tienminutengemiddelden van de waterstanden volledig automatisch geschiedt. Sindsdien worden jaargemiddelde waterstanden berekend uit alle tienminutengemiddelden.

Het zal duidelijk zijn dat de huidige bepalingswijze van de gemiddelde zeestanden uit tienminutengemiddelde waarden de meest nauwkeurige is. De berekende waarden uit de uurstanden en 3-uurlijkse standen blijken volgens vergelijkend onderzoek goed met elkaar overeen te komen, die uit 6-uurlijkse standen zijn wat minder nauwkeurig. Het minst nauwkeurig zijn de gemiddelde zeestanden berekend uit halftijstanden. Voor meer informatie wordt verwezen naar De Ronde (1982 en 1983) en naar Van den Hoek Ostende en Van Malde (1989).

De gemiddelde hoog- en laagwaterstanden zijn vanaf ongeveer 1884 berekend uit de standen voor hoog- en laagwaters welke werden afgelezen van de registratiebladen. Daarvóór (peilschalen) werden ze berekend uit alleen de daghoogwaters en daglaagwaters.

2.7 Beschikbaarheid van de data

Als men de figuren in bijlage C bekijkt, dan valt op dat voor een aantal locaties de beschikbaarheid van de gemiddelde zeestanden afwijkt van die van de gemiddelde hoog- en laagwaterstanden, dat sommige tijdreeksen hiaten vertonen en dat sommige tijdreeksen een opvallend verloop laten zien die om een nadere verklaring vraagt.

Voor een aantal stations lopen de tijdreeksen van gemiddelde zeestanden vanaf 1971, terwijl de reeksen voor gemiddeld hoogwater en gemiddeld laagwater veel verder teruggaan. Dat is het geval voor de stations Bath, Cadzand, Westkapelle, Stavenisse, Scheveningen, Petten-Zuid, Den Oever en Oudeschild.

Tot en met 1970 werden van met een peilschrijver uitgeruste waterstandsmeeptpunten in het getijgebied in beginsel alleen de tijden en standen van hoog- en laagwaters opgeslagen. Hiaten werden opgevuld met peilschaalwaarnemingen en geïnterpoleerde standen.

Vanaf 1934 werden maand- en jaargemiddelden aangeleverd aan de al eerder genoemde PSMSL. De voor Nederland oorspronkelijk hiervoor geselecteerde stations waren Delfzijl, Harlingen, West-Terschelling, Den Helder, IJmuiden, Hoek van Holland, Hellevoetsluis, Brouwershaven, Zierikzee en Vlissingen. De berekeningswijzen zijn beschreven in paragraaf 2.6.

De overgang van het aflezen van 6-uurlijkse standen naar 3-uurlijkse standen werd mede ingegeven door de dataleveranties aan de PSMSL. Naast de daarvoor geselecteerde stations werden de standen ook voor een aantal andere stations 3-uurlijks afgelezen in verband met het uitvoeren van harmonische getij-analyses.

Van de stations waarvan de gemiddelde zeestanden beschikbaar zijn vanaf 1971, terwijl de reeksen voor gemiddeld hoogwater en laagwater veel verder teruggaan, zijn geen of vrijwel geen digitale equidistante tijdreeksen beschikbaar. Het toevoegen van data berekend uit halftijstanden met een correctie voor de vorm van de getijkromme zou eigenlijk niets toevoegen uit wat men al kan afleiden uit de tijdreeksen van gemiddeld hoog- en laagwater. Bovendien wordt de periode waarover dezelfde correctie terug in de tijd zou moeten worden toegepast vaak veel groter dan destijds bij de samenstelling van het PSMSL-bestand. De lokale correctie ten gevolge van wijzigingen in de getijkromme kan op een termijn van decennia wel enkele cm's verlopen.

Veel van deze stations zijn relatief kort geleden met een peilschrijver uitgerust, bijvoorbeeld Stavenisse pas in 1956, waardoor het alsnog digitaliseren van lange reeksen equidistante data niet eens mogelijk is.

Cadzand

Bij Cadzand wijken de hiaten voor de gemiddelde zeestand af van die van de gemiddelde laagwaterstand.

Cadzand behoorde niet tot de locaties waarvoor vanaf 1934 data aan de PSMSL zijn geleverd. Wel zijn er ooit jaargemiddelden berekend uit 6-uurlijkse standen t/m 1920. Op de oude meetlocatie (tegen de oostelijke vleugelmuur van de uitwateringsluis "De Wielingen") werd de registratie bij laag water geleidelijk onbetrouwbaarder. In 1966 werd een nieuwe meetpaal in gebruik genomen.

Terneuzen

Bij Terneuzen ontbreken de gemiddelde zeestanden voor de jaren 1920 t/m 1939 en 1944 t/m 1946, terwijl die voor de gemiddelde hoog- en laagwaterstanden wel beschikbaar zijn. Terneuzen is geen PSMSL-locatie, maar er waren ooit wel jaargemiddelden berekend uit de 6-uursstanden t/m 1920. De gemiddelden over 1944 t/m 1946 ontbreken wegens te grote onvolledigheid.

Stavenisse

De waterstanden bij Stavenisse zijn vanaf 1976 tot 1987 sterk beïnvloed door de Oosterscheldewerken. De bouw van de Philipsdam begon eind 1976 met de aanleg van een werkeiland op de Plaat van Vliet. Het sluisencomplex (de Krammersluizen) was in 1983 gereed. Begin 1987 was de dam gereed en werd hij officieel geopend. In 1983 was de Markiezaatskade klaar. De bouw van de Oesterdam startte in 1979 met de aanleg van een werkeiland en werkhaven voor de Bergsche Diepsluis. In 1986 kwam de Oesterdam gereed. De Oosterscheldekering werd "geopend" in 1986.

Scheveningen

In Scheveningen werd pas in 1961 een Meetpunt van Rijkswaterstaat gerealiseerd. Oudere data zijn afkomstig van het vroegere gemeentelijke peilmeetstation bij de sluis. De data van hoog- en laagwaterstanden werden in tabelvorm aan RWS geleverd. RWS beschikt dus niet over de registraties van vóór die tijd.

Petten zuid

De beschikbare tijdreeksen voor gemiddeld hoog- en laagwater van Petten-zuid tonen twee hiaten. Ze zijn een samenvoeging van drie verschillende reeksen. De oudste reeksen betreffen de jaren 1863 t/m 1953. Het zijn peilschaalwaarnemingen van daghoogwaters en daglaagwaters. In 1988 doken ze op uit een archief in Noord-Holland. Ze zijn gebruikt in het werk van Saarloos (1951), maar nooit vermeld in publicaties van Rijkswaterstaat, zoals de Jaarboeken der Waterhoogten. Over de wijze van handhaven van het NAP is niets bekend. In de tweede periode van 1964 t/m 1973 heeft er een peilschrijver gestaan ter hoogte van het reactorcentrum. Vanaf 1977 werkt de nieuwe opstelling (meetpaal), Petten zuid genoemd, omdat de peilschrijver al werd aangeduid met Petten.

Vlieland haven

Vlieland haven vertoont ten opzichte van de andere Waddenstations een zeer snelle stijging van het gemiddelde laagwater over de periode van ca. 1880 tot ca. 1920. Daarna is er een hiaat tot 1941. De oude peilschrijver (tot 1920) en de nieuwe peilschrijver (vanaf november 1940) stonden op dezelfde locatie.

De registratie van de oude was onbetrouwbaar rond laagwater en de afwijking werd steeds groter. Daarom zijn vanaf 1922 alleen nog daghoogwaters bewerkt. Bij de reeksen van jaargemiddelden zijn als leidraad in de regel de oude Tienjarige Overzichten gebruikt (geldt overigens voor alle stations). Als daarin jaargemiddelden waren gepubliceerd zijn ze in de tijdreeksen opgenomen, ook als bekend was dat ze onbetrouwbaar waren.

Nieuwe Statenzijl

Voor Nieuwe Statenzijl zijn alleen jaargemiddelde hoogwaterstanden beschikbaar. Jaargemiddelde laagwaterstanden konden niet berekend worden omdat de laagwaters over het algemeen niet of niet goed gemeten kunnen worden wegens droogval. Het gevolg is dat ook gemiddelde zeestanden en gemiddelde tijverschillen niet berekend konden worden.

Vlissingen en IJmuiden

Vlissingen en IJmuiden laten beide een afwijkend verloop zien vóór ca. 1885, zowel voor de gemiddelde zeestanden als voor de gemiddelde hoog- en laagwaterstanden. De oorzaak van dit afwijkend verloop is niet gedocumenteerd en niet bekend. Het zou kunnen zijn dat er een verband is met het einde van de eerste Nauwkeurigheidswaterpassing (1875-1885, zie bijlage B).

Als er sprake is van een verandering in het lokale referentievlak zou de sprong in de onderscheiden zeeniveaus even groot moeten zijn en zou het tijverschil niet beïnvloed mogen worden. Verderop in dit rapport wordt hierop verder ingegaan. Een andere mogelijkheid is een lokale verandering in de hydrologische omstandigheden door uitgevoerde werken en/of de verplaatsing van de meetopstelling.

Delfzijl

Voor het statistisch onderzoek naar de overschrijdingsfrequentie van extreme stormvloedstanden waren voor Delfzijl continue data beschikbaar vanaf 1 maart 1881 t/m 31 december 1985 (Dillingh et al, 1993). De thans beschikbare reeksen gaan veel verder terug, tot 1824.

In 1988 werden, in zijn speurtocht naar oude peilschaalwaarnemingen, door Van den Hoek Oostende in het Rijksarchief van Groningen, tabellen met peilschaalwaarnemingen (hoog- en laagwaters overdag) van enkele meetpunten in het noordoosten van het land uit de jaren 1824 tot 1877 gevonden, die destijds bij Rijkswaterstaat niet bekend waren. Het bestaan ervan was aan het licht gekomen via het werk van G.A. Venema (Vloed en eb langs de Groningse kust, 1860). Deze data zijn gedigitaliseerd en omgerekend naar het NAP (het oudste deel ook naar cm's) door Koos Doekes van de Rijkswaterstaat. Ook de reeks gemiddelde zeestanden is door hem verlengd door herleiding uit daghelftij. Vanwege het onzekere karakter hiervan – de periode waarover de herleiding is bepaald is pas het eind van de 19^e eeuw – is deze uitgebreide reeks niet aan de PSMSL geleverd. Er is geen publicatie bekend waarin dit staat gedocumenteerd.

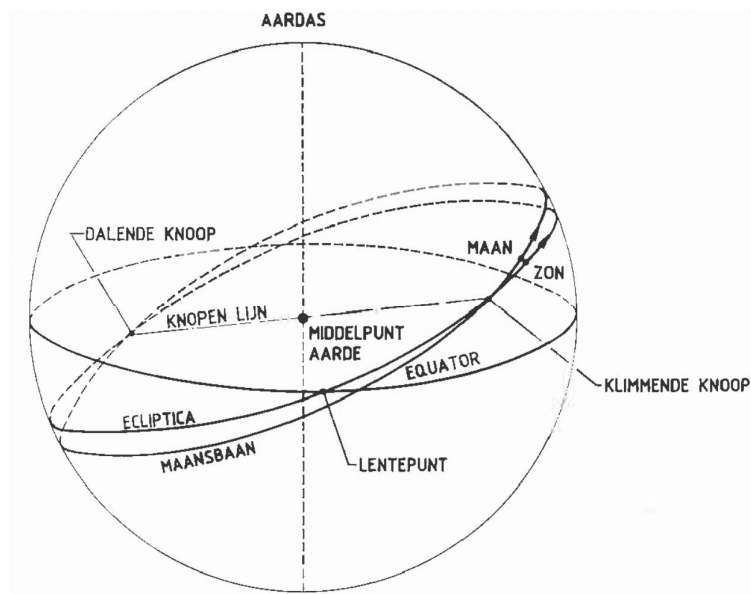
3 Methode trendanalyses

Dit hoofdstuk gaat over de wijze waarop de trends in de tijdreeksen van gemiddelde zeeniveaus zijn berekend. Een belangrijk punt van aandacht is de correctie voor de 18,6-jarige cyclus in de tijdreeksen.

3.1 De 18,6- jarige cyclus in de tijdreeksen van jaargemiddelde zeeniveaus

In Dillingh et al (2010) werd bestudeerd hoe lang de tijdreeksen van de gemiddelde zeestand moesten zijn voor een betrouwbare schatting van de zeespiegelstijging. Daarvoor werd het belangrijk gevonden om deze tijdreeksen te corrigeren voor een in de reeksen aangetoonde 18,6-jarige getijcyclus (de zogenaamde knopencyclus), welke een astronomische oorsprong heeft.

Om de 18,6-jarige cyclus te begrijpen wordt gebruik gemaakt van het begrip hemelbol, een fictieve bol met een straal vele malen groter dan die van de aarde, die niet roteert ten opzichte van de sterren, met de aarde meebeweegt en dezelfde equator heeft. Als de zon beschouwd wordt als draaiende om de aarde, dan ligt de projectie van de baan van de zon op de hemelbol in een vlak dat een hoek maakt van $23,5^\circ$ met het equatorvlak van de aarde. Deze cirkelvormige baan wordt de ecliptica genoemd. De declinatie van de zon varieert van $+23,5^\circ$ tot $-23,5^\circ$ met een periode van 1 jaar. De declinatie is de hoek die de lijn door de middelpunten van aarde en hemellichaam (hier dus de zon) maakt met het vlak van de equator. De declinatie is het grootst op de langste dag op het noordelijk halfrond ($+23,5^\circ$, omstreeks 21 juni) en het kleinst ($-23,5^\circ$, omstreeks 22 december) op de kortste dag op het noordelijk halfrond (met dag wordt hier bedoeld de periode dat het licht is).



Figuur 3.1.1 De snijcirkels gevormd door de doorsnijding van de vlakken van de equator, de ecliptica en de maansbaan met de hemelbol (Rijkswaterstaat, 1989)

De plaats van de zon op de ecliptica op het tijdstip dat op het noordelijk halfrond de lente begint, wordt het lentepunt genoemd. Het lentepunt is dus het snijpunt van ecliptica en equator omstreeks 21 maart. De declinatie is dan 0° en dag en nacht duren overal op aarde precies even lang. Dat is natuurlijk ook het geval in het andere snijpunt van equator en ecliptica, het herfstpunt, omstreeks 23 september.

Het vlak van de maansbaan om de aarde maakt een vrij kleine hoek van ongeveer 5° met het vlak van de ecliptica. De snijlijn van deze vlakken wordt de knopenlijn of drakenlijn genoemd. De snijpunten van de maansbaan en de ecliptica zijn de knopen. Het maansbaanvlak draait nu om een as loodrecht op het eclipticavlak, waardoor de knopenlijn ronddraait in dat vlak met een periode van 18,6 jaar. De draaiingsrichting van de knopen op de hemelbol is tegengesteld aan die van de zon en de maan.

Dit veroorzaakt een periodieke schommeling in de jaargemiddelde getijamplituden met een cyclus van 18,6 jaar. Tevens geeft dit een periodieke stijgings- en dalingscomponent in de tijdreeksen van de gemiddelde zeespiegel. In Baart et al. (2012) wordt uitgebreid ingegaan op de het effect van de knopencyclus op regionale schattingen voor de zeespiegelstijging.

Bestudering van de figuren in bijlage C laat zien dat de invloed van de knopencyclus op de gemiddelde laagwaterstanden over het algemeen groter is dan op de hoogwaterstanden. Omdat de gemiddelde zeestanden worden berekend uit alle gemeten waarden komt de 18,6-jarige cyclus ook in de gemiddelde zeestanden terecht.

Waarom het effect op de gemiddelde hoog- en laagwaterstanden zo verschillend is, is niet helemaal duidelijk, maar heeft vermoedelijk deels te maken met niet-lineaire interacties in ondiepe randzeeën zoals de Noordzee.

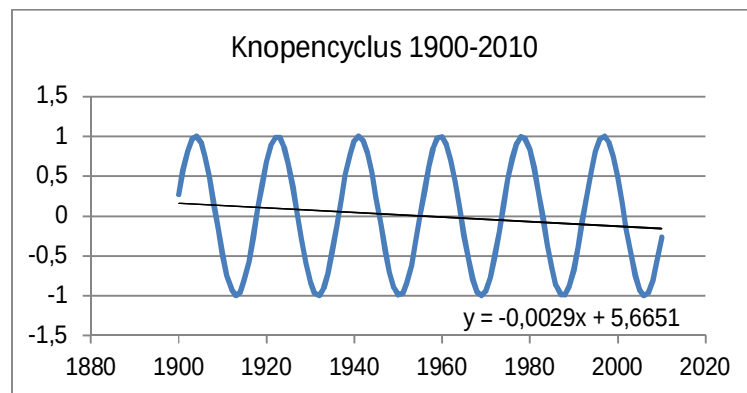
Voor het berekenen van de zogenaamde slotgemiddelden werd vanouds deze deterministische component zo goed mogelijk uit de data verwijderd. Het slotgemiddelde van een grootheid (bijvoorbeeld van de hier onderscheiden zeenniveaus) is daarbij gedefinieerd als de waarde op een bepaald tijdstip (doorgaans het slot van een decennium) volgens een meerjarige trendlijn, na correctie voor zowel korte toevallige schommelingen als meerjarige astronomische fluctuaties. Slotgemiddelde 2011.0 betekent "kenmerkend voor de toestand begin 2011". De volgende formule werd hierbij toegepast (zie bijvoorbeeld Rijkswaterstaat, 1985):

$$y = At + B \cdot \sin \left\{ \frac{2\pi(t + \varphi)}{18,6} \right\} + C$$

Hierin is t het jaartal. Het rechterlid is de som van een rechte lijn en een sinusoid met amplitude B en fase φ en is dan ook alleen geschikt voor lineaire of nagenoeg lineaire trendmatige verlopen. De coëfficiënten A , B , C en φ kunnen worden berekend met een kleinste kwadratenaanpassing aan de data. Voor de knopencyclus wordt voor φ in bovenstaande formule ook wel de vaste waarde van -2 jaar aangenomen. Deze waarde is afgeleid voor de 20^e eeuw onder toepassing van een waarde van 18,6 jaar voor de periode van de knopencyclus. In het vervolg zijn deze waarden consequent toegepast. Bijlage E laat zien dat de fase in de 20^e eeuw hiermee, vooral voor het tijverskil goed zichtbaar, goed in overeenstemming is met de werkelijkheid. Voor de gemiddelde zeestand is dat minder duidelijk en wordt deze waarde niet altijd toegepast. Toch is er hier ook voor gekozen dat wel te doen, omdat niet duidelijk is waarom die zou moeten afwijken van die voor tijverskil en hoog- en laagwater.

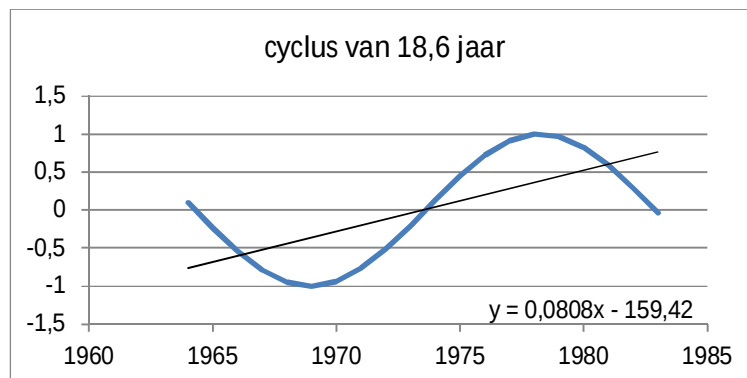
3.2 Het effect van een periodiek signaal in de tijdreeksen op de lineaire trend

Om het effect van een aanwezige sinusvormige component op een lineaire trend te laten zien is in figuur 3.2.1 een cyclus getekend met een periode van 18,6 jaar over de periode 1900-2010, waarbij de coëfficiënten A en C van bovenstaande formule op 0 zijn gesteld en de coëfficiënten B en ϕ respectievelijk op 1 en -2 zijn gesteld. De horizontale t-as kan hier dus opgevat worden als de lineaire trendlijn waarop de sinusoïde van de knopencyclus is gesuperponeerd. De lineaire trendlijn, berekend over de hele periode, is in de figuur getekend en wijkt duidelijk af van de horizontale as. Berekend over de beschouwde periode 1900-2010 bedraagt de trend als gevolg van alleen de sinusoïde in dit geval 0,0029 “eenheden” per jaar, immers de amplitude is gesteld op 1. Voor een andere periode is het resultaat weer anders. In Dillingh et al (2010), paragraaf 2.9, is deze “eenheid” berekend op 1,5 cm voor de gemiddelde tijdreeks van de gemiddelde zeestanden van de zes hoofdstations, wat dan dus overeenkomt met een trend van $0,29 \times 1,5 \approx 0,44$ cm per eeuw. De berekende lineaire trend voor de gemiddelde zeestand over deze periode langs de Nederlandse kust bedraagt gemiddeld 19 cm per eeuw. Hierbij is rekening gehouden met de 18,6-jarige cyclus.



Figuur 3.2.1 De lineaire trend in een knopencyclus over de periode 1900-2010, waarbij de amplitude van het sinusvormige signaal is gesteld op 1.

In figuur 3.2.2 is ter illustratie de lineaire trendlijn getekend voor een cyclus van 18,6 jaar over een periode van 19 jaar, waarbij in het startjaar de sinuswaarde vrijwel gelijk aan nul is.

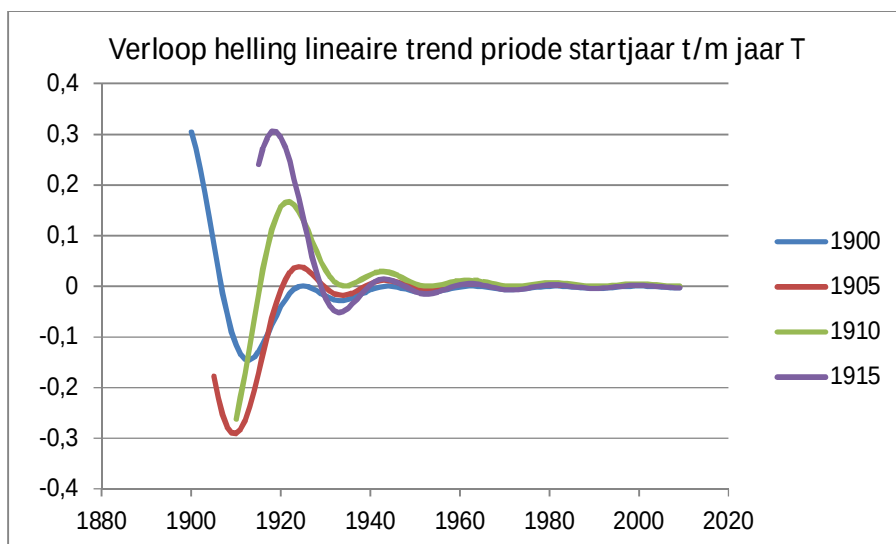


Figuur 3.2.2 De lineaire trend in een knopencyclus over de periode 1964-1983, waarbij de amplitude van het sinusvormige signaal is gesteld op 1.

Deze figuur laat duidelijk zien wat er met een berekende lineaire trend gebeurt in aanwezigheid van een sinusoïde in het signaal. Uiteraard is de grootte van deze trend afhankelijk van de beginfase.

Naast de beginfase van de sinusoïde hangt de berekende trend ook af van de lengte van de tijdreeks. Om hiervan een indruk te geven zijn in figuur 3.2.3 verlopen van de lineaire trend getekend, berekend over de periode “startjaar” t/m jaar T , voor vier verschillende startjaren van de tijdreeks (en dus verschillende beginfase van de sinusoïde).

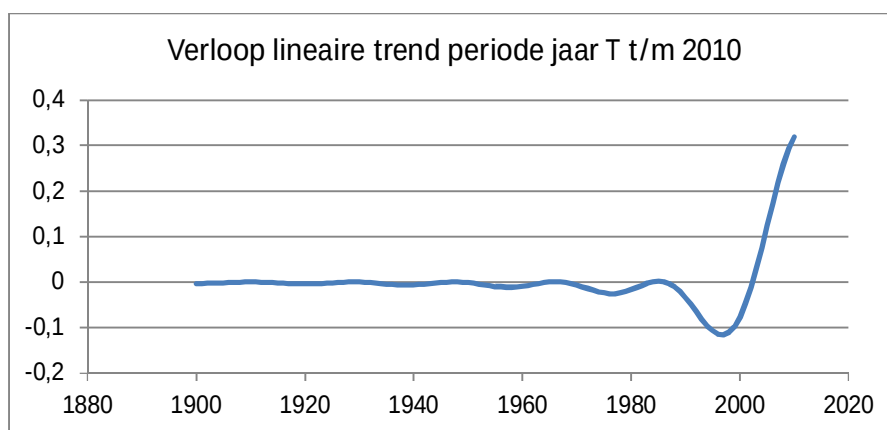
Uit figuur 3.2.3 valt af te leiden dat voor korte tijdreeksen (korter dan ca. 40 jaar) de berekende lineaire trend sterk kan afwijken van de werkelijke lineaire trend (hier dus gelijk aan 0). Voor tijdreeksen langer dan ca. 50 jaar is het effect van de knopencyclus op de berekende trend voor de praktijk verwaarloosbaar. In beginsel is het mogelijk om voor elke tijdreeks aan de hand van verlopen als in figuur 3.2.3 de periode te bepalen waarover de trend berekend moet worden om het effect van de cyclus op de berekende lineaire trend te neutraliseren (snijpunten met de t -as).



Figuur 3.2.3 Verloop van de lineaire trend in een knopencyclus met een amplitude van 1, berekend over de periode vanaf het startjaar t/m jaar T voor 4 verschillende startjaren van de tijdreeks (1900, 1905, 1910 en 1915).

In figuur 3.2.4 is nog eens duidelijk aangegeven wat een korte lengte van de tijdreeksen betekent voor het specifieke geval van het onderhavige onderzoek, waarvoor tijdreeksen beschikbaar zijn vanaf een zeker jaar (T) tot en met 2010. De vraag is dan tot hoe ver terug de reeksen moeten gaan om de afwijking in de lineaire trend als gevolg van de 18,6-jarige cyclus te minimaliseren. Daarmee samen hangt de vraag welke tijdreekslengten juist een grote trendafwijking laten zien.

Volgens Figuur 3.2.4 geven de reeksen met startjaren vóór 1955, in de periodes 1965-1968, 1984-1987 en voor het jaar 2002 een minimale trendafwijking als gevolg van de 18,6-jarige cyclus. De afwijking bij het startjaar 1971 blijft nog binnen de perken.



Figuur 3.2.4 Verloop van de lineaire trend in de sinusoïde van Figuur 3.1.1 over de periode vanaf jaar T tot en met jaar 2010.

3.3 Keuze van de analysemethode

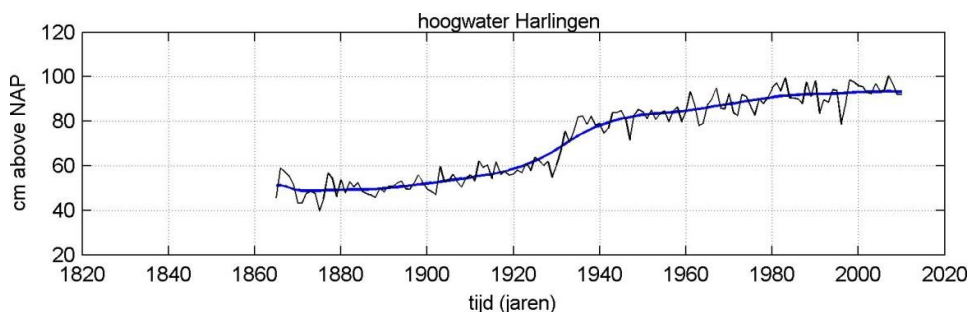
De gemiddelde zeestanden laten zich over het algemeen nog redelijk goed karakteriseren door middel van een lineaire trendlijn, maar voor gemiddelde hoog- en laagwaterstanden en gemiddeld getij is dat veelal niet meer het geval. Een blik op de figuren in bijlage C toont dat wel aan. Een benadering van deze tijdreeksen door een lineaire trendlijn met daar bij opgeteld een sinusoïde met een periode van 18,6 jaar is daarvoor geen begaanbare weg. Hiervoor zullen dus niet-lineaire trendlijnen gezocht moeten worden.

Een lineaire trend geeft een goed beeld van de gemiddelde trend over de geanalyseerde periode. Voor het laten zien van trendfluctuaties binnen deze periode, en dus ook van mogelijke versnellingen aan het einde van de periode, is deze methode minder geschikt.

In Dillingh en Heinen (1994) werd als analysemethode de SSA-methode toegepast. De SSA-methode (Singuliere Spectrum Analyse) biedt de mogelijkheid een tijdreeks uiteen te rafelen in een niet lineaire trend en een aantal periodieke componenten. Bij deze analyse wordt gebruik gemaakt van deelreeksen van de tijdreeks met een gekozen aantal (M) aaneengesloten jaren. M wordt het venster genoemd.

De keuze van het venster M bepaalt de mate waarin de kenmerken van de tijdreeks (trend, periodieke componenten) worden onderscheiden. Voor M moet per tijdreeks een verstandige keuze worden gemaakt door vergelijking van de resultaten bij verschillende vensters.

Voor een eenvoudig begrip kan de toepassing van de SSA-methode voor trendanalyse van de reeksen van jaargemiddelde zeeniveaus gezien worden als een geoptimaliseerde vorm van lopend middelen. In Figuur 3.3.1 is een voorbeeld gegeven van een SSA-trendlijn voor station Harlingen. Nadelen van de SSA-methode zijn dat de methode niet goed om kan gaan met sprongen in de dataset, zoals in dit voorbeeld voor het hoogwater bij Harlingen. In 1932 is een sprong in het verloop van het gemiddelde hoogwater te zien als gevolg van het gereedkomen van de Afsluitdijk in 1932. Hoe nauwkeuriger men de sprong wil benaderen met de trendlijn, des te kleiner moet het venster M zijn. Dat brengt echter weer met zich mee dat de trendlijn weer meer in detail de kortere fluctuaties in de tijdreeks gaat volgen, wat voor het hier beoogde doel ongewenst is.



Figuur 3.3.1 SSA-trendlijn gemiddeld hoogwater Harlingen

De SSA-methode vereist ook complete tijdreeksen, dus zonder hiaten. Bij grote hiaten is een SSA-analyse daarom meestal niet erg zinvol. Kleine hiaten kunnen nog wel opgevuld worden, bijvoorbeeld door lineaire interpolatie.

Een goed alternatief is dan de zogenaamde Whittaker smoother, (Dillingh et al, 2010) en (Eilers, 2003 en 2006). Deze smoother (letterlijk te vertalen als gladstrijker) minimaliseert de volgende *penalized least sum of squares (PLSS)*:

$$Q = \sum_i w_i (y_i - z_i)^2 + \lambda \sum_i (\Delta^2 z_i)^2$$

Hierin is y de meetreeks, geeft w gewichten, die 1 zijn voor jaren met een meetwaarde en 0 als dat niet het geval is (een gat in de waarnemingsreeks), en z de te berekenen trend.

De eerste term van de vergelijking berekent het kwadraat van de verschillen tussen gegevens en trend.

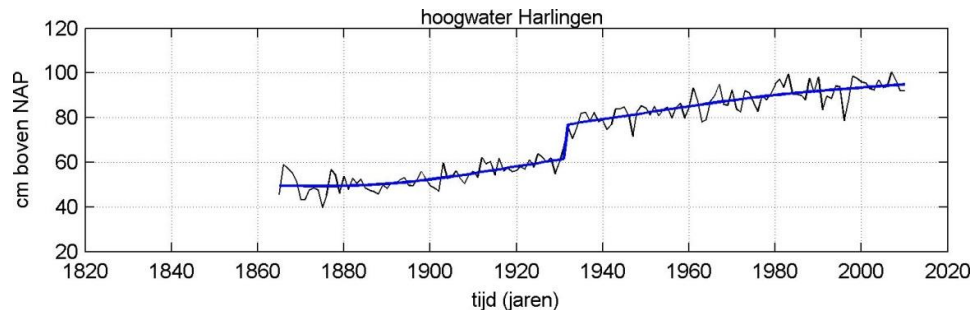
Als z een rechte lijn is, geeft minimalisering van Q de uitkomst volgens een lineaire regressie. De tweede term van bovenstaande vergelijking, de penalty (boetefunctie), is een maat voor de "ruwheid" van het verloop van de trendlijn. De notatie $\Delta^2(z)$ betekent $\Delta(\Delta z)$ en dus het tweemaal toepassen van de verschiloperator Δ . Deze differentie van de tweede orde is een numerieke benadering van de tweede afgeleide, die weer een maat is voor de kromming van de functie. De parameter λ in de tweede term van de vergelijking bepaalt de sterkte van de invloed van deze "penalty" op het resultaat. Lagere waarden voor λ leiden tot curven die steeds beter de oorspronkelijke gegevens volgen en dus meer fluctuaties tonen.

Voor $\lambda=0$ wordt de oorspronkelijke datareeks verkregen. Hogere waarden voor λ leiden tot een gladdere trendlijn. Voor $\lambda=\infty$ komt het resultaat exact overeen met een lineaire regressie.

Hier is gekozen voor $\lambda=10^4$. Deze keuze van λ is gebaseerd op het "ingenieursoog" voor ronde waarden van λ (Dillingh et al, 2010). De gekozen waarde voor λ heeft als resultaat dat trendveranderingen goed gevolgd worden en dat het resultaat niet erg gevoelig is voor toevoeging van een nieuw jaar.

Figuur 3.3.2 laat als voorbeeld het resultaat zien van de toepassing van de Whittaker smoother op dezelfde tijdreeks van gemiddeld hoogwater voor Harlingen.

De Whittaker smoother kan moeiteloos omgaan met hiaten. Het is ook relatief eenvoudig om een discontinuïteit in de tijdreeks te modelleren. De ontwikkelde software zorgt ervoor dat voor en na de discontinuïteit de helling van de trendlijn gelijk is. Het voordeel hiervan is dat voor het bepalen van gemiddelde stijgsnelheden in beginsel de hele tijdreeks gebruikt kan worden, waarbij eenvoudig gecorrigeerd kan worden voor de sprong. Het programma berekent zelf de grootte van de sprong. Het jaar van de sprong moet worden opgegeven. Helaas staat de huidige software nog slechts de verwerking van één continuïteit per tijdreeks toe. In Bijlage C zijn voorbeelden te vinden van tijdreeksen met hiaten en met discontinuïteiten.



Figuur 3.3.2 PLSS-trendlijn gemiddeld hoogwater Harlingen met een sprong in 1932

In Dillingh et al (2010) lag de nadruk op de huidige zeespiegelstijging en het al dan niet aantonen van een mogelijke trendverandering (versnelling) hierin. Een dergelijk versnelling kon voor de Nederlandse kust niet worden aangetoond. Als analysemethode werd gekozen voor een lineaire regressie en een kwadratische regressie (kwadratische term toegevoegd aan de lineaire vergelijking). Doel van de kwadratische term was om vast te stellen of een kwadratische regressielijn, die een bepaalde kromming toestaat, een significante verbetering opleverde van de verklaarde variantie van de waarnemingsreeksen. De tijdreeksen werden gecorrigeerd voor de NAP-aanpassing van 2005 en voor de 18,6-jarige cyclus.

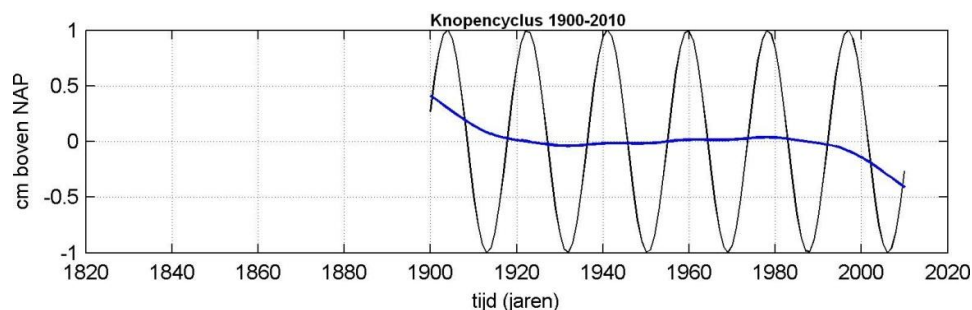
Het doel van het onderhavige onderzoek is anders (paragraaf 1.2). Omdat gemiddelde stijgsnelheden over bepaalde tijdvakken met elkaar zullen worden vergeleken (hoofdstuk 4) is het wel van belang om te weten hoe een periodiek signaal als de knopencyclus het resultaat van een analyse met de Whittaker smoother beïnvloedt. Nagegaan moet worden in hoeverre de Whittaker smoother met de gekozen waarde voor λ ($\lambda=10^4$) de 18,6-jarige cyclus weg filtert (zie de figuren van Bijlage C).

Bij de beschouwing van de korte reeksen moet men rekening houden met het in paragraaf 3.1 geschetste effect. Ook de Whittaker smoother is gevoelig voor dit effect.

De 18,6-jarige cyclus manifesteert zich het sterkst voor het tijverskil. Het tijverskil is echter een afgeleide grootheid van het gemiddelde hoogwater en laagwater, die als extra informatie is toegevoegd. De stijgsnelheden van het tijverskil worden niet apart geanalyseerd.

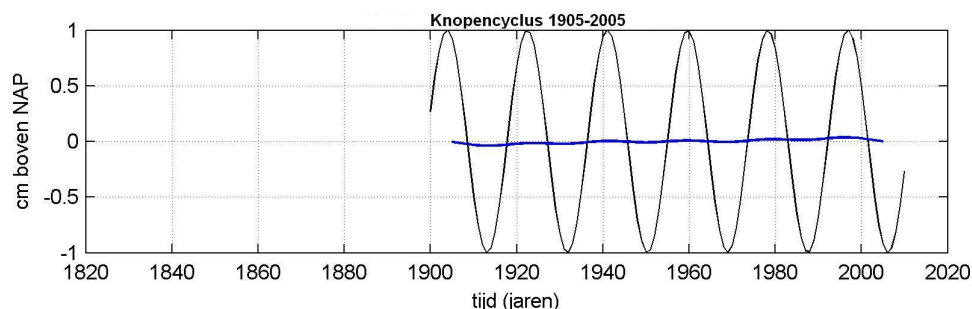
3.4 Het effect van een periodiek signaal in de tijdreeksen op de PLSS-trend

In navolging van de analyse van de invloed van de 18,6-jarige cyclus op de helling van een lineaire trendlijn (paragraaf 3.2), wordt in deze paragraaf nagegaan wat het effect van deze cyclus is op de met de Whittaker smoother berekende trendlijn. Uitgegaan wordt van de tijdreeks van figuur 3.2.1: een zuivere sinusoïde met amplitude 1 en een periode van 18,6 jaar over de periode 1900-2010. Het resultaat is gegeven in figuur 3.4.1.



Figuur 3.4.1 De PLSS-trendlijn toegepast op een sinusvormige tijdreeks met een periode van 18,6 jaar over de periode 1900-2010.

Wat opvalt is, dat de PLSS-trendlijn aan het begin en einde afwijkt van de horizontale as, en dat in het gebied daartussen de lijn vrijwel horizontaal verloopt en dus goed in staat is de 18,6-jarige cyclus weg te filteren. Als de analyse wordt uitgevoerd over de periode 1905-2005 dan is er een voor dit geval optimaal begin- en eindjaar gevonden voor het wegfilteren van de 18,6-jarige cyclus; zie figuur 3.4.2. Dat is dus hier het geval als het eerste analysejaar net een jaar na een knopenextreem valt, en het laatste analysejaar net een jaar vóór een knopenextreem valt.



Figuur 3.4.2 De PLSS-trendlijn toegepast op een sinusvormige tijdreeks met een periode van 18,6 jaar over de periode 1905-2005.

Geconcludeerd moet worden dat het noodzakelijk is de periodieke component te verwijderen om afwijkende trendwaarden aan het begin en einde van de beschouwde periode te voorkomen.

3.5 Verbeterde analysemethode

Gekozen is voor een analysemethode voor duidelijk niet-lineair verlopende tijdreeksen met een significante periodieke component met een periode van 18,6 jaar, bestaande uit de volgende stappen:

- 1 Pas op de te analyseren tijdreeks de PLSS-methode toe zoals hier beschreven, inclusief een eventuele sprong in de data;
- 2 Trek de gevonden jaarwaarden volgens deze PLSS-analyse af van de oorspronkelijk waarden van de deelreeks;
- 3 Schat uit de verkregen tijdreeks van residuen de amplitude van de 18,6-jarige cyclus door middel van een kleinste kwadratenaanpassing van de trendlijn met de formule

$$y = A.t + B.\sin\left\{\frac{2\pi(t-2)}{18,6}\right\} + C$$

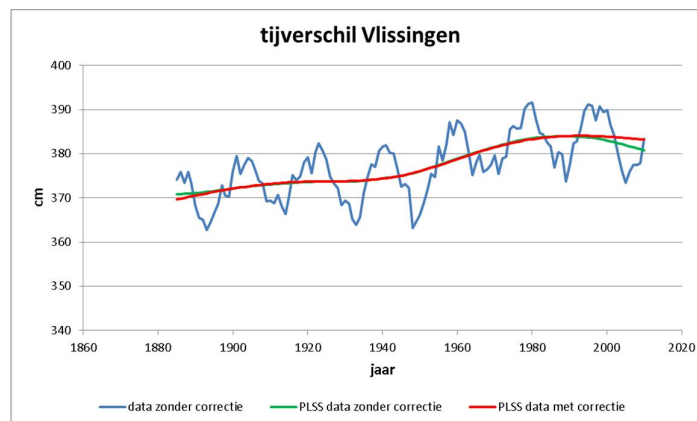
De termen A.t en C zouden kunnen worden weggelaten, omdat verwacht wordt dat deze bijdragen door de gevolgde werkwijze minimaal zullen zijn. De fase zou kunnen worden geoptimaliseerd via de kleinste kwadratenaanpassing als daar aanleiding voor is. In het onderhavige onderzoek is de formule in de gegeven vorm toegepast op de te analyseren tijdreeksen van de gemiddelde zeeniveaus;

- 4 Trek van de oorspronkelijk data van de hele te analyseren tijdreeks de berekende periodieke component af;
- 5 Bereken de PLSS-trendlijn uit de aldus gecorrigeerde data. Dit is de gezochte trendlijn.

Voor (bij benadering) lineair verlopende trendlijnen zijn de stappen 1 en 2 overgeslagen en is de formule van stap 3 direct toegepast op de te analyseren tijdreeks.

Voor het tijverskil is niet apart een amplitude bepaald. De voor de knopencyclus gecorrigeerde tijdreeks voor het tijverskil wordt verkregen uit het verschil tussen de gecorrigeerde tijdreeksen voor hoog- en laagwater.

Men zou als verbetering kunnen overwegen eerst het langst mogelijke deel van de te analyseren tijdreeks te selecteren met een optimaal begin- en eindjaar voor het wegfilteren van de knopencyclus (paragraaf 3.4). Dat is hier onderzocht voor het station Vlissingen. Het effect ervan op de berekende amplitude van de knopencyclus bleek verwaarloosbaar.



Figuur 3.5.1. Het effect van de correctie voor de 18,6-jarige cyclus op de trendlijn voor het tijverskil bij Vlissingen.

In figuur 3.5.1. wordt het effect van de correctie voor de 18,6-jarige periode op de tijdreeks van Vlissingen gedemonstreerd. In het tijverskil is de 18,6-jarige cyclus over het algemeen het sterkst aanwezig. De figuren voor de gemiddelde zeestand, gemiddeld hoogwater en gemiddeld laagwater van Vlissingen worden gegeven in bijlage D. Het valt op dat voor de gemiddelde zeestand het verschil nauwelijks nog te onderscheiden is.

In bijlage E worden de berekende 18,6-jarige cycli getoond die berekend zijn uit de residuen van de oorspronkelijke data (alleen NAP-gecorrigeerd) en de PLSS-trendlijn op deze data voor Vlissingen.

Bijlage F geeft de berekende amplitudes van de 18,6-jarige cycli en de verschillen tussen de berekende waarden voor het jaar 2010 volgens de PLSS-trendlijnen met en zonder toepassing van de knopencorrectie.

3.6 Nabeschouwing

Het grote voordeel van de PLSS-methode is dat de trendlijn flexibel is en trendmatige veranderingen, positief en negatief, goed kan volgen, in tegenstellingen tot bijvoorbeeld de aanname van een lineaire of kwadratische trendlijn. Hiaten en sprongen zijn in beginsel ook geen probleem. Verder geeft de methode een trendschatting voor de hele periode, in tegenstelling tot bijvoorbeeld lopend middelen.

Voor veel tijdreeksen is de 18,6-jarige cyclus moeilijk te onderscheiden, of voldoende klein om een verwaarloosbaar effect te hebben op de geschatte trendwaarden aan het eind van de reeks. Voor tijdstippen verder van de randen af wordt het effect van de cyclus op de PLSS-trendlijn verwaarloosbaar. Als de amplitude van de 18,6-jarige cyclus niet te verwaarlozen is, is het altijd verstandig deze component eerst te elimineren alvorens de trendlijn te berekenen.

Behalve door de fase van de 18,6-jarige cyclus wordt het gedrag van de trendlijn aan het einde (of begin) van de reeks ook beïnvloed door de toevallige fluctuaties. Vooral voor de gemiddelde zeestand is dat het geval, omdat de toevallige fluctuaties daarvoor relatief groot zijn ten opzichte van de 18,6-jarige cyclus. Het is inherent aan de problematiek dat de trendlijn aan het eind (of begin) van de tijdreeksen minder nauwkeurig te bepalen valt, welke methode men ook kiest. De toekomst is immers onbekend.

Het gecombineerde effect van de periodieke en toevallige fluctuaties aan het eind (of begin) van de tijdreeksen op het verloop van de trendlijn dient per geval te worden beoordeeld. Indien nodig, bijvoorbeeld na visuele inspectie, kan het trendverloop aan het eind handmatig worden bijgesteld door vergelijking met de resultaten voor naburige stations. In het onderhavige rapport is dat niet gedaan.

Extra voorzichtigheid verdienen de korte tijdreeksen (korter dan ca. 30 jaar), vooral als daarin een sterke 18,6-jarige cyclus zichtbaar is. Het is dan verstandig het resultaat mede te beoordelen door vergelijking met de resultaten voor naburige stations met langere tijdreeksen. De resultaten voor de korte tijdreeksen zijn hier wel opgenomen in bijlage C.

Bestudering van de figuren van bijlage C laat zien dat de uiteindelijke PLSS-trendlijnen er goed uitzien. In de tijdreeksen van het tijvershil is de 18,6-jarige cyclus over het algemeen het meest prominent aanwezig; de sinusvorm is hiervoor het beste herkenbaar. Het effect op het eind van de tijdreeksen is daarvoor dan ook het beste zichtbaar. Voor andere tijdreeksen, bijvoorbeeld het laagwater van Vlissingen (Figuur C.4) wordt de nog resterende "afwijking" (het effect van de verwijdering van de knopencyclus was hiervoor relatief groot) aan het eind van de tijdreeksen veroorzaakt door de relatief hoge waarden in het laatste decennium en het bijna horizontale verloop in de periode daarvoor.

4 Resultaten van de trendanalyses

4.1 Verloop trendlijnen

In Bijlage C worden alle beschikbare tijdreeksen getoond (met NAP-correctie) met de berekende PLSS-trendlijn (Whittaker smoother) na correctie voor de 18,6-jarige cyclus, ook voor de korte tijdreeksen vanaf 1980 of later. Deze laatste zullen echter niet gebruikt worden voor het schatten van de stijgsnelheden.

De horizontale tijdas van de figuren van Bijlage C is gelijk gekozen voor alle figuren. De verticale assen zijn echter verschillend. Bij de interpretatie van de figuren dient hiermee rekening te worden gehouden.

In verband met opmerkingen in paragraaf 2.7 over de beschikbaarheid en de kwaliteit van de data zijn voor een aantal stations trendanalyses uitgevoerd en opgenomen in Bijlage C over periodes die afwijken van de door Rijkswaterstaat geleverde data, namelijk:

Cadzand:	vanaf 1966
Stavenisse:	vanaf 1988
Scheveningen:	vanaf 1962
Vlissingen:	vanaf 1885
IJmuiden:	vanaf 1885
Petten zuid:	vanaf 1978
Vlieland haven:	vanaf 1941 (zeestand vanaf 1949)

De trendlijnen voor het tijverskil zijn berekend uit de gecorrigeerde tijdreeksen van hoog- en laagwater. Vermeldenswaardig is dat de Whittaker smoother intern consistente resultaten oplevert. Daarmee wordt bedoeld dat de PLSS-trendlijn voor het tijverskil berekend als het verschil van de PLSS-trendlijnen voor de gemiddelde hoogwaterstanden en gemiddelde laagwaterstanden, exact gelijk is aan de PLSS-trendlijn voor de gemiddelde tijverschillen (berekend als het verschil tussen hoogwater en laagwater).

Enkele opvallende verschijnselen in de figuren van Bijlage C zijn:

- De jaarlijkse fluctuaties in de gemiddelde standen als gevolg van verschillen in meteorologische omstandigheden (wind, luchtdruk), watertemperatuur, zoutgehalte, gegevensinwinning en -verwerking;
- De vrij gelijkmatig verlopende stijging van de gemiddelde zeestanden voor alle stations, terwijl de hoog- en laagwaters en de tijverschillen een veel grilliger verloop laten zien. Gemiddelde zeestanden blijken veel minder gevoelig voor menselijke ingrepen en de daarmee samenhangende morfologische ontwikkelingen dan gemiddelde hoog- en laagwaterstanden;
- De daling van de gemiddelde zeeniveaus bij Vlissingen rond 1885. Deze lijken niet verklaard te kunnen worden uit een herdefinitie van het NAP bij Vlissingen na de 1^e Nauwkeurigheidswaterpassing (1875-1885). De dalingen in de gemiddelde niveaus zijn daarvoor te verschillend. Er moet dus een andere oorzaak zijn. Tot nu toe is er geen bevredigende verklaring voor gevonden. IJmuiden laat een vergelijkbaar gedrag zien rond 1885. De dalingen voor IJmuiden komen beter met elkaar overeen en zouden wel verklaard kunnen worden uit een lokale verandering in het referentievlak;
- Het verloop van het gemiddelde hoogwater bij Cadzand laat een opmerkelijke afvlakking zien;

- De 18,6-jarige cyclus is op het oog vooral zeer duidelijk zichtbaar bij de tijverschillen, maar ook bij de laagwaters en in mindere mate bij de hoogwaters, in het Deltagebied, maar ook nog goed te zien voor de meeste andere locaties;
- De relatief snelle stijging van het tijverschil als gevolg van morfologische veranderingen door baggerwerken, inpolderingen en verlanding van schorren. De laatste decennia lijkt er sprake van een vermindering in de stijgsnelheid;
- Grote veranderingen van het getij bij Stavenisse als gevolg van de Oosterscheldewerken;
- Een snelle verhoging van het gemiddelde hoogwater bij Hoek van Holland in 1965 in verband met de aanleg van de Maasvlakte en werken in de mond van de Nieuwe Waterweg;
- Sterke veranderingen in het getij bij de stations rond de westelijke Waddenzee na 1932, als gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee;
- Een snelle verandering van het getij bij Delfzijl in 1979 als gevolg van veranderingen in het havengebied;

Opmerkelijk in bijlage F is dat voor de amplitudes van de knopencyclus voor hoogwater voor de stations boven IJmuiden, behalve voor die in de Eems-Dollard en voor Lauwersoog, Wierumergronden en Huibertgat, negatieve waarden worden gevonden. De overige zijn positief. Het min-teken geeft aan dat de fase 180° verschilt ten opzichte van positieve waarden. Het is niet duidelijk waarom dit zo systematisch verschilt.

4.2 Stijgsnelheden gemiddelde zeeniveaus

4.2.1 Gemiddelde stijgsnelheden voor drie tijdvakken

In deze paragraaf worden gemiddelde stijgsnelheden van de onderscheiden zeeniveaus per locatie gegeven voor drie verschillende tijdvakken (lang, middellang en kort). Dit geeft de mogelijkheid het effect van de beschouwde periode op het resultaat van de analyse te bestuderen.

Tabel 4.1 geeft voor de drie aangegeven tijdvakken de gemiddelde stijgsnelheden voor gemiddeld hoogwater, gemiddelde zeestand en gemiddeld laagwater, voor zover ze berekend konden worden.

De stijgsnelheden zijn berekend als het verschil tussen de waarden van de PLSS-trendlijnen van het eerste en laatste jaar van de beschouwde periode, gedeeld door de lengte van die periode. Als in het betreffende tijdvak een sprong in de data optrad, dan is daarvoor gecorrigeerd. De stijgsnelheid is dan berekend alsof er geen sprong had plaats gevonden. Daarbij wordt dus stilzwijgend aangenomen dat de trends voor en na de sprong vergelijkbaar zijn. Dat ligt bijvoorbeeld in het geval van de westelijke Waddenzee (effect van de afsluiting van de Zuiderzee in 1932) niet voor de hand. Omdat de trends voor en na 1932 zich ogenschijnlijk gewoon voortzetten, is toch deze werkwijze gevolgd. Men dient zich hier wel van bewust te zijn.

De gemiddelde snelheden zijn uitgedrukt in cm/eeuw en afgerond op hele getallen. De verschillen tussen de stijgsnelheden van hoogwater en zeestand en tussen die van zeestand en laagwater zijn per tijdvak aan de tabellen toegevoegd.

Naast de verschillende gemiddelde stijgsnelheden van de onderscheiden zeeniveaus per tijdvak, kunnen ook de overeenkomstige kolommen voor de verschillende tijdvakken met elkaar worden vergeleken. Dat geeft inzicht in de ontwikkelingen van de betrokken grootheid in de tijd. Dat wordt besproken in paragraaf 4.2.2.

Tabel 4.1 Gemiddelde stijgsnelheden [cm/eeuw] van gemiddeld hoogwater, gemiddelde zeestand en gemiddeld laagwater voor drie onderscheiden periodes, en hun onderlinge verschillen. De hoofdstations zijn vet weergegeven.

Station	1900-2010					1933-2010					1971-2010				
	HW	ZS	LW	HW-ZS	ZS-LW	HW	ZS	LW	HW-ZS	ZS-LW	HW	ZS	LW	HW-ZS	ZS-LW
Bath	45	-	2	-	-	46	-	-5	-	-	46	18	-23	28	41
Hansweert	39	19	18	20	1	40	25	23	15	2	32	30	27	2	3
Terneuzen	37	24	18	13	6	37	23	19	14	4	30	22	17	8	5
Vlissingen	31	22	21	9	1	32	21	19	11	2	29	23	24	6	-1
Cadzand	20	-	-	-	-	16	-	-	-	-	8	15	16	-7	-1
Westkapelle	27	-	19	-	-	25	-	21	-	-	24	27	24	-3	3
Hoek van Holland	22	24	20	-2	4	25	24	18	1	6	36	28	23	8	5
Scheveningen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	21	13	4	8
IJmuiden	22	21	24	1	-3	25	21	27	4	-6	25	22	32	3	-10
Den Helder	22	15	10	7	5	21	16	11	5	5	23	18	14	5	4
Oudeschild	20	-	16	-	-	19	-	14	-	-	19	22	8	-3	14
Vlieland haven	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17	18	20	-1	-2
West-Terschelling	20	15	4	5	11	19	12	0	7	12	22	19	12	3	7
Nes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	25	27	-2	-2
Schiermonnikoog	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24	30	28	-6	2
Den Oever	26	-	28	-	-	24	-	32	-	-	28	35	41	-7	-6
Kornwerderzand	-	-	-	-	-	19	13	10	-	3	16	13	7	3	6
Harlingen	25	13	10	12	3	23	13	4	10	9	18	15	-5	3	20
Lauwersoog	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27	27	14	0	13
Delfzijl	22	19	8	3	11	22	19	2	3	17	24	21	3	3	18
Nieuwe Statenzijl	21	-	-	-	-	21	-	-	-	-	19	-	-	-	-

De langste gekozen periode gaat terug tot 1900. Hierbij worden alle reeksen meegenomen die teruggaan tot in de 19^e eeuw. In verband met de onderlinge vergelijkbaarheid, de lagere betrouwbaarheid van de oudste waarnemingsreeksen en de voorkeur voor ronde getallen is het jaar 1900 als ondergrens aangenomen.

Voor de middellange en de korte periode is gekozen voor de periodes 1933-2010 respectievelijk 1971-2010. Het beginjaar 1933 is ingegeven door het gereed komen van de Afsluitdijk. Het beginjaar 1971 vloeiende voort uit de beschikbaarheid van de gemiddelde zeestanden voor een aantal stations vanaf 1971 (zie paragraaf 2.7). Stations met kortere tijdreeksen worden in deze analyse buiten beschouwing gelaten.

Bij de interpretatie van de getallen dient bedacht te worden dat de keuze van de periodes invloed heeft op de getallen. De getallen geven een gemiddelde waarde over het beschouwde tijdvak. In werkelijkheid kunnen binnen een tijdvak flinke variaties in stijgsnelheid voorkomen. Scherpe conclusies kunnen dan ook niet worden getrokken, hooguit globale.

Vrijwel alle tijdreeksen zijn beïnvloed door uitgevoerde werken. Plotselinge veranderingen van het getij laten zich goed modelleren door een sprong in de betreffende tijdreeks aan te nemen en te berekenen, al is niet altijd precies duidelijk in welk jaar de sprong gelegd moet worden. Als de ingreep zich over meerdere jaren uitstrekt, bijvoorbeeld bij baggerwerkzaamheden, of als de ingreep langzame morfologische wijzigingen veroorzaakte die het getij weer beïnvloedden, is niet goed te bepalen wat nu de autonome en wat de antropogene bijdrage in de geconstateerde trend is. Dat maakt het lastig om algemeen geldige conclusies te trekken. Bij de interpretatie van de tabellen dient daar rekening mee te worden gehouden.

Naast de trendmatige veranderingen van de hoog- en laagwaterstanden zijn er andere veranderingen in het getij die niet volgen uit de hier gegeven tijdreeksen. Te denken valt aan:

- Verschil tussen springtij en doodtij;
- Toe- of afname van de dagelijkse ongelijkheid;
- Vervroeging of verlating van de fase van het getij;
- Verandering van de vorm van de getijkrommen.

Op deze veranderingen wordt hier verder niet ingegaan.

4.2.2 Trendverschillen tussen de onderscheiden periodes:

Deze studie is niet bedoeld om aan te tonen of er al dan niet sprake is van een versnelde zeespiegelstijging. Daarvoor is de hier gevolgde benadering te grof. In Dillingh et al. (2010) is op deze problematiek uitgebreid ingegaan. Geconcludeerd werd daarin dat een versnelling in de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust niet kon worden aangetoond. Dit onderzoek wordt hier niet overgedaan.

Om de tabellen per onderscheiden zeeniveau voor de verschillende perioden te kunnen vergelijken is voor de inzichtelijkheid tabel 4.2 samengesteld uit de kolommen van tabel 4.1. Een vergelijking tussen de verschillende periodes is alleen mogelijk voor stations waarvoor deze voor meerdere periodes berekend kon worden.

Tabel 4.2 Gemiddelde stijgsnelheden [cm/eeuw] van gemiddeld hoogwater, gemiddelde zeestand en gemiddeld laagwater voor de drie onderscheiden periodes. De hoofdstations zijn vet weergegeven.

Station	HOOGWATER				ZEESTAND				LAAGWATER		
	1900-2010	1933-2010	1971-2010		1900-2010	1933-2010	1971-2010		1900-2010	1933-2010	1971-2010
Bath	45	46	46		-	-	18		2	-5	-23
Hansweert	39	40	32		19	25	30		18	23	27
Terneuzen	37	37	30		24	23	22		18	19	17
Vlissingen	31	32	29		22	21	23		21	19	24
Cadzand	20	16	8		-	-	15		-	-	16
Westkapelle	27	25	24		-	-	27		19	21	24
Hoek van Holland	22	25	36		24	24	28		20	18	23
Scheveningen	-	-	25		-	-	21		-	-	13
IJmuiden	22	25	25		21	21	22		24	27	32
Den Helder	22	21	23		15	16	18		10	11	14
Oudeschild	20	19	19		-	-	22		16	14	8
Vlieland haven	-	-	17		-	-	18		-	-	20
West-Terschelling	20	19	22		15	12	19		4	0	12
Nes	-	-	23		-	-	25		-	-	27
Schiermonnikoog	-	-	24		-	-	30		-	-	28
Den Oever	26	24	28		-	-	35		28	32	41
Kornwerderzand	-	19	16		-	13	13		-	10	7
Harlingen	25	23	18		13	13	15		10	4	-5
Lauwersoog	-	-	27		-	-	27		-	-	14
Delfzijl	22	22	24		19	19	21		8	2	3
Nieuwe Statenzijl	21	21	19		-	-	-		-	-	-

Westerschelde (Bath, Hansweert, Terneuzen en Vlissingen)

Het verloop van de gemiddelde zeeniveaus in de Westerschelde wordt sterk beïnvloed door de baggerwerken ten behoeve van de verdiepingen van de vaargeul. Vooral het gemiddelde laagwater wordt er door beïnvloed, en dat beïnvloedt op zijn beurt weer de gemiddelde zeestand. In het verloop van de gemiddelde laagwaterstanden en het tijverschil is het sterkst de 18,6-jarige cyclus te herkennen.

De stijgsnelheden van de gemiddelde hoogwaterstanden in de Westerschelde nemen de laatste decennia af. Voor Bath blijkt dat niet zozeer uit de getallen van tabel 4.2, maar figuur C.1 toont dit zichtbaar. Zoals al eerder werd opgemerkt, geven de tabellen een globaal overzicht. Voor de interpretatie (bijvoorbeeld de aanwezigheid van cycli langer dan de 18,6-jarige) moeten de figuren erbij worden betrokken.

Voor Hansweert is de stijging van de gemiddelde zeestand groter voor recenter periode. Dat lijkt vooral bepaald te worden door het verloop van de gemiddelde laagwaterstanden. Voor Terneuzen en Vlissingen is het beeld dat de stijging van de gemiddelde zeestand vrij constant is. Vlissingen laat iets meer variatie zien, veroorzaakt door het verloop van de gemiddelde laagwaterstanden.

Cadzand en Westkapelle zouden tot de Noordzeekust gerekend kunnen worden, maar ook tot de Westerschelde. De verlopen van de gemiddelde zeeniveaus zijn gegeven in de figuren C5b en C6. Het verloop van het gemiddelde hoogwater laat ook voor Westkapelle een afnemende stijgsnelheid zien. Voor Cadzand is deze afnemende stijgsnelheid opmerkelijk. Mogelijk dat baggerwerken rond de Wielingen hier debet aan zijn. De gemiddelde zeestand bij Cadzand is in de laatste decennia (1970-2010) minder snel gestegen dan bij de naburige stations. Dat is waarschijnlijk toe te schrijven aan het effect van de hoogwaterstanden op de gemiddelde zeestand.

Het algemene beeld voor de Westerschelde is dat de gemiddelde hoogwaterstanden een afnemende stijgsnelheid laten zien, terwijl de gemiddelde zeestanden een vrij constante stijgsnelheid laten zien. De stijgsnelheden van de gemiddelde laagwaterstanden lijken het meest beïnvloed door de baggerwerken. Opmerkelijk is het verloop bij Bath, waar in de 70'er jaren van de vorige eeuw het gemiddelde laagwater een flinke daling inzet; het tijverschil neemt dan ook toe. Er lijkt bijna sprake van een sprong in het verloop van het gemiddelde tijverschil.

Het laagwater bij Vlissingen lijkt in de laatste decennia iets sterker te zijn gestegen. Te zien is dat de hoogste jaargemiddelden van het laagwater in het laatste decennium rond 2006 relatief hoog is in het licht van de voorgaande hoge waarden.

Oosterschelde

De tijdreeksen van de stations in de Oosterschelde zijn relatief erg kort en zijn daarom in de tabellen buiten beschouwing gebleven.

Hollandse kust (Hoek van Holland, Scheveningen, IJmuiden, Den Helder)

Hoek van Holland laat een opvallend hoge stijging van het gemiddelde hoogwater zien over het tijdvak 1971-2010. Het getij bij Hoek van Holland is in deze periode door een complex van werken beïnvloed, zoals de aanleg van de 1^e Maasvlakte rond 1960, verdiepingen van de vaargeul naar de Rotterdamse haven, wijzigingen in de waterafvoer door de Nieuwe Waterweg in samenhang met de Deltawerken, de "trapjeslijn" in de Nieuwe waterweg om de zoutindringing tegen te gaan, en recent de aanleg van Maasvlakte2. IJmuiden vertoont een evenwichtiger beeld, maar ook hier zijn havenwerken uitgevoerd in de periode 1971-2010. Om het effect van de havenwerken te kunnen scheiden van de autonome ontwikkelingen is nader onderzoek met behulp van modellen nodig.

Den Helder laat voor alle zeeniveaus een gelijkmatig verloop zien met relatief lage waarden voor de gemiddelde zeestand, die echter wel een stijging in de tijd laten zien. Dat is overigens in overeenstemming met de resultaten van Dillingh et al (2010), waarin van de hoofdstations alleen voor Den Helder een significante versnelling in de stijging van de gemiddelde zeestanden naar voren kwam. De relatief lage waarden voor de gemiddelde zeestand hangen mogelijk samen met het achtergelegen westelijk Waddengebied, waar de stijging van de gemiddelde zeestand ook relatief laag is, zie bijvoorbeeld de waarden voor Harlingen en Kornwerderzand. Het verticale getij bij Den Helder is langs de Nederlandse kust het minst sterk bij Den Helder.

Het algemene beeld is dat de stijging van de gemiddelde hoogwaterstanden, behoudens de invloed van havenwerken, een gelijkmatig patroon laat zien. Dat geldt ook voor de gemiddelde zeestand en voor het gemiddelde laagwater. Den Helder laat iets lagere stijgingen zien dan de andere locaties, een duidelijke verklaring hiervoor is niet bekend. Bij Scheveningen valt de relatief lage stijging voor het gemiddelde laagwater op over de periode 1971-2010. Het bijzondere verloop hiervan in de 70'er jaren van de vorige eeuw lijkt hieraan debet.

Waddenzee

De Waddenzee is een uiterst complex gebied door het aanwezige dynamische geulenstelsel en de morfologische veranderingen die nog steeds plaats vinden als gevolg van het afsluiten van de Zuiderzee. Vooral het verplaatsen van geulen waaraan de peilmeetstations zijn gelegen en het verplaatsen van wantijen hebben invloed op de gemeten waterstanden. Daarnaast zijn er ook geulverdiepingen geweest daar waar dat nodig was voor de scheepvaart. Vooral de laagwaterstanden zijn gevoelig voor dergelijke veranderingen, wat ook weer invloed heeft op de gemiddelde zeestanden.

De gemiddelde hoogwaterstanden laten een redelijk gelijkmatig beeld zien over de onderscheiden perioden. Harlingen laat een iets afnemende stijgsnelheid zien, terwijl die van Den Oever over de laatste periode een iets hogere waarde heeft.

De toename van de gemiddelde zeestand geeft voor West-Terschelling de hoogste waarde over de periode 1971-2010. Dat lijkt een inhaalslag na een periode van een vrijwel horizontaal verloop over de periode 1940-1980. In die periode lijkt het verloop sterk bepaald door dat van het gemiddelde laagwater, dat in die periode zelfs een daling laat zien (figuur C.25). De verlopen van na 1940 bij Vlieland-haven lijken qua karakter sterk op die bij West-Terschelling.

Opvallend hoge waarden voor de gemiddelde zeestand worden berekend voor Nes, Schiermonnikoog, Den Oever buiten en Lauwersoog. Behalve Den Oever buiten liggen deze stations allemaal in de oostelijke Waddenzee. De analyseperiodes van deze stations zijn relatief kort.

De gemiddelde laagwaterstanden tonen een tamelijk grillig patroon waarin niet een duidelijk systeem valt te ontdekken. De verschillen per locatie zijn groot. De relatief grote gevoeligheid van laagwaterstanden voor morfologische veranderingen zal hier vermoedelijk de oorzaak van zijn.

Eems-Dollard

Delfzijl vertoont voor het gemiddelde hoogwater en de gemiddelde zeestand een heel gelijkmatig verloop. De stijging van de gemiddelde zeestand is over de periode 1971-2010 iets hoger dan over de langere perioden, maar dat kan ook net zo goed veroorzaakt worden door het verloop van gemiddeld laagwater en/of hoogwater.

Voor Nieuwe Statenzijl zijn alleen data beschikbaar van de gemiddelde hoogwaterstand. Het beeld is tamelijk gelijkmatig voor de onderscheiden perioden. De stijgsnelheid lijkt de laatste decennia iets te zijn afgenomen, maar het lijkt er op dat de relatief hoge waarden rond 1980 deze ogenschijnlijke afname veroorzaken.

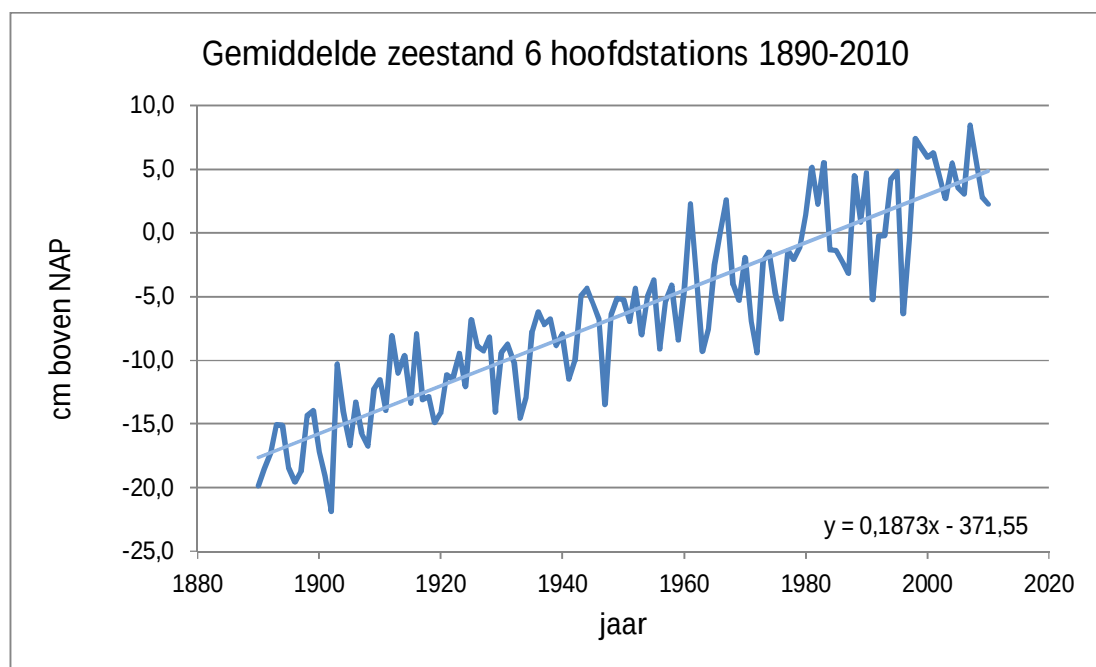
Opmerking: veel effecten zijn zeer lokaal en hoeven daarom niet geldig te zijn voor een ruimere omgeving.

4.2.3 Zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust

Interessant is natuurlijk hoe de gemiddelde zeespiegelstijging uit deze studie zich verhoudt tot die uit Dillingh et al. (2010). In laatst genoemd onderzoek werd gekeken naar de hoofdstations Vliissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl. Het zijn alle kuststations met lange tijdreeksen. Het gemiddelde van de stijging van de gemiddelde zeestanden van deze stations over de periode 1900-2010 ten opzichte van de bovenkant van het pleistoceen bedraagt volgens tabel 4.2 19 cm/eeuw en dat is geheel in overeenstemming met de resultaten van de studie uit 2010. Voor de periodes 1933-2010 en 1971-2010 bedraagt de gemiddelde stijging respectievelijk 19 en 21 cm/eeuw.

Dat de gemiddelde waarde over de periode 1971-2010 iets hoger ligt dan over de langere perioden wil niet zeggen dan er toch sprake is van een significante versnelling van de zeespiegelstijging. Het wordt mogelijk veroorzaakt door de relatief korte lengte van deze analyseperiode en de toevallige fluctuaties aan het eind van de periode.

Figuur 4.1 geeft als illustratie het verloop van de gemiddelde zeestand over de periode 1890-2010, berekend als gemiddelde van zeestand van de 6 hoofdstations Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl. De lineaire trendlijn is toegevoegd. De laatste 2 toegevoegde jaren t.o.v. Dillingh et al (2010) liggen onder de trendlijn. Deze figuur duidt op het oog ook niet op een versnelde zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust.



Figuur 4.1 Lineaire trend gemiddelde zeestand (gecorrigeerd voor NAP-2005 en 18,6-jarige cyclus), gemiddeld over de zes hoofdstations.

Algemeen

In de figuren van Bijlage C valt op dat er een hoge mate van correlatie is tussen de verlopen van overeenkomstige zeenniveaus voor alle stations in het Deltagebied, langs de Noordzeekust en in het Waddengebied. Dat geeft aan dat grootschalige fenomenen een belangrijke rol spelen. Hiermee valt te bestuderen hoe de berekende trendlijnen voor de korte reeksen zich verhouden tot die voor de veel langere reeksen.

4.2.4 Trendverschillen tussen de zeenniveaus

In tabel 4.1 zijn per onderscheiden periode naast de kolommen voor hoogwater (HW), zeestand (ZS) en laagwater(LW) kolommen toegevoegd die het verschil geven tussen de getallen voor HW en ZS respectievelijk ZS en LW.

Westerschelde

Voor de Westerschelde vallen de relatief hoge waarden voor HW-ZS en relatief lage waarden voor ZS-LW op voor de periodes 1900-2010 en 1933-2010.

Voor de periode 1971-2010 zijn de relatief hoge waarden voor HW-ZS verdwenen en stijgen de gemiddeld zeeniveaus ongeveer even snel. Een uitzondering vormt Bath. De data voor de gemiddelde zeestand hiervoor beginnen pas in 1971. Het gemiddelde laagwater toont een afwijkend patroon door een daling na ongeveer 1970, vermoedelijk als gevolg van lokaal baggerwerk.

Cadzand laat voor alle perioden een relatief lage stijging van het gemiddelde hoogwater zien (Figuur C.5a). De sterke stijging tussen 1910 en 1960 komt in de getallen niet tot uiting door de keuze van de periodes. De periode 1971-2010 laat een gemiddelde zeestand zien die sneller stijgt dan de gemiddelde hoogwaterstand. Dat geldt in iets mindere mate voor Westkapelle. Laagwater en gemiddelde zeestand stijgen voor deze locaties in deze periode ongeveer even snel.

Hollandse kust

De Hollandse kust vertoont nog het meest regelmatige patroon: een iets snellere stijging van het gemiddelde hoogwater ten opzichte van de gemiddelde zeestand en een iets langzamere stijging van de gemiddelde laagwaterstand ten opzichte van de gemiddelde zeestand. Een uitzondering van dit patroon wordt gevormd door het laagwater bij IJmuiden.

Dat dit gebied het meest regelmatige patroon laat zien heeft ongetwijfeld te maken met de relatief eenvoudige bodemligging. Alleen de havenwerken, inclusief de toegangsgeulen, compliceren het patroon enigszins, maar niet zoveel als in het Waddengebied en de estuaria.

Waddengebied

Het Waddengebied laat een vrij grillig patroon zien van positieve en negatieve getallen voor HW-ZS en ZS-LW. Het is een morfologisch zeer dynamisch gebied. De westelijke Waddenzee is nog niet in dynamisch evenwicht na het gereedkomen van de Afsluitdijk. Harlingen en Delfzijl hebben ook nog te maken met haven- en baggerwerken.

HW-ZS

In paragraaf 1.1 wordt gemeld dat er tot nu toe vanuit wordt gegaan dat voor de Hollandse kust en Waddenzeekust de stijging van de gemiddelde hoogwaterstanden gemiddeld globaal 5 cm/eeuw meer bedraagt dan die van de gemiddelde zeestand. Deze extra hoogwaterstijging wordt in rekening gebracht bij aanleg of verbetering van primaire waterkeringen, bovenop de in het kustgebied vigerende scenario's voor zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust voor de komende eeuw. Voor de Westerschelde en het Eems-Dollard estuarium werden hogere stijgsnelheden gevonden.

De vraag is of deze extra stijging van 5 cm/eeuw van het gemiddelde hoogwater ten opzichte van de gemiddelde zeestand nog steeds geldig is.

Uit de analyses van het onderhavige rapport komt een iets genuanceerder beeld naar voren. De beschikbare getallen (HW-ZS) voor de Hollandse kust en Waddenzeekust voor de middellange periode zijn alle positief en gemiddeld 5 cm/eeuw. De getallen voor dezelfde stations voor de korte periode zijn ook positief en gemiddeld ongeveer 4 cm/eeuw. Harlingen is echter voor de middellange periode een uitschieter, Hoek van Holland voor de korte periode (havenwerken). De andere stations laten voor de korte periode in de meeste gevallen een afname zien van HW-ZS. Voor de korte periode zijn data van meer stations beschikbaar dan voor de middellange periode, de variabiliteit van de getallen is veel groter.

Daarbij komt dat de figuren voor het gemiddeld tijverskil (bijlage C) de laatste decennia over het algemeen een afnemende stijgsnelheid laten zien voor het tijverskil. Het is dus maar de vraag of het gemiddelde hoogwater de komende 50 tot 100 jaar sneller zal blijven stijgen dan de gemiddelde zeestand (behoudens de invloed van menselijke ingrepen).

De tabellen en figuren geven dus geen aanleiding om het uitgangspunt dat langs de Hollandse kust en Waddenzeekust de autonome stijging van het gemiddelde hoogwater gemiddeld globaal 5 cm/eeuw meer bedraagt dan die van de gemiddelde zeestand te handhaven. Het uit tabel 4.1 berekende gemiddelde voor de stations Hoek van Holland t/m Delfzijl bedraagt 0,9 cm/eeuw. Worden de waarden langs de Deltakust meegenomen (Cadzand en Westkapelle) dan wordt het gemiddelde nog lager.

Uitzondering is het station Bath. Voor dit station en zijn omgeving wordt vooralsnog aanbevolen wel een toeslag van 25 cm/eeuw toe te passen, zeker zolang de vaargeul in de Westerschelde regelmatig verdiept wordt. Toekomstige analyses zullen moeten aantonen wanneer dat niet meer nodig is.

5 Samenvatting en conclusies

In het onderhavige rapport worden de beschikbare tijdreeksen van jaargemiddelde zeenniveaus (hoogwater, gemiddelde zeestand of zeespiegel en laagwater) in de vorm van figuren gepresenteerd van alle peilmeetstations in de Nederlandse kustwateren. Ook de tijverschillen worden gepresenteerd.

Daarnaast is nagegaan hoeveel de verschillende zeenniveaus zijn gestegen over een drietal verschillende tijdvakken: 1900-2010, 1933-2010 en 1971-2010. De gemiddelde stijgsnelheden over deze tijdvakken zijn in tabelvorm gegeven.

Correctie voor NAP-aanpassing

Het nationale referentievlak voor hoogtemetingen in Nederland is het NAP (Normaal Amsterdams Peil). Voor de landelijke verspreiding van het NAP-vlak bestaat een netwerk van ondergrondse merken (regionale referentiepunten). Ook de zogenaamde nulpalen van de peilmeetstations behoren tot dit netwerk. Deze ondergrondse merken zijn gefundeerd op het pleistoceen. Hun onderlinge hoogteligging wordt bepaald door middel van zogenaamde Nauwkeurigheidswaterpassingen.

Gebleken is dat de bovenkant van het pleistoceen niet zo stabiel is als oorspronkelijk gedacht, vooral als gevolg van geologische processen als isostasie, compactie en tektoniek. Na de 5^e Nauwkeurigheidswaterpassing (1996-1999) is besloten de NAP-hoogten van de NAP-merken aan te passen. Met ingang van 1 januari 2005 is dat formeel gebeurd. Hiermee is dus een discontinuïteit in de meetwaarden van de waterhoogten ingevoerd die van invloed is op de resultaten van trendanalyses.

Voor zo zuiver mogelijke tijdreeksen voor trendanalyses van jaargemiddelde zeenniveaus zijn deze gecorrigeerd voor het effect van de NAP-aanpassing op 1 januari 2005 door het corrigeren van de waarden vóór 2005 tot NAP-waarden zoals die zouden zijn geweest vanaf 2005.

Lineaire of niet-lineaire trendanalyse

Voor de tijdreeksen van jaargemiddelde zeenniveaus was het noodzakelijk niet-lineaire trendanalyses toe te passen. Kunnen de verlopen van de gemiddelde zeestanden vanaf ongeveer 1885 meestal nog wel voldoende nauwkeurig door een lineaire trendlijn worden benaderd, voor de gemiddelde hoog- en laagwaterstanden is dat vaak niet meer het geval. Gebruik is gemaakt van de zogenaamde Whittaker smoother, een functievrije fittingsmethode, ook wel aangeduid als *penalized least sum of squares (PLSS)*. Deze methode kan goed omgaan met trendveranderingen, hiaten en discontinuïteiten.

Correctie voor de 18,6-jarige knopencyclus

Er is uitvoerig aandacht besteed aan de invloed van de bekende 18,6-jarige cyclus in de tijdreeksen van gemiddelde zeenniveaus, de zogenaamde knopencyclus. Deze periode hangt samen met de verandering in de helling van het vlak van de maansbaan om de aarde ten opzichte van de ecliptica. Het blijkt dat ook de PLSS-trendlijn aan het eind van de tijdreeks gevoelig is voor een periodieke component als de knopencyclus. Om die reden zijn alle tijdreeksen gecorrigeerd voor de 18,6-jarige cyclus, alvorens de definitieve PLSS-trendlijn te berekenen.

Uitgevoerde werken

Vrijwel alle tijdreeksen zijn beïnvloed door uitgevoerde werken. Dat maakt het lastig om algemeen geldende conclusies te trekken uit de tabellen met berekende stijgsnelheden.

Stijgt het hoogwater gemiddeld 5 cm/eeuw sneller van de gemiddelde zeestand?

Tot nu toe werd er vanuit gegaan dat voor de Hollandse en Waddenzeekust de stijging van de gemiddelde hoogwaterstanden gemiddeld ongeveer 5 cm/eeuw meer bedraagt dan die van de gemiddelde zeestand. Deze extra hoogwaterstijging wordt in rekening gebracht bij aanleg of verbetering van primaire waterkeringen, bovenop de in het kustgebied vigerende scenario's voor zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust voor de komende eeuw.

Uit de analyses van het onderhavige rapport komt een genuanceerder beeld naar voren. Deze analyses geven aanleiding om het uitgangspunt dat langs de Hollandse kust en Waddenzeekust de stijging van het gemiddelde hoogwater gemiddeld globaal 5 cm/eeuw meer bedraagt dan die van de gemiddelde zeestand te heroverwegen.

Uitzondering is het station Bath. Voor dit station en zijn omgeving wordt vooralsnog aanbevolen wel een toeslag van 25 cm/eeuw toe te passen, zeker zolang de vaargeul in de Westerschelde regelmatig verdiept wordt. Toekomstige analyses zullen moeten aantonen wanneer dat niet meer nodig is.

6 Literatuur

(Baart et al, 2012)

F. Baart, P. H. A. J. M. van Gelder, J. de Ronde, M. van Koningsveld, and B. Wouters, *The effect of the 18.6-year lunar nodal cycle on regional sea-level rise estimates*. Journal of Coastal Research, 28(2): 511–516, March 2012.

(Barends et al, 2008)

Barends, Frans; Dillingh, Douwe; Hanssen, Ramon en Onselen, Kyra van (eds), (2008) *Bodemdaling langs de Nederlandse kust, case Hondsbossche en Pettemer zeewering*, IOS Press, Amsterdam.

(Brand, 2002)

Brand, G.B.M (2002): *Oorzaken van de bewegingen van de meetpunten van het NAP*, rapport MDGAP-2002.26, Rijkswaterstaat, 2002.

(Brand et al, 2004)

Brand, G.B.M., G. van Brussel, J.H. ten Damme en J. Gerritsen (2004): *Herberekening van het primaire net van het NAP, Verbetering precisie en betrouwbaarheid ten behoeve van de nieuwe NAP-publicatie*, rapport AGI/GAP-04?004, Rijkswaterstaat AGI, augustus 2004.

(De Bruijne et al, 2005)

Bruijne, Arnoud de; Joop van Buren; Anton Kösters; Hans van der Marel (2005): *De geodetische referentiestelsels van Nederland, definitie en vastlegging van ETRS89, RD en NAP en hun onderlinge relaties*, Nederlandse Commissie voor Geodesie.

(Dillingh et al, 1993)

D. Dillingh, L. de Haan, R. Helmers, G.P. Können, en J. van Malde (1991), *De basispeilen langs de Nederlandse kust, Statistisch onderzoek*, Rapport DGW-93.023, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Den Haag, april 1993.

(Dillingh en Heinen, 1994)

D. Dillingh en P.F. Heinen (1994), *Zeespiegelstijging, getijverandering en deltaveiligheid*, Rapport RIKZ-94.026, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Den Haag, juni 1994.

(Dillingh et al, 2010)

D. Dillingh, F. Baart en J.G. de Ronde (2010), *Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte, Rekenmodel t.b.v. handhaven kustfundament*, Deltares, Rapport 1201993-002-VEB-0003, Delft, juli 2010.

(Dillingh en De Lima Rego, 2010)

D. Dillingh en Joao de Lima Rego (2010), *Toets- en Rekenpeilen Kust en Estuaria ten behoeve van de HR2011*, Deltares, Rapport 1202341-002-HYE-0060, Delft, juli 2010.

(Eilers, 2003)

Eilers, P.H.C. (2003), *A Perfect Smoother*, Analytical Chemistry, 75(14), pp 3631-3636, DOI: 10.1021/ac034173t, May 30, 2003.

(Eilers, 2006)

Eilers, P.H.C., *Statistische Analyse van Trends in Zeewaterstanden*, in opdracht van RWS-RIKZ, EDAS, Dordrecht, 2006.

(Heinen en Hoogkamer, 1993)

P.F. Heinen en M.J.J. Hoogkamer (1993), *Trends en meteorologische invloeden in gemiddelde zeeniveaus*, Rijkswaterstaat, RIKZ, rapport DGW-93.017, Den Haag, april 1993.

(Van den Hoek Ostende en Van Malde, 1989)

Hoek Ostende, E.R. van den; J. van Malde (1989): *De invloed van de bepalingwijze op de berekende gemiddelde zeestand, nota GWAO-89.006*, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, november 1989.

(Van den Hurk et al, 2006)

Bart van den Hurk, Albert Klein Tank, Geert Lenderink, Aad van Ulden, Geert Jan van Oldenborgh, Caroline Katsman, Henk van den Brink, Franziska Keller, Janette Bessembinder, Gerrit Burgers, Gerbrand Komen, Wilco Hazeleger and Sybren Drijfhout, *KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands*, KNMI Scientific Report WR 2006-01, 22 mei 2006.

(Kooi et al, 1998)

H. Kooi, P. Johnston, K. Lambeck, C. Smither and R. Molendijk (1998), *Geological causes of recent (~100 yr) vertical land movement in the Netherlands*, Tectonophysics, 299, 297-316.

(Min. VenW, 2000)

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2000), *3e Kustnota, Traditie, Trends en Toekomst*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, december 2000.

(Philippart et al, 1995)

M.E. Philippart, D. Dillingh en S.T. Pwa (1995), *De basispeilen langs de Nederlandse kust, de ruimtelijke verdeling en overschrijdingslijnen*, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Rapport RIKZ-95.008, Den Haag, mei 1995.

(Rijkswaterstaat, 1989)

Tienjarig Overzicht der waterhoogten, afvoeren en watertemperaturen 1971-1980, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, 's Gravenhage, 1989.

(De Ronde, 1982)

Ronde, J.G. de (1982): *Bepaling der gemiddelde zeestanden vermeld in de Tienjarige Overzichten*, Nota J.d.R.82.13, Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Den Haag, 15 november 1982.

(De Ronde, 1983)

Ronde, J.G. de (1983): *Nauwkeurigheid gemiddelde zeestanden*, Nota J.d.R.83.21, Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, 18 oktober 1983.

(De Ronde en Vogel, 1988)

J.G. de Ronde en J.A. Vogel (1988), *Zeespiegelstijging, Hydro Meteo scenario's*, nota GWAO-88.015, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, februari 1988.

(Saarloos, 1951)

Saarloos J.M. (1951), *De geringe nauwkeurigheid van het bodemdalingsgetal ten opzichte van zeeniveau, afgeleid uit de aflezingen op de Nederlandse kustpeilschalen, en de methode*

om daarin verbeteringen te brengen, Tijdschrift Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap, LXVIII, 1951, p101-122.

(Schureman, 1958)

Schureman, P. (1958), *Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides*, U.S. Departement of Commerce, Coast and Geodetic Survey, Special Publication No. 98,

(TAW, 2002)

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 2002, *Leidraad Zandige Kust*, Rapport DWW-2003-046Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, december 2002.

(TAW, 2002)

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (2002), *Leidraad Zandige Kust*, Rapport RWS DWW-2003-046, Delft, december 2002.

.

A Overzichtskaart peilmeetstations Nederlandse kustwateren

RD-coördinaten beschouwde peilmeetstations

Station	X-coördinaat	Y-coördinaat
Terneuzen	045793	373070
Bath	073048	379492
Hansweert	059050	384960
Vlissingen	030593	385312
Bergse Diepsluis west	070210	392090
Krammersluizen west	069000	408570
Stavenisse	059300	401630
Roompot binnen	037216	404735
Cadzand	015260	378750
Westkapelle	019900	394356
Roompot buiten	036920	404796
Brouwershavense Gat 08	046197	419184
Haringvliet10	049862	431612
Hoek van Holland	067932	444000
Scheveningen	078006	457360
IJmuiden	098507	497450
Petten zuid	105240	531980
Den Helder	111776	553163
Texel Noordzee	111217	570623
Terschelling Noordzee	151570	604853
Wierumergronden	192882	614562
Huibertgat	222032	621365
Oudeschild	119053	561696
Vlieland haven	135307	589943
West-Terschelling	143870	597420
Nes	180158	604899
Schiermonnikoog	209220	609488
Den Oever buiten	131911	549678
Kornwerderzand buiten	151500	564972
Harlingen	156609	576553
Lauwersoog	208853	602777
Eemshaven	250792	607798
Delfzijl	258000	594430
Nieuwe Statenzijl	276551	584320

ETRS89-coördinaten platforms

Station	NB	OL
Lichteland Goeree	51° 55' 30"	3° 40' 06"
Euro platform	51° 59' 52"	3° 16' 30"
K13a platform	53° 13' 01"	3° 13' 08"



Peilmeetstations in de Nederlandse kustwateren

Legenda

- RWS peilmeetstations

Datum: 26-08-2013
Kaartnummer: RWSWD20130003

Schaal: 1:1.150.000

0 5 10 20 30 Kilometers



Ministerie van Infrastructuur en Milieu
Rijkswaterstaat

B Een beknopte geschiedenis van het NAP

De voorganger van het NAP is het AP (Amsterdamsch Stadtspeyl). Het kwam overeen met de gemiddelde vloedhoogte op het IJ te Amsterdam en werd in 1682, of vlak daarna, vastgelegd door middel van peilmerken in de vorm van witte marmeren stenen waarin een groeve was uitgehakt. Deze dijkpeilstenen werden aangebracht in acht sluizen van de toen nieuwe waterkering van Amsterdam.

Het AP verspreidde zich daarna langs de Zuiderzee en de grote rivieren en werd in 1818 bij Koninklijk Besluit door Koning Willem I voorgeschreven als algemeen vergelijkingsvlak voor waterstanden.

De eerste nationale waterpassing (de 1^e zogenaamde Nauwkeurigheidswaterpassing (NWP)) vond plaats in de periode 1875-1885. Uitgangspunt hierbij waren vijf overgebleven dijkpeilstenen van de oorspronkelijke acht. Om de uitkomsten te onderscheiden van eerdere waterpassingen werd op 1 januari 1891 de naam Normaal Amsterdams Peil (NAP) ingevoerd.

In 1926 werd begonnen met de 2^e Nauwkeurigheidswaterpassing, omdat de resultaten van de 1^e NWP niet meer absoluut betrouwbaar waren door zakking van peilmerken als gevolg van klink en bodembeweging en omdat peilmerken verloren waren gegaan. Reconstructie is niet meer mogelijk omdat het grootste deel van de metingen verloren is gegaan. De 2^e NWP werd afgerond in 1940. In het begin van de 2^e NWP werd besloten tot de aanleg van ondergrondse merken, verspreid over het land, om het NAP zo stabiel mogelijk in heel Nederland vast te leggen. Dat gebeurde in eerste instantie vooral in het midden en oosten van het land vanwege de geologische stabiele oppervlakte in deze gebieden.

Bij de 3^e NKW (1950-1959) werd het aantal ondergrondse merken uitgebreid, vooral in het westen van Nederland, waarvoor funderingspalen tot op de daadkrachtige grond in de bodem moesten worden gedreven (soms tot 20 m diepte). Dit type werd ook bij een aantal belangrijke peilschalen langs de kust en grote rivieren geplaatst, de eerste in 1963. Het waterpasnet werd in 1955 aangesloten op de laatst overgebleven dijkpeilsteen in Amsterdam, die in de Nieuwe Brugsluis. Met het oog op het verdwijnen van deze laatste dijkpeilsteen werd de hoogte toen overgebracht naar een ondergronds merk van het type funderingspaal, aangebracht onder het plaveisel van de Dam te Amsterdam. De hoogte van de bout op deze paal gold dus vanaf 1955 als formeel referentiepunt van het NAP.

De 4^e NWP vond plaats in de periode 1965-1974. Vernieuwend element hierbij was de zogenaamde hydrostatische waterpassing, gebruik makend van een lange loden buis gevuld met water. Hiermee konden ook de eilanden qua referentievlek met elkaar worden verbonden en kon het NAP ook overgebracht worden naar meetopstellingen in open zee. Vanaf de 70-er jaren van de 20^e eeuw werd het aantal nulpalen bij peilmeetstations sterk uitgebreid.

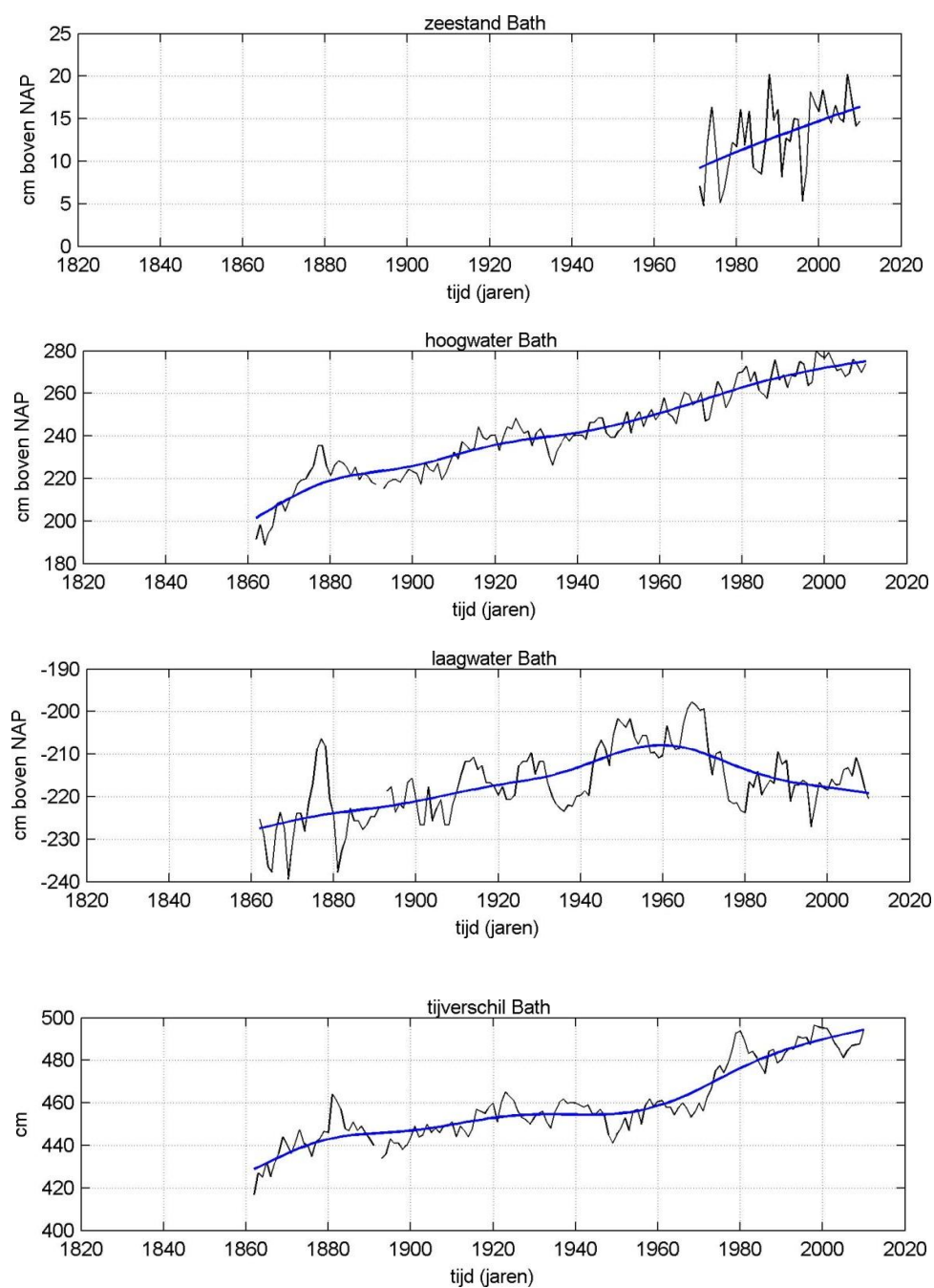
Na de 3^e NWP werden de hoogten van ondergrondse merken niet aangepast, ze leken stabiel genoeg. De resultaten van de 4^e NWP bevestigden de stabiliteit van de ondergrondse merken, reden om de hoogten van de ondergrondse merken van het primaire net ook nu niet opnieuw te berekenen, al bestonden toen al aanwijzingen dat het westen van Nederland wat daalde als gevolg van de post glacial rebound (ca. 3 cm per eeuw). Dat kon echter door de beperkte meetnauwkeurigheid nog niet bevestigd worden.

Bij de 5^e NWP (1996-1999) werden voor het eerst in Nederland optische en hydrostatische waterpassing, satellietplaatsbepaling en zwaartekrachtmeting gecombineerd. De waterpassingen vormen de basis van het primaire net van het NAP. De zwaartekrachtmetingen vormen een onafhankelijke meting voor het vaststellen van bodembeweging. De GPS-metingen dienden als extra ondersteuning voor het waterpasnet over grote afstanden. Er werden zoveel mogelijk punten en trajecten uit eerdere NWP's meegenomen. Een aantal nieuwe ondergrondse merken werd geplaatst. Een doorgaande waterpasroute langs de kust werd gemeten. Voor meer informatie wordt verwezen naar De Bruijne et al., (2005).

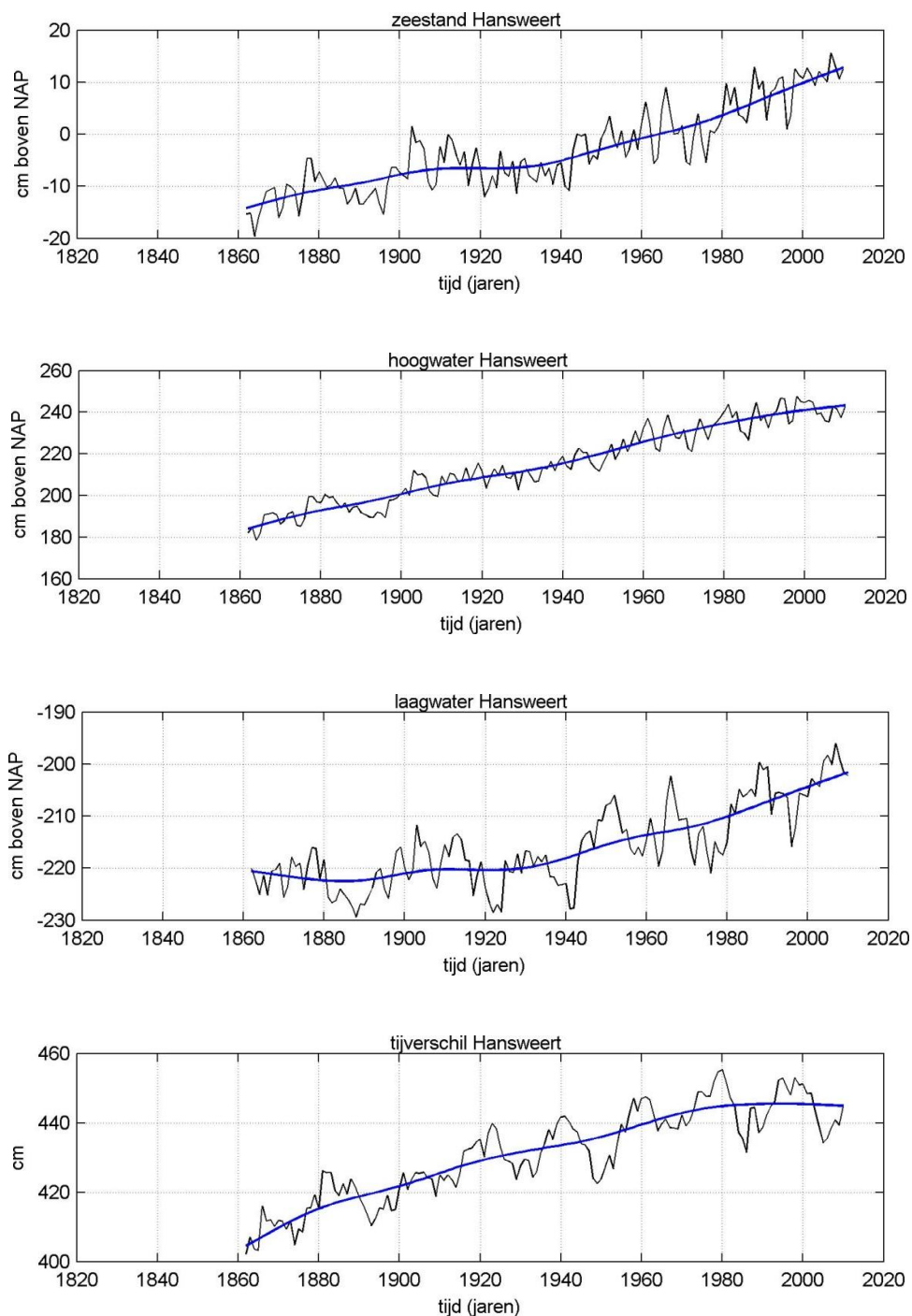
Het ondergrondse merk op de Dam in Amsterdam is toch onvoldoende stabiel gebleken om zondermeer als basis te dienen voor het primaire net van het NAP. De ondergrondse merken in het oosten van Nederland, en in het bijzonder op de Veluwe, zijn wel stabiel (Brand, 2002) en kunnen worden benut voor de controle van het ondergrondse merk in Amsterdam. De hoogte van het ondergrondse merk op de Dam te Amsterdam is na de 5^e NWP 2 cm lager vastgesteld dan de oude gepubliceerde hoogte.

De resultaten van de 5^e NWP plus aanvullende analyses hebben uiteindelijk geleid tot de NAP-publicatie van 2005.

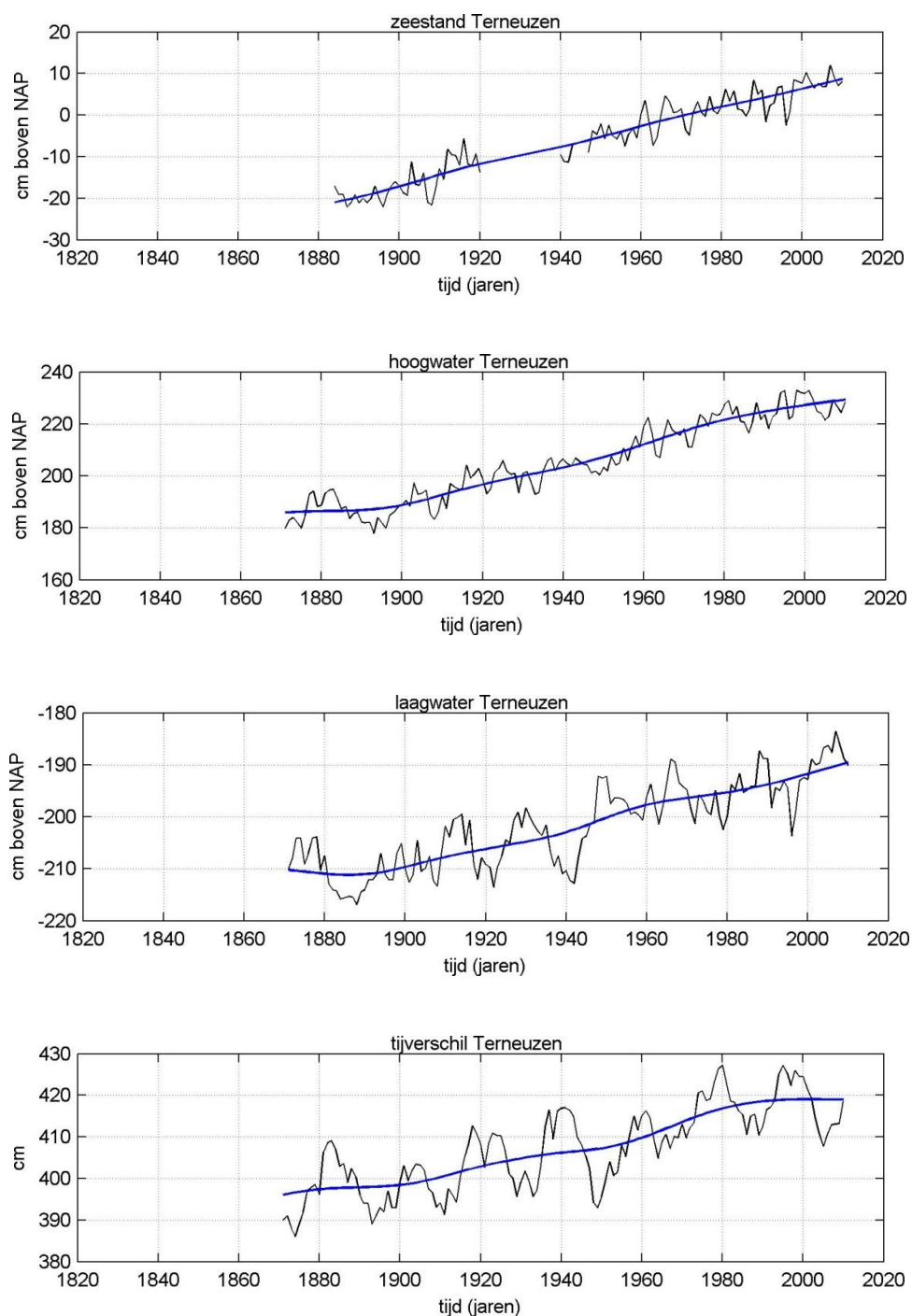
C Verloop jaargemiddelde zeeniveaus per peilmeetstation



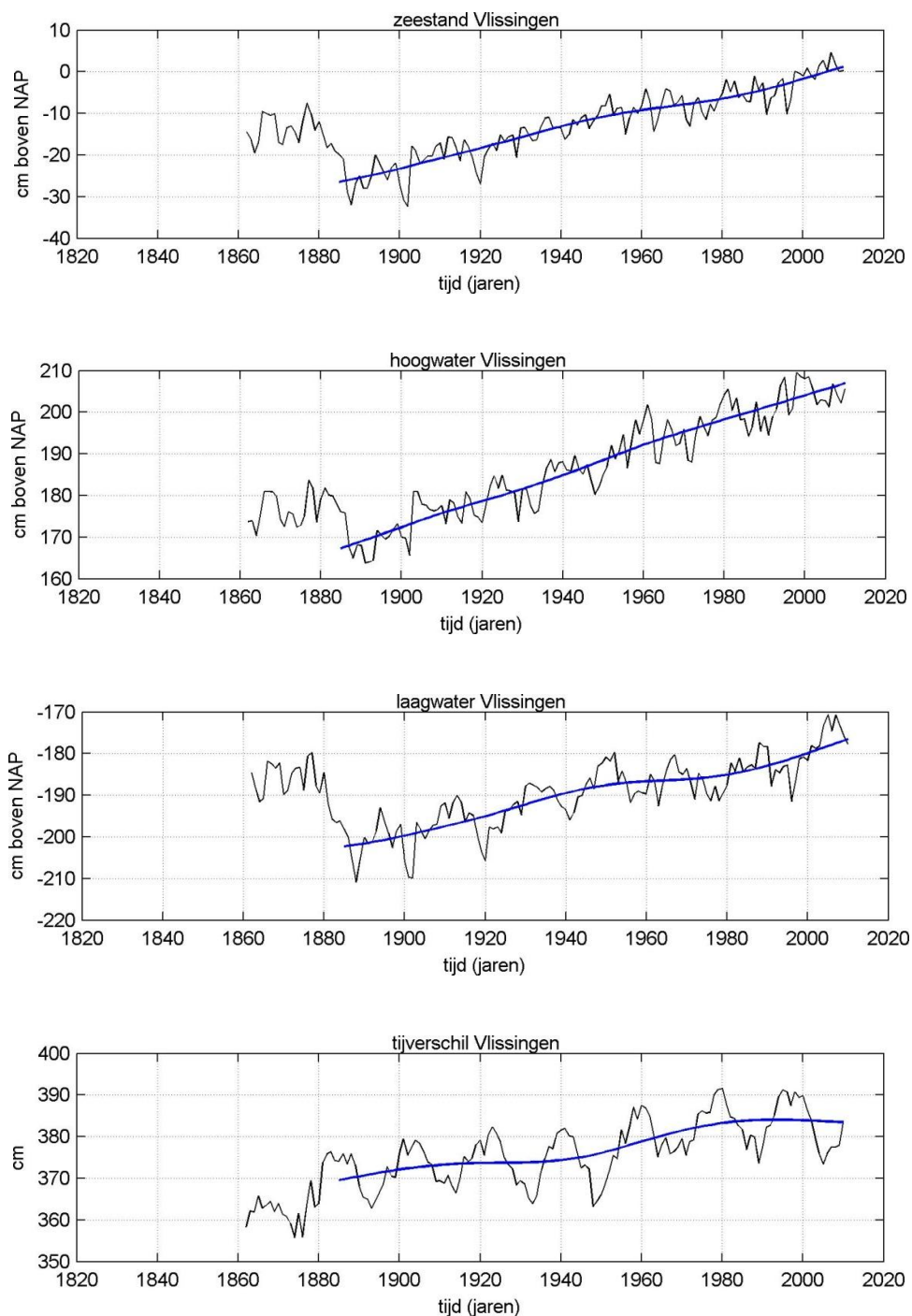
Figuur C.1 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Bath



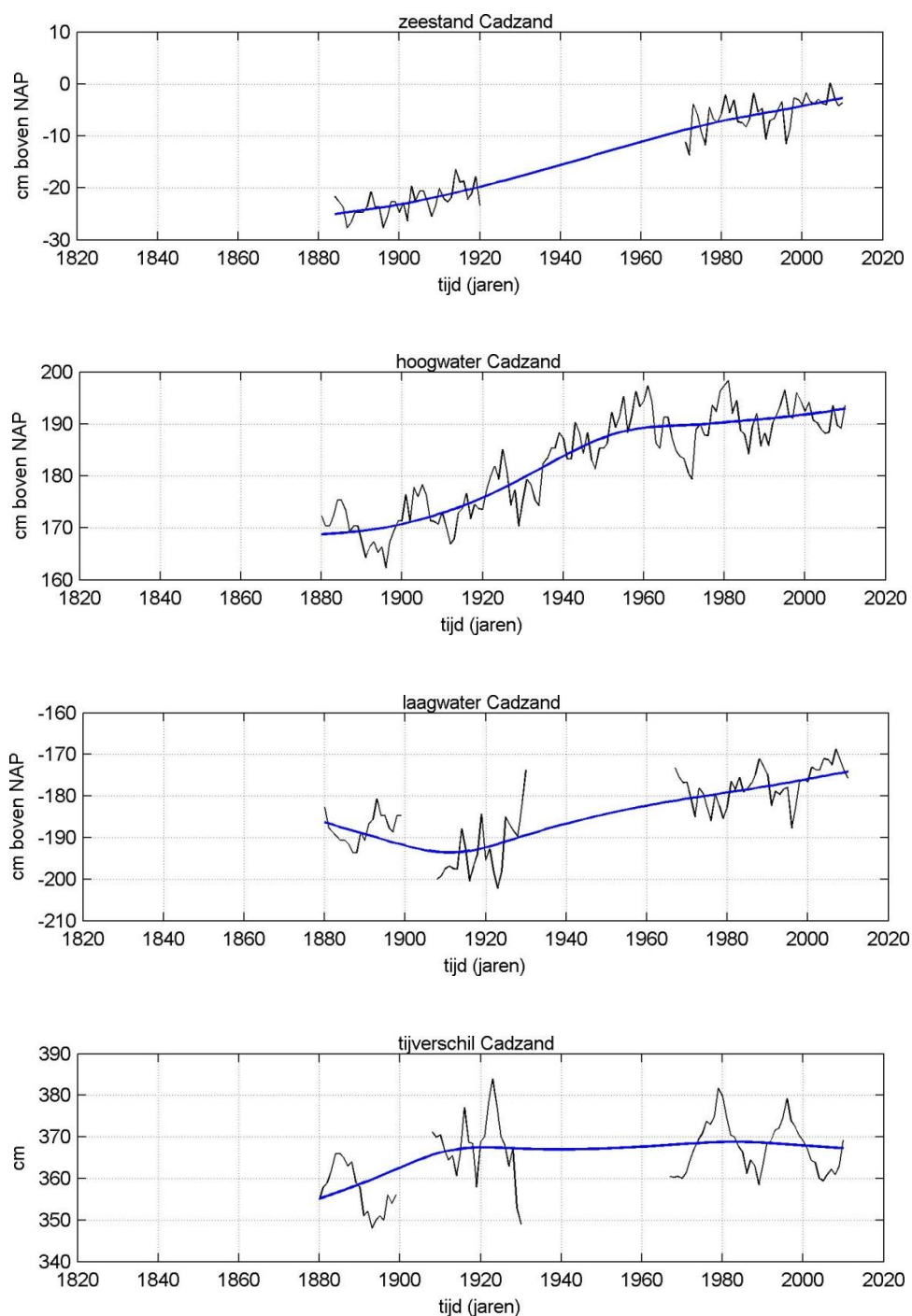
Figuur C.2 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Hansweert



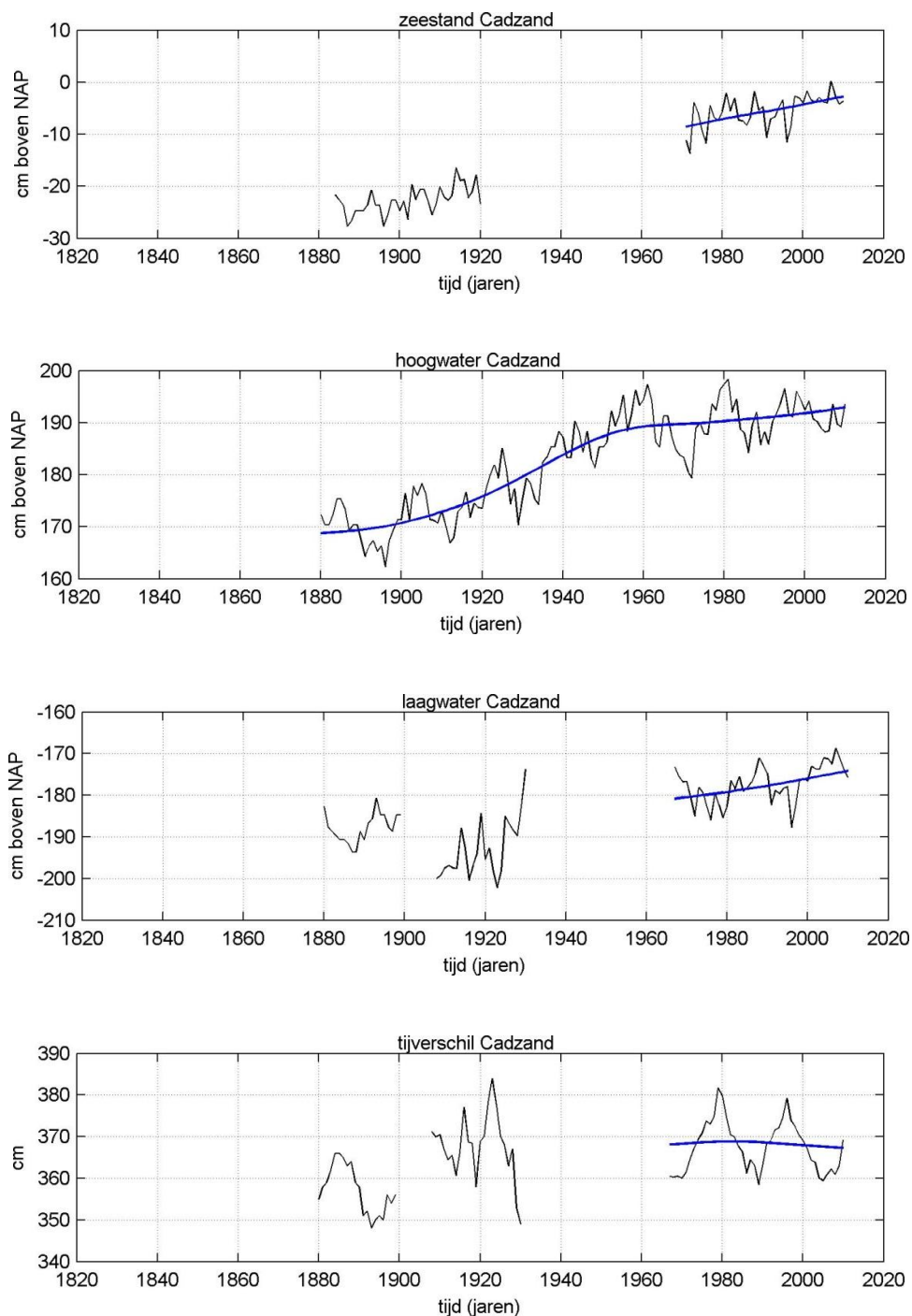
Figuur C.3 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Terneuzen



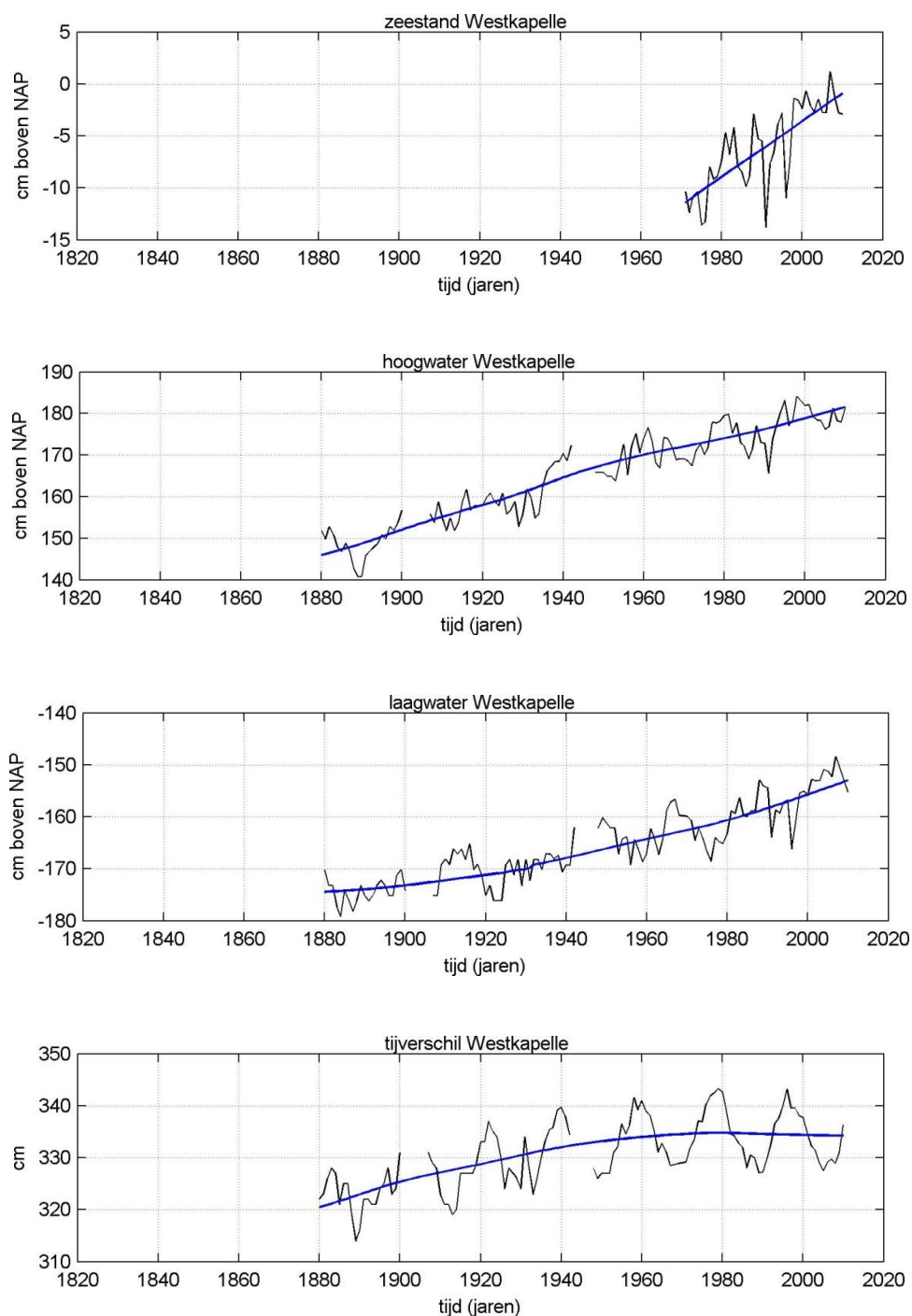
Figuur C.4 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Vlissingen
Analyseperiode vanaf 1885



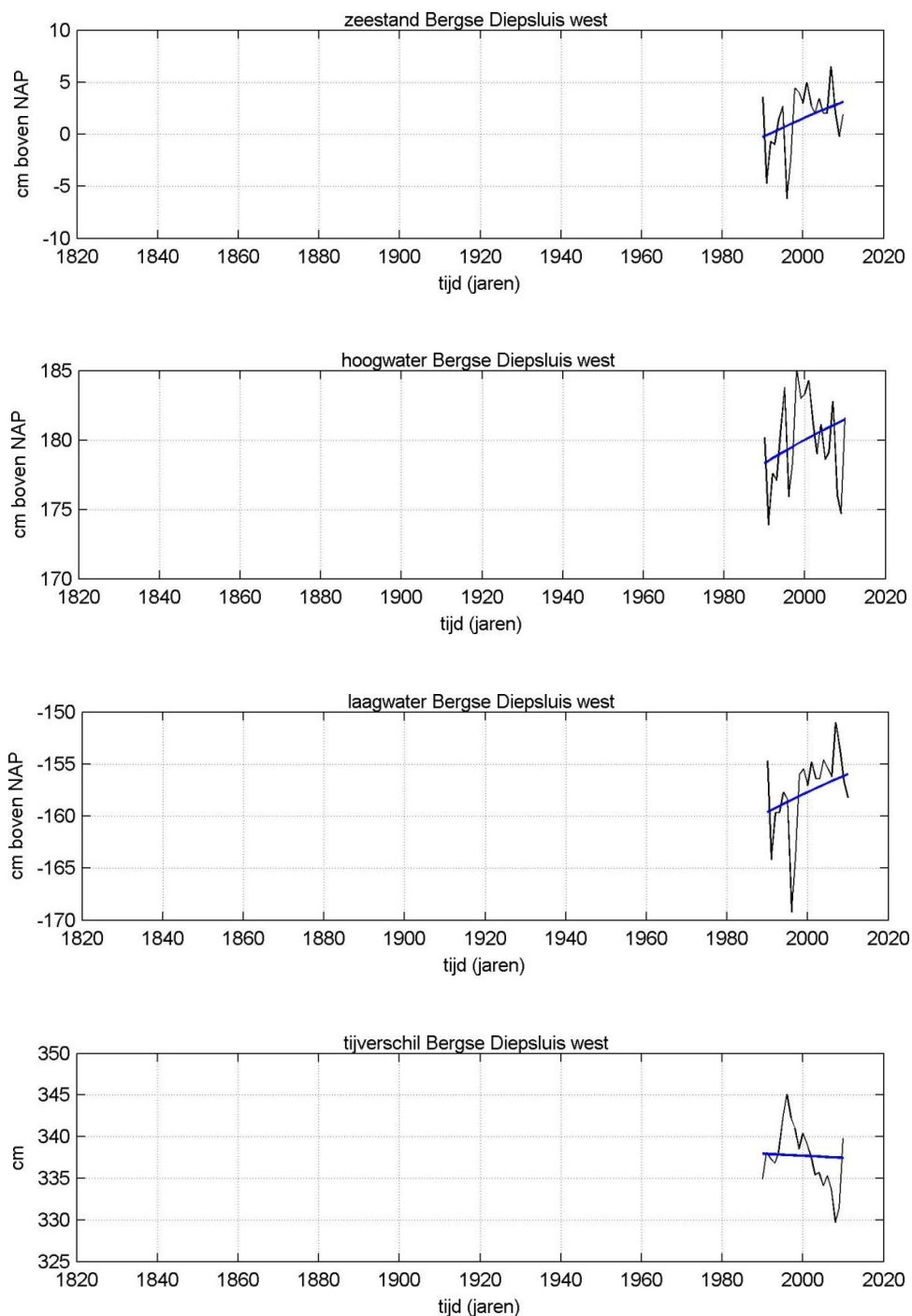
Figuur C.5a Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Cadzand



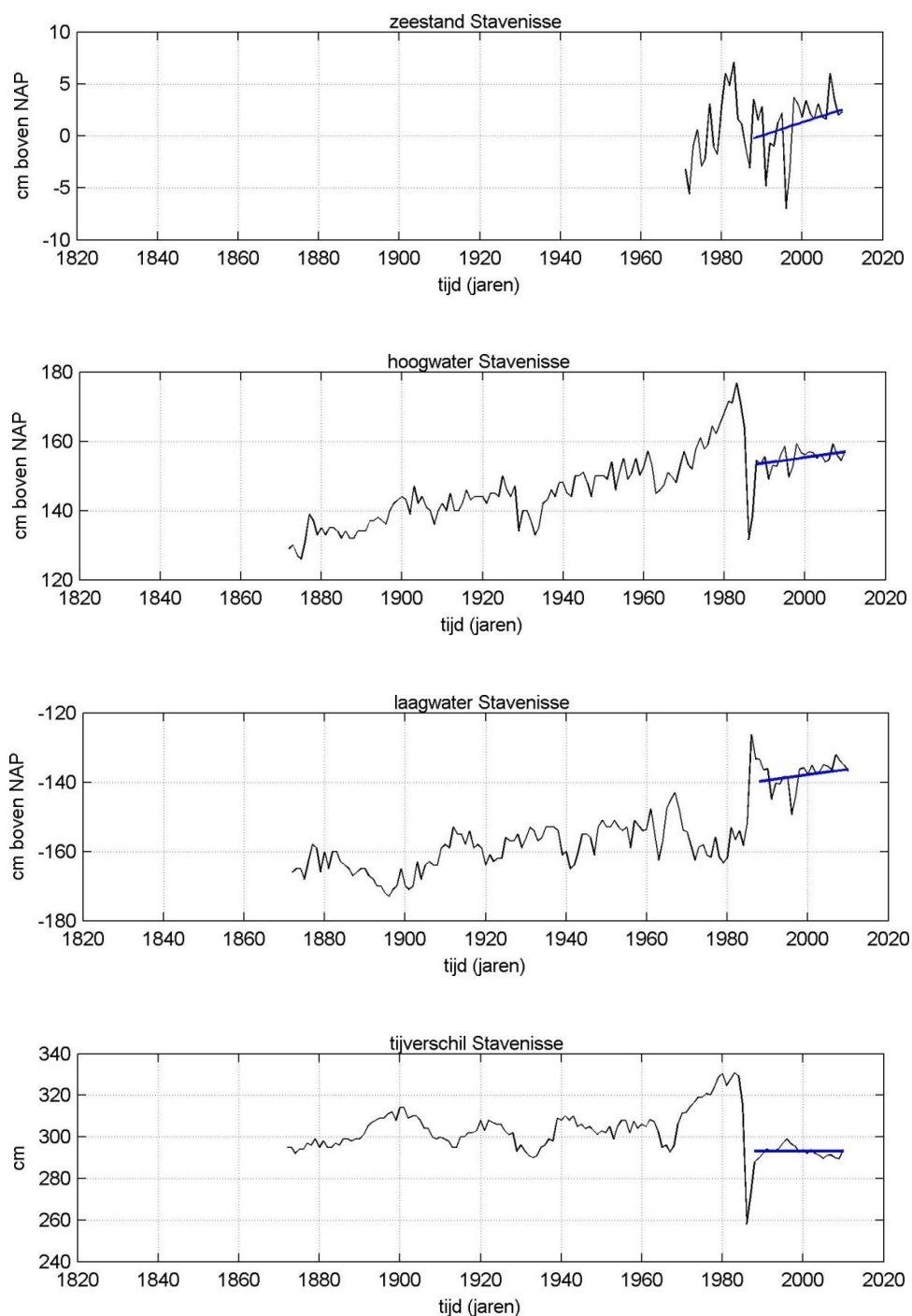
Figuur C.5b Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Cadzand
Analyseperiode vanaf 1971 voor de zeestand en vanaf 1967 voor laagwater en tijverschil



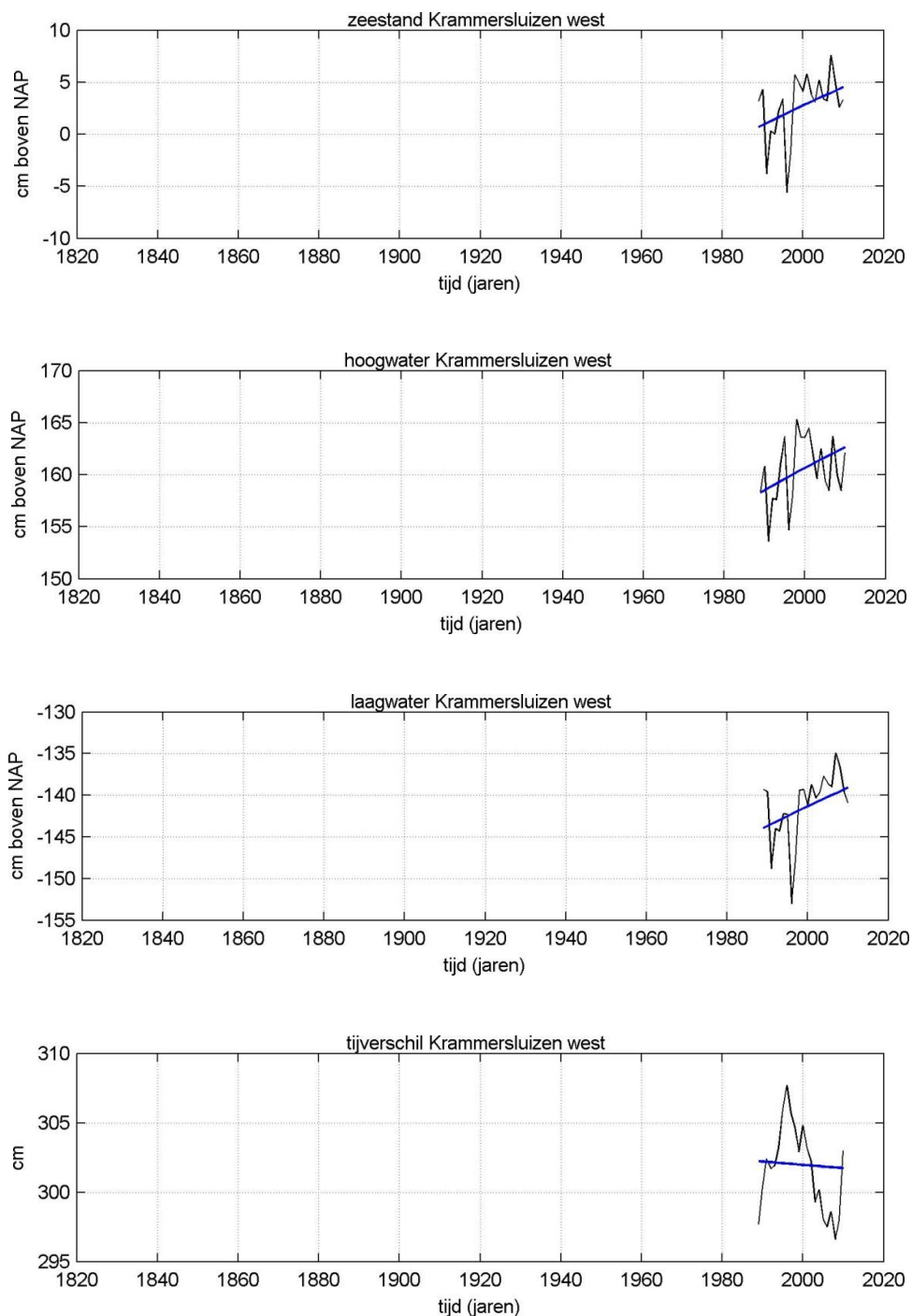
Figuur C.6 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Westkapelle



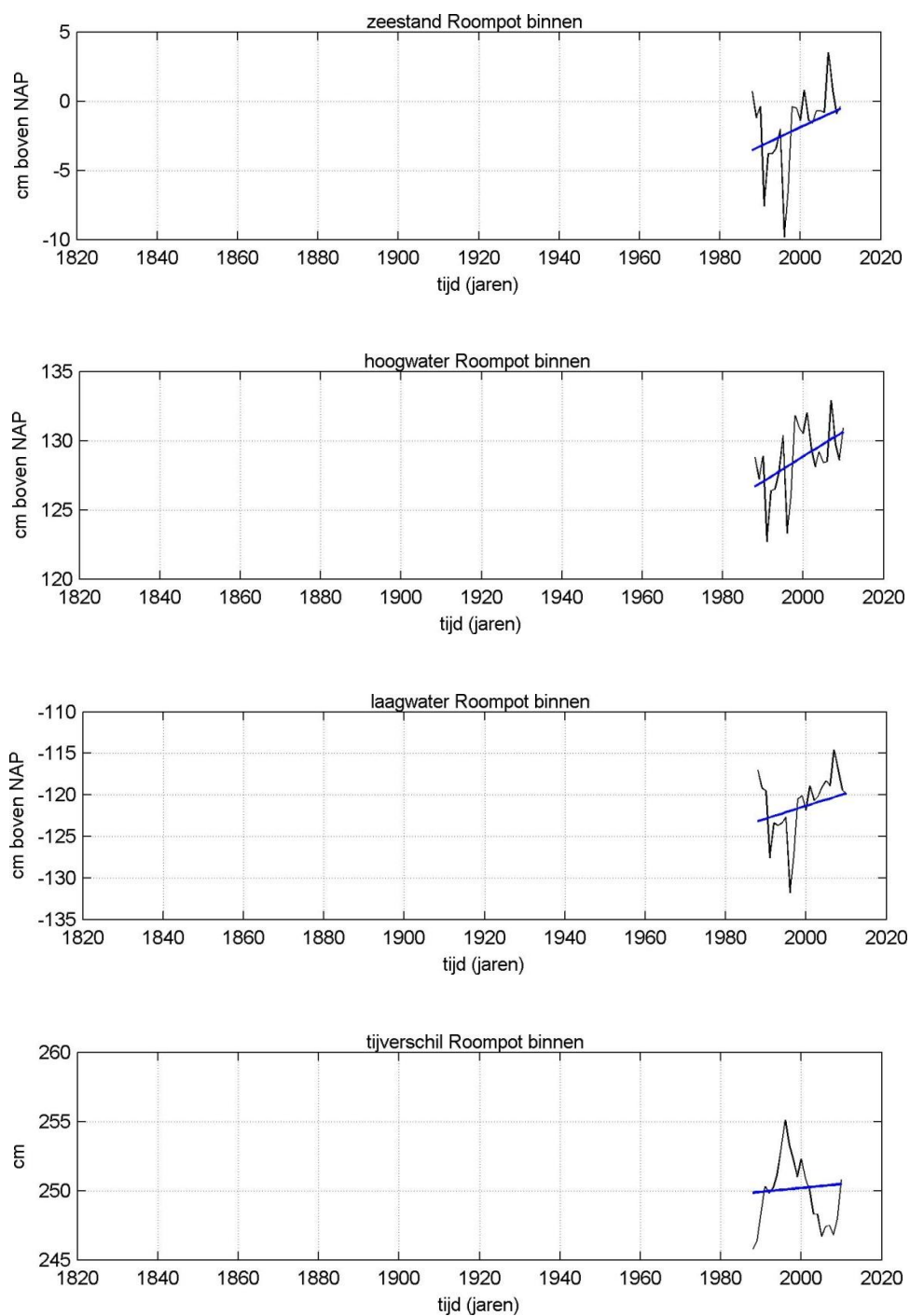
Figuur C.7 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Bergse Diepsluis west



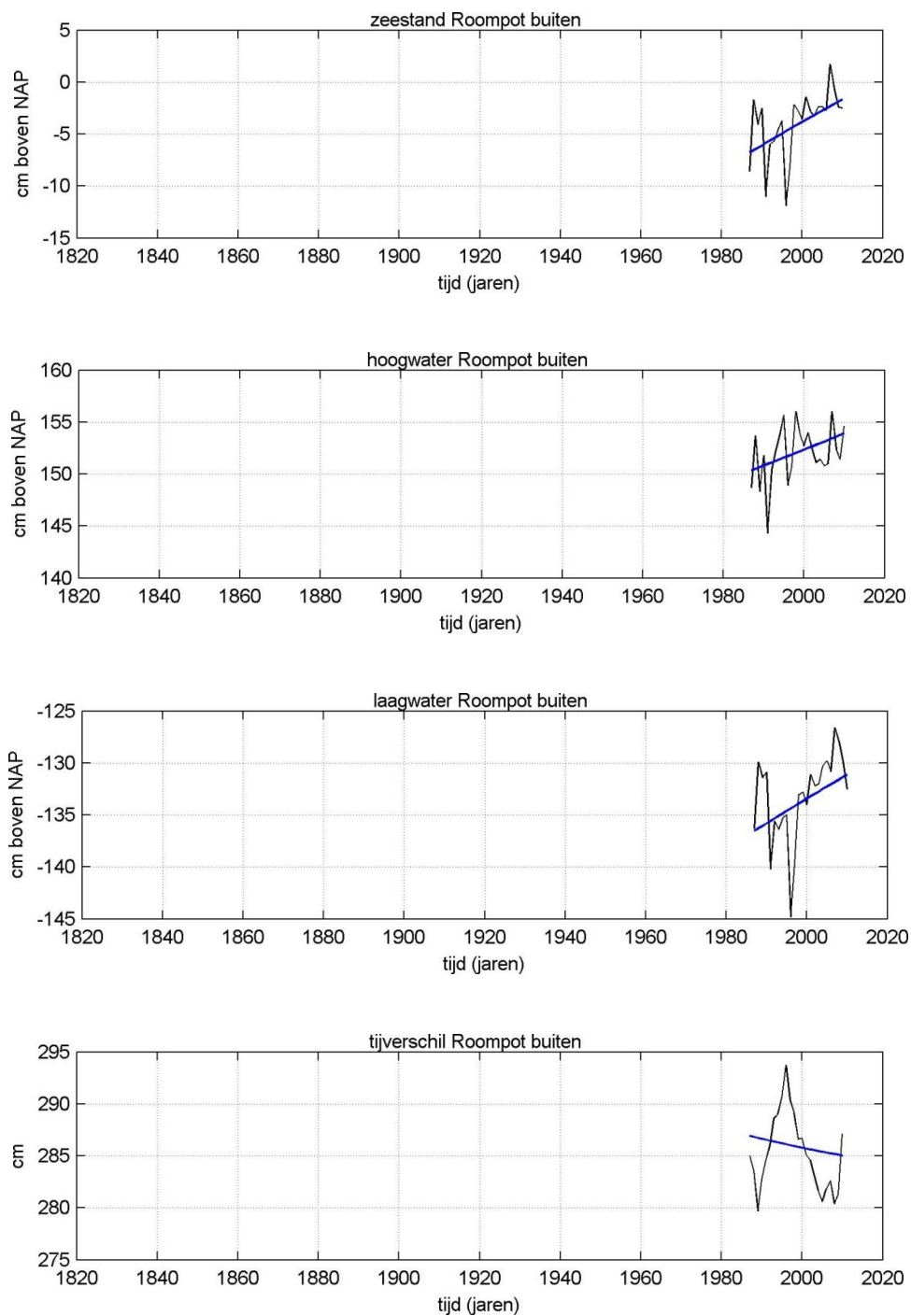
Figuur C.8 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Stavenisse
Analyseperiode vanaf 1988



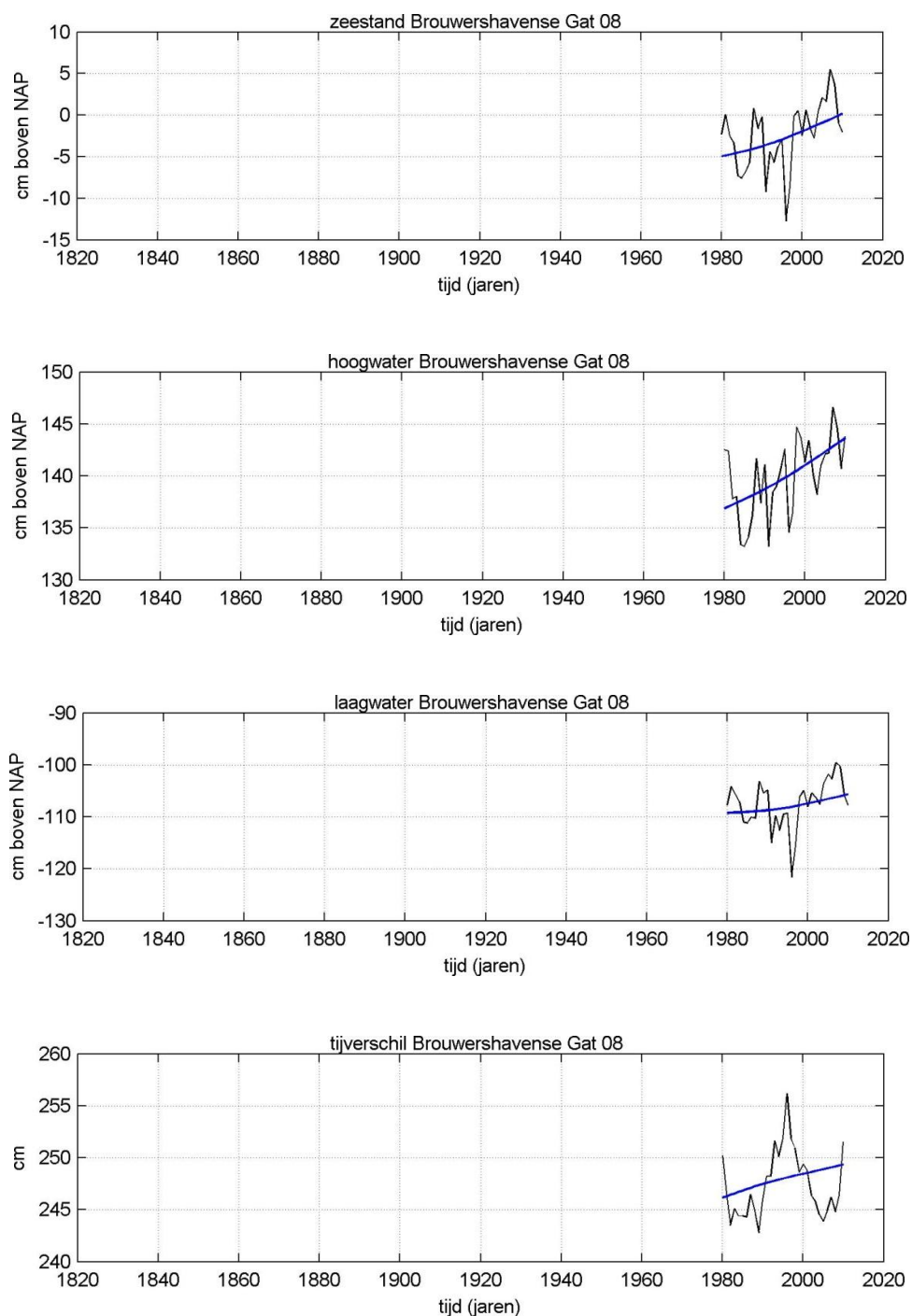
Figuur C.9 Verloop jaargemiddelde zeenniveaus Krammersluizen west



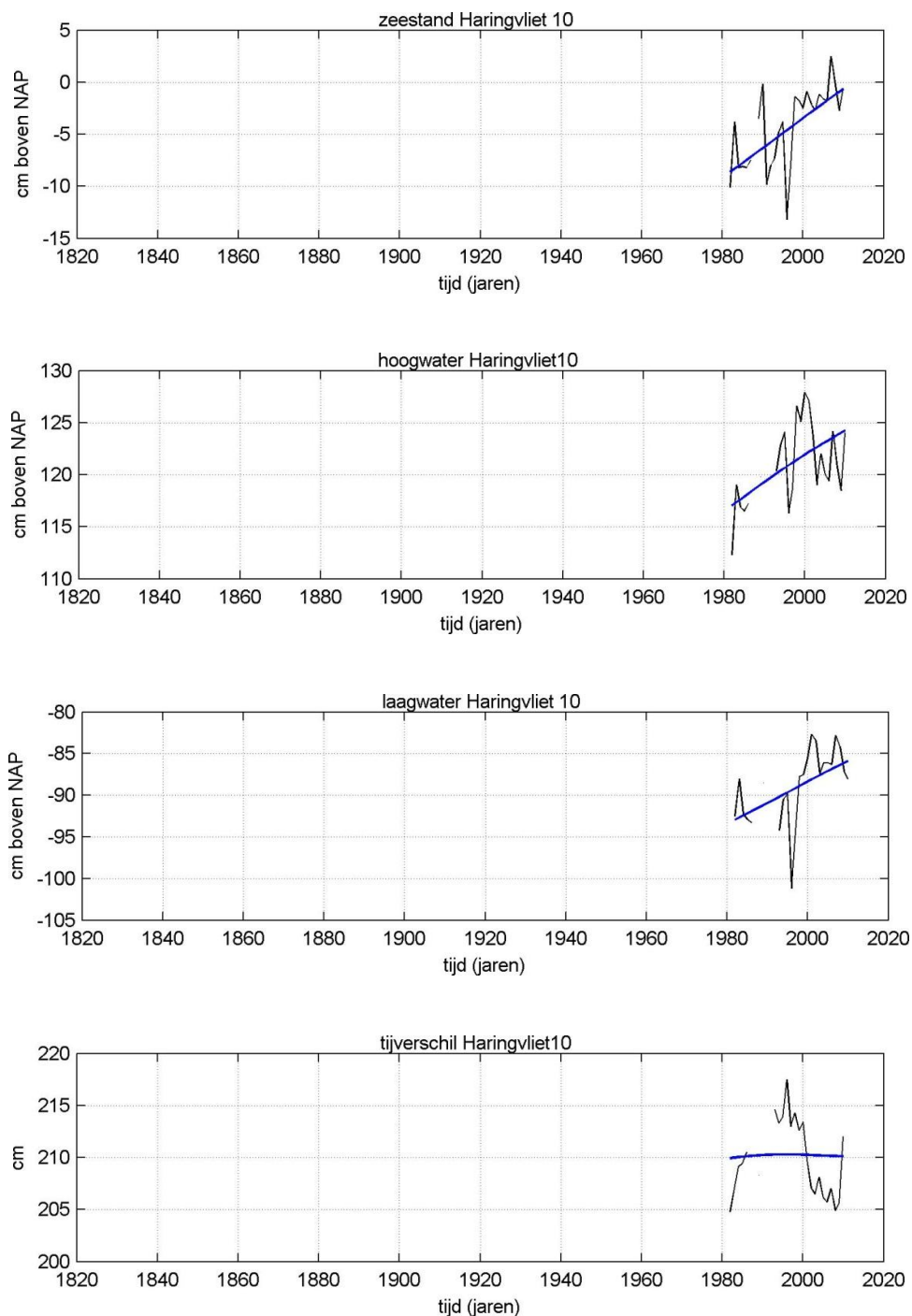
Figuur C.10 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Roombot binnen



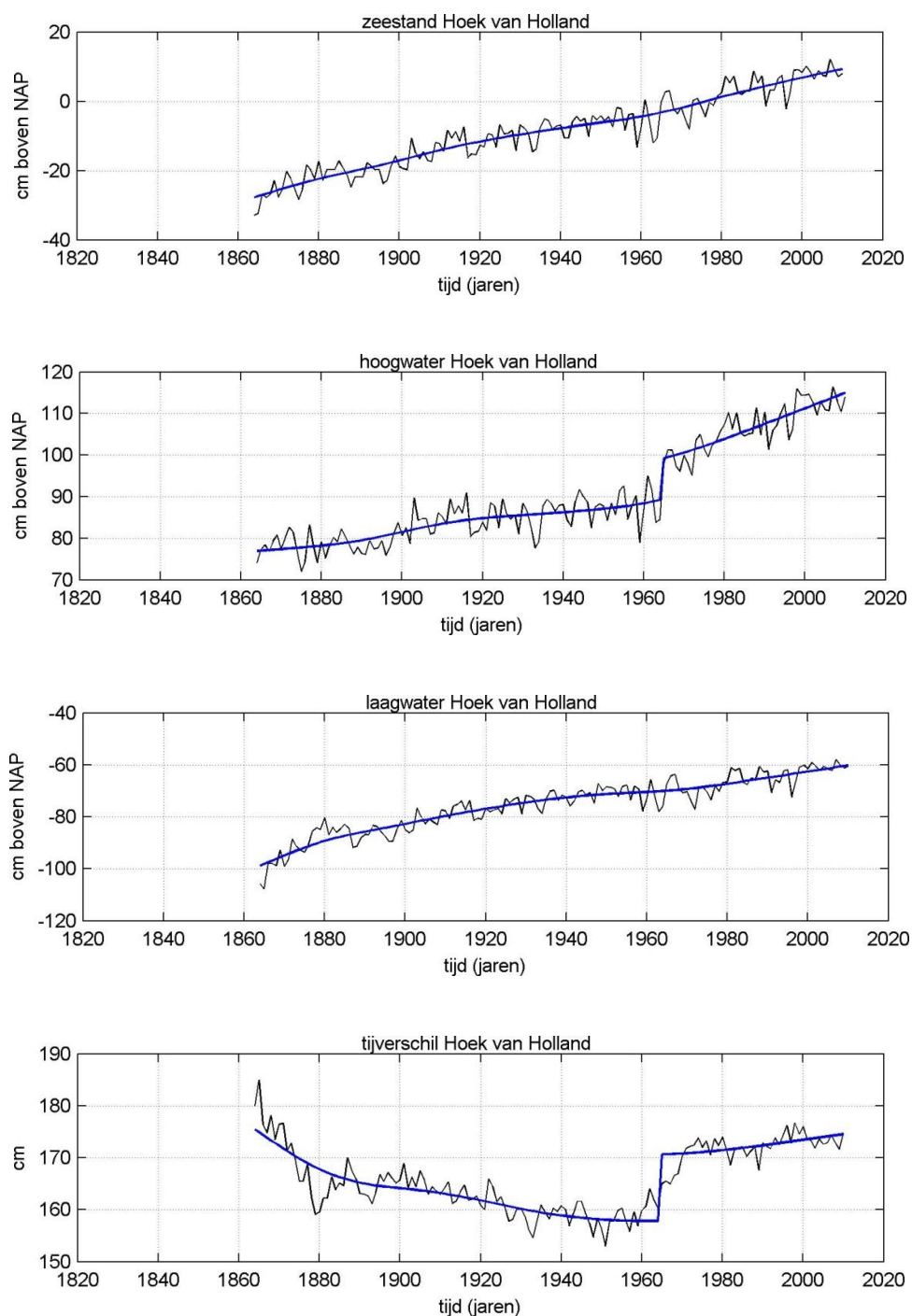
Figuur C.11 Verloop jaargemiddelde zeenniveaus Roombot buiten



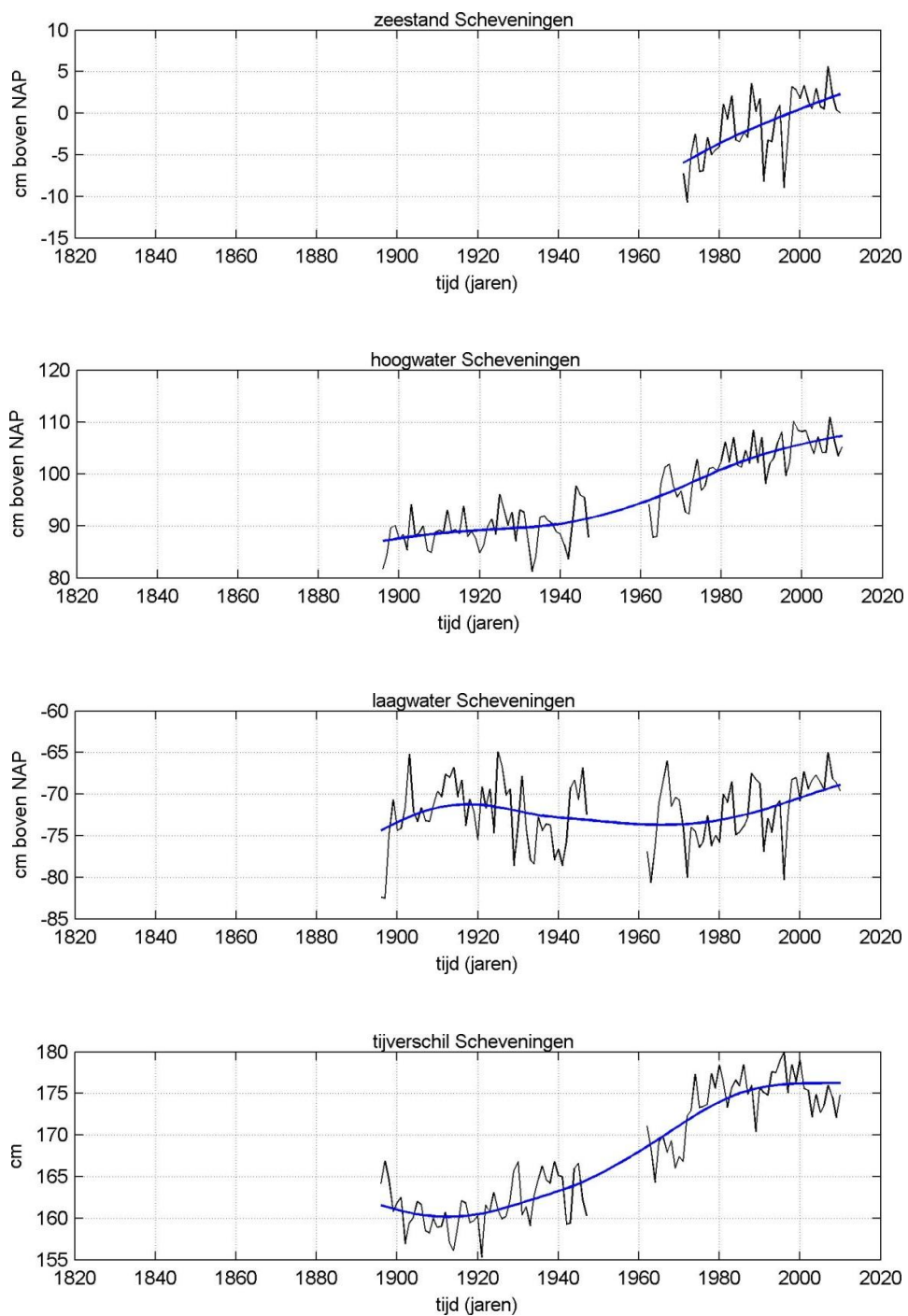
Figuur C.12 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Brouwershavense Gat 08



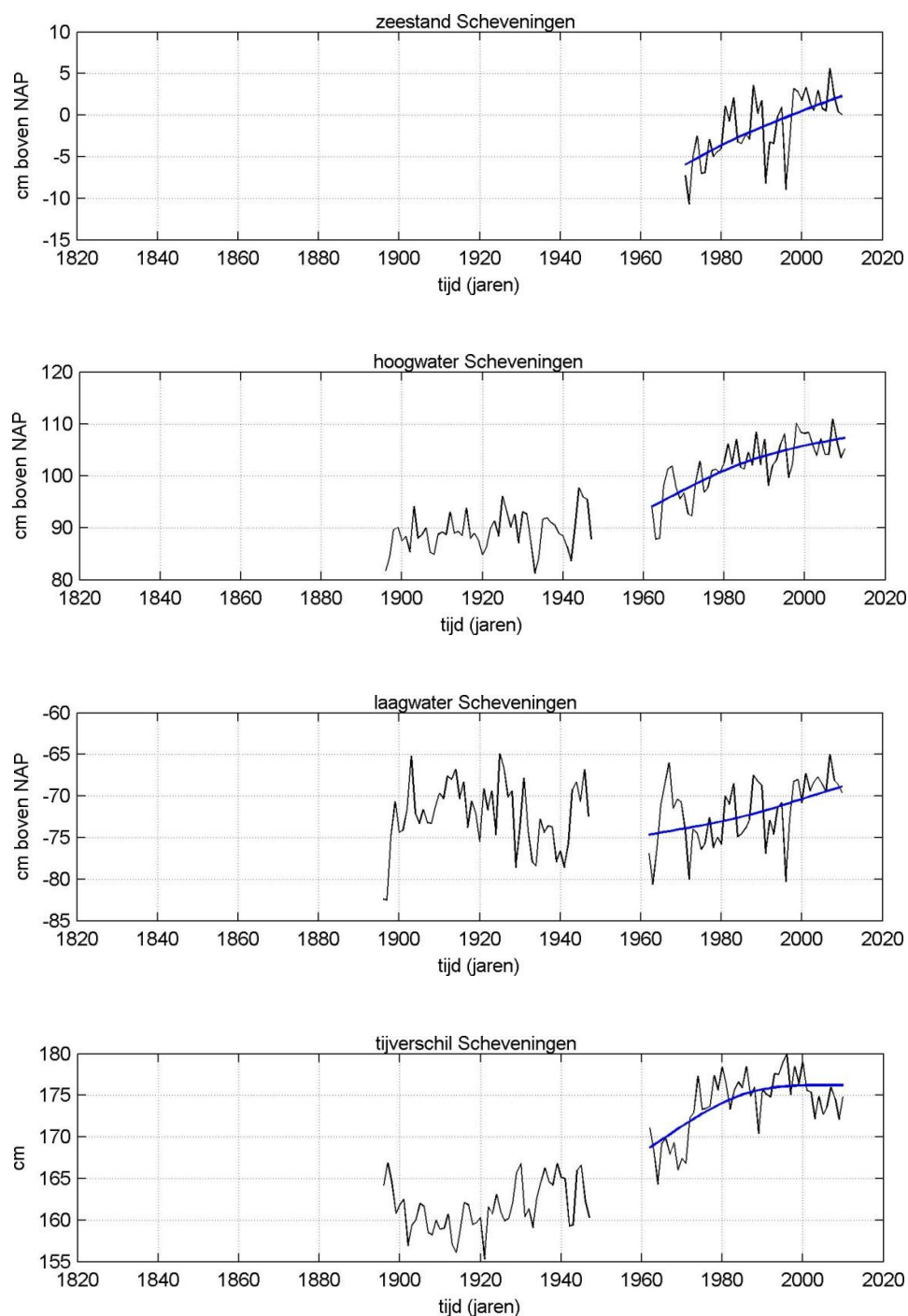
Figuur C.13 Verloop jaargemiddelde zeenniveaus Haringvliet 10



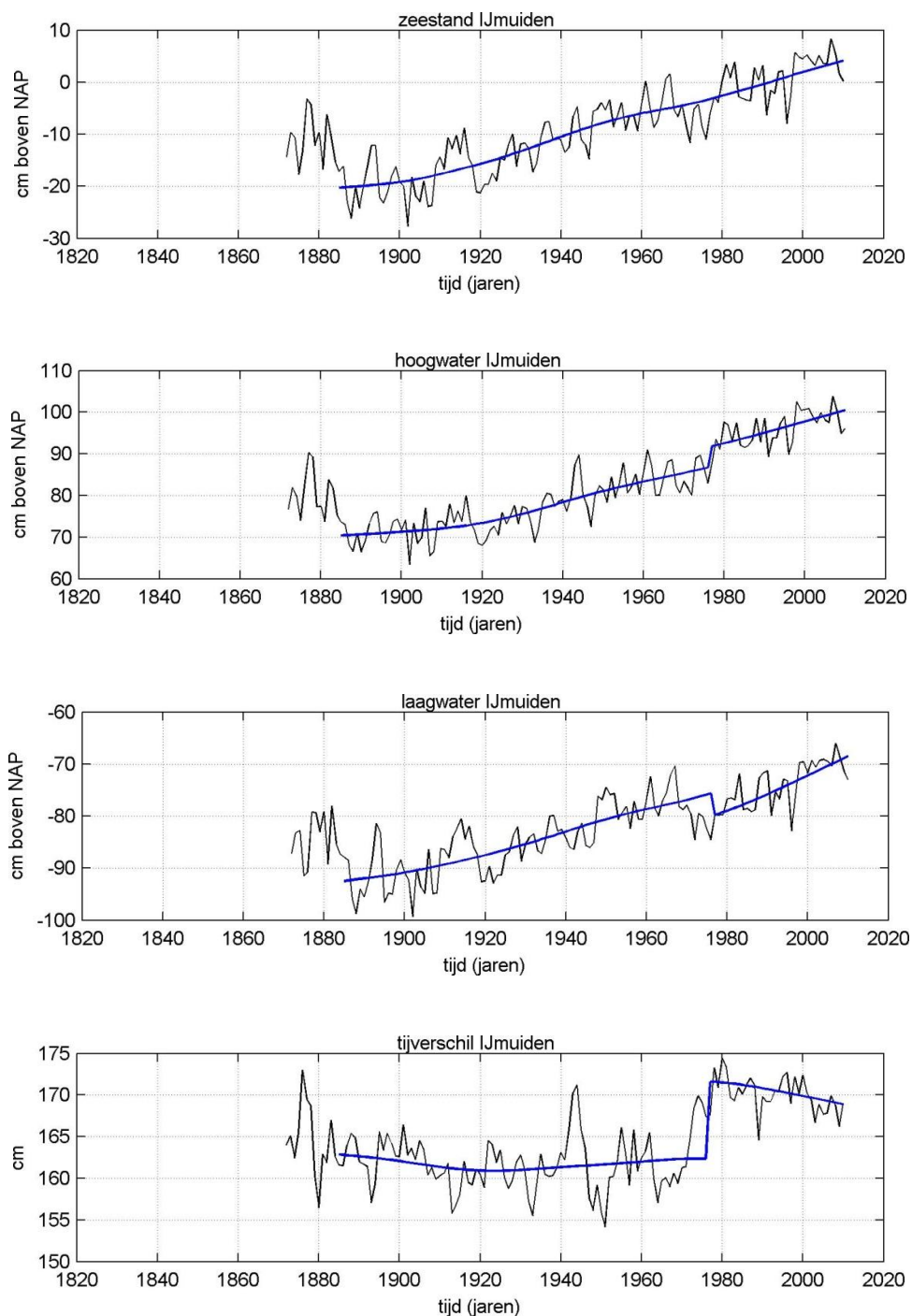
Figuur C.14 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Hoek van Holland



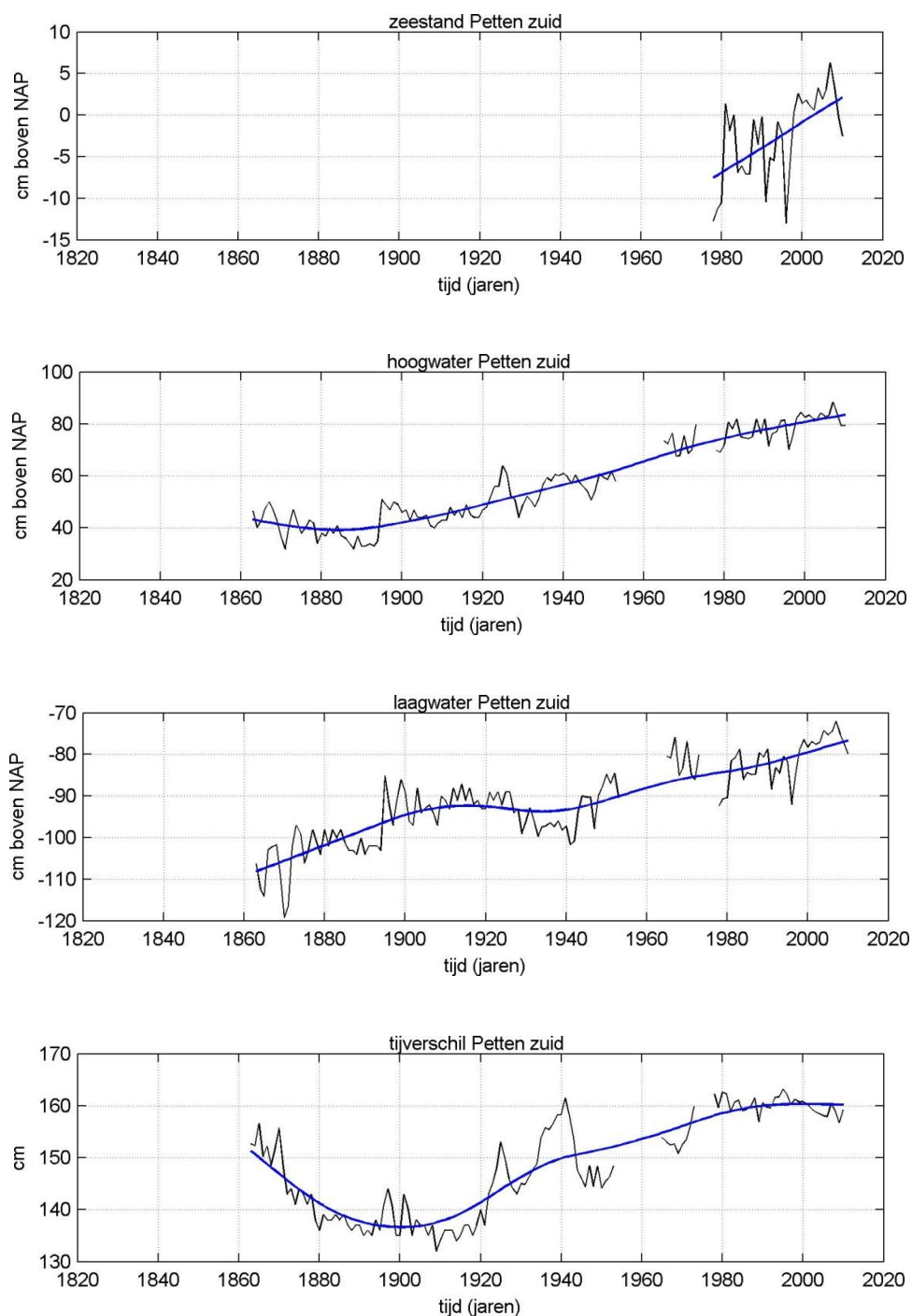
Figuur C.15a Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Scheveningen



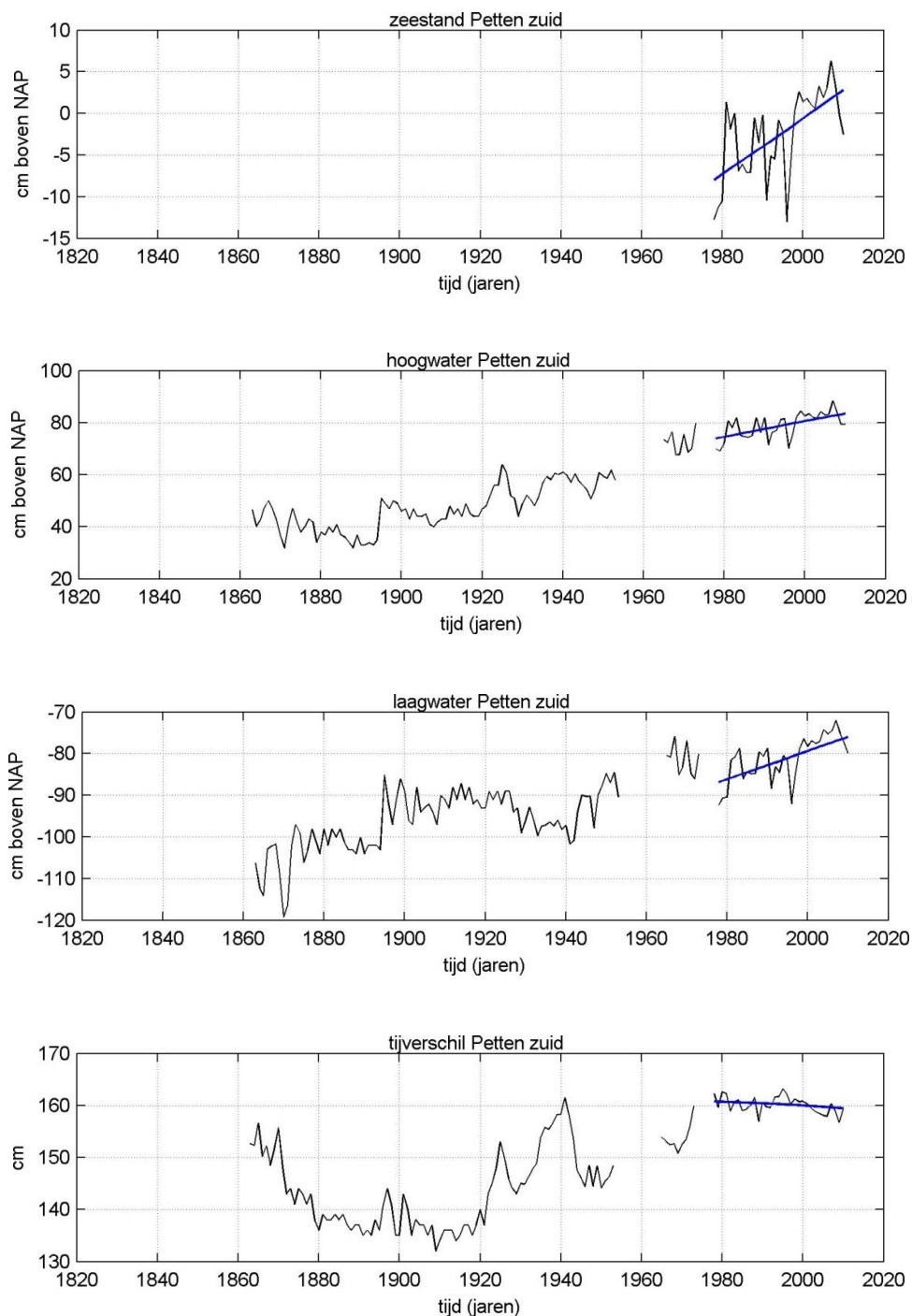
Figuur C.15b Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Scheveningen
Analyseperiode vanaf 1971 voor de zeestand
en vanaf 1962 voor hoogwater, laagwater en tijverschil.



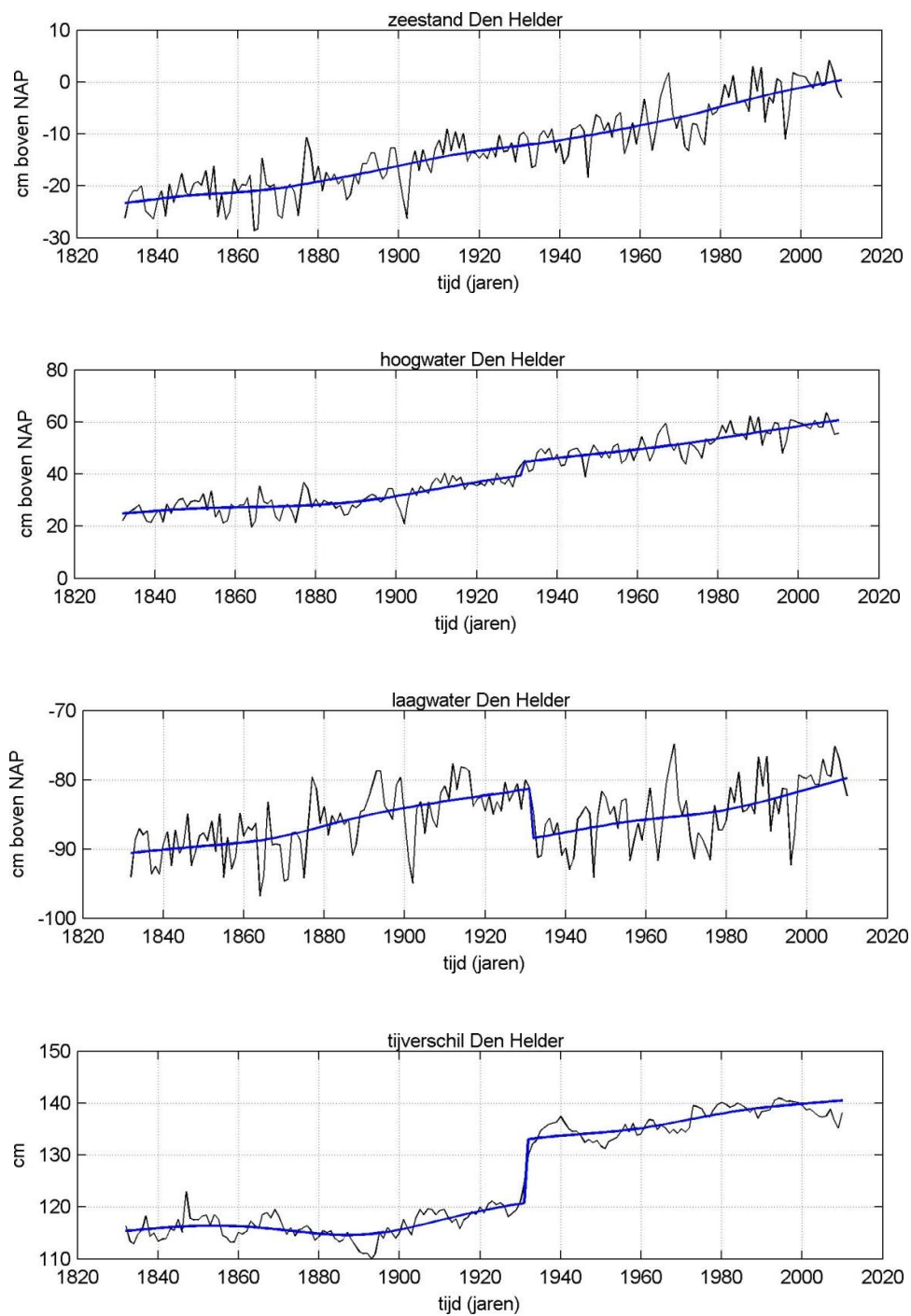
Figuur C.16 Verloop jaargemiddelde zeenniveaus IJmuiden
Analyseperiode vanaf 1885



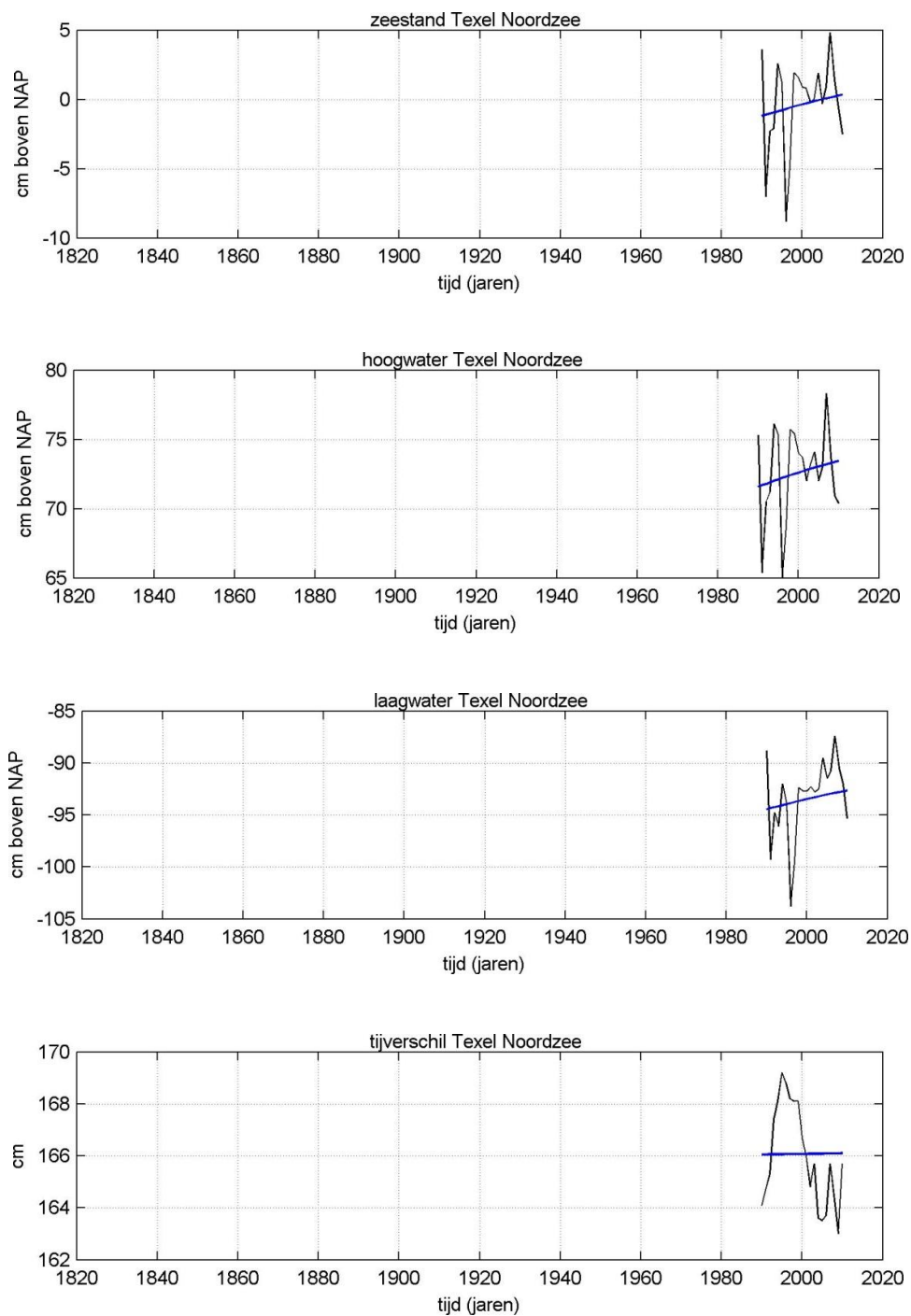
Figuur C.17a Verloop jaargemiddelde zeenniveaus Petten zuid



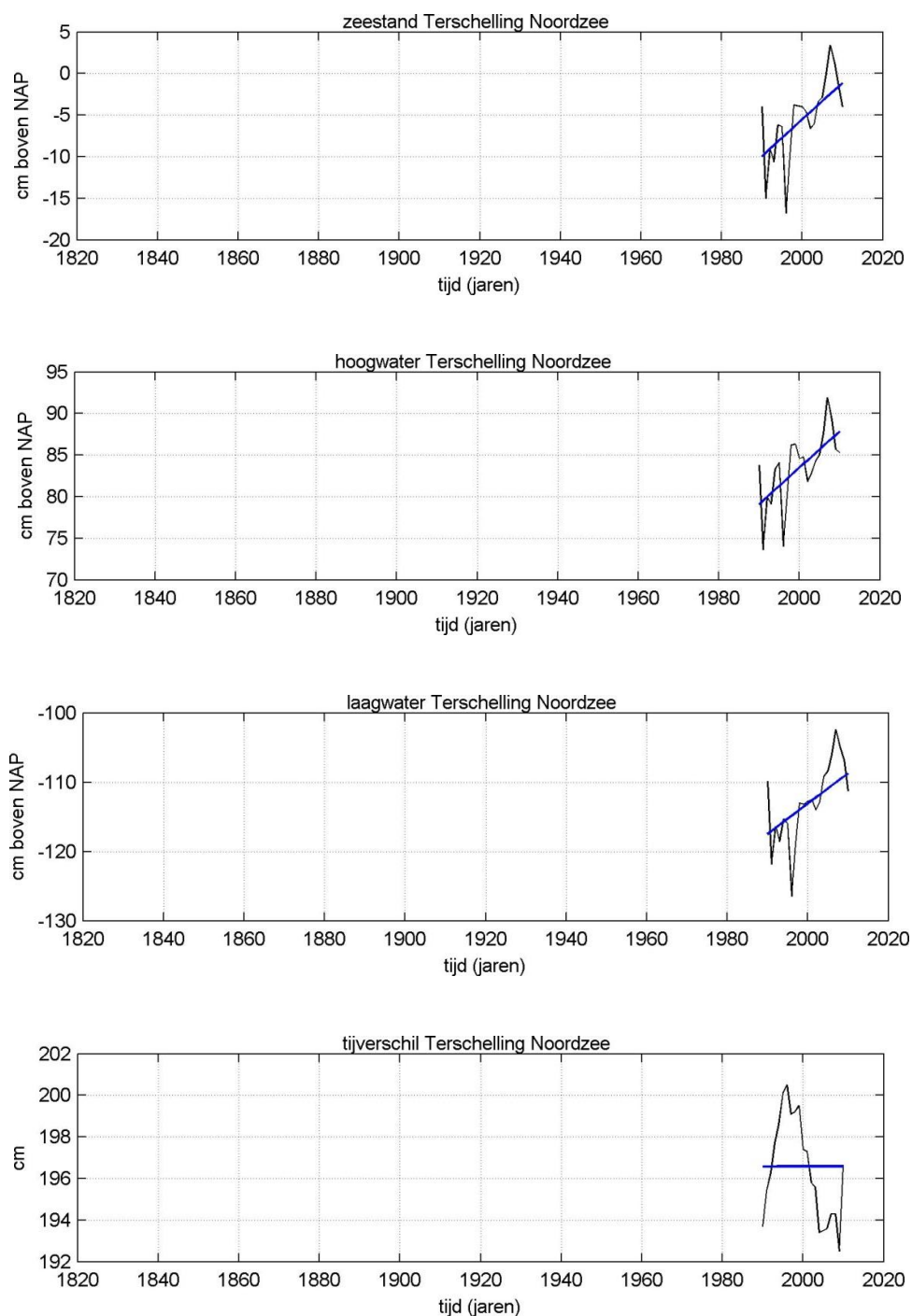
Figuur C.17b Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Petten zuid
Analyseperiode vanaf 1978



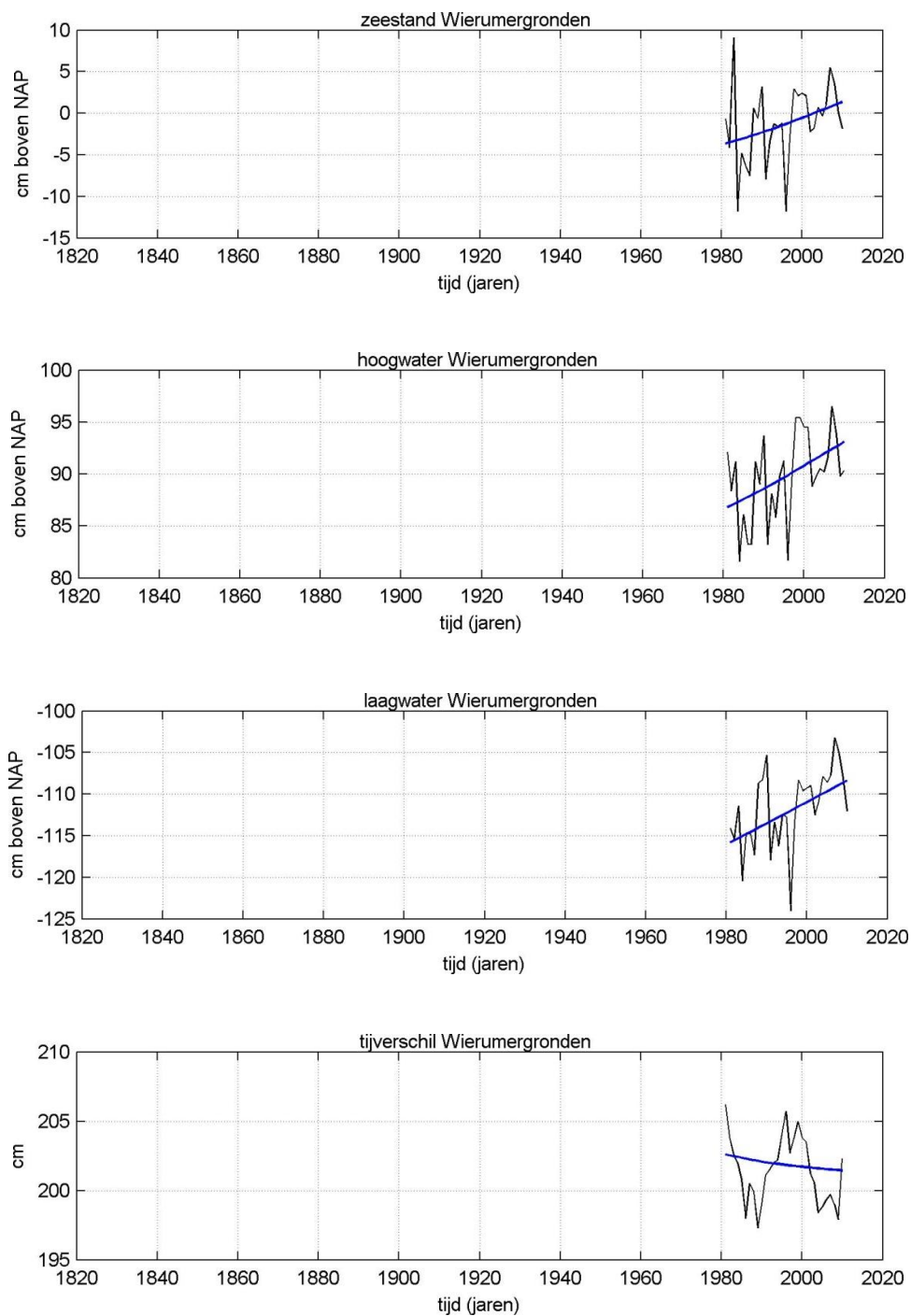
Figuur C.18 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Den Helder



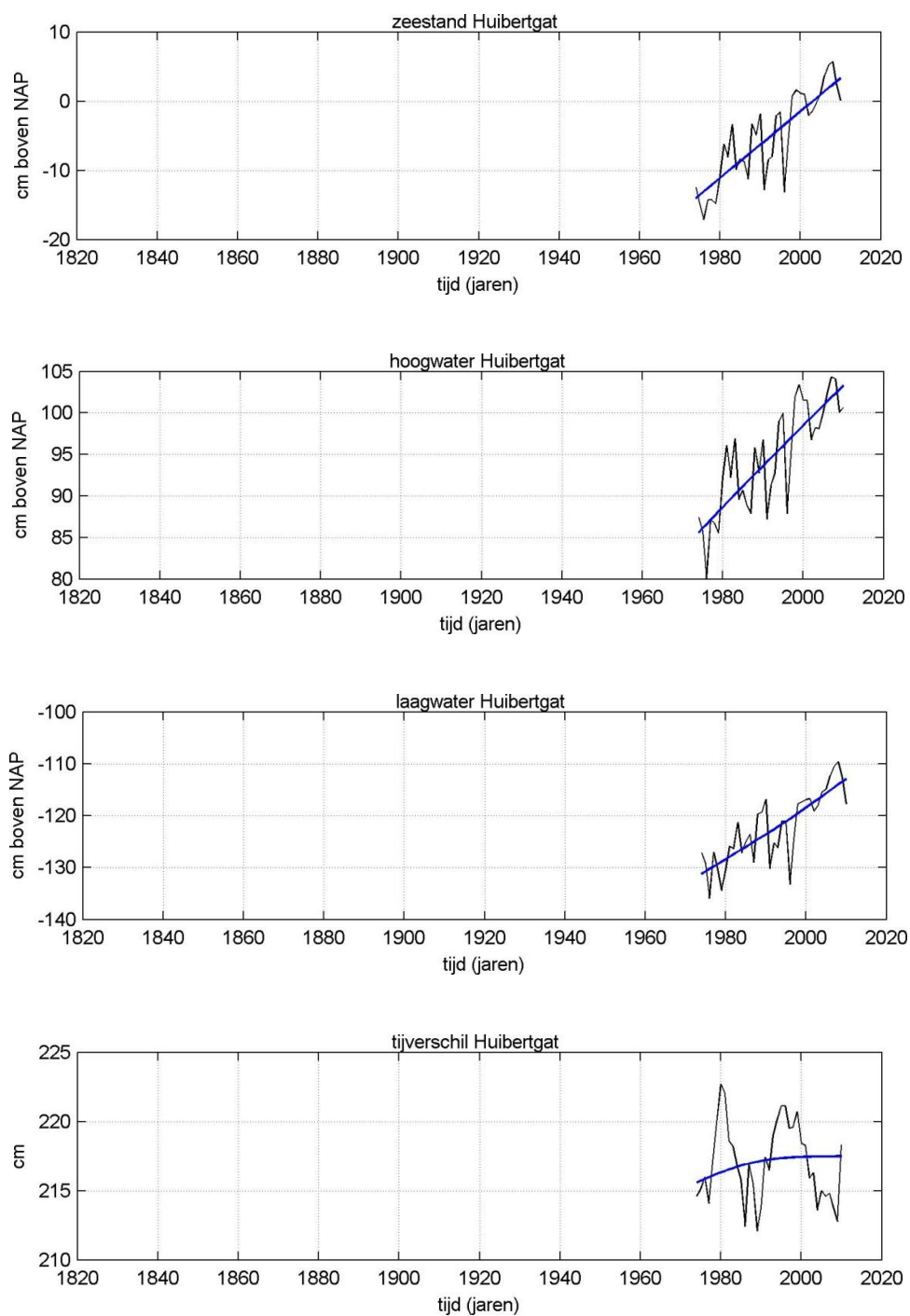
Figuur C.19 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Texel Noordzee



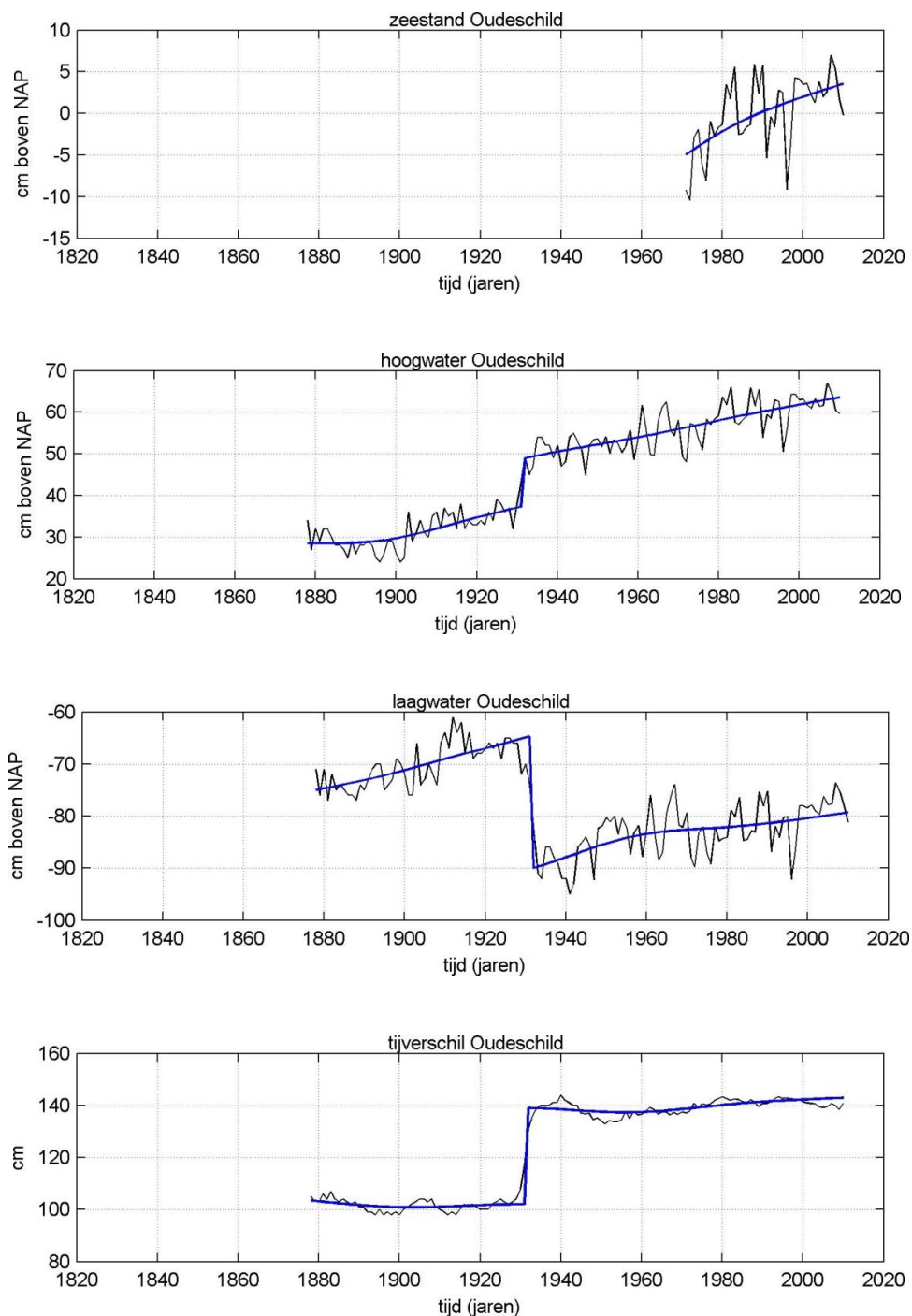
Figuur C.20 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Terschelling Noordzee



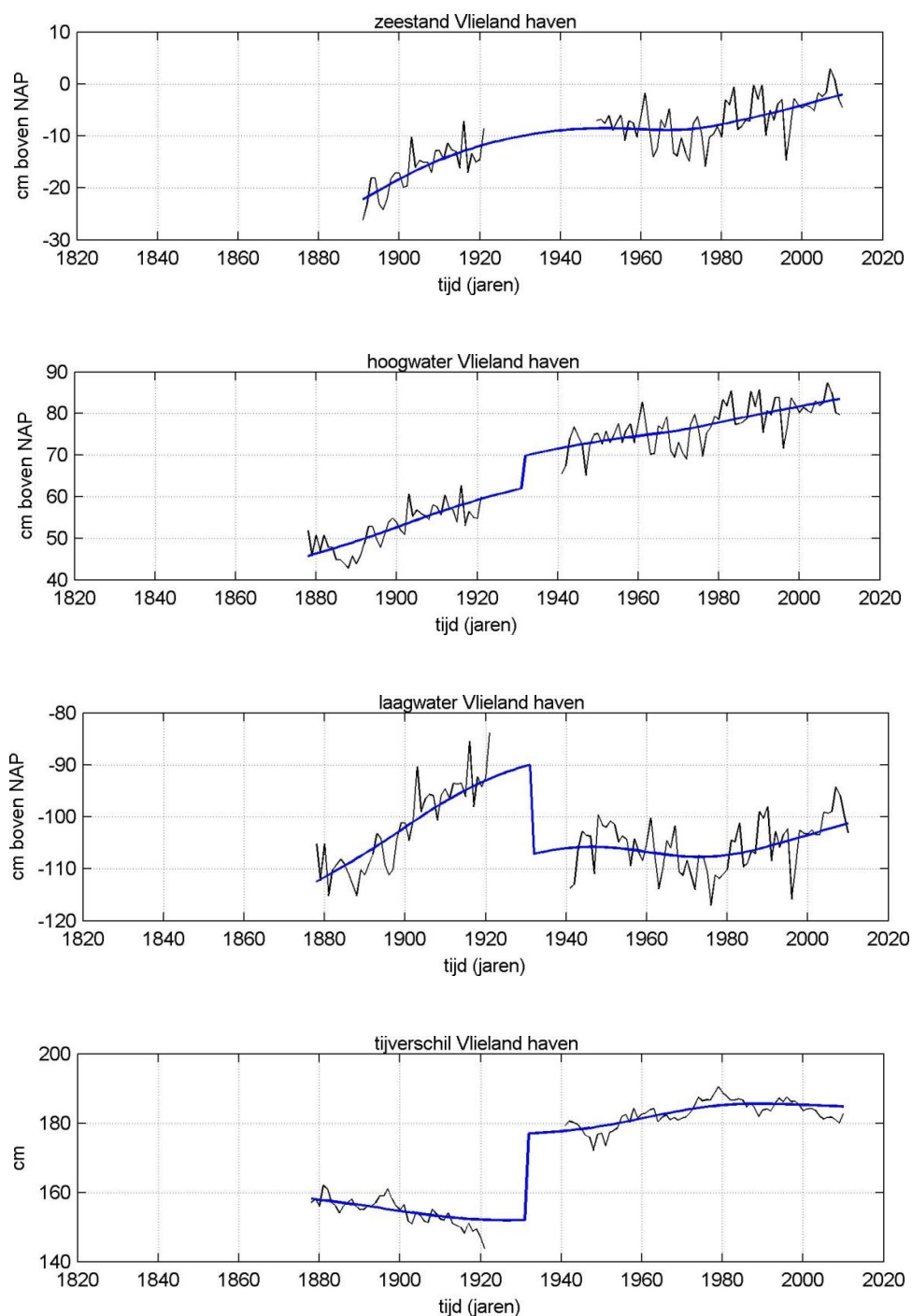
Figuur C.21 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Wierumergronden



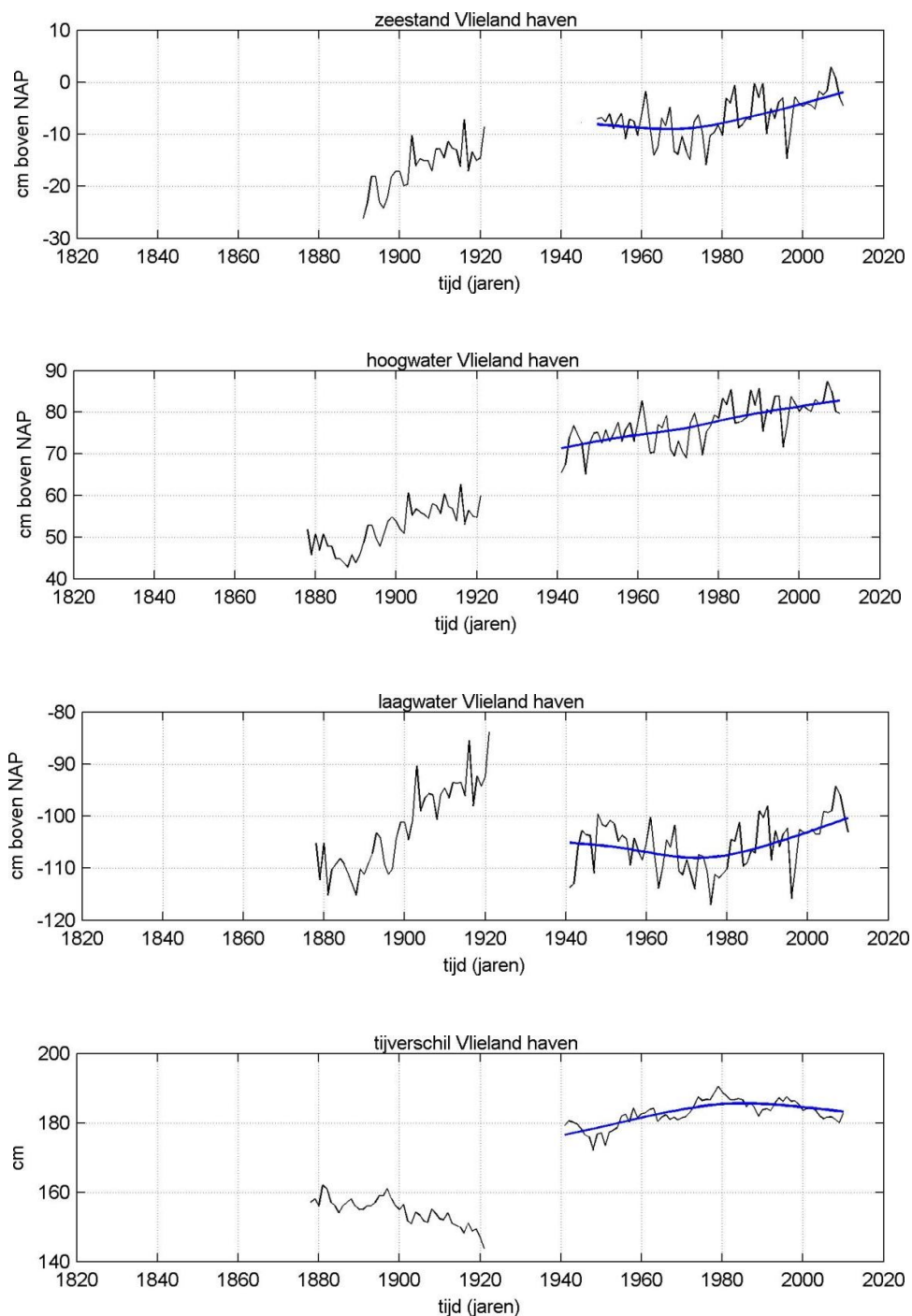
Figuur C.22 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Huibertgat



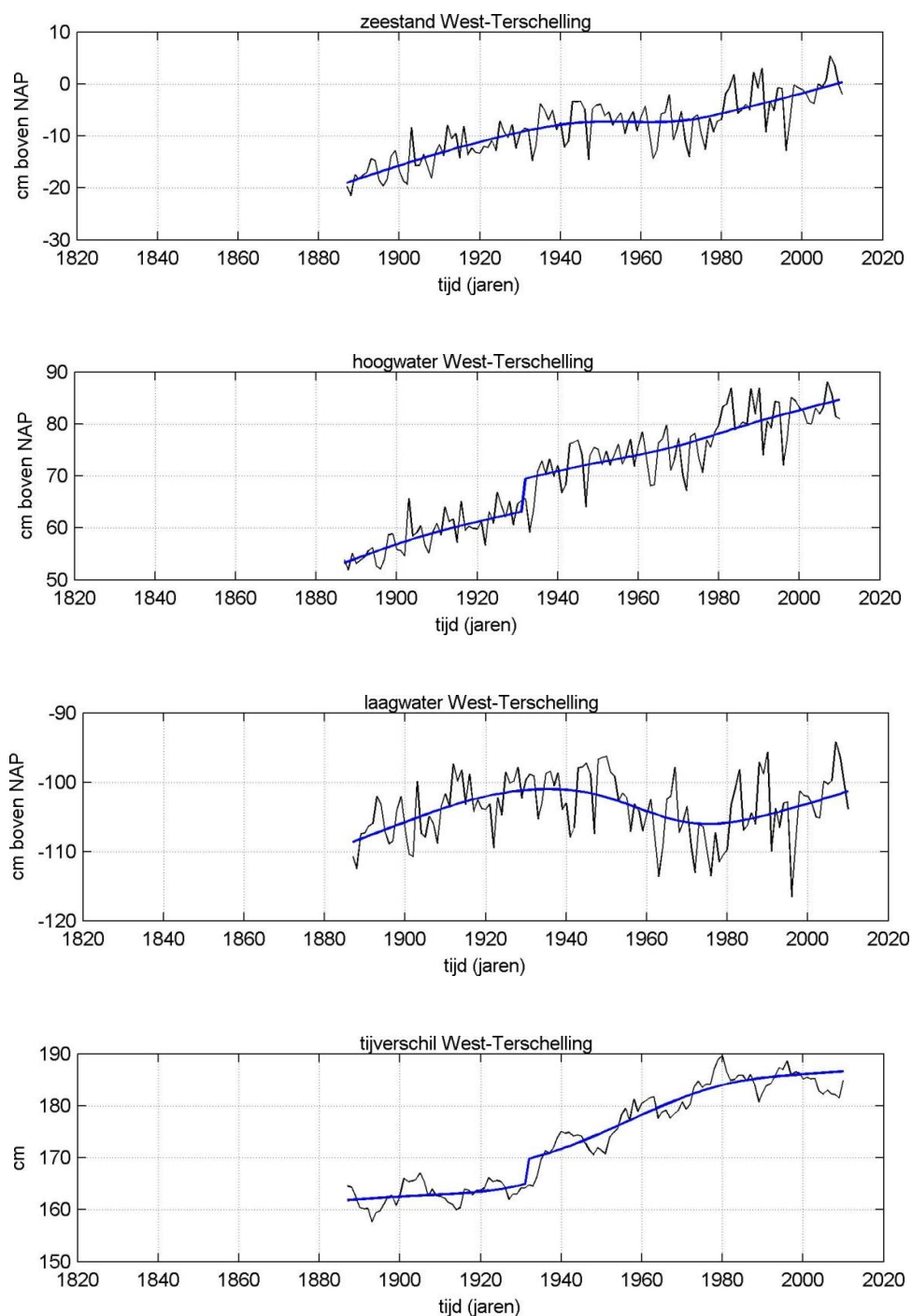
Figuur C.23 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Oude Schild



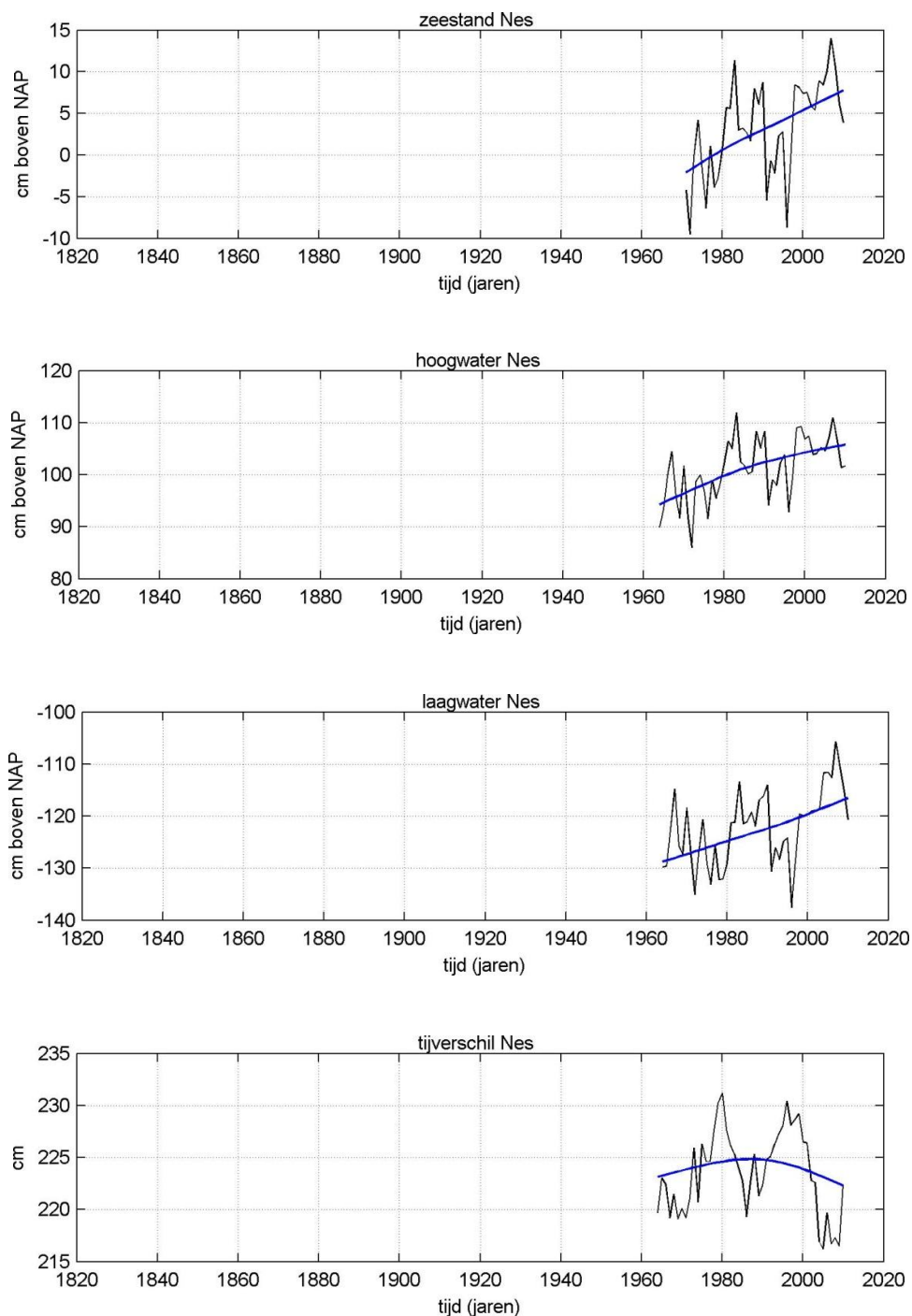
Figuur C.24a Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Vlieland haven



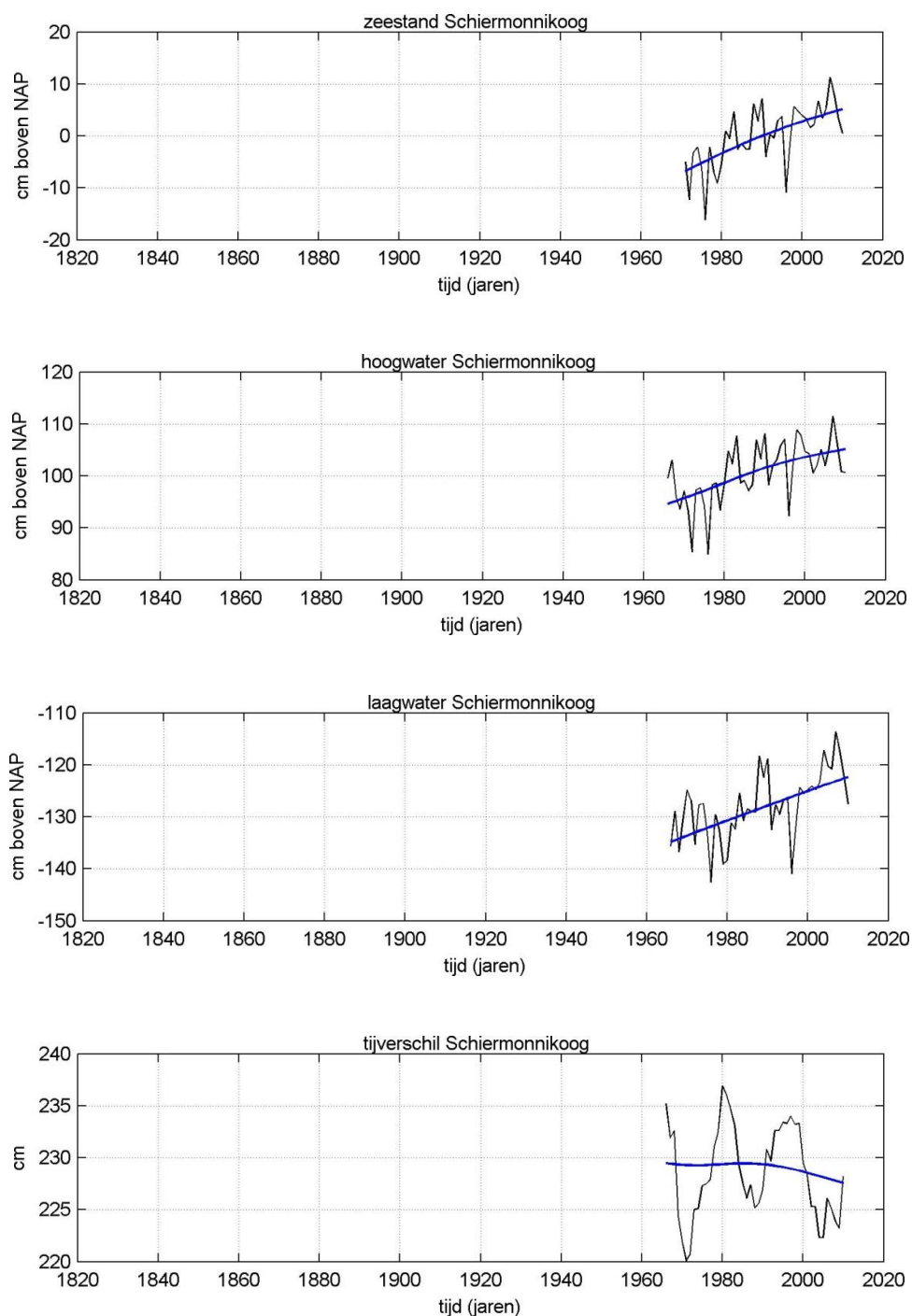
Figuur C.24b Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Vlieland haven
Analyseperiode vanaf 1949 voor de zeestand
en vanaf 1941 voor hoogwater, laagwater en tijverschil



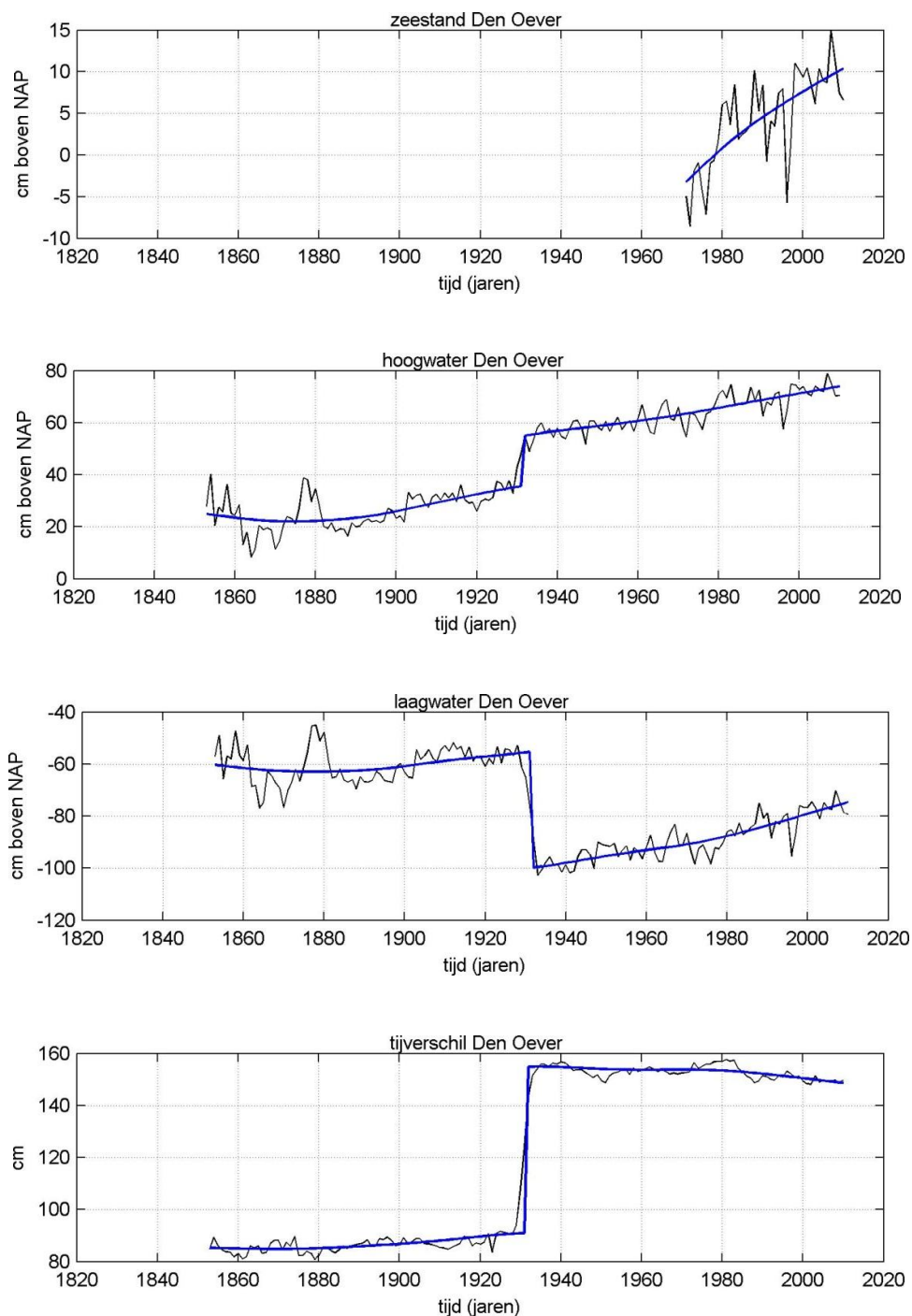
Figuur C.25 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus West-Terschelling



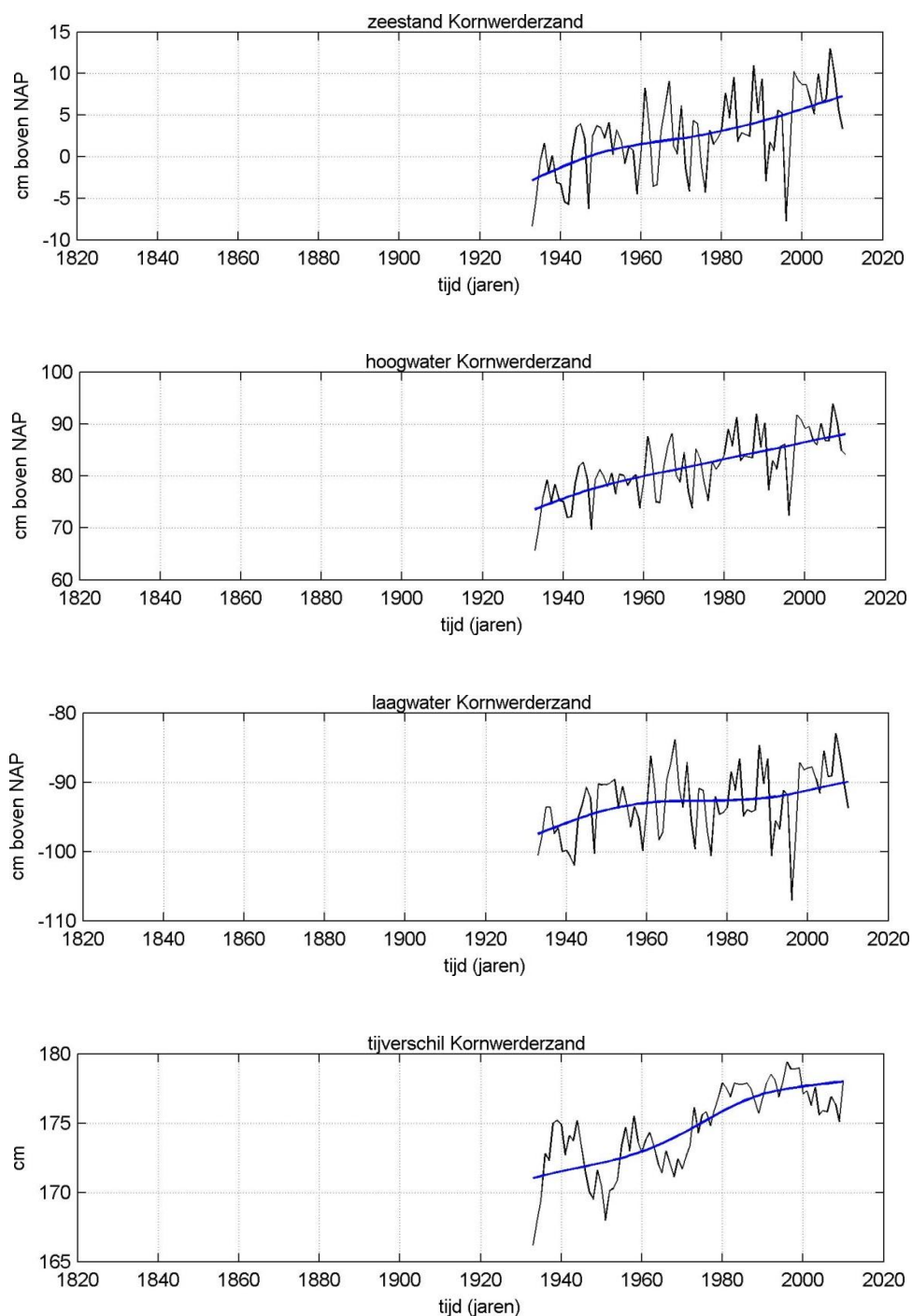
Figuur C.26 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Nes



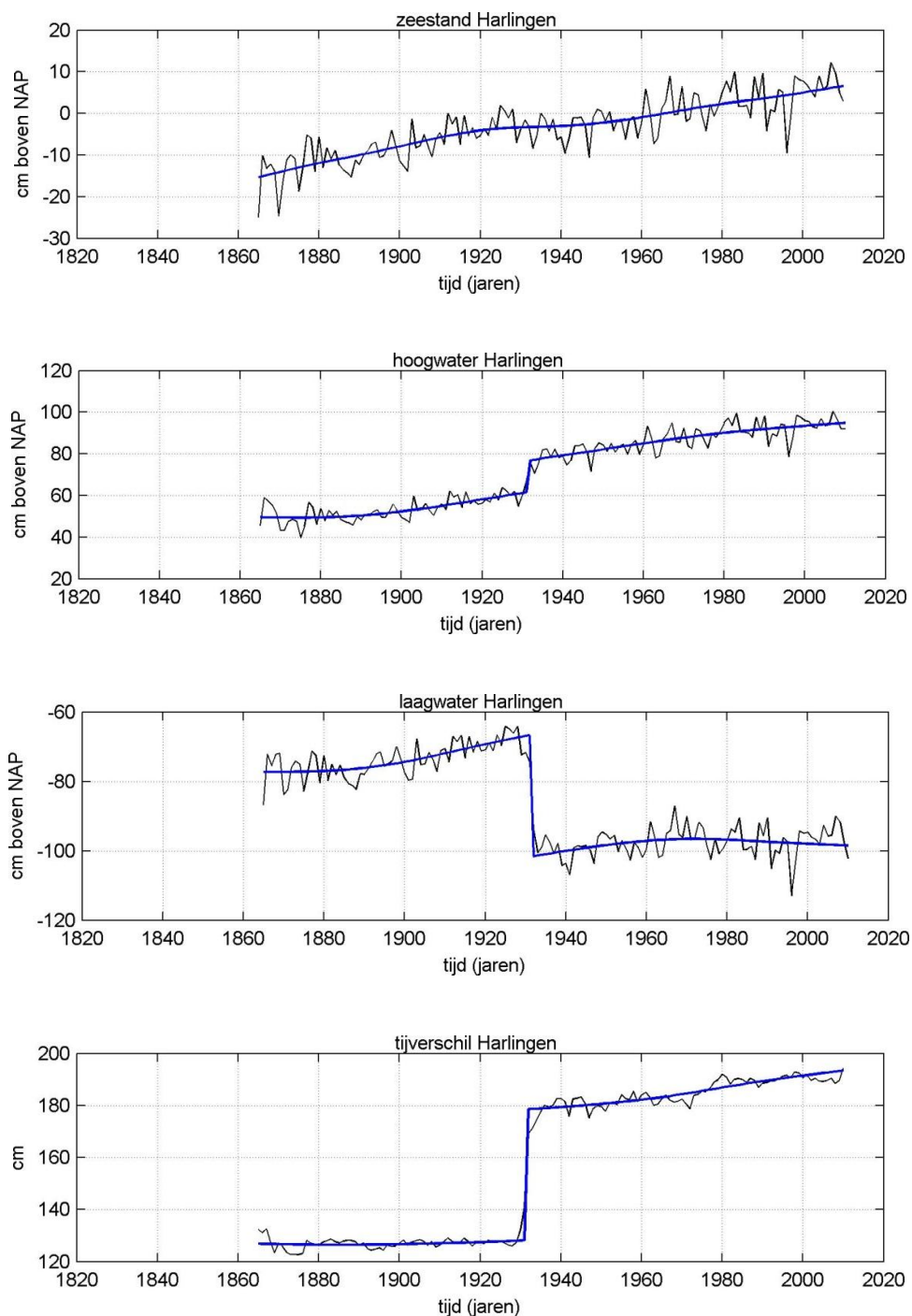
Figuur C.27 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Schiermonnikoog



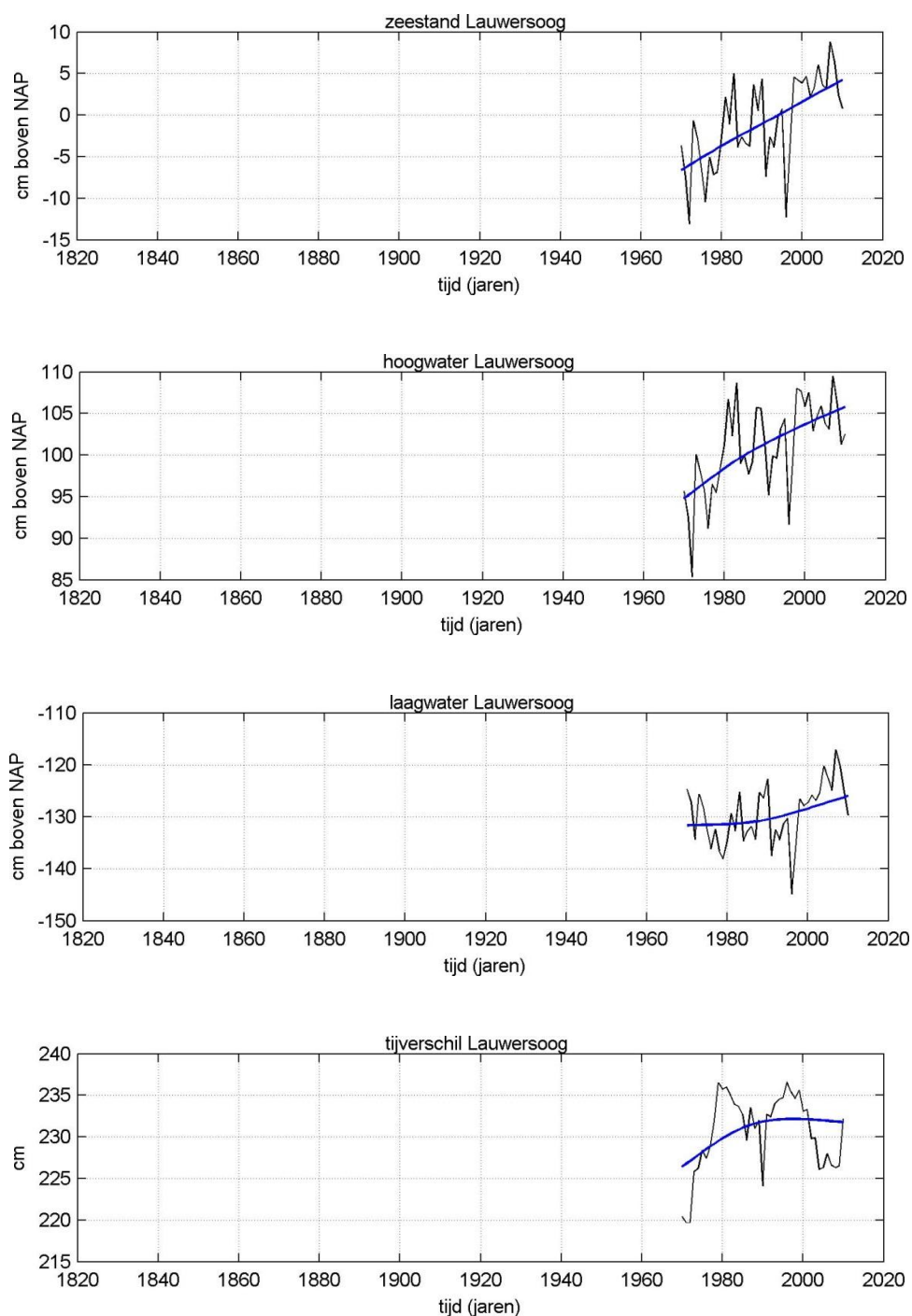
Figuur C.28 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Den Oever



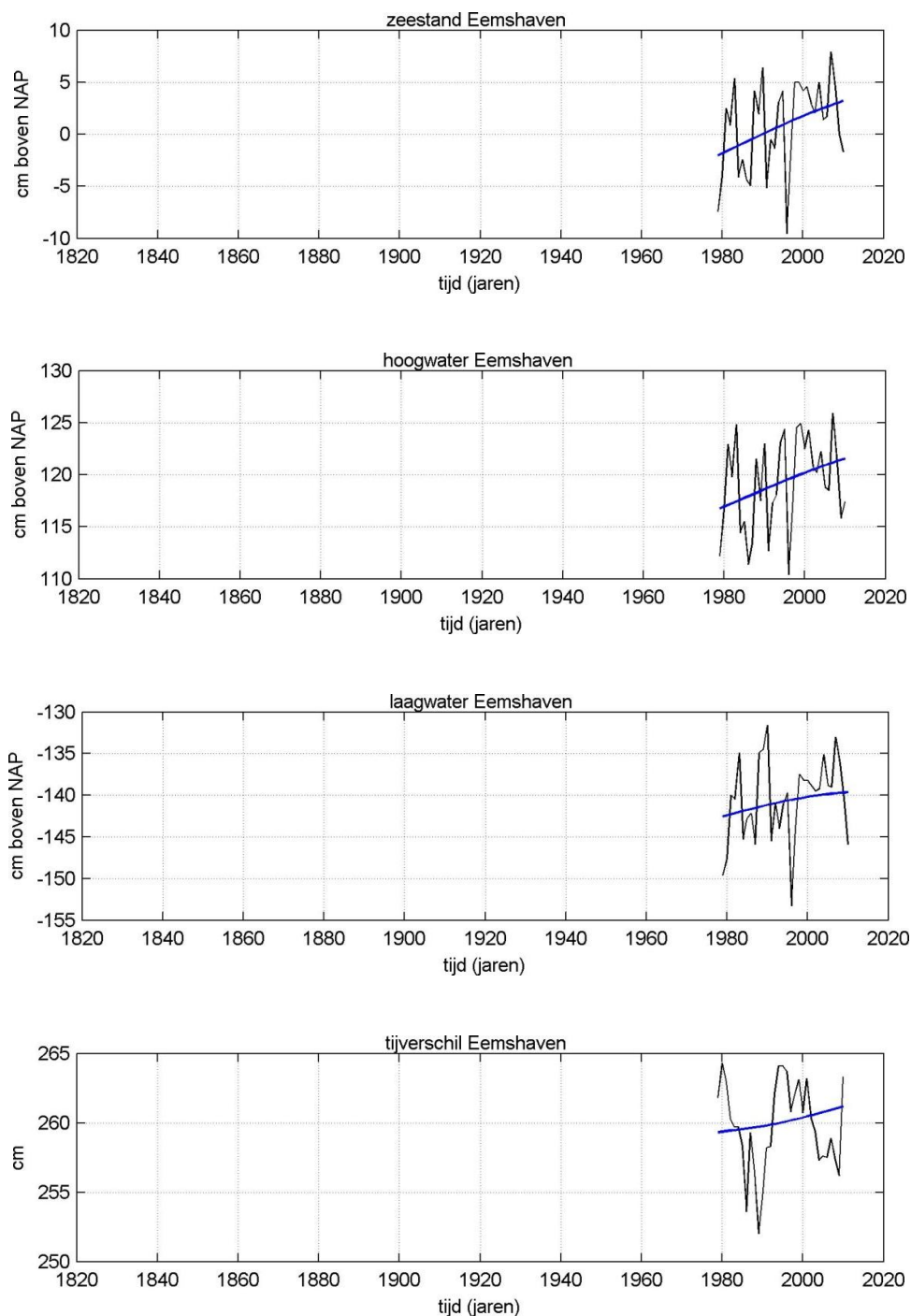
Figuur C.29 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Kornwerderzand



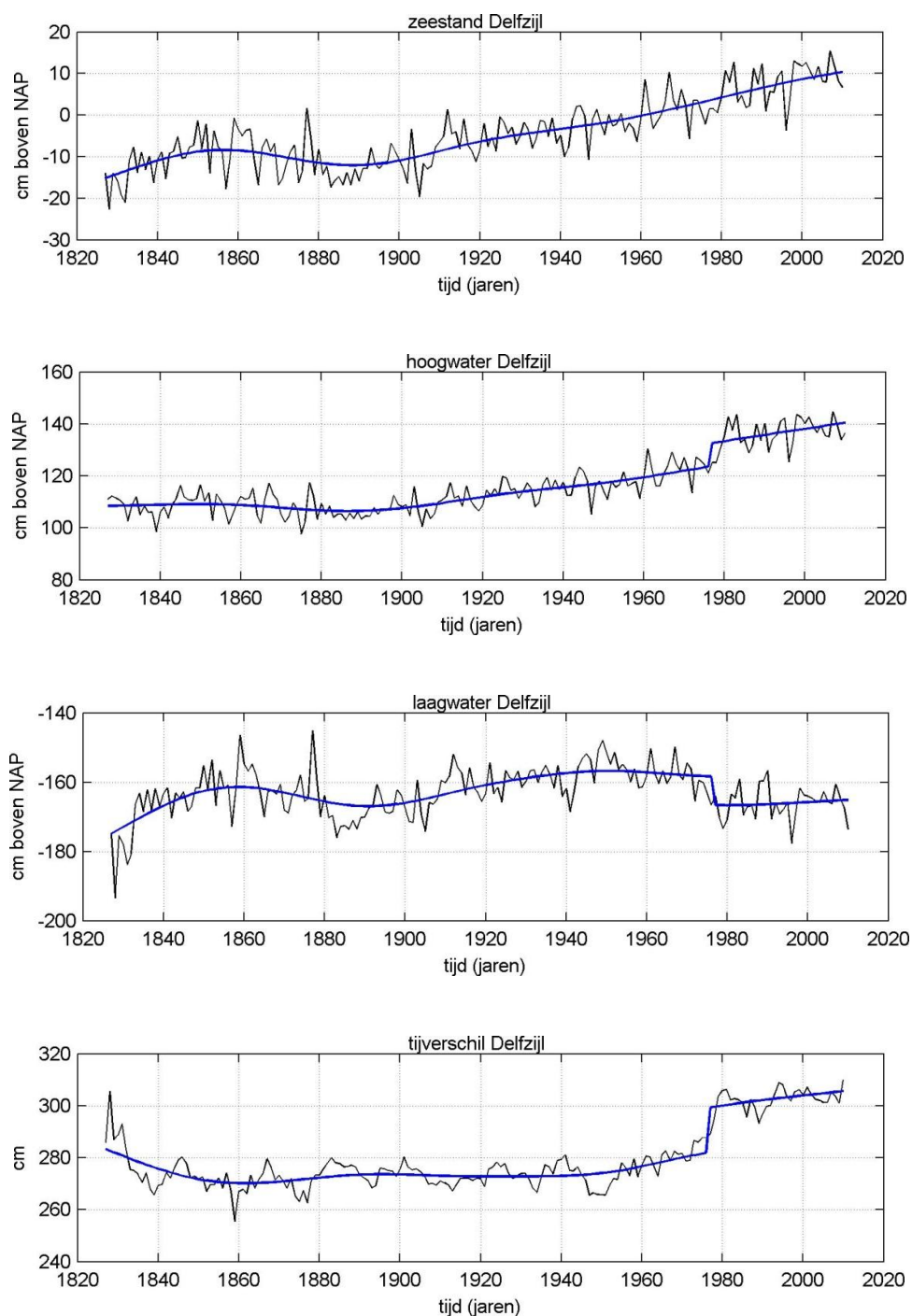
Figuur C.30 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Harlingen



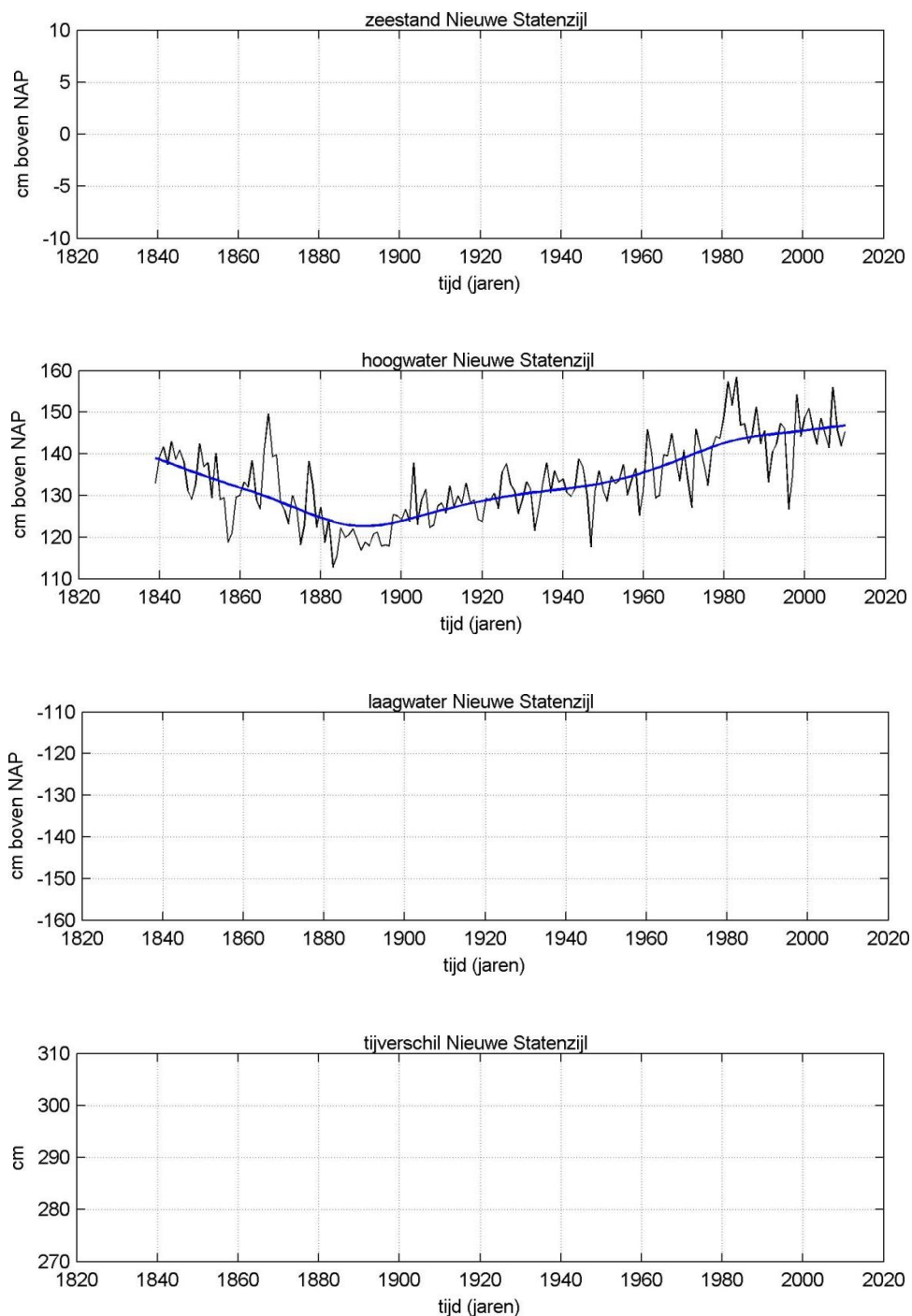
Figuur C.31 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Lauwersoog



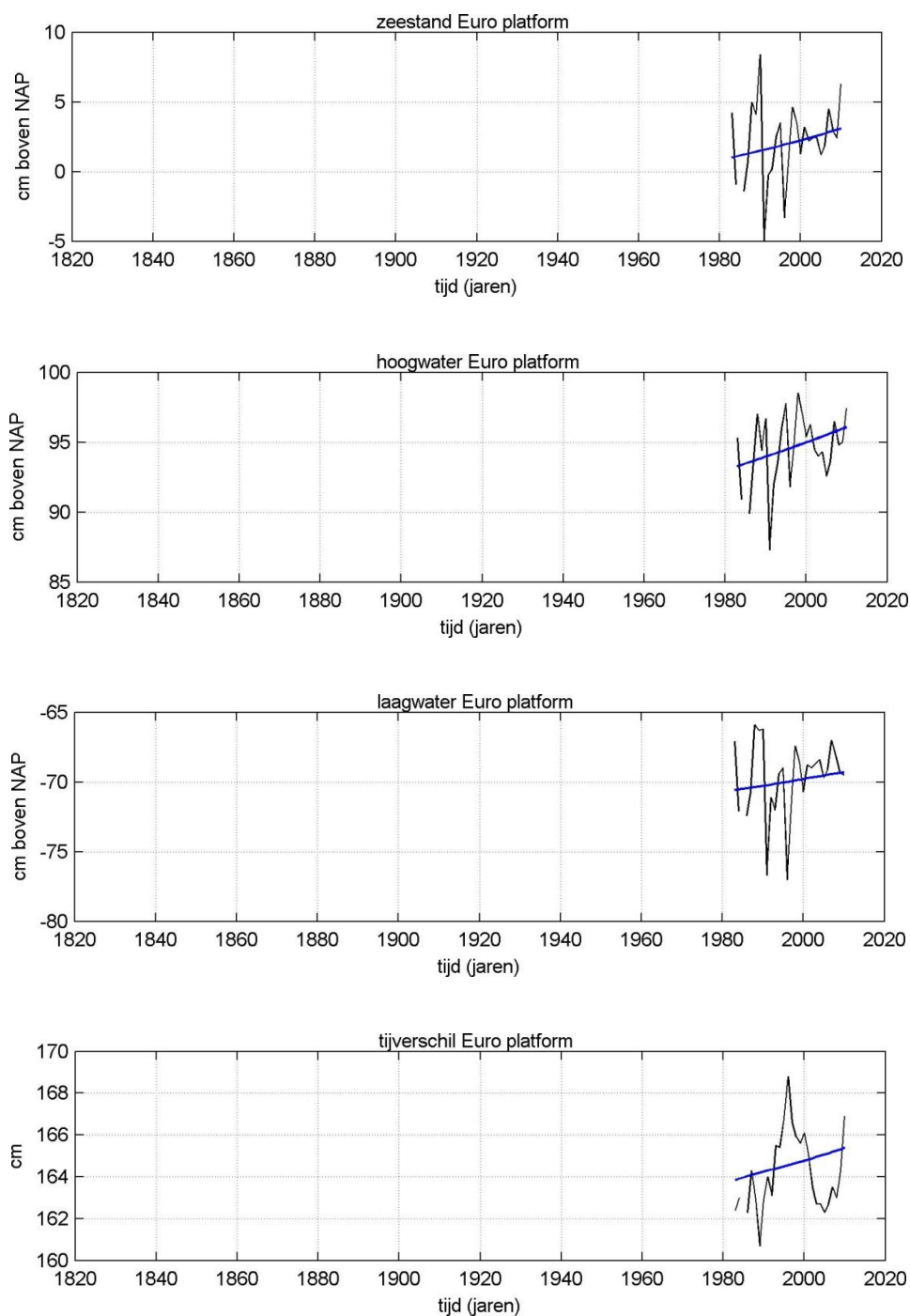
Figuur C.32 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Eemshaven



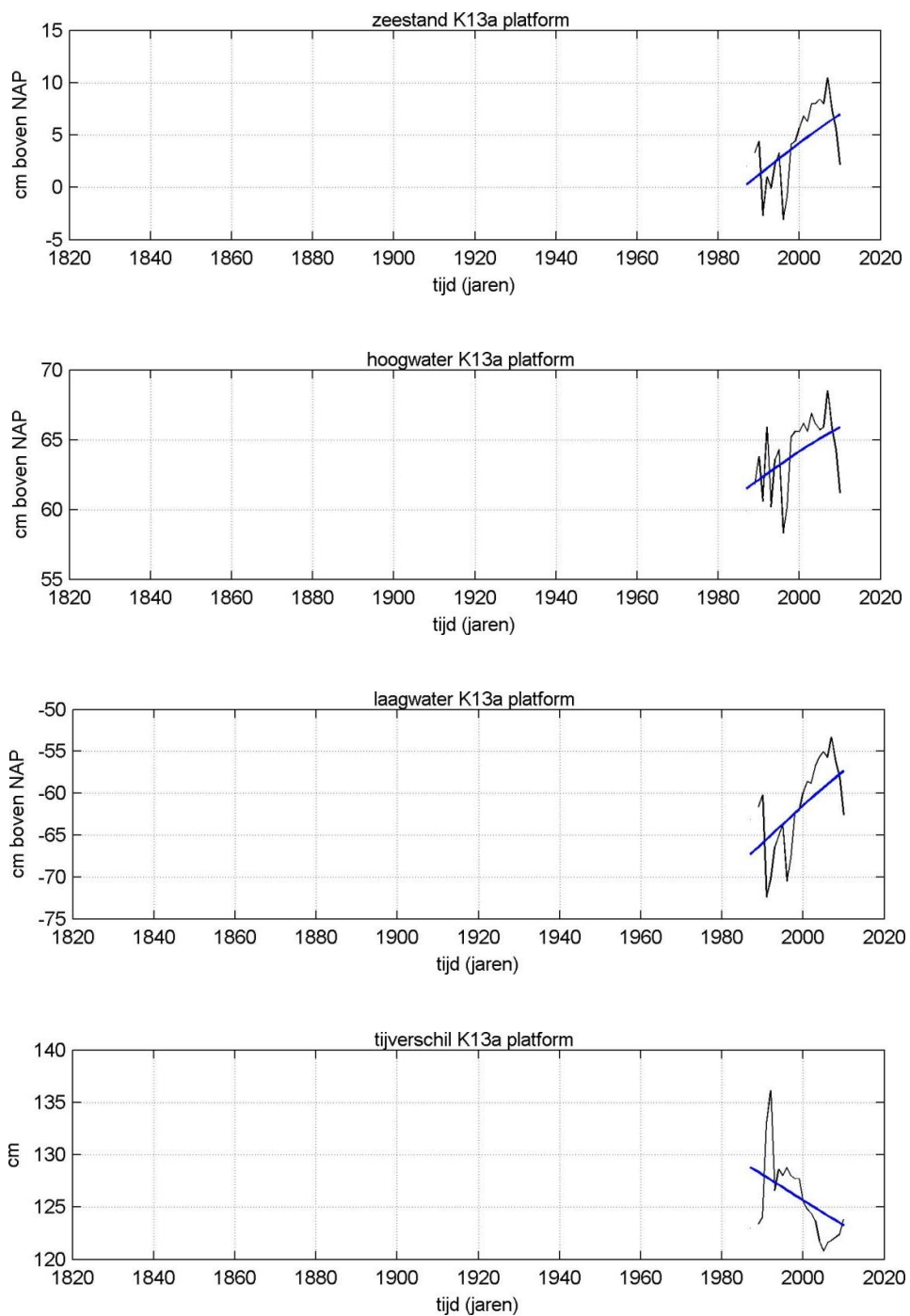
Figuur C.33 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Delfzijl



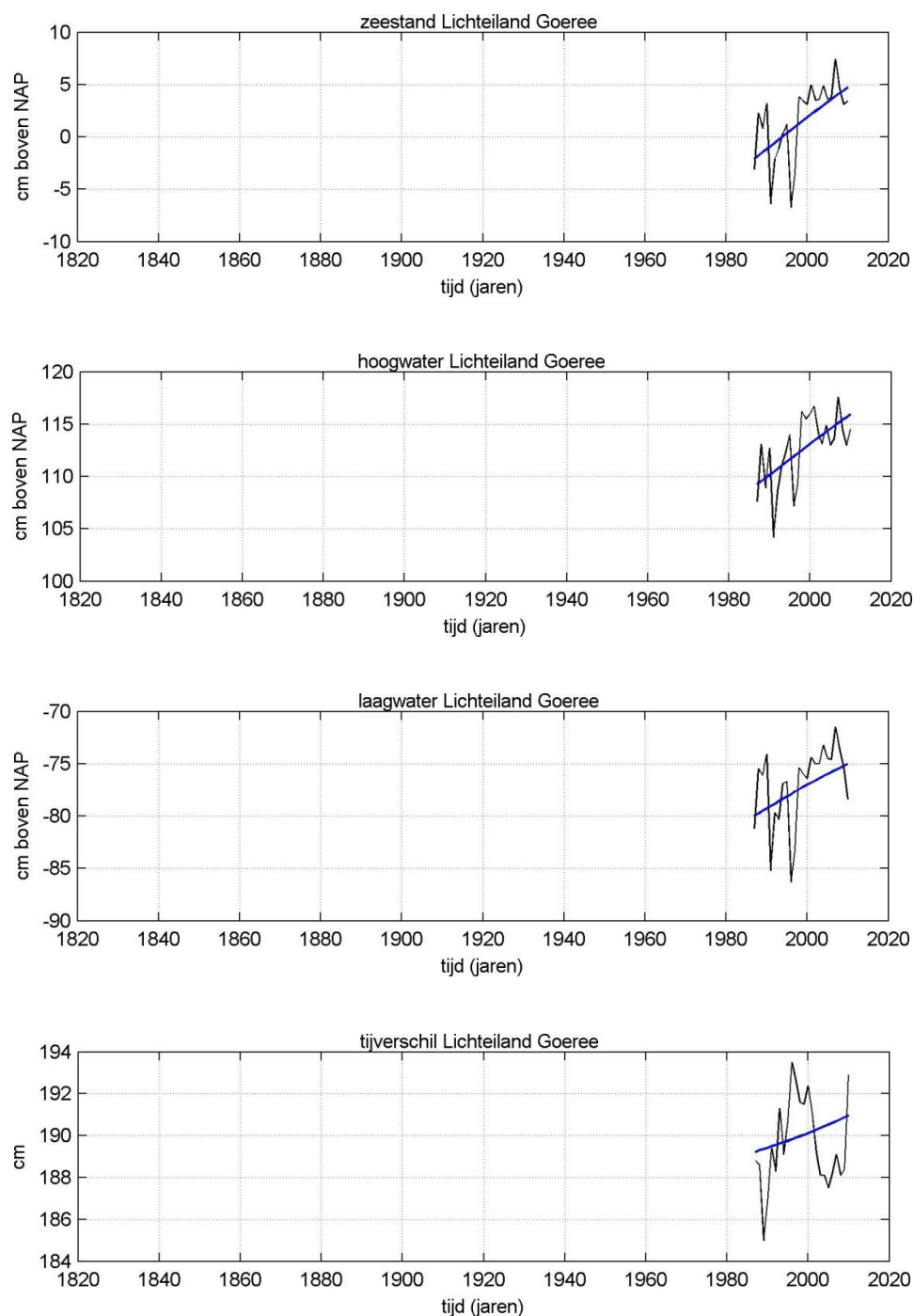
Figuur C.34 Verloop jaargemiddelde zeeniveaus Nieuwe Statenzijl.
Data zeestand, laagwater en tijverschil ontbreken.



Figuur C.35 Verloop jaargemiddelde zeenniveaus Euro platform.
Data t.o.v. op zeker tijdstip bepaalde lokale gemiddelde zeespiegel.
NAP ter plaatse niet ingemeten.

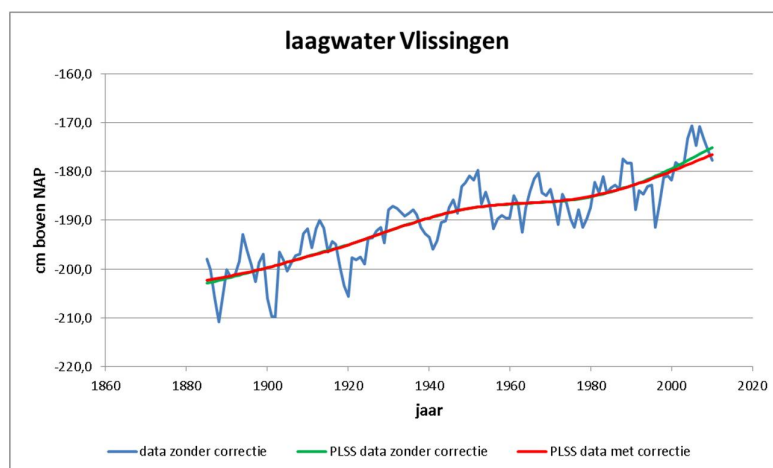
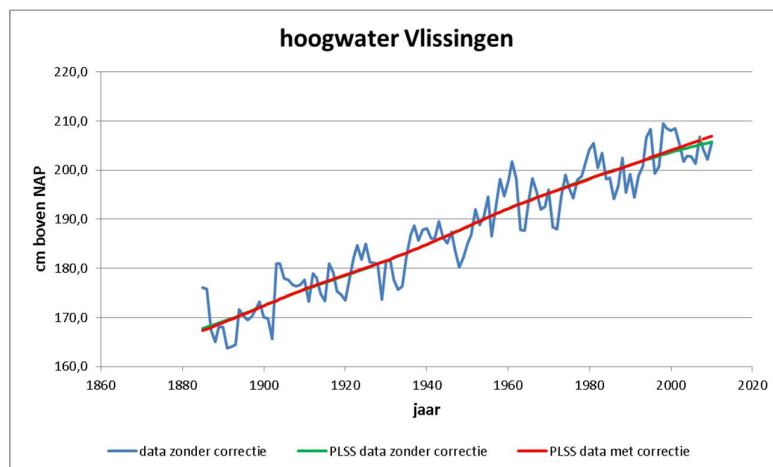
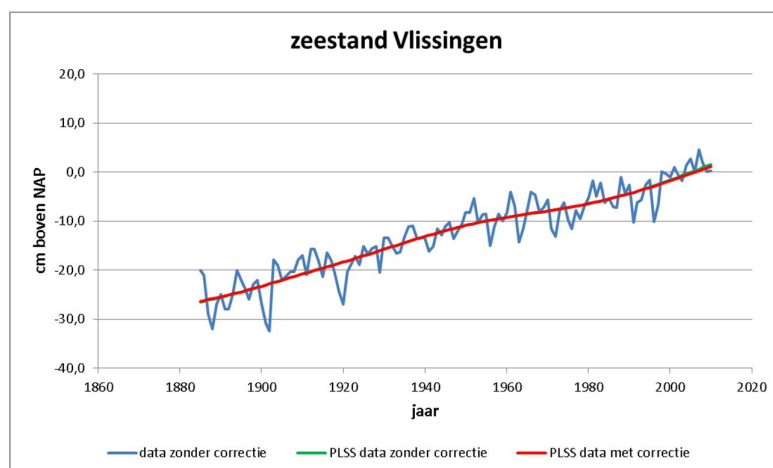


Figuur C.36 Verloop jaargemiddelde zeenniveaus K13a platform.
Data t.o.v. op zeker tijdstip bepaalde lokale gemiddelde zeespiegel.
NAP ter plaatse niet ingemeten.

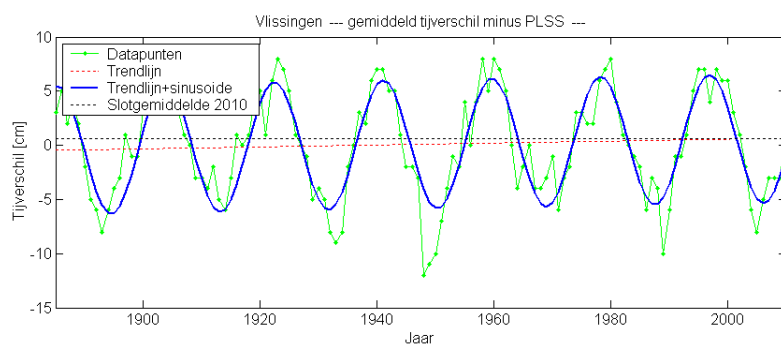
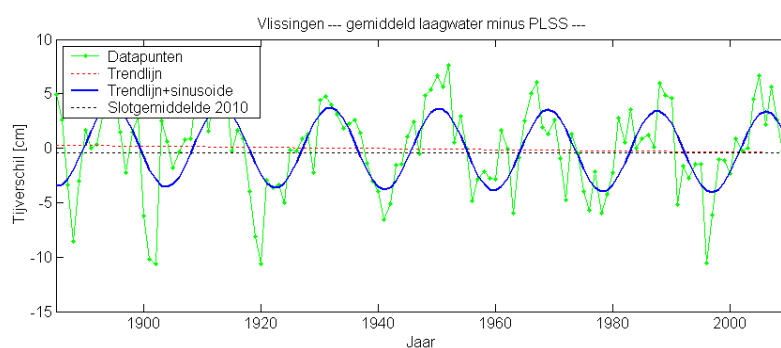
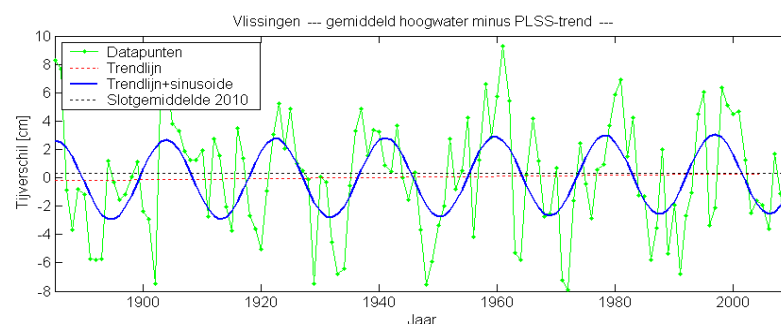
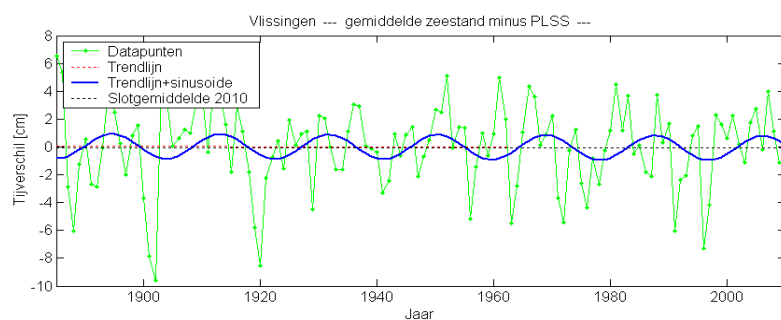


Figuur C.37 Verloop jaargemiddelde zeenniveaus Lichteiland Goeree.
 Data t.o.v. op zeker tijdstip bepaalde lokale gemiddelde zeespiegel.
 NAP ter plaatse niet ingemeten.

D Correctie knopencyclus voor de zeeniveaus van Vlissingen



E Berekenende 18,6-jarige cycli voor Vlissingen (voorbeeld)



F Amplitudes knopencycli en correcties PLSS-waarden 2010

Station	Zeestand		Hoogwater		Laagwater		Tijverschil
	Amplitude	Correctie 2010	Amplitude	Correctie 2010	Amplitude	Correctie 2010	Correctie 2010
	knopencyclus	PLSS-waarde	knopencyclus	PLSS-waarde	knopencyclus	PLSS-waarde	PLSS-waarde
	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm NAP]	[cm NAP]
Bath	-0,51	-0,2	0,2	0,1	-4,3	-1,8	1,8
Bergse Diepsluis west	-0,38	-0,2	2,1	1,3	-2,4	-1,5	2,9
Brouwershavense Gat 08	-1,39	-0,6	1,0	0,4	-2,7	-1,1	1,6
Cadzand vanaf 1967	0,01	0,0	3,8	1,6	-3,5	-1,3	2,9
Delfzijl	-1,3	-0,5	0,8	-0,1	-3,0	0,3	-0,3
Den Helder	-1,16	-0,5	-0,4	0,0	-1,7	0,2	-0,1
Den Oever	-0,5	-0,2	-0,3	0,0	-2,4	0,2	-0,2
Eemshaven	-0,51	-0,2	1,1	0,5	-2,7	-1,2	1,7
Euro platform	-0,49	-0,2	1,0	0,4	-1,2	-0,4	0,7
Hansweert	-0,65	-0,3	2,4	1,0	-3,4	-1,4	2,4
Haringvliet10	-1,23	-0,4	2,0	0,8	-1,9	-0,8	1,6
Harlingen	-1,02	-0,4	-0,2	0,0	-1,7	0,2	-0,2
Hoek van Holland	-0,72	-0,3	0,8	-0,1	-0,9	-0,2	0,1
Huibertgat	-0,91	-0,5	0,6	0,3	-2,5	-1,3	1,5
IJmuiden	-1,45	-0,6	0,0	0,0	-1,8	0,2	-0,2
K13a platform	-2,02	-0,9	-0,6	-0,3	-3,2	-1,4	1,2
Kornwerderzand	-1,23	-0,5	-0,6	-0,2	-2,3	-0,9	0,7
Krammersluizen west	-0,9	-0,5	1,4	0,8	-2,6	-1,4	2,1
Lauwersoog	-1,41	-0,6	0,1	0,0	-4,1	-1,7	1,8
Lichteiland Goeree	-1,3	-0,5	0,4	0,1	-2,3	-0,9	1,0
Nes	-1,96	-0,9	-0,9	-0,3	-5,0	-1,9	1,6
Nieuwe Statenzijl	NaN	NaN	1,1	0,4	NaN	NaN	NaN
Oudeschild	-0,36	-0,2	-0,4	0,0	-1,9	0,2	-0,1
Petten zuid vanaf 1978	-1,4	-0,7	-1,0	-0,5	-2,2	-1,1	0,6
Roompot binnen	-1,78	-0,8	0,1	0,1	-3,2	-1,4	1,5
Roompot buiten	-1,28	-0,5	1,2	0,5	-3,2	-1,2	1,7
Scheveningen vanaf 1962	-0,33	-0,1	0,2	0,1	-1,9	-0,8	0,8
Schiermonnikoog	-1,86	-0,8	-0,6	-0,2	-4,1	-1,6	1,3
Stavenisse vanaf 1988	-1,33	-0,6	0,5	0,2	-2,8	-1,3	1,5
Terneuzen	-0,31	-0,1	2,7	1,1	-3,9	-1,6	2,7
Terschelling Noordzee	-1,76	-1,1	-0,5	-0,3	-3,8	-2,5	2,2
Texel Noordzee	-1,12	-0,7	-0,2	-0,1	-2,8	-1,8	1,6
Vlieland haven vanaf 1941	-0,72	-0,3	0,1	-0,1	-2,4	-1,0	0,9
Vlissingen	-0,89	-0,4	2,8	1,2	-3,8	-1,5	2,7
Westkapelle	0,09	0,0	2,7	1,1	-2,6	-1,1	2,1
West-Terschelling	-0,92	-0,4	0,1	0,0	-2,5	-1,0	1,0
Wierumergronden	-0,13	0,0	1,0	0,4	-1,9	-0,7	1,1