

**Definitie zeespiegelstijging
voor bepaling
suppletiebehoefte**

Rekenmodel t.b.v. handhaven kustfundament



Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte

Rekenmodel t.b.v. handhaven kustfundament

ir. D. Dillingh
drs. F. Baart
ir. J.G. de Ronde

1201993-002

Titel

Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat-Waterdienst

Project

1201993-002

Kenmerk

1201993-002-VEB-0003

Pagina's

66

Trefwoorden


Zeespiegelstijging, bodemdaling, suppletiebehoefte, handhaving kustfundament

Samenvatting

De samenvatting volgt na de inhoudopgave (blz. iii)

Referenties

Projectplan Verkenning toekomstige ontwikkeling suppletiebehoefte – methoden en effecten, John de Ronde, 1200104-002, augustus 2009

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
3	juli 2010	Douwe Dillingh John de Ronde Fedor Baart		Jaap Kwadijk		Rinus Vis	

Status

definitief

Inhoud

Samenvatting	iii
1 Inleiding	1
1.1 Kustlijnhandhaving	1
1.2 Het kustfundament	2
1.3 Meegroeien met de zeespiegel	3
1.4 Vraagstelling definitie zeespiegelstijging	4
1.5 Samenvatting	5
1.6 Uitvoering	6
1.7 Leeswijzer	6
2 Relatieve zeespiegelstijging; een nadere beschouwing van de Nederlandse data	7
2.1 Relatieve zeespiegelstijging	7
2.2 Het Normaal Amsterdams Peil (NAP)	8
2.3 Geologische achtergronden	9
2.4 De NAP-publicatie 2005	11
2.5 Hoe om te gaan met de bodemdalingscomponent in de zeespiegelstijging?	12
2.6 Absolute beweging van het NAP-vlak	14
2.7 De bepalingswijze van de gemiddelde zeestanden	15
2.8 Ongecorrigeerde tijdreeksen	16
2.9 De 18,6-jarige cyclus	17
2.10 Keuze voor de te analyseren tijdreeksen	18
2.11 Samenvatting	19
3 Analyse gecorrigeerde data Nederlandse hoofdpeilmeetstations	21
3.1 Lineaire en kwadratische regressie-analyse	21
3.2 Analyse met de Whittaker smoother	26
3.3 Samenvatting	28
4 Toekomstige zeespiegelstijging	29
4.1 IPCC-scenario's	29
4.2 KNMI'06 klimaatscenario's voor Nederland	31
4.3 Bovengrensscenario van de Delatacommissie 2008	33
4.4 Koppeling van de tijdreeksen met de KNMI'06 scenario's	34
4.5 Samenvatting	36
5 Mondiale zeespiegelstijging	37
5.1 Het 4 ^e assessmentrapport van het IPCC (2007)	37
5.2 Satellietdata op Internet	39
5.3 Recente literatuur.	41
5.4 De invloed van de gravitatiekrachten van de landijsmassa's van Groenland en Antarctica	42
5.5 Samenvatting	43
6 Hydraulische randvoorwaarden 2011 en gebruikte zeespiegelstijging	45
6.1 Basis- en ontwerppeilen	45
6.2 Gekozen aanpak voor de HR2006	45

6.3	Getijverandering	46
6.4	Zeespiegelstijging en de HR2006	47
6.5	Samenvatting	48
7	Conclusies en advies	49
7.1	Conclusies	49
7.2	Advies	50
8	Literatuur	53
	Bijlage(n)	
A	Een beknopte geschiedenis van het NAP	55
B	Gemiddelde zeestanden zes hoofdstations, ongecorrigeerde data	57
C	Lineaire trends gecorrigeerde data; illustratie invloed analyseperiode voor Delfzijl en Vlissingen	59
D	Gemiddelde zeestanden hoofdstations, gecorrigeerde data; trends berekend met de Whittaker smoother, $\lambda=10^4$	61
E	Gemiddelde zeestanden Delfzijl, ongecorrigeerde data; trends berekend met de Whittaker smoother voor driewaarden van λ	63
F	Stijgsnelheden van de gemiddelde zeestanden volgens de Whittaker smoother, gecorrigeerde data, $\lambda=10^4$	65

Samenvatting

Vraagstelling

In het huidige kustbeleid is ervoor gekozen om het kuststelsel (kustfundament plus Waddenzee en Westerschelde) te laten meegroeien met de zeespiegel door middel van suppleties met zand. Het benodigde suppletievolume voor het meegroeien wordt op dit moment bepaald door het oppervlak hiervan te vermenigvuldigen met de zeespiegelstijging. Een toename van de zeespiegelstijging heeft dan ook grote consequenties voor de toekomstige suppletiehoeveelheid. De vraag van deze studie is dan ook met hoeveel zeespiegelstijging nu en in de komende jaren rekening moet worden gehouden en welke definitie en schattingsmethode daarbij moet worden gebruikt.

Nederlandse data

In de Nederlandse situatie spelen zowel zeespiegelstijging als bodemdaling een rol. Het gaat om het effect van beide en daarom wordt uitgegaan van de relatieve zeespiegelstijging. Relatieve zeespiegelstijging is de stijging van de zeespiegel ten opzichte van het land, hier de som van de werkelijke zeespiegelstijging en de daling van het landgebonden referentievlak.

De waterstanden in Nederland worden gemeten ten opzichte van het NAP, het nationale referentievlak voor hoogtemetingen. Het NAP werd vanouds vastgelegd door een ondergronds merk onder de Dam in Amsterdam. Het NAP is over Nederland verspreid door een netwerk van ondergrondse merken, die alle gefundeerd zijn op het pleistoceen.

Gebleken is dat de bovenkant van het pleistoceen niet zo stabiel was als gedacht, 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 gebeurd. De maximale aanpassing bij de beschouwde zes hoofdpeilmeetstations bedraagt -3,0 cm. De gemiddelde aanpassing van deze stations bedraagt -1,8 cm. De waterstand ten opzichte van het NAP is na de aanpassing dus 1,8 cm lager dan ervoor, gemiddeld over deze stations.

Behalve deze sprong in de hoogten van de NAP-merken in 2005 laat de geschiedenis van de koppeling van de waterstandsmetingen aan het NAP zien dat er in de tijdreeksen van gemiddelde zeestanden een bodemdalingscomponent aanwezig is. Ook zijn onnauwkeurigheden geïntroduceerd door wisselingen in de configuratie van de NAP-merken. Het geheel elimineren van deze invloeden is onmogelijk.

Voor het bepalen van de zeespiegelstijging ten opzichte van de bovenkant van het pleistoceen, van belang voor het benodigde suppletievolume, is ervoor gekozen de te analyseren tijdreeksen te corrigeren voor het effect van de NAP-publicatie van 2005. De gecorrigeerde data geven de relatieve zeespiegelstijging weer ter plekke van de kust. De daling van de kust ten opzichte van het NAP-vlak is hierin dus meegenomen. De bodemdaling van het Holocene pakket bovenop het pleistoceen zit dus niet in de hier beschouwde relatieve zeespiegelstijging. Voor het bepalen van de zeespiegelstijging t.o.v. het landoppervlak is de extra zakking door het Holocene pakket wel belangrijk.

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 bij de peilmeetstations. Voor trendanalyses is een dergelijke reeks zuiverder.

De gemiddelde zeestanden zijn in de loop der jaren op verschillende manieren bepaald, afhankelijk de waarnemingwijze: uit halftijstanden (het gemiddelde van hoog- en laagwater, en gemiddelden van 6-uurlijkse, 3-uurlijkse, uurlijkse en 10-minuten (vanaf 1987) standen. De oudste waarden zijn ook de minst nauwkeurige.

De tijdreeksen van gemiddelde zeestanden zien er nogal grillig uit. Verschillen van jaar tot jaar worden voornamelijk veroorzaakt door verschillen in windklimaat, luchtdruk, watertemperatuur en zoutgehalten. Verder zijn er altijd meetfouten en gaat ook de gegevensverwerking met onnauwkeurigheden gepaard. Dit grillige karakter maakt het moeilijk uitspraken te doen over veranderingen in de zeespiegelstijging.

In de tijdreeksen van de gemiddelde zeestanden langs de Nederlandse kust blijkt een periodieke component te zitten met een periode van 18,6 jaar. Deze periode hangt samen met de verandering in de helling van het vlak van de maansbaan om de aarde ten opzichte van de ecliptica. Deze deterministische fluctuatie levert een bijdrage aan het verloop van de zeespiegel die niets met klimaatverandering te maken heeft.

De trendanalyses worden uitgevoerd op de volgende data:

1. De gemiddelde zeestanden gecorrigeerd voor het effect van de NAP-publicatie van 2005 en de 18,6-jarige cyclus.
2. Beperking tot de hoofdstations Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl. Van deze stations zijn lange tijdreeksen beschikbaar. Ze liggen goed verspreid langs de Nederlandse kust en geven daarmee een goed beeld van de relatieve zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust.

Trendanalyses van de gecorrigeerde Nederlandse tijdreeksen van de gemiddelde zeespiegel

Voor de trendanalysemethoden is uitgegaan van lineaire (rechte lijn) en kwadratische regressie (parabool). Daarnaast is een methode gebruikt die de ruis onderdrukt (de Whittaker smoother) en het signaal als het ware gladstrijkt.

Lengte en beginpunt van de analysereeksen hebben bij het toepassen van lineaire regressie grote invloed op het berekende resultaat, dat ook per station verschilt. De signaal-ruis verhouding is van dien aard dat een lange analyseperiode nodig is voor een stabiele schatting volgens een lineaire trendanalyse. Zelfs 30 jaar is weinig. Bij kortere reeksen wordt de betrouwbaarheidsband van de trend snel groter. Over de periode 1890-2008 wordt een lineaire trend berekend van 19 cm/eeuw met een betrouwbaarheidsinterval van 17-20 cm (afgeronde getallen). Uitgaande van een parabolische fit wordt geen significante versnelling gevonden over de periode 1890-2008 (of over kortere perioden). De kwadratische term in de vergelijking van de parabool blijkt statistisch niet significant.

De Whittaker smoother (een functievrije fittingsmethode) laat een lichte stijging zien in de meer recente jaren. Het is echter (nog) niet mogelijk om de statistische significantie ervan te berekenen. Deze methode is vooral geschikt voor een visuele presentatie van het verloop van de gemiddelde zeespiegel en de zeespiegelstijging in de loop der jaren. Het karakter van het verloop van de zeespiegelstijging over de jaren verschilt per station.

Toekomstige zeespiegelstijging (IPCC en KNMI scenario's)

Voor het schatten van de toekomstige suppletiehoeveelheden is de toekomstige zeespiegelstijging van belang. Omdat de ontwikkelingen in de toekomst niet bekend zijn, wordt gebruik gemaakt van emissiescenario's (mogelijke plausibele ontwikkelingen voor de uitstoot van broeikasgassen) en wordt met behulp van modellen berekend wat de mogelijke

gevolgen daarvan zijn voor o.a. de temperatuur en de zeespiegel. Het IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change) geeft mondiaal gemiddelde projecties voor de toekomst.

De KNMI'06-scenario's zijn gebaseerd op dezelfde studies en modelberekeningen als de IPCC-scenario's, maar zijn toegespitst op de Nederlandse situatie, immers de zeespiegelstijging is niet over de hele wereld gelijk, maar verschilt per regio. Bovendien is in de KNMI'06-scenario's een bijdrage opgenomen voor de versnelde afkalving van de randen van Groenland en Antarctica.

Aansluitend aan de lineaire regressielijn van de gemiddelde tijdreeks van de zes hoofdstations over de periode 1890-1990 zijn vloeiende lijnen (som van een lineaire en een exponentiële functie) getrokken door de KNMI-scenario's voor 2050 en 2100. Hiermee kunnen stijgsnelheden worden berekend. Ze geven niet meer dan een indicatie voor de toekomstige ontwikkeling.

Mondiale zeespiegelstijging

In recente literatuur die zich bezig houdt met lange tijdreeksen (meer dan 50 jaar) wordt een significante versnelling gevonden rondom het jaar 1930. Deze knik is in de Nederlandse data niet zichtbaar.

Vanaf 1993 zijn ook satellietdata van de zeespiegel beschikbaar. Ze laten een trend zien van rond de 3 mm/jaar (30 cm/eeuw). De trend in de satellietdata komt goed overeen met de trend in de data verkregen met peilmeetstations wanneer de overeenkomstige perioden vergeleken worden, de uitkomsten zijn dus niet tegenstrijdig. De trend in de satellietdata (1993-2008) is groter dan de trends verkregen over lange perioden uit data van peilmeetstations. Dat heeft waarschijnlijk te maken met fluctuaties met de duur van één tot enkele decennia.

Satellietdata laten zien dat de zeespiegelstijging vanaf 1993 over de oceanen verschilt van enkele malen de mondiaal gemiddelde waarde tot gebieden waar die zelfs daalt. Satellietdata zijn pas betrouwbaar enkele tientallen kilometers uit de kust. Voor het vaststellen van de zeespiegelstijging langs de kust geven de peilmeetstations de beste informatie.

Hydraulische randvoorwaarden

De uitgangspunten voor de wijze waarop de zeespiegelstijging in rekening wordt gebracht bij de hydraulische randvoorwaarden ten behoeve van de periodieke landelijke toetsing van de primaire waterkeringen en bij de suppletiebehoefte verschillen van elkaar. Voor het toetsen van de waterkeringen is de stijging van de gemiddelde hoogwaterstand van belang, evenals regionaal maatwerk. Voor het bepalen van de suppletiebehoefte gaat het om de stijging van de gemiddelde zeestand. Omdat het suppletiezand van buiten het kustfundament in een strook langs de kust wordt gebracht en verder in het kuststelsel verspreid wordt door natuurlijke processen, kan volstaan worden met een landelijk gemiddelde waarde voor de zeespiegelstijging.

Advies

De projecties van IPCC en KNMI geven aan dat rekening moet worden gehouden met een versnelde zeespiegelstijging, volgend uit de (reeds waargenomen) toename van de opwarming van de aarde. De mate waarin is echter onzeker. Deze versnelling is langs de Nederlandse kust nog niet in de metingen terug te vinden.

Voor de toekomstige suppletiebehoefte tot 2100 kan ten aanzien van de toekomstige zeespiegelstijging vooralsnog uitgegaan worden van een fit door de meetdata en de punten van het lage KNMI'06-scenario (zie onderstaande tabel). Gekozen is voor het lage KNMI'06-scenario omdat voor de bepaling van de suppletiebehoefte over 5 of 10 jaar relatief gemakkelijk overgeschakeld kan worden op een hoger scenario als tegen die tijd duidelijk blijkt dat het die kant op gaat.

Relatieve zeespiegelstijging volgens de fit door de meetdata en het G/G+-scenario (lage KNMI'06-scenario)

jaar	relatieve zeespiegelstijging (cm/eeuw)
1990	19
2000	21
2010	23
2020	25
2050	32
2100	49

Voor de bepaling van de huidige zeespiegelstijging (2010) kan uitgegaan worden van twee scenario's:

1. Uitgaan van een lineaire regressie op de lange reeks waarnemingen tot nu toe (de meest robuuste analysemethode): 19 cm/eeuw
2. Uitgaan van de koppeling van de waarnemingen en het lage KNMI'06-scenario: 23 cm/eeuw

Op dit moment wordt 20 cm per eeuw gehanteerd. Gezien de geringe verschillen en de grote onzekerheden in de scenario's is het advies om op dit moment nog te blijven uitgaan van deze 20 cm per eeuw en om iedere 5-6 jaar aan de hand van de nieuwste gegevens en informatie deze waarde indien nodig bij te stellen. Deze cyclus komt overeen met die van de hydraulische randvoorwaarden voor de landelijke toetsing van de primaire waterkeringen en van de assessmentrapporten van het IPCC en de hieraan gerelateerde KNMI-klimaatscenario's. Aanbevolen wordt de uitvoering daarvan door Deltares te laten doen, in overleg met het KNMI.

1 Inleiding

De hoofdlijnen van het landelijke kustbeleid zijn gegeven in de 3^e kustnota en in de Nota Ruimte van 2006. Twee belangrijke elementen van dit beleid zijn het handhaven van de kustlijn en het handhaven van het kustfundament. Voor beide elementen is het van belang dat het zogenaamde kustfundament, en de daaraan in morfologische zin gekoppelde bodems van de Waddenzee en de Westerschelde, meegroeien met de zeespiegel. Het benodigde zandvolume voor het meegroeien van het beschouwde kustsysteem (kustfundament plus Waddenzee en Westerschelde) is gelijk aan het oppervlak hiervan maal de zeespiegelstijging. De hoeveelheid te suppleren zand, nu en in de toekomst, is dus een functie van de zeespiegelstijging en van de omvang van het gebied dat mee moet stijgen. Deze rapportage richt zich op de zeespiegelstijging en geeft een advies over met hoeveel zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust rekening moet worden gehouden in het kader van het suppletiebeleid, nu en in de nabije toekomst en op welke manier deze berekend moet worden. Dat is minder triviaal dan het lijkt: de gemiddelde zeespiegel verschilt van jaar tot jaar en van plaats tot plaats.

In de volgende paragrafen van dit hoofdstuk wordt de probleemstelling verder toegelicht, nadat eerst het vigerende landelijke kustbeleid is samengevat, voor zover dat van belang is voor dit rapport over de zeespiegelstijging in relatie tot de suppletiebehoefte.

1.1 Kustlijnhandhaving

De duinen, het strand en de onderwateroever vormen een natuurlijke waterkering die voortdurend in beweging is door natuurkrachten. Zonder ingrijpen zou veel land verloren gaan en zou de veiligheid van het achterliggende gebied niet meer kunnen worden gegarandeerd. Daarom is er uiteindelijk voor gekozen om de kustlijn te handhaven op de plaats waar hij lag in 1990, de basiskustlijn (BKL). Men spreekt in dit verband over het "dynamisch handhaven" van de kustlijn. Voor een aantal kustgebieden is geen BKL gedefinieerd, zoals de strandvlakten op de uiteinden van sommige Waddeneilanden. Hier laat men de natuur zoveel mogelijk zijn gang gaan.

De basiskustlijn geeft ongeveer de positie van de gemiddelde laagwaterlijn in 1990. Door de ligging van de momentane kustlijn van jaar op jaar te vergelijken met die van de basiskustlijn kan worden vastgesteld hoe de kustlijnontwikkeling is en of, in het geval van een eroderende kust, de basiskustlijn de komende jaren overschreden dreigt te worden. In het laatste geval wordt tijdig een zandsuppletie gepland. Met zandsuppleties wordt het natuurlijke karakter van de kust behouden. Ze zijn bovendien goedkoop vergeleken met oplossingen met harde constructies, zoals dijken en strandhoofden.

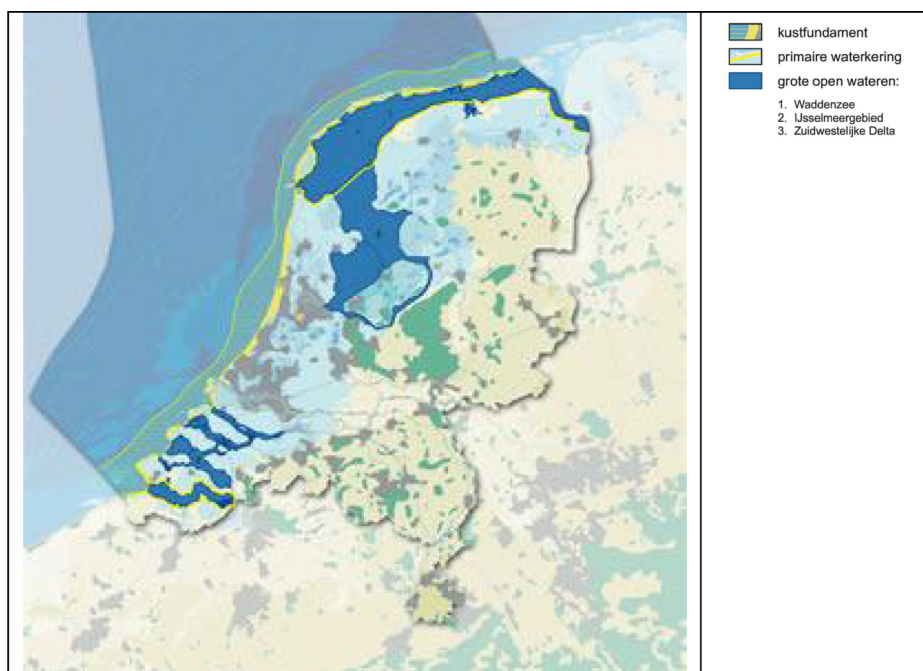
Bij het bepalen van de basiskustlijn en de jaarlijkse momentane kustlijn wordt gebruik gemaakt van de jaarlijkse kustmetingen, waarbij kustprofielen langs raaien loodrecht op de kust worden opgemeten, van 200m landwaarts van de eerste duinenrij tot 800 m zeewaarts van het strand en een onderlinge raaiafstand van 200 a 250 m. Eens in de drie jaar worden de profielen tot 2 a 3 kilometer verlengd. De (natte) dieptemetingen worden verricht vanuit meetschepen, de (droge) hoogtemetingen van strand en duin vanuit vliegtuigen, vroeger d.m.v. stereofotogrammetrie, tegenwoordig met laseraltimetrie.

De 3^e kustnota "Traditie, Trends en Toekomst" van december 2000 legt een veel sterkere relatie tussen kustveiligheid en ruimtegebruik dan de voorgaande kustnota's. Vooral

versnelde zeespiegelstijging vergt in de toekomst bredere en sterkere waterkeringen. Hiervoor zal ruimte moeten worden gereserveerd. Maar ook vanaf land wordt de kust door steeds meer functies gebruikt, die de ruimte voor verbreding van de waterkeringen beperken. Gezien de grote onzekerheden over de omvang van toekomstige relatieve zeespiegelstijging, wordt voor het beleid en beheer uitgegaan van scenario's. Afhankelijk van de toepassing wordt uitgegaan van één van de volgende scenario's (Min. VenW, 2000):

- Minimale scenario van 20 cm/eeuw: Toe te passen bij beslissingen met korte ontwerpduur (orde 5 jaar), geringe investering of hoge mate van flexibiliteit (zandsuppleties).
- Midden scenario 60 cm/eeuw: Toepassen bij beslissingen met langere ontwerpduur (orde 50-100 jaar), grote investering en weinig flexibiliteit (dijken en stormvloedkeringen).
- Maximale scenario 85 cm/eeuw + 10% toename wind: Toepassen bij reservering van ruimte.

Deze beleidsscenario's m.b.t. klimaatverandering en zeespiegelstijging dienen onderscheiden te worden van klimaatscenario's zoals die door het IPCC en het KNMI gemaakt worden (zie hoofdstuk 4). De klimaatscenario's van het IPCC (mondiaal) en het KNMI (voor Nederland) zijn gebaseerd op wetenschappelijk onderzoek en worden elke 5 à 6 jaar geactualiseerd op basis van de nieuwste inzichten. De beleidsscenario's zijn uiteraard ook gebaseerd op de wetenschappelijke scenario's, maar zijn een vertaling ervan voor de problematiek van het betrokken beleidsterrein. Ze hoeven ook niet per definitie mee te wijzigen met de wetenschappelijke scenario's, een langere houdbaarheid is over het algemeen zelfs gewenst.



Figuur 2.2.1 Het kustfundament uit de Nota Ruimte (2006)

1.2 Het kustfundament

In de Nota Ruimte van 2006 (Ministeries van VROM, LNV, VenW en EZ) is het begrip kustfundament gedefinieerd. Het omvat het gehele zandgebied, nat en droog, dat als geheel

van belang is als drager van functies in het kustgebied. Het kustfundament wordt volgens deze nota als volgt begrensd:

- De zeewaartse grens bestaat uit de doorgaande NAP-20m lijn (zie figuur 2.2.1);
- Aan de landzijde omvat het kustfundament alle duingebieden en alle daarop gelegen harde zeeweringen. De landwaartse grens valt bij smalle duinen en dijken samen met de grens van de waterkering, uitgebreid met met de ruimtereservering voor tweehonderd jaar zeespiegelstijging en omvat daar waar de duinen breder zijn dan de waterkering het gehele duingebied.



Figuur 2.2.2 Kustfundament en estuaria als samenhangend morfologisch systeem

1.3 Meegroeien met de zeespiegel

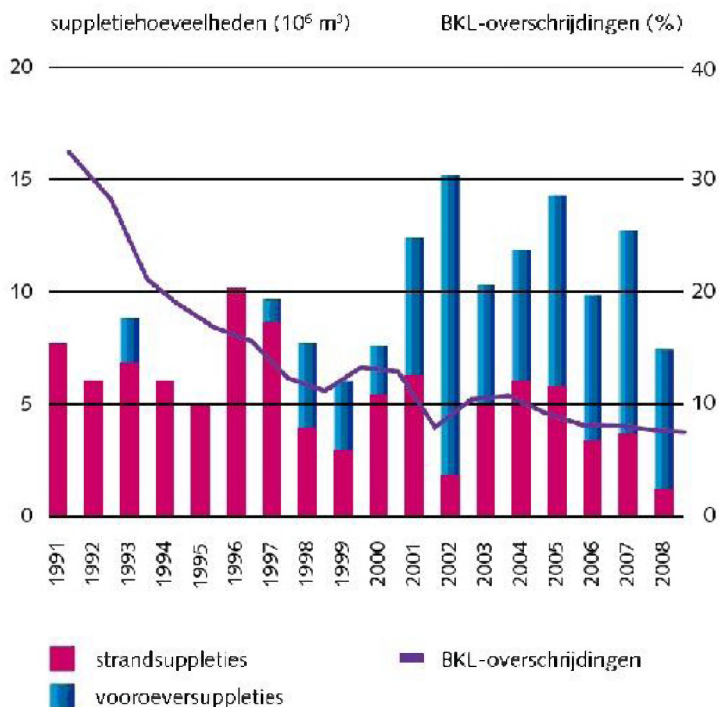
Voor het waarborgen van duurzame veiligheid tegen overstroming vanuit zee is het nodig dat het kustfundament in stand wordt gehouden en dat daarin voldoende ruimte beschikbaar blijft voor versterking van de zeewering.

Het in stand houden van het kustfundament ten opzichte van de zeespiegel geschiedt door zand van de Noordzeebodem zeewaarts van het kustfundament, te verplaatsen tot binnen het kustfundament en de morfologische processen het zand verder te laten verspreiden.

Door het handhaven van kustlijn en kustfundament door middel van zandsuppleties groeit de kust als het ware mee omhoog met de zeespiegel. Omdat de Waddenzee en de Westerschelde in morfologische zin een systeem vormen met het kustfundament, groeien ze ook mee met de zeespiegel. Dit is schematisch weergegeven in figuur 2.2.2.

De afgelopen jaren is gemiddeld ongeveer 12 miljoen kubieke meter zand per jaar gesuppleerd. De zandsuppleties worden zoveel mogelijk uitgevoerd als onderwatersuppleties, waarna de natuurlijke processen moeten zorgen voor verder transport naar de kust toe. Dat is beter voor de natuurlijke dynamiek en is bovendien goedkoper.

Het jaarlijkse percentage waarin de basiskustlijn is overschreden laat in figuur 2.2.3 een dalend verloop zien tot beneden de 10%.



Figuur 2.2.3 Jaarlijkse suppletiehoeveelheden (10⁶ m³) en percentages waarin de basiskustlijn is overschreden (bron: Water in Beeld, 2009; data: Rijkswaterstaat)

Ook ten aanzien van de veiligheid tegen overstromen wordt als het ware meegegroeid met de zeespiegel. In de Waterwet van januari 2009 is geregeld dat elke zes jaren de veiligheid van de primaire waterkeringen moet worden beoordeeld. Voorheen was dat volgens de Wet op de waterkering elke vijf jaar. Deze wet is opgegaan in de nieuwe Waterwet. Voor elke toetsperiode worden de hydraulische randvoorwaarden waaraan de waterkeringen moeten voldoen geactualiseerd op de veranderende belastingen, o.a. door zeespiegelstijging, en worden de beleidsscenario's voor klimaatverandering en zeespiegelstijging volgens de 3^e kustnota toegepast bij het ontwerp van eventueel benodigde versterkingen.

1.4 Vraagstelling definitie zeespiegelstijging

In (De Ronde, 2008) wordt aangegeven dat, om aan het huidige beleid te voldoen, zo'n 20 miljoen m³ zand per jaar gesuppleerd moet worden (zie tabel 2.4.1). Hierbij is uitgegaan van een zeespiegelstijging van 20 cm/eeuw. Een groot gedeelte daarvan (14 miljoen m³/jaar) is gekoppeld aan deze zeespiegelstijging. Grofweg is het benodigde suppletievolume voor het meegroeien van het beschouwde kuststelsel (kustfundament plus Waddenzee en Westerschelde) gelijk aan het oppervlak hiervan maal de zeespiegelstijging. Bij een zeespiegelstijging van 30 en 60 cm/eeuw neemt de suppletiebehoefte door zeespiegelstijging toe tot 21 respectievelijk 42 miljoen m³ per jaar. De totale suppletiebehoefte neemt dan toe tot 27 respectievelijk 48 miljoen m³ per jaar.

Tabel 2.4.1 Suppletiebehoefte (miljoen m³/jaar) bij verschillende waarden van de zeespiegelstijging (uit: De Ronde, 2008)

Suppletiebehoefte	Zeespiegelstijging		
	20 cm/eeuw	30 cm/eeuw	60 cm/eeuw
Meegroeien bodem Waddenzee met zss	5,0	7,5	15
Meegroeien kustfundament met zss	8,4	12,5	25
Meegroeien Westerschelde met zss	0,5	0,8	1,5
Meegroeien kustsysteem met zss	13,9	20,8	41,5
Meegroeien kustsysteem met zss	13,9	20,8	41,5
Compensatieverliezen	6,5	6,5	6,5
Totale suppletiebehoefte	20,4	27,3	48

De waarde van de zeespiegelstijging is dus zeer bepalend voor het schatten van het benodigde suppletievolume. Welke waarde voor de zeespiegelstijging genomen moet worden hangt af van hoe deze gedefinieerd en berekend wordt. Dat is de hoofdvraag van dit rapport.

De volgende vragen spelen daarbij een rol:

1. Welke Nederlandse data zijn beschikbaar en hoe goed zijn deze data?
2. Welke analysemethode verdient de voorkeur?
3. Hoever terug moet worden gekeken, de laatste 10, 20, 30, ..., 50, ... jaar?
4. Wat zegt de literatuur over de zeespiegelstijging?
5. Geven satellieten bruikbare informatie?
6. Wordt alleen naar Nederlandse peilmeetstations gekeken, of ook naar de wereldgemiddelde waarde?
7. Hoe kan de verwachtingswaarde van de huidige zeespiegelstijging het beste geschat worden: alleen uit de analyse van meetreeksen, of moeten de verwachtingen voor de toekomst (klimaatscenario's) daarbij betrokken worden?
8. Met welke cyclus dient de zeespiegelstijging vastgesteld te worden?

In dit rapport komen al deze vragen aan de orde.

1.5 Samenvatting

Het vigerende beleid met betrekking tot zeespiegelstijging en kustveiligheid is samen te vatten als:

- het dynamisch handhaven van de kustlijn van 1990,
- het meegroeien van het kustfundament met de zeespiegel,
- het meegroeien van de waterkeringen met de zeespiegel d.m.v. periodieke toetsing en zonodig versterkingen,
- het reserveren van ruimte voor toekomstige versterking van de waterkeringen.

In de praktijk wordt dat uitgevoerd door het suppleren van zand in het kustsysteem, door creëren van nieuwe randvoorwaarden voor de periodieke toetsing op veiligheid van de waterkeringen volgens de Waterwet van 29 januari 2009, en onder toepassing van de beleidsscenario's voor klimaatverandering en zeespiegelstijging volgens de 3^e kustnota bij het ontwerp van eventueel benodigde versterkingen.

Het benodigde suppletievolume voor het meegroeien van het beschouwde kustsysteem (kustfundament plus Waddenzee en Westerschelde) wordt bepaald door het oppervlak hiervan maal de zeespiegelstijging. Bij een zeespiegelstijging van 30 en 60 cm/eeuw neemt de totale suppletiebehoefte door zeespiegelstijging toe van de huidige ca. 20 miljoen m³ tot

27 respectievelijk 48 miljoen m³ per jaar. De waarde van de zeespiegelstijging is dus zeer bepalend voor het schatten van het benodigde suppletievolume en de daarmee gemoeide kosten. Een goede methode voor het schatten van de zeespiegelstijging is dus van belang. De huidige zeespiegelstijging kan geschat worden aan de hand van metingen. Voor de toekomst zal een beroep moeten worden gedaan op de beschikbare klimaatscenario's.

1.6 Uitvoering

Bij het opstellen van het rapport is namens de opdrachtgever overlegd met Nicoline van den Heuvel en Deon Slagter van de RWS Waterdienst (WD) over het rapport als geheel.

Met het KNMI (Caroline Katsman) is afgestemd over de hoofdstukken betreffende de toekomstige en de mondiale zeespiegelstijging.

Met de RWS Data en ICT Dienst (DID) (Anton Kösters) is afgestemd over de paragrafen aangaande het NAP.

De jaargemiddelde waterstanden (ongecorrigeerd) werden geleverd door de Waterhelpdesk van de WD.

1.7 Leeswijzer

Na het beschrijven van de hoofdlijnen van het vigerende landelijke kustbeleid, voor zover dat van belang is voor de zeespiegelstijging in relatie tot de suppletiebehoefte in dit hoofdstuk, wordt in hoofdstuk 2 ingegaan op begrippen als gemiddelde zeespiegel en relatieve zeespiegelstijging, op wat van belang is voor het suppletievolume, en worden de beschikbare gegevens nader bekeken op hun bruikbaarheid en nauwkeurigheid. Het nationale Nederlandse referentievlak voor hoogtemetingen komt daarbij uitgebreid aan de orde.

Vervolgens worden in hoofdstuk 3 de toegepaste analysemethoden en -resultaten besproken met betrekking tot het bepalen van de zeespiegelstijging uit de beschikbare Nederlandse meetgegevens.

Voor het schetsen van de toekomstige ontwikkeling is het nodig om met klimaatscenario's te werken. De meest recente klimaatscenario's voor zeespiegelstijging van het IPCC (mondiaal) en het KNMI (toegesplitst op Nederland) worden beschreven in hoofdstuk 4. Uitgaande van de tijdreeks van de gemiddelde zeestanden, gemiddeld over de zes hoofdstations langs de Nederlandse kust, worden lijnen getrokken door de KNMI-scenario's voor zeespiegelstijging voor de jaren 2050 en 2100, waarmee een artist-impression van mogelijke toekomstige verlopen voor de zeespiegelstijging wordt verkregen.

In hoofdstuk 5 wordt de mondiale zeespiegelstijging besproken, zoals die in de literatuur staat beschreven en wordt gekeken hoe deze inzichten zich verhouden tot die van de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust.

Ook voor de veiligheid is zeespiegelstijging van belang. In hoofdstuk 6 wordt beschreven of de wijze waarop op bij het vaststellen van hydraulische randvoorwaarden voor de periodieke toetsing van de primaire waterkeringen langs de kust en estuaria wordt omgegaan met zeespiegelstijging ook bruikbaar is voor het bepalen van de benodigde suppletievolumes.

Hoofdstuk 7 eindigt tenslotte met de conclusies en aanbevelingen.

2 Relatieve zeespiegelstijging; een nadere beschouwing van de Nederlandse data

Tot nu toe is er gesproken over zeespiegelstijging en het meegroeien van het kustfundament met de zeespiegel zonder dat precies duidelijk is gemaakt wat nu precies onder de begrippen zeespiegel en zeespiegelstijging verstaan moet worden, hoe ze gemeten worden en wat nu eigenlijk van belang is voor het meegroeien, alleen zeespiegelstijging of ook bodemdaling, en welke bodemdaling dan. In dit hoofdstuk komen deze zaken aan de orde en worden de beschikbare gegevens nader bekeken op hun bruikbaarheid en nauwkeurigheid (vraag 1 van paragraaf 1.4).

2.1 Relatieve zeespiegelstijging

Absolute zeespiegelstijging is de werkelijke verhoging van de zeespiegel door vermeerdering van de hoeveelheid water in de oceanen en door uitzetting als gevolg van temperatuurstijging. Relatieve zeespiegelstijging is de stijging van de zeespiegel ten opzichte van een referentievlak, en is dus de som van de werkelijke zeespiegelstijging en de daling 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 het land daalt kan deze daling in de praktijk ervaren worden als een zeespiegelstijging. Als het referentievlak daalt terwijl de zeespiegel gelijk blijft, wordt dit toch gemeten als een zeespiegelstijging ten opzichte van dit vlak. Als men de werkelijke zeespiegelstijging wil weten, moet men dus loskomen van het landgebonden referentievlak. Tegenwoordig kan dat door gebruik te maken van navigatiesatellieten, bijvoorbeeld GPS (Global Positioning System). In de wereld wordt dat dan ook in toenemende mate toegepast.

Voor het meegroeien van het kustfundament is naast de absolute zeespiegelstijging ook de daling van het kustfundament van belang, immers of de zeespiegel stijgt of het land daalt heeft hetzelfde effect op de kusterosie.

Onder de zeespiegel wordt hier verstaan het niveau van het zeewateroppervlak zonder de door wind opgewekte golven. Met zeespiegelstijging worden in het algemeen niet de periodieke fluctuaties bedoeld die het gevolg zijn van de bewegingen in het stelsel zon-aarde-maan (het astronomisch getij) of de verhoging of verlaging door de stuwende werking van de wind. Deze fluctuaties worden eerst uitgemiddeld tot een gemiddelde zeespiegel. Het begrip gemiddelde zeespiegel kent overigens ook 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 getijcycli met langere perioden. Dat betekent dat langere meetreeksen dan deze perioden nodig zijn om deze cycli te identificeren. Dat is wel van belang om te voorkomen dat een waargenomen versnelde zeespiegelstijging ten onrechte wordt toegeschreven aan een versterkt broeikaseffect.

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 niet verstaan het verschil tussen de jaargemiddelde zeestanden van opeenvolgende jaren. Onder de zeespiegelstijging wordt hier verstaan de helling van de kromme door de jaargemiddelde zeestanden, die het trendmatige verloop van de jaargemiddelde zeestanden beschrijft door het zo goed mogelijk uitfilteren van toevallige fluctuaties (ruis).

2.2 Het Normaal Amsterdams Peil (NAP)

Het nationale referentievlak voor de hoogteligging op het land, het NAP (Normaal Amsterdams Peil), is vastgelegd door de halfbolvormige bovenkant van een bronzen bout in de kop van een 22 m lange op een pleistocene zandlaag gefundeerde betonpaal onder de Dam te 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 A). 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 afgeleid van de hoogten van de ondergrondse merken.



Figuur 2.2.1. Nulpalen bij de peilmeetstations (uit: De Bruijne et al., 2005)

In en rond peilmeetstations langs kust, estuaria, meren en grote rivieren zijn de afgelopen decennia (vanaf halverwege de zestiger jaren) nulpalen geplaatst (figuur 2.2.1 en tabel 2.4.1), die een stabiel referentiepunt voor de waterstandsmetingen vormen. 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 Data-ICT-Dienst van de Rijkswaterstaat. Begin 2004

kende het primaire net van het NAP 362 hoofdpunten: 295 ondergrondse merken en 67 nulpalen (De Bruijne et al., 2005).

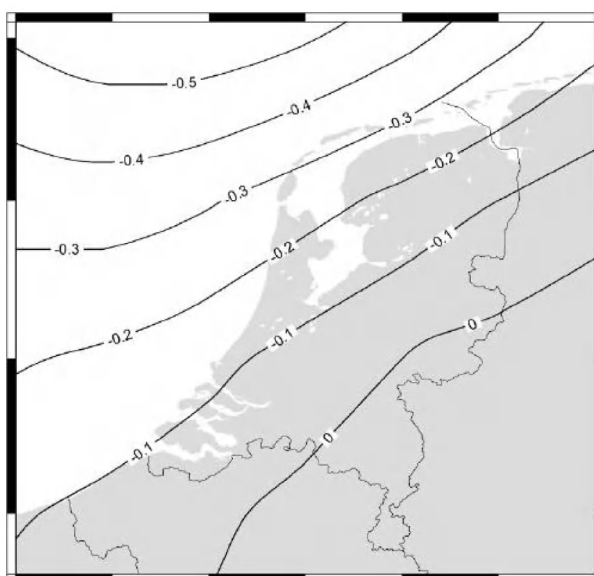
De onderlinge hoogteverschillen van de ondergrondse merken worden bepaald met een zogenaamde primaire waterpassing, meestal aangeduid met nauwkeurigheidswaterpassing (NWP). Na de 4^e NWP (1965-1978) werd het reeds vermoede bestaan van bewegingen aangetoond. Na analyse van de resultaten van de 5^e NWP (1996-1999) is vast komen te staan dat er verschillen bestaan tussen de formeel bestaande hoogtes van 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 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. De publicatie verloopt volledig via internet (www.rdnap.nl). In bijlage A 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 (zie hoofdstuk 3). 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 10 cm/eeuw (bv. door de gaswinning in Noord Holland).

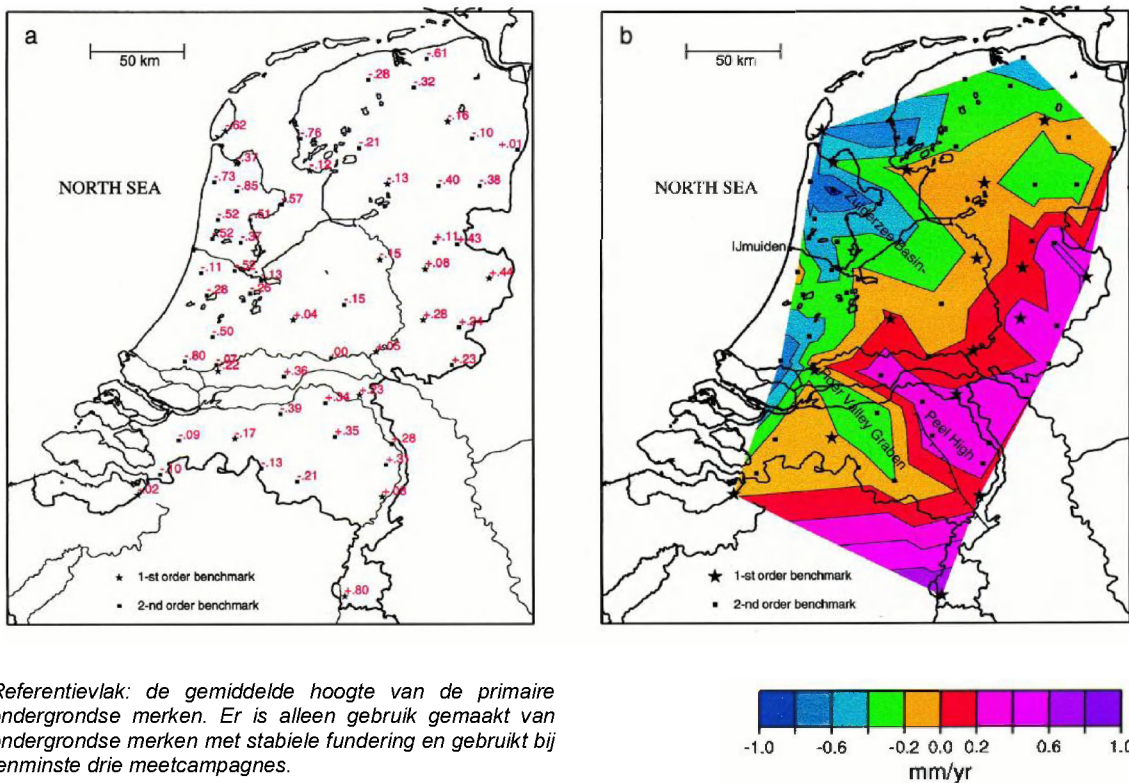
2.3 Geologische achtergronden

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.



Figuur 2.3.1 Schatting van de huidige bodembeweging (mm/jaar t.o.v. het centrum van de aarde) door post glacial rebound (uit: Kooi et al., 1998)

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, bijvoorbeeld door compactie.



Figuur 2.3.2 Regionale verticale bodembeweging van de top van het pleistoceen in Nederland (mm/jaar), volgend uit de resultaten van de 2^e t/m de 4^e nauwkeurigheidswaterpassingen en de secundaire waterpassingen (voor de instandhouding van gewone peilmerken van het NAP) van 1979-1987. Uit (Kooi et al, 1998)

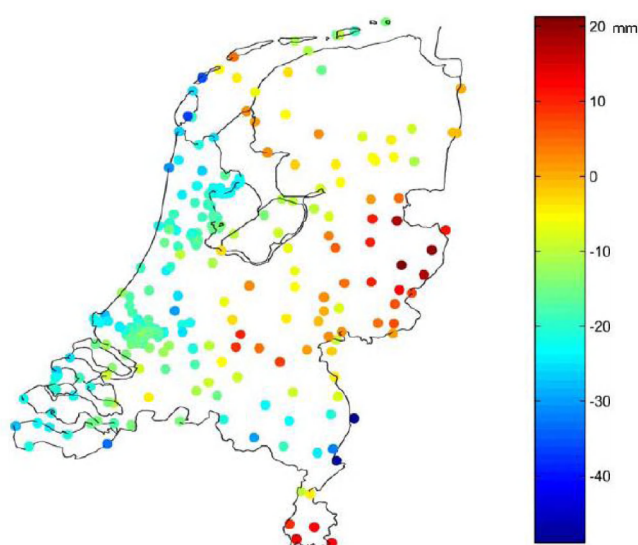
Compactie is de dikteverandering van lagen, bijvoorbeeld als gevolg van belasting, verandering van de stijghoogte van het grondwater of delfstofwinning (olie, gas). Vooral de compactie van Tertiaire kleipakketten, dus onder de Pleistocene zanden gelegen, speelt een rol bij de huidige bodemdaling door 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).

Isostatische beweging wordt veroorzaakt door herstel van het verstoorde evenwicht van 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 is "post glacial rebound". Figuur 2.3.1 geeft de meest recente en waarschijnlijke schatting op basis van modelberekeningen van de huidige bodembeweging door deze "post glacial rebound" (Kooi et al, 1998). Ook afgezette dikke sedimentpakketten vormen een

belasting voor de lithosfeer. Voor de Nederlandse kust wordt de bijdrage van de isostasie aan de bodemdaling volgens figuur 2.3.1 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. De samenwerking tussen geodeten en geologen heeft geleid tot het kaartje van de relatieve verticale pleistocene beweging van Nederland in figuur 2.3.1. (Kooi et al., 1998). Hierin zijn de gegevens van de 5^e NWP nog niet verwerkt. Daarom staan de relatief recente nulpalen van de peilmeetstations nog niet in dit overzicht. Recente bodemdaling vanwege de gaswinning in Groningen is buiten beschouwing gelaten. Een geactualiseerd plaatje is nog niet beschikbaar.

Uit de geodetische metingen van de bodemdaling en de berekende bijdragen van isostasie en compactie daarin, volgde een onverwacht grote resterende bijdrage van de tektoniek. Figuur 2.3.2.b. laat zien 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 zijn te herkennen.



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, bijdrage Kyra van Onselen).

2.4 De NAP-publicatie 2005

De nieuwe NAP-publicatie heeft gevolgen voor de tijdreeksen van de verschillende zeeniveau's. 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 sprongetje 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 referentiewaarde. De veranderingen in de NAP-waarden voor de nulpalen van de peilmeetstations langs de kust zijn gegeven in tabel 2.4.1.

Figuur 2.4.1. geeft de hoogteverschillen van alle punten van het primaire net voor en na de NAP-publicatie van 1-1-2005. Veel van de karakteristieken van figuur 2.3.1.b zijn hierin terug te vinden.

Tabel 2.4.1 Hoogtewijzigingen m.i.v. 1 januari 2005 van de nulpalen bij de kuststations

Naam	Nummer	1 ^e waterpassing	Hoogte oude NAP [m]	Hoogte nieuwe NAP [m]	Vershil [m]
Nes	2592		3,7722	3,7611	-0,0111
Schiermonnikoog	2594		2,3559	2,3462	-0,0097
Hansweert	4010	1-1-1965	4,7587	4,7448	-0,0139
Terneuzen	4018	1-1-1067	7,3191	7,2980	-0,0211
Harlingen	4020	1-1-1966	6,9925	6,9860	-0,0065
Hoek van Holland	4021	1-1-1969	4,8548	4,8271	-0,0277
Scheveningen	4022	15-6-1970	6,5020	6,4898	-0,0122
Lauwersoog	4025	1-1-1969	6,9485	6,9360	-0,0125
Westkapelle	4033	1-1-1979	7,5037	7,4819	-0,0218
Den Helder	4036	15-6-1970	6,2707	6,2539	-0,0168
Oudeschild	4037	15-6-1970	6,7383	6,7180	-0,0203
Terschelling	4038	15-6-1970	6,7642	6,7428	-0,0214
Delfzijl	4041	1-1-1978	4,2853	4,2771	-0,0082
Eemshaven	4042	1-1-1978	3,7917	3,7814	-0,0103
IJmuiden	4049	1-1-1980	4,4713	4,4495	-0,0218
Den Oever	4050	1-1-1981	4,9407	4,9154	-0,0253
Kornwerderzand	4051	1-1-1981	5,2680	5,2705	0,0025
Vlieland	4054	1-1-1981	6,8184	6,7967	-0,0217
Petten	4066	20-9-1997	6,5841	6,5530	-0,0311
Vlissingen	4068	31-8-1982	4,6998	4,6701	-0,0297
Cadzand	4088	8-1-1988	6,0700	6,0426	-0,0274
Bath	4097	29-8-1992	4,1064	4,0893	-0,0171
Nieuwe Statenzijl	4098	5-12-1994	8,0605	8,0576	-0,0029

Opmerking bij de stations Nes en Schiermonnikoog:geen nulpaal, maar ondergronds merk van de DID, vergelijkbaar met nulpaal, maar verder van peilmeetstation.

De beschouwde hoofdstations zijn vet weergegeven.

2.5 Hoe om te gaan met de bodemdalingscomponent in de zeespiegelstijging?

Behalve Kornwerderzand hebben de nulpalen van alle peilmeetstations formeel een lagere NAP-hoogte gekregen op 1 januari 2005. Dat betekent dus dat 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 trendanalyse van de tijdreeksen van de gemiddelde zeeniveau's.

Voor een zo zuiver mogelijke trendanalyse kan nu uit twee uitgangspunten gekozen worden:

- a) Het beschouwen van de relatieve zeespiegelstijging langs de kust ten opzichte van het NAP vlak, vastgelegd door het cluster ondergrondse merken op de Veluwe. Dat wordt bereikt door de sprong van 2005 uit te smeren, bijvoorbeeld over de periode 1926 -2005 (1926 is het basisjaar van de ondergrondse merken van het NAP).
- b) Het beschouwen van de relatieve zeespiegelstijging van de stations ten opzichten van het referentievlak ter plaatse van de kust (deze komt ongeveer overeen met die van het kustfundament. De zakking van dit referentievlak ten opzichte van het NAP (ongeveer 2 cm per eeuw wordt dan meegenomen in de relatieve zeespiegelstijging. Dat wordt bereikt door de aanpassing van 2005 over de jaren vanaf 2005 terug te corrigeren, dus doen alsof de NAP-publicatie 2005 niet was ingevoerd.

Ad a) De sprong van 2005 uitsmeren, bijvoorbeeld over de periode 1926 (basisjaar ondergrondse merken van het NAP) tot 2005

Het uitsmeren van de NAP-2005-correcties over de periode 1926-2005 zou betekenen, dat aangenomen wordt dat de correctie van de NAP-publicatie van 2005 lineair is toegenomen van nul in 1926 tot de correctiewaarde in 2005. De gegevens van voor 1926 zijn minder betrouwbaar. Bij de 2^e NWP is men begonnen met het plaatsen van ondergrondse merken. De meeste nulpalen dateren van na 1970. Voor de periode daarvoor is de aansluiting dus nog steeds onzeker. Voor Delfzijl komt daar nog bij dat daar de hoogten van de nulpalen in het verleden wel regelmatig zijn bijgesteld vanwege de bodemdaling door delfstofwinning. De daling van de bodem bij Delfzijl, inclusief de nulpaal, door de gaswinning is veel groter dan de grootte van de correctie van 2005. Voor een goede bewegingsanalyse analyse per station moet ook nog rekening worden gehouden met lokale beweging, bijvoorbeeld door negatieve kleeft of grondwateronttrekking.

Er vallen dus veel vraagtekens te plaatsen bij deze wijze van uitsmeren. Vooralsnog wordt hiervan afgezien. Bovendien wordt de daling van de kust (kustfundament) ten opzichte van het NAP vlak in dit geval niet meegenomen, maar zou als aparte toeslag in rekening moeten worden gebracht.

Ad b) De sprong van 2005 over de jaren vanaf 2005 terug corrigeren, dus doen alsof de NAP-publicatie 2005 niet was ingevoerd.

Deze aanpak geeft het beste de relatieve zeespiegelstijging weer t.o.v. de top van het pleistoceen, omdat de hoogten van de ondergrondse merken tot 2005 nooit zijn aangepast. De daling van het pleistoceen en dus ook van het kustfundament zit impliciet in deze data. Voor het bepalen van de benodigde suppletiehoeveelheden is dat het beste uitgangspunt, immers voor het meegroeien van het kustfundament moet ook deze daling worden gecompenseerd. Deze optie zal daarom hier worden toegepast.

Opgemerkt moet worden dat in de praktijk de nieuwe merkhoogten 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 wordt 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.

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.

Voor de PSMSL (Permanent Service for Mean for Mean Sea Level), een instantie in Engeland, die gegevens van gemiddelde zeestanden verzameld over de hele wereld, is dat

reden om van de “beste” stations te verlangen dat zij hun gemiddelde zeeniveau's berekenen ten opzicht van een vaste bout in een nabijgelegen rots. Om die reden behoren de door Nederlandse geleverde meetreeksen niet bij de hoogste klasse van peilmeetstations. Dat is jammer, want Nederland heeft lange peilmeetreeksen, en peilmeetstations en bijbehorende gegevensverwerking van zeer hoge kwaliteit.

Nu kent Nederland langs de kust geen rotsen, maar de bouten in de nulpalen kunnen dezelfde rol vervullen. Het is 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 bout in de nulpalen. Deze reeksen worden dan niet “vervuild” door aanpassingen van de NAP-hoogten. Nog beter is om de peilmeetstations, in ieder geval de hoofdpeilmeetstations ook te voorzien van permanente GPS-hoogtemetingen.

Door de sprong van 2005 terug te corrigeren blijft de hoogte van de bout op de nulpaal dus onveranderd vanaf het plaatsen van de nulpaal. Helaas geldt dat niet voor Harlingen en Delfzijl.

Pogingen in het verleden om voor alle peilmeetstations langs de kust de tijdreeksen van jaargemiddelde zeestanden voor bodemdaling vóór het plaatsen van de nulpalen te corrigeren 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 met name 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.

2.6 Absolute beweging van het NAP-vlak

Het huidige NAP is thans opgehangen aan een cluster van stabiele ondergrondse merken op de Veluwe. De overige ondergrondse merken en nulpalen worden hierop aangesloten, ook die van Amsterdam.

De verticale bewegingen van de ondergrondse merken, waarover in het voorgaande is gesproken, zijn altijd beschouwd in onderlinge samenhang en niet ten opzichte van een absoluut referentievlak, bijvoorbeeld ten opzichte van het gemiddelde van het cluster stabiele ondergrondse merken op de Veluwe of ten opzichte van het gemiddelde van de primaire ondergrondse merken. Dan dient nog de vraag gesteld te worden of het NAP-vlak als geheel in verticale zin beweegt ten opzichte van een referentie-ellipsoïde of ten opzichte van het centrum van de aarde. Met andere woorden: zijn de gemeten stijgsnelheden van de gemiddelde zeespiegel absoluut of zit er een gemiddelde bodemdalingscomponent van heel Nederland in. Inzicht daarin kan worden verkregen met behulp van permanente GPS-metingen en zwaartekrachtmetingen. De tijdreeksen van deze metingen zijn echter nog te kort om daarover een betrouwbare uitspraak te doen (Reudink en Klees, 2009). Uitgangspunt

hier is dat het cluster ondergrondse merken op de Veluwe, waaraan het NAP is opgehangen, niet of verwaarloosbaar in verticale zin ten opzichte het centrum van de aarde beweegt. Dat betekent dat de zeespiegelstijging ten opzichte van het NAP bij grote benadering gelijk gesteld wordt aan de absolute zeespiegelstijging.

2.7 De bepalingswijze van de gemiddelde zeestanden

Behalve over de bodemdalingscomponent valt ook het nodige te zeggen over de verschillende manieren waarop de gemiddelde zeestanden in de loop van de jaren zijn 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, waarmee 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 gemiddelde zeestanden ook nog berekend uit halftijstanden met een correctie, waarbij de halftijstanden werden berekend uit de 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.

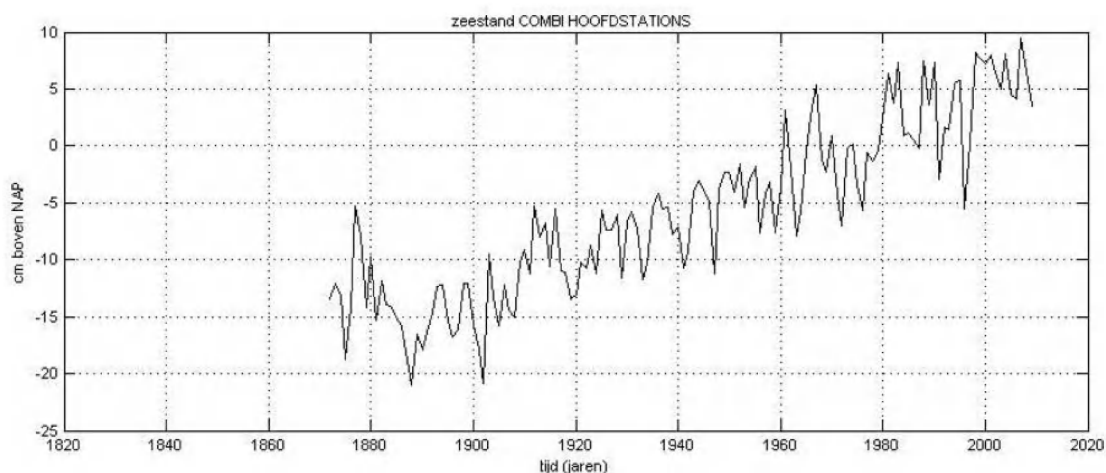
Ad 5. In 1987 zijn de peilschrijvers vervangen door digitale niveaumeters, waarmee de inwinning van tienminuutsgemiddelden van de waterstanden volledig automatisch geschiedt. Sindsdien worden jaargemiddelde waterstanden berekend uit alle tienminuutsgemiddelden.

Het zal duidelijk zijn dat de huidige bepalingswijze van de gemiddelde zeestanden uit tienminuutsgemiddelde 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).

2.8 Ongecorrigeerde tijdreeksen

In figuur 2.8.1 is de tijdreeks van het gemiddelde van de jaargemiddelde zeestanden van de zes hoofdpeilmeetstations gegeven langs de Nederlandse kust: Delfzijl, Harlingen, Den Helder, IJmuiden, Hoek van Holland en Vlissingen. Van deze stations zijn lange tijdreeksen beschikbaar. Hiermee wordt een goede indruk verkregen van de gemiddelde relatieve zeespiegelstijging (t.o.v. het NAP) langs de Nederlandse kust. Figuur 2.8.1 geeft het verloop vanaf het jaar dat voor alle zes stations data beschikbaar is. De tijdreeksen van de afzonderlijke stations zijn gegeven in bijlage B. Deze tijdreeksen zijn nog niet gecorrigeerd voor de NAP-publicatie 2005. Het zijn de "ruwe" data zoals die door de Rijkswaterstaat geleverd worden.



Figuur 2.8.1 Gemiddelde zeestand, gemiddeld over de zes hoofdstations

De tijdreeksen zien er nogal grillig uit. Verschillen van jaar tot jaar worden voornamelijk veroorzaakt door verschillen in windklimaat, luchtdruk, watertemperatuur en zoutgehalten. Verder zijn er altijd meetfouten en gaat ook de gegevensverwerking met onnauwkeurigheden gepaard, vooral in de tijd vóór de automatisering van de gegevensinwinning en -verwerking. Zoals uit de voorgaande paragrafen aangegeven, zijn er ook onnauwkeurigheden ontstaan door de aansluiting van de hoogtemetingen van de peilmeetstations op het NAP en door de manier waarop de gemiddelde zeestanden zijn berekend. De gegevens zijn het nauwkeurigst vanaf het moment dat zowel een nulpaal in gebruik is, als de berekening van de gemiddelde jaarstanden gebaseerd is op 3-uurlijkse waarnemingen, behoudens de sprong in de data door de invoering van de NAP-publicatie van 2005.

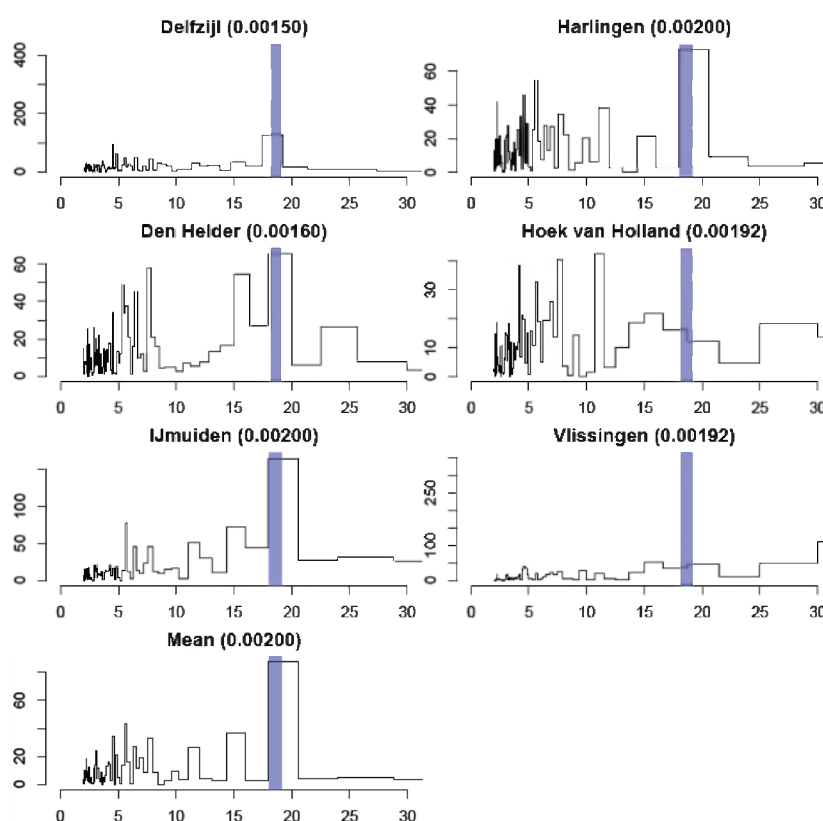
In Bijlage B is te zien dat na ongeveer 1890 alle hoofdstations een onmiskenbare monotoon stijgende trend volgen. Daarvóór is dat niet voor alle stations het geval, met name voor Delfzijl, IJmuiden en Vlissingen niet. Een bevredigende verklaring daarvoor is tot nu toe niet gevonden.

Het grillige verloop van de tijdreeksen vereist een adequate analysemethode om iets over de zeespiegelstijging en een mogelijke versnelling daarin te kunnen zeggen. Met andere woorden: hoe trek je op een verantwoorde manier een vloeiend verloop door het grillige

signaal. Men zou kunnen proberen eerst de ruis te verminderen door te corrigeren voor de fluctuaties in de bovengenoemde veroorzakende factoren. Dat is in het verleden wel geprobeerd, zonder dat dat veel reductie in de ruis opleverde. Een nieuwe poging valt buiten de scope van het onderhavige onderzoek, maar verdient zeker aandacht in de toekomst.

2.9 De 18,6-jarige cyclus

In deze paragraaf komt, naast de correctie voor de NAP-publicatie van 2005, nog een tweede correctieterm aan de orde, namelijk die voor de invloed van de 18,6-jarige cyclus in de tijdreeksen van jaargemiddelde zeestanden. De “gewone” getijcomponenten met periodes veel kleiner dan een jaar worden in de jaargemiddelde zeestanden uitgemiddeld, een getijcomponent met een cyclus van 18,6 jaar echter niet. Figuur 2.9.1 laat het resultaat zien van een spectraalanalyse op de data van de zes hoofdstations en op de gemiddelde tijdreeks van die stations. De data tot 1890 zijn daarbij buiten beschouwing gebleven. De data vanaf 2005 zijn gecorrigeerd voor het effect van de NAP-publicatie van 2005.



Figuur 2.9.1. Spectra van de tijdreeksen van de gemiddelde zeespiegel vanaf 1890. Vanaf 2005 zijn de data gecorrigeerd voor het effect van de NAP-publicatie van 2005. De horizontale as geeft de periode (jaren), de verticale as de variantiedichtheid. De blauwe verticale balk geeft de positie van de 18,6-jarige cyclus weer.

De stations Delfzijl, Den Helder, IJmuiden en Harlingen laten duidelijk een piek zien rond de positie van de 18,6-jarige cyclus (verticale blauwe balk). Ook in het spectrum van de gemiddelde tijdreeks is de 18,6-jarige cyclus duidelijk aanwezig. Bij de stations Hoek van Holland en Vlissingen is dat niet het geval. De reden daarvan is niet duidelijk.

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).

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.

Omdat het astronomische getij het gevolg is van de bewegingen en onderlinge aantrekkingskrachten van het systeem zon-aarde-maan, is de 18,6-jarige cyclus in het getij terug te vinden. Hoewel men deze periode niet in de tijdreeksen van jaargemiddelde zeestanden zou verwachten, blijkt die daar toch in te zitten, vermoedelijk door niet-lineaire interacties in ondiepe randzeeën, zoals de Noordzee.

Deze cyclus heeft dus niets te maken met zeespiegelstijging als gevolg van klimaatverandering, maar zorgt wel voor een periodieke stijgings- en dalingsbijdrage in de tijdreeksen van de gemiddelde zeespiegel. Om die reden wordt deze deterministische component uit de data gefilterd, alvorens analyses voor zeespiegelstijging toe te passen.

Voor het bepalen van de grootte van de amplitude van de 18,6-jarige cyclus is de volgende formule gebruikt:

$$hv = \beta_0 + \beta_1 t + A \sin \left\{ \frac{2\pi(t + \phi)}{18.613} \right\}$$

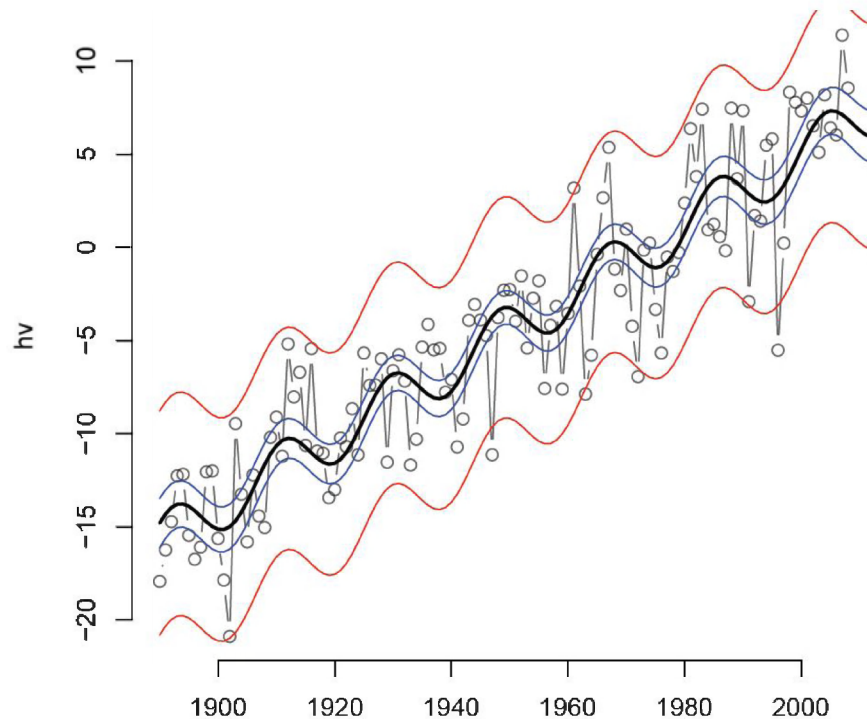
Hierin is t het jaartal. Dit is dus de som van een rechte lijn en een sinus met amplitude A en fase ϕ . De coëfficiënten β_1 , A en ϕ worden berekend op basis van een kleinste kwadraten aanpassing aan de data vanaf 1890. Figuur 2.9.2 geeft het resultaat van de analyse op de gemiddelde kromme van de zes hoofdstations. De amplitude A in deze figuur bedraagt 1,5 cm.

2.10 Keuze voor de te analyseren tijdreeksen

Trendanalyses worden uiteindelijk uitgevoerd op de volgende data:

1. De gemiddelde zeestanden gecorrigeerd voor het effect van de NAP-publicatie van 2005 en de 18,6-jarige knopencyclus.
2. Beperking tot de hoofdstations Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl. Van deze stations zijn lange tijdreeksen beschikbaar. Ze liggen goed verspreid langs de Nederlandse kust en geven daarmee een goed beeld van de

relatieve zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Het zijn ook peilmeetstations die nog steeds bestaan en waarvan aangenomen mag worden dat ze dat tot in lengte van jaren zullen blijven doen.



Figuur 2.9.2 De knopencyclus in de tijdreeks vanaf 1890 van het gemiddelde van de tijdreeksen van gemiddeld hoogwater van de zes hoofdstations. Op de verticale as staat het gemiddelde zeeniveau langs de kust [cm]. De blauwe lijnen geven het 95% betrouwbaarheidsinterval van de regressielijn (zwarte lijn). De rode lijnen geven het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de voorspellingen van de jaarwaarden (predictie-interval).

2.11 Samenvatting

In Nederland worden waterstanden gemeten ten opzichte van het NAP. Het NAP werd vanouds vastgelegd door een ondergronds merk onder de Dam in Amsterdam. Het NAP is over Nederland verspreid door een netwerk van ondergrondse merken, die alle gefundeerd zijn op het pleistoceen.

Gebleken is dat de bovenkant van het pleistoceen niet zo stabiel is als oorspronkelijk werd aangenomen.

De belangrijkste natuurlijke oorzaken zijn isostasie (aanpassingen van de aardkorst onder invloed van veranderende belastingen door ijskappen, sedimenten en zeespiegelstijging), compactie van Tertiaire kleilagen (samendrukken van sedimentpakketten door het gewicht van bovenliggende sedimentpakketten) en tektoniek (vervormingen van de aardkorst als gevolg van de dynamiek in het binnenste van de aarde, al dan niet langs breuklijnen).

De geconstateerde discrepanties in de NAP-hoogten van de ondergrondse merken hebben geleid tot een nieuwe NAP-publicatie in 2005, waarmee de werkelijke hoogteverschillen in Nederland weer correct worden weergegeven.

De geschiedenis van het NAP en de NAP-publicatie van 2005 laten zien dat in de meetreeksen van gemiddelde waterstanden langs de Nederlandse kust componenten van bodembeweging zitten, alsmede invloeden die samenhangen met veranderingen in de configuratie van de netwerken van het NAP. Het geheel elimineren van deze invloeden is onmogelijk. Voor het bepalen van de zeespiegelstijging ten opzichte van de bovenkant van het pleistoceen, van belang voor het mee laten groeien van het kustfundament, is ervoor gekozen de te analyseren tijdreeksen te corrigeren voor het effect van de NAP-publicatie van 2005.

Aangenomen wordt dat het cluster ondergrondse merken op de Veluwe, waaraan het NAP thans is opgehangen, in verticale zin niet of verwaarloosbaar beweegt ten opzichte van het middelpunt van de aarde.

Het is gewenst om de waterhoogten niet alleen ten opzichte van het NAP vast te leggen, maar ook ten opzichte van de vaste bout op de nulpaal. Het uitrusten van de hoofdstations met vaste GPS-meetopstellingen wordt daarbij sterk aanbevolen.

De gemiddelde zeestanden zijn in de loop der jaren op verschillende manieren bepaald. De oudste bepalingswijze is uit de zogenaamde daghalftijstanden, het gemiddelde van het daghoog- en laagwater (d.i. tussen 6 en 18 uur), de nieuwste uit 10-minuten (vanaf 1987) standen.

De tijdreeksen van gemiddelde zeestanden zien er nogal grillig uit. Verschillen van jaar tot jaar worden voornamelijk veroorzaakt door verschillen in windklimaat, luchtdruk, watertemperatuur en zoutgehalten. Verder zijn er altijd meetfouten en gaat ook de gegevensverwerking met onnauwkeurigheden gepaard. Ook zijn onnauwkeurigheden ontstaan door de aansluiting van de hoogtemetingen van de peilmeetstations op het NAP en door de manier waarop de gemiddelde zeestanden zijn berekend.

In de tijdreeksen van de gemiddelde zeestanden langs de Nederlandse kust blijkt een periodieke component te zitten met een periode van 18,6 jaar. Deze periode hangt samen met de verandering in de helling van het vlak van de maansbaan om de aarde ten opzichte van de ecliptica. De amplitude van deze component in de gemiddelde tijdreeks van de zes hoofdstations bedraagt 1,5 cm.

Trendanalyses worden uitgevoerd op de volgende data:

1. De gemiddelde zeestanden gecorrigeerd voor het effect van de NAP-publicatie van 2005 en de 18,6-jarige knopencyclus.
2. Beperking tot de hoofdstations Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl. Van deze stations zijn lange tijdreeksen beschikbaar. Ze liggen goed verspreid langs de Nederlandse kust en geven daarmee een goed beeld van de relatieve zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Het zijn ook peilmeetstations die nog steeds bestaan en waarvan aangenomen mag worden dat ze dat tot in lengte van jaren zullen blijven doen.

3 Analyse gecorrigeerde data Nederlandse hoofdpeilmeetstations

In dit hoofdstuk worden de uitgevoerde analyses op de gecorrigeerde tijdreeksen van de gemiddelde zeestanden van de zes hoofdpeilmeetstations beschreven. Deze analyses zijn gericht op het schatten van de huidige zeespiegelstijging en het aantonen van een eventuele versnelling hierin. Verschillende analysemethoden en -perioden zijn toegepast om tot een zo goed mogelijk rekenmodel te komen.

3.1 Lineaire en kwadratische regressie-analyse

Als eerste verkenning zijn trendlijnen berekend voor de tijdreeksen vanaf 1890 van de zes hoofdstations en van hun gemiddelde. Daarvoor zijn twee modellen gebruikt: een lineaire regressie : $h = \beta_0 + \beta_1 t$

en een kwadratische regressie (met een kwadratische term toegevoegd aan de lineaire vergelijking): $h = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2$

De coëfficiënten β_i volgen uit een kleinste kwadraten aanpassing aan de data. Doel hiervan is om vast te stellen of een kwadratische regressielijn, die dus een bepaalde kromming toestaat, significant beter is dan een lineaire.

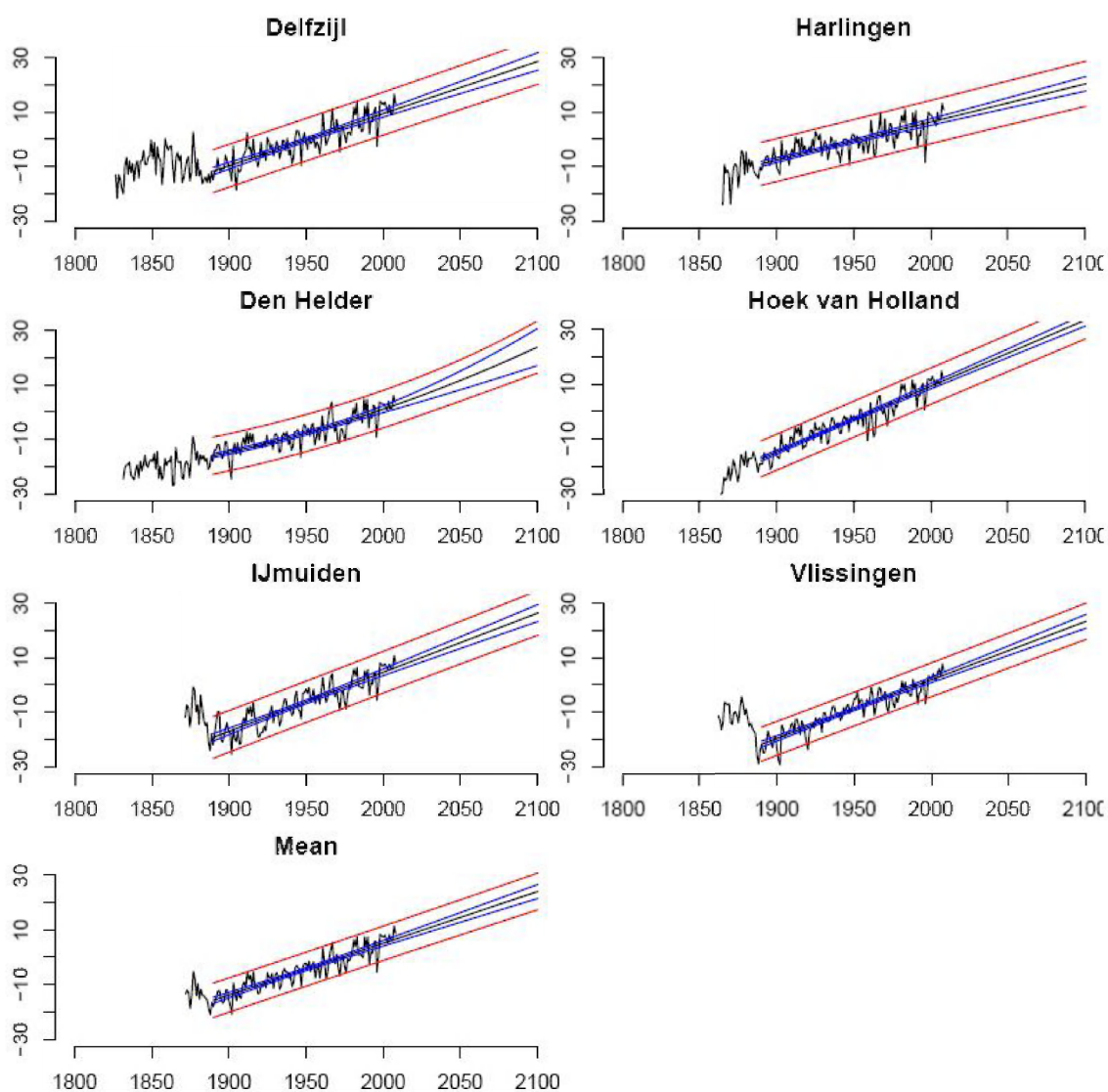
Tabel 3.1.1 Coëfficiënten lineaire regressie

Station	$\beta_{0,2,5\%}$ (cm)	$\beta_{0,97,5\%}$ (cm)	$\beta_{1,2,5\%}$ (cm/jaar)	$\beta_{1,97,5\%}$ (cm/jaar)
Delfzijl	-414	-333	0,171	0,212
Harlingen	-303	-242	0,124	0,155
Den Helder	-292	-253	0,126	0,146
IJmuiden	-466	-388	0,196	0,236
Hoek van Holland	-496	-446	0,227	0,253
Vlissingen	-458	-394	0,198	0,230
Gemiddelde	-405	-340	0,172	0,205-

Tabel 3.1.2 Coëfficiënten kwadratische regressie

Station	$\beta_{0,2,5\%}$ (cm)	$\beta_{0,97,5\%}$ (cm)	$\beta_{1,2,5\%}$ (cm/jaar)	$\beta_{1,97,5\%}$ (cm/jaar)	$\beta_{2,2,5\%}$ (cm/jaar ²)	$\beta_{2,97,5\%}$ (cm/jaar ²)
Delfzijl	-1540	3577	-3,86	1,39	-3,07.10 ⁻⁴	1,04.10 ⁻³
Harlingen	-2795	358	-0,512	2,746	-6,73.10 ⁻⁴	1,68.10 ⁻⁴
Den Helder	206	1798	-2,022	-0,363	1,30.10⁻⁴	5,62.10⁻⁴
IJmuiden	-2058	2889	-3,19	1,89	-4,29.10 ⁻⁴	8,73.10 ⁻⁴
Hoek van Holland	-2044	551	-0,816	1,866	-4,20.10 ⁻⁴	2,73.10 ⁻⁴
Vlissingen	-3976	47,6	-0,272	3,858	-9,35.10 ⁻⁴	1,25.10 ⁻⁴
Gemiddelde	-1627	2451	-2,71	1,48	-3,30.10 ⁻⁴	7,43.10 ⁻⁴

Gevonden werd dat alleen voor station Den Helder het toevoegen van de kwadratische term een significante verbetering opleverde van de verklaarde variantie van de waarnemingsreeksen ($\beta_2=0$ valt buiten het betrouwbaarheidsinterval van β_2 , zie tabel 3.1.2). Figuur 3.1.1 laat de regressielijnen en hun betrouwbaarheidsintervallen zien, welke zijn geëxtrapoleerd tot 2100 op basis van de gefitte krommen op de waarnemingsreeksen. Voor Den Helder is hiervoor de kwadratische regressielijn gebruikt, voor de andere stations de lineaire.



Figuur 3.1.1 Lineaire (Delfzijl, Harlingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Vlissingen, Gemiddelde) en kwadratische (Den Helder) regressielijnen en hun betrouwbaarheidsinterval; data-analyse vanaf 1890.

De huidige geschatte zeespiegelstijging (2009) volgens de regressielijnen van figuur 3.1.1 is gegeven in tabel 3.1.3. De lineaire regressie van Den Helder is toegevoegd.

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

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

Een belangrijke vraag is over welke periode een trend berekend moet worden om een goed beeld te krijgen van de huidige zeespiegelstijging. Een rekenmethode moet daarbij robuust zijn, d.w.z. dat een geringe wijziging van de dataset, zoals het toevoegen van een nieuw jaar aan de datareeks niet tot relatief grote afwijkingen in de schattingen mag leiden en moet iets zeggen over de zeespiegelstijging zelf en niet over de ruis op het signaal.

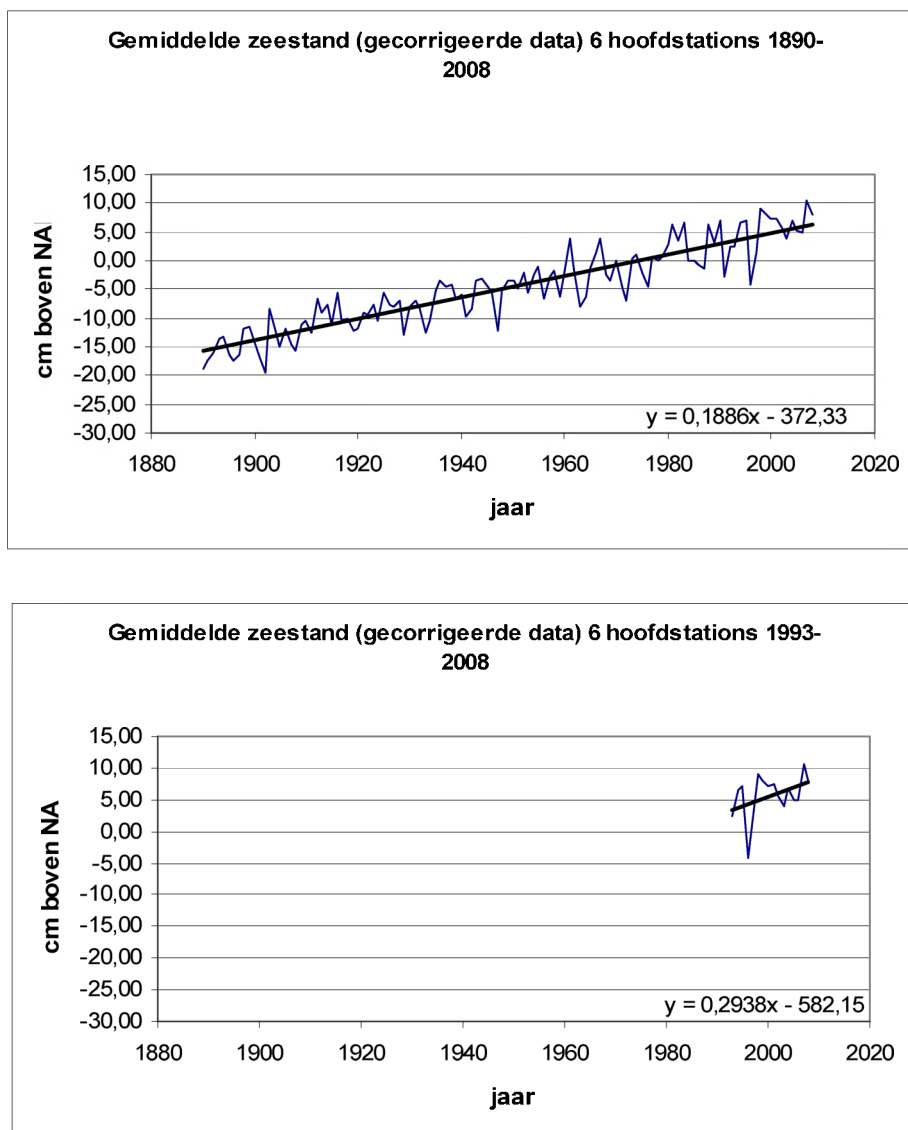
In tabel 3.1.4 zijn de lineaire trends voor de verschillende stations gegeven voor een aantal analyseperiodes. De tabel laat de gevoeligheid zien van de beginperiode en de lengte van de reeks waarover de trend wordt berekend. De analyseperiode 1993-2008 is toegevoegd, omdat dit de periode is waarover satellietdata beschikbaar zijn (zie hoofdstuk 5). Figuur 3.1.2 geeft als illustratie de perioden 1890-2008 en 1993-2008. In 1996 was de gemiddelde zeestand relatief laag, wat een relatief hoge trend oplevert voor deze periode. Bijlage C illustreert voor Delfzijl en Vlissingen waarom de berekende trends over de laatste 10 jaar zo opmerkelijk van elkaar en van de lange analyseperiode 1890-2008 verschillen. Een periode van 10 jaar levert duidelijk geen betrouwbare schatting voor de trend in de gemiddelde zeespiegel.

Een lineaire trend lijkt helemaal geen slechte benadering voor de zeespiegelstijging over de periode 1890-2008. Op het oog valt nog geen versnelling waar te nemen.

Tabel 3.1.4 Trends gemiddelde zeestanden (gecorrigeerde data) volgens lineaire regressie voor verschillende analyseperiodes (afgerond, cm/eeuw)

Station	1890-2008	1950-2008	1993-2008	1959-2008 laatste 50 jaar	1969-2008 laatste 40 jaar	1979-2008 laatste 30 jaar	1989-2008 laatste 20 jaar	1999-2008 laatste 10 jaar
Delfzijl	19	23	19	23	25	21	21	-15
Harlingen	13	16	43	15	15	12	36	12
Den Helder	15	18	22	20	27	15	19	3
IJmuiden	22	19	24	22	30	19	31	-3
Hoek van Holland	24	28	30	33	31	21	30	4
Vlissingen	21	17	38	20	26	26	39	38
Gemiddelde	19	20	29	22	26	19	29	7

Zelfs langs de betrekkelijk korte Nederlandse kust, zo blijkt dus uit tabel 3.1.4, doen zich verschillen voor in de relatieve verandering van de gemiddelde zeespiegel. Deels zijn daarvoor oorzaken aan te wijzen die samenhangen met menselijke ingrepen. Een belangrijk aspect voor het Waddengebied zijn bijvoorbeeld de morfologische ontwikkelingen, vooral als gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee. In de estuaria van de Westerschelde en de Eems-Dollard is bovendien invloed merkbaar van baggerwerkzaamheden. En dan is er ook sprake van een regionaal verschillende bodemdalingscomponent.

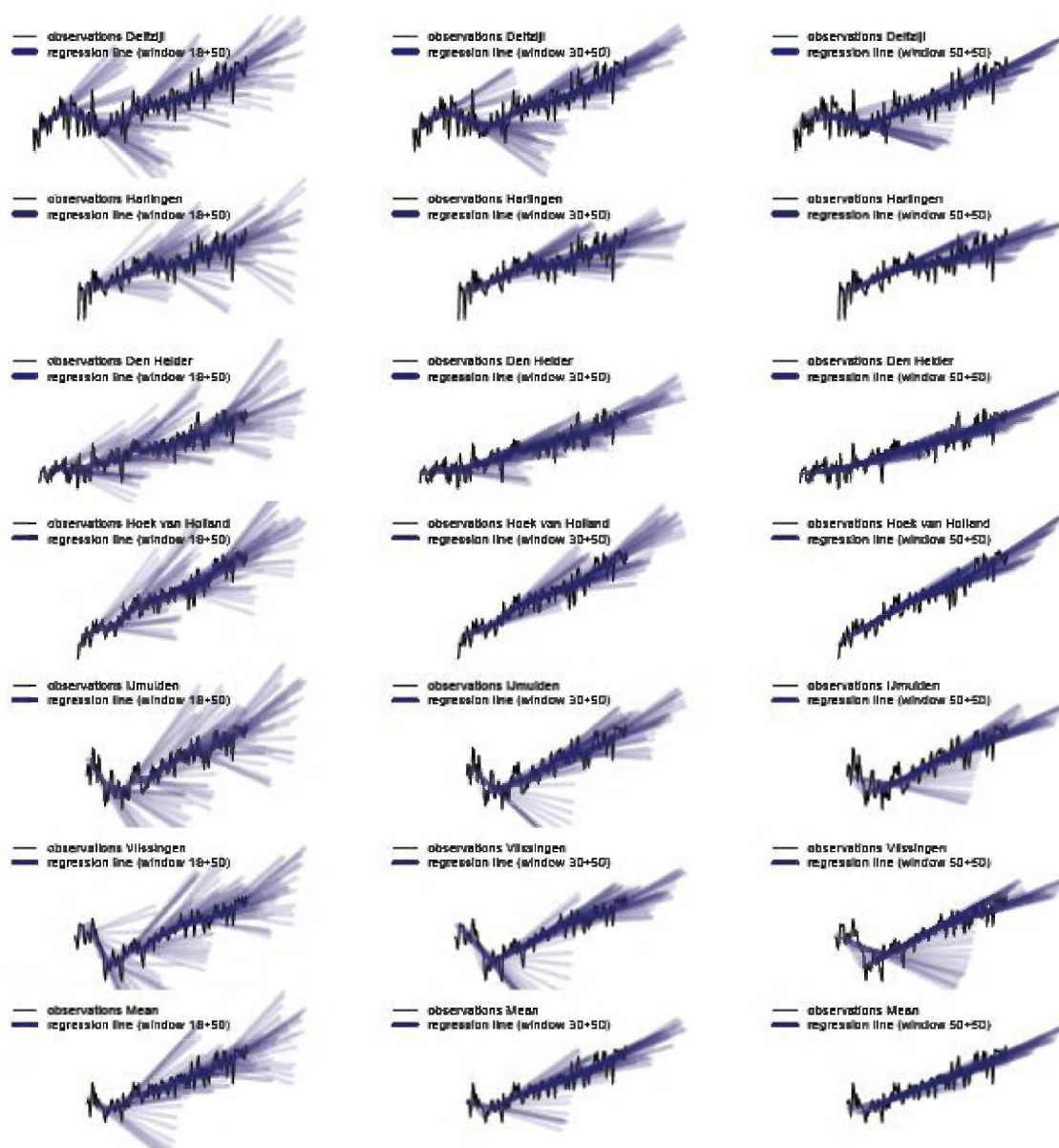


Figuur 3.1.2. Lineaire trend gemiddelde zeestand (gecorrigeerd), gemiddeld over de zes hoofdstations
Periodes 1890-2008 en 1993-2008

Lengte en beginpunt van de analysereeks blijken grote invloed te hebben op het berekende resultaat, dat ook per station verschilt. Een lineaire trend over de laatste 10 jaar is ook zeker geen geschikte schatting van de huidige gemiddelde zeespiegelstijging. De signaal-ruis verhouding is van dien aard dat een relatief lange analyseperiode nodig is voor een stabiele

schatting volgens een lineaire trendanalyse. De invloed van de correcties voor NAP en knopencyclus is ook groter voor korte periodes.

In figuur 3.1.3 wordt getoond wat het effect zou zijn geweest van het doen van voorspellingen 50 jaar vooruit op basis van 18, 30 respectievelijk 50 jaar waarnemingen. De procedure daarbij is als volgt. Kies een tijdvenster, bijvoorbeeld 30 jaar. Neem van de tijdreeks de eerste 30 jaar, bepaal de lineaire regressielijn door deze punten en extrapoleer ("voorspel") daarmee 50 jaar vooruit. De getrokken lijntjes zijn steeds zolang als het tijdvenster plus 50 jaar. Herhaal dit voor de jaren 2...31, 3...33, etc. Figuur 3.1.3 laat zien dat extrapolatie volgens een lineaire trendlijn tot zeer verschillende resultaten kan leiden, afhankelijk van het gekozen tijdvenster (positie en lengte).



Figuur 3.13 Voorspelling van de gemiddelde zeezustand 50 jaar vooruit met lineaire regressie op de waarnemingen in een lopend tijdvenster van 18, 30 respectievelijk 50 jaar.

3.2 Analyse met de Whittaker smoother

Een lineaire trend geeft vooral 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. Een goed alternatief is dan de zogenaamde Whittaker smoother, voor het eerst toegepast op tijdreeksen voor gemiddelde zeestanden in (Eilers, 2003). Deze smoother (letterlijk te vertalen als gladstrijker) minimaliseert de volgende *penalized sum of squares* (PSS):

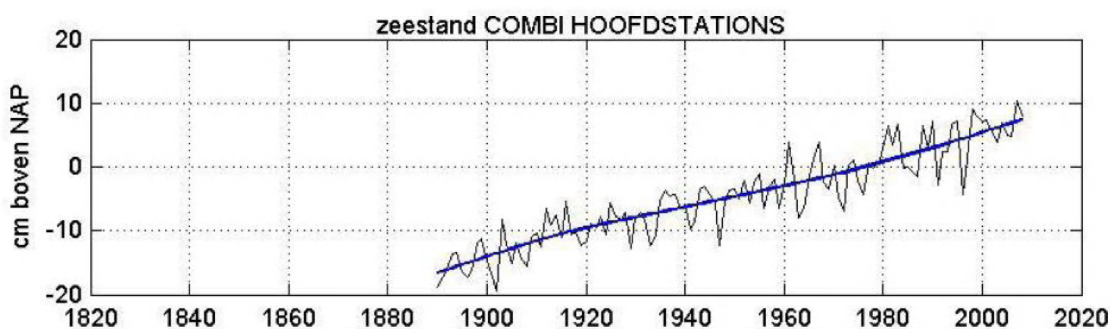
$$Q = \sum_i w_i (y_i - z_i)^2 + \lambda \sum_i (\Delta^2 z_i)^2$$

Hierin is y de meetreeks, geeft w gewichten, die 1 zijn als in een jaar gemeten is 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 de 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 zullen 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 overeenkomt met een lineaire regressie. Figuur 3.2.1 laat het resultaat zien van de toepassing van deze smoother op de gemiddelde tijdreeks van de zes hoofdstations vanaf 1890.

Bijlage D geeft de PSS-trendlijnen voor de afzonderlijke hoofdstations.

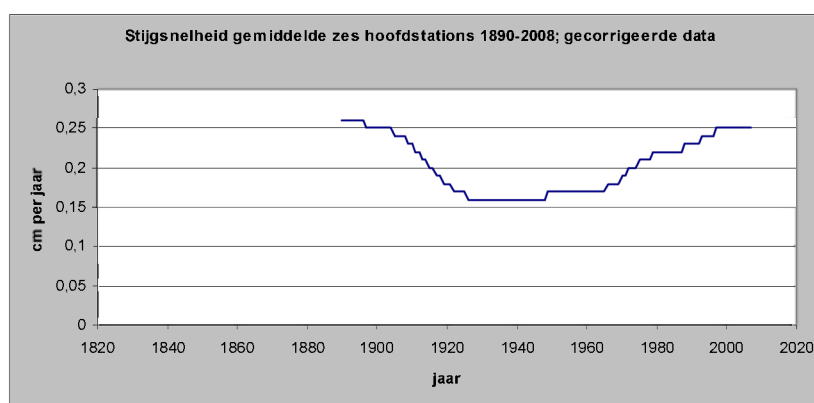


Figuur 3.2.1 Gemiddelde zeestand, gemiddeld over de zes hoofdstations; trend berekend met de Whittaker smoother, $\lambda=10^4$.

Hier is gekozen voor $\lambda=10^4$. Voor $\lambda=10^3$ bleek de toevoeging van het jaar 2009 aan de reeks zichtbaar invloed te hebben op de trend in de laatste jaren van de reeks, wat ongewenst is. Wordt $\lambda=10^5$ gebruikt, dan worden trendveranderingen in het verleden niet goed weergegeven: een te "strakke" smoother dus. De keuze voor $\lambda=10^4$ lijkt dus een goed compromis: niet zo gevoelig voor de toevoeging van een nieuw jaar en goed in staat echte trendveranderingen te volgen. Een automatische procedure om een optimale waarde voor λ te bepalen volgens een gesteld criterium is niet goed mogelijk, omdat dat alleen goed gaat

als de gegevens bestaan uit een gladde trend plus ongecorrleerde ruis, wat hier niet het geval is (Eilers, 2006). De keuze van λ is daarom gebaseerd op het "ingenieursoog" voor ronde waarden van λ . Bijlage E geeft voor het station Delfzijl de trendlijnen voor de drie genoemde waarden van λ . Hiervoor zijn nog de ongecorrigeerde data gebruikt. De data van Delfzijl laten goed zien hoe de smoother de data volgt, ook voor het afwijkende verloop van vóór 1890. Voor het principe van de methode maakt het niet uit welke data wordt gebruikt.

De verkregen trendlijn met $\lambda=10^4$ lijkt dus een goede robuuste schatting voor gemiddelde zeespiegelstijging te geven. De helling van de curve is een schatting voor de zeespiegelstijging op het betrokken moment.



Figuur 3.2.2 Stijgsnelheid gemiddelde zeestand (gecorrigeerde data), gemiddeld over de zes hoofdstations (1890-2008); trend berekend met de Whittaker smoother (PSS-analyse), $\lambda=10^4$.

Figuur 3.2.2 geeft het verloop van de stijgsnelheid van het gemiddelde van de zes hoofdstations. De kromme duidt op een soort S-kromme van zeespiegelstijging, een snellere zeespiegelstijging aan het begin en einde van de periode en een mindere stijging in het midden van de periode. Bijlage F geeft de verlopen voor de afzonderlijke stations. Tabel 3.2.1 geeft de gemiddelde stijgsnelheden over het laatste jaar en de laatste 10, 20, 30 en 40 jaar.

Tabel 3.2.1 Trends gemiddelde zeestanden (gecorrigeerd) volgens de Whittaker smoother gemiddelde over verschillende analyse perioden (afgerond, cm/eeuw)

Station	1969-2008 laatste 40 jaar	1979-2008 laatste 30 jaar	1989-2008 laatste 20 jaar	1999-2008 laatste 10 jaar	laatste jaar
Delfzijl	24	24	24	24	24
Harlingen	16	17	18	20	21
Den Helder	20	21	21	21	21
IJmuiden	23	25	27	27	27
Hoek van Holland	29	29	28	28	28
Vlissingen	22	25	28	30	30
Gemiddelde	23	24	24	25	25

De Whittaker smoother levert een stijgsnelheid in 2008 van 25 cm/eeuw. In 1990 was dat 23 cm/eeuw. Er lijkt sprake van een lichte versnelling, over de laatste decennia, vooral veroorzaakt door de noordelijke stations, maar de significantie hiervan kan niet worden aangetoond en ook niet of deze versnelling doorzet. Omdat elk station zijn eigen karakteristieke verloop heeft is het verstandig uit te gaan van het gemiddelde van de zes stations.

De waarden volgens de smoother op de gecorrigeerde data geven de beste schatting van de relatieve zeespiegelstijging ten opzichte van de bovenkant van het pleistoceen, omdat de NAP-correctie van 1 januari 2005 ongedaan is gemaakt in de data. Deze waarden zijn het meest relevant voor de zandsuppleties, immers ook de daling van het pleistoceen langs de kust moet worden gecompenseerd door zandsuppleties en niet alleen de zeespiegelstijging.

De daling van het pleistoceen langs de Nederlandse kust door isostasie, compactie en tektoniek wordt geschat op enkele cm's (2-4) per eeuw. Lokaal kunnen hogere waarden voorkomen tot maximaal 10 cm/eeuw. De geschatte gemiddelde zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust ten opzichte van het huidige NAP volgens het berekeningsmodel met de Whittaker smoother komt daarmee op 21-23 cm/eeuw in 2008 en 19-21 cm in 1990.

3.3 Samenvatting

Zelfs langs de betrekkelijk korte Nederlandse kust doen zich verschillen voor in de relatieve verandering van de gemiddelde zeespiegel. Deels zijn daarvoor oorzaken aan te wijzen die samenhangen met menselijke ingrepen.

Lengte en beginpunt van de analysereeksen hebben bij het toepassen van lineaire regressie grote invloed op het berekende resultaat, dat ook per station verschilt. Een lineaire trend over de laatste 10 jaar levert zeker geen geschikte schatting van de huidige gemiddelde zeespiegelstijging. De signaal-ruis verhouding is van dien aard dat een lange analyseperiode nodig is voor een stabiele schatting volgens een lineaire trendanalyse. Deze methode is geschikt voor een algeheel gemiddeld beeld, maar minder geschikt voor het nauwkeurig schatten van variaties in de zeespiegelstijging.

Voor het betrouwbaar vaststellen van een lineaire trend in de zeespiegelstijging is het noodzakelijk over een lange waarnemingsreeks te beschikken. Zelfs 30 jaar is weinig. Bij kortere reeksen wordt de betrouwbaarheidsband van de trend snel groter. Uitgaande van een parabolische fit wordt geen significante versnelling gevonden over de periode 1890-2008 (of voor kortere perioden).

De Whittaker smoother (een functievrije fittingsmethode) laat een sterkere stijging zien in de meer recente jaren. Het is echter (nog) niet mogelijk om de statistische significantie ervan te berekenen. Deze methode is vooral geschikt voor een visuele presentatie van het verloop van de gemiddelde zeespiegel en de zeespiegelstijging in de loop der jaren.

De Nederlandse data tonen "nog" geen significante versnelde stijging. De lineaire stijgsnelheid (periode 1890 - 2008) bedraagt 19 cm per eeuw met een bijbehorend betrouwbaarheidsinterval van 17 - 20 cm per eeuw. Alle waarden hierbij zijn afgerond op hele cm's.

4 Toekomstige zeespiegelstijging

Toe nu toe is uitsluitend gekeken naar de zeespiegelstijging in het heden en recente verleden. Een van de gestelde vragen in paragraaf 1.4 is, of voor het schatten van de huidige zeespiegelstijging ook rekening gehouden moet worden met verwachtingen voor de toekomst. Omdat de ontwikkelingen in de toekomst niet bekend zijn, wordt gebruik gemaakt van emissiescenario's (mogelijke plausibele ontwikkelingen) voor de uitstoot van broeikasgassen en wordt met behulp van modellen berekend wat de mogelijke gevolgen daarvan zijn voor o.a. de temperatuur en de zeespiegel. Het IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change) geeft mondiaal gemiddelde projecties voor de toekomst, het KNMI richt zich vooral op Nederland. Dit hoofdstuk beschrijft de scenario's van het 4^e Assessment Rapport (AR4) van het IPCC, de KNMI'06 scenario's en het bovengrensscenario van de Deltacommissie 2008.

4.1 IPCC-scenario's

De algemene verwachting is dat de gemiddelde zeespiegel door het versterkte broeikaseffect versneld zal stijgen. Zelfs bij stabilisatie van de huidige concentraties van broeikasgassen zal de zeespiegelstijging nog vele eeuwen doorgaan als gevolg van de traagheid van de opwarming van het oceaankwater. Hoe groot de totale stijging zal zijn, is erg onzeker.

Het IPCC concludeert in zijn 4^e Assessment Report (IPCC, 2007) dat menselijke activiteiten in belangrijke mate de oorzaak zijn van de warmer wordende wereld, met name vanaf het midden van de 20^e eeuw. De wetenschappelijke argumenten daarvoor zijn sterker geworden. Het is ook zeer waarschijnlijk dat de opwarming in de 20^e eeuw heeft bijgedragen aan de waargenomen mondiale zeespiegelstijging gedurende deze eeuw

Het IPCC heeft een groot aantal scenario's, mogelijke ontwikkelingen, beschreven voor de toekomstige emissie van broeikasgassen. Voor zes representatieve scenario's zijn in het 4^e assessmentrapport van het IPCC schattingen gegeven voor 2090-2099 ten opzichte van 1980-1999 van de bijbehorende temperatuurverhoging en zeespiegelstijging. Deze zijn weergegeven in tabel 4.1.1.

Tabel 4.1.1 Projecties voor de mondiaal gemiddelde stijging van de oppervlaktetemperatuur en de zeespiegel aan het eind van de 21^e eeuw.

Scenario	Temperatuurstijging [°C in 2090-2099 t.o.v. 1980-1999]		Zeespiegelstijging [m in 2090-2099 t.o.v. 1980-1999]
	Beste schatting	5% - 95% interval	
constante concentraties van het jaar 2000	0,6	0,3 - 0,9	--
B1	1,8	1,1 - 2,9	0,18 - 0,38
A1T	2,4	1,4 - 3,8	0,20 - 0,45
B2	2,4	1,4 - 3,8	0,20 - 0,43
A1B	2,8	1,7 - 4,4	0,21 - 0,48
A2	3,4	2,0 - 5,4	0,23 - 0,51
A1FI	4,0	2,4 - 6,4	0,26 - 0,59

De namen B1 t/m A1FI van de IPCC-scenario's vereisen wellicht nog enige toelichting.

De klimaatveranderingen in de toekomst worden berekend met behulp van klimaatmodellen. Men noemt dit projecties. Deze projecties hangen in sterke mate af van toekomstige menselijke activiteiten. Omdat de toekomst onzeker is, wordt voor het aansturen van de klimaatmodellen gebruik gemaakt van emissiescenario's: plausibele en intern consistente beschrijvingen van de toekomstige ontwikkeling van de emissie van stoffen die van invloed zijn op het broeikas-effect, van het toekomstige landgebruik, van andere aandrijvende krachten en van hun onderlinge relaties.

Er zijn zo'n 40 scenario's in gebruik. Ze zijn ingedeeld in families met gelijke "storyline". Een storyline is een verhalende beschrijving van de belangrijkste karakteristieken, de relaties tussen aandrijvende krachten en de dynamiek van hun ontwikkeling. Er worden vier families onderscheiden: A1, A2, B1 en B2.

A1: Snelle economische groei; maximum wereldbevolking rond 2050, daarna afname; snelle verspreiding van nieuwe en efficiënte technologieën; weinig verschil tussen regio's, veel culturele en sociale interactie.

A2: Een meer verdeelde wereld, onafhankelijk opererende landen, regionaal georiënteerde economische ontwikkeling; steeds toenemende bevolking; langzamere en meer gefragmenteerde technologische veranderingen.

B1: Dezelfde convergerende wereld, bevolkings- ontwikkeling en economische ontwikkeling als voor de A1-familie, maar met een snelle overgang naar een diensten- en informatie economie; reducties in materiaalgebruik en de introductie van schone en innovatieve technologieën die efficiënt omgaan met hulpbronnen; nadruk op mondiale oplossingen voor economische, sociale en ecologische duurzaamheid.

B2: Een meer verdeelde wereld, maar milieu-vriendelijk; steeds toenemende bevolking, maar langzamer dan bij A2; meer nadruk op lokale dan op mondiale oplossingen voor economische, sociale en ecologische duurzaamheid; gemiddeld niveau van economische ontwikkeling; minder snelle en meer gefragmenteerde technologische veranderingen dan bij A1 en B1.

De A1-scenariofamilie is onderverdeeld in 3 groepen met alternatieve richtingen in de technologische veranderingen in het energiesysteem. **A1FI** (fossil-intensieve) is de groep met intensief gebruik van fossiele brandstoffen, bij **A1T** ligt de nadruk op niet-fossiele energiebronnen, terwijl **A1B** meer een balans kent in de diverse bronnen.

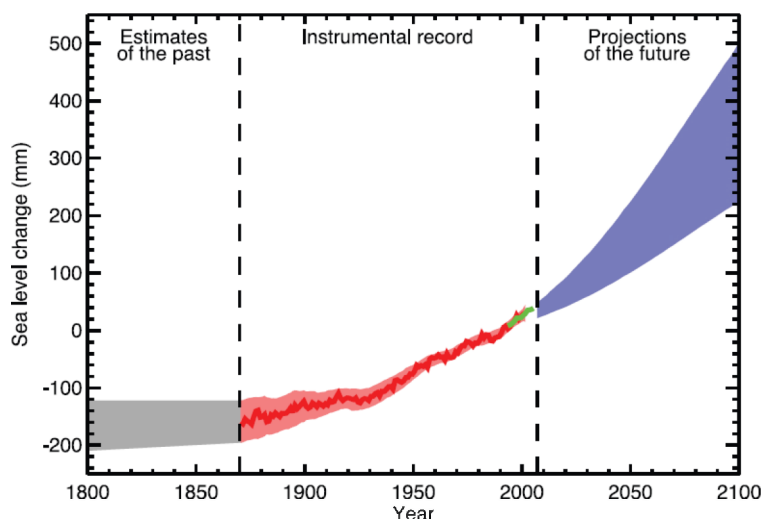
Totaal worden er zes groepen onderscheiden, aangeduid met A1B, A1FI, A1T, A2, B1 en B2. Voor elke groep is een scenario gekozen, dat illustratief is voor die groep. De ene groep is niet beter dan de andere. Waar in de tabellen, figuren en beschrijvingen de groepsnamen voorkomen, worden in feite de illustratieve scenario's bedoeld.

Figuur 4.1.1 laat nog eens de ontwikkeling van de mondiaal gemiddelde zeespiegel zien in het verleden en in de toekomst voor het A1B-scenario (qua effect een "gemiddeld" scenario).

De relatieve bijdrage van verschillende processen aan de totale zeespiegelstijging in de 21^e eeuw is grofweg:

- 75% door uitzetten van het oceaanooppervlak door temperatuurverhoging
- 35% door het afsmelten van gletsjers
- 10% door het smeltend landijs en afkalving van de randen van Groenland
- een afname van 20% als som van toegenomen sneeuw- en ijsaccumulatie op Antarctica en het afkalven van de randen.

De som van de positieve bijdragen is 120%. De totale som komt door de negatieve bijdrage van 20% van Antarctica weer uit op 100%.



Figuur 4.1.1 Het verloop van de globaal gemiddelde zeespiegelstijging volgens het 4^e assessmentrapport van het IPCC, werkgroep 1, hoofdstuk 5, blz. 409. Voor 1870 waren te weinig data van peilmeetstations beschikbaar voor het bepalen van een globaal gemiddelde zeespiegelstijging. De rode lijn is afgeleid uit data van peilmeetstations, de groene lijn geeft de satellietwaarnemingen. Het blauwe vlak geeft de range van de modelprojecties voor de zeespiegelstijging tot 2100 volgens het A1B-scenario t.o.v. het gemiddelde van 1980-1999.

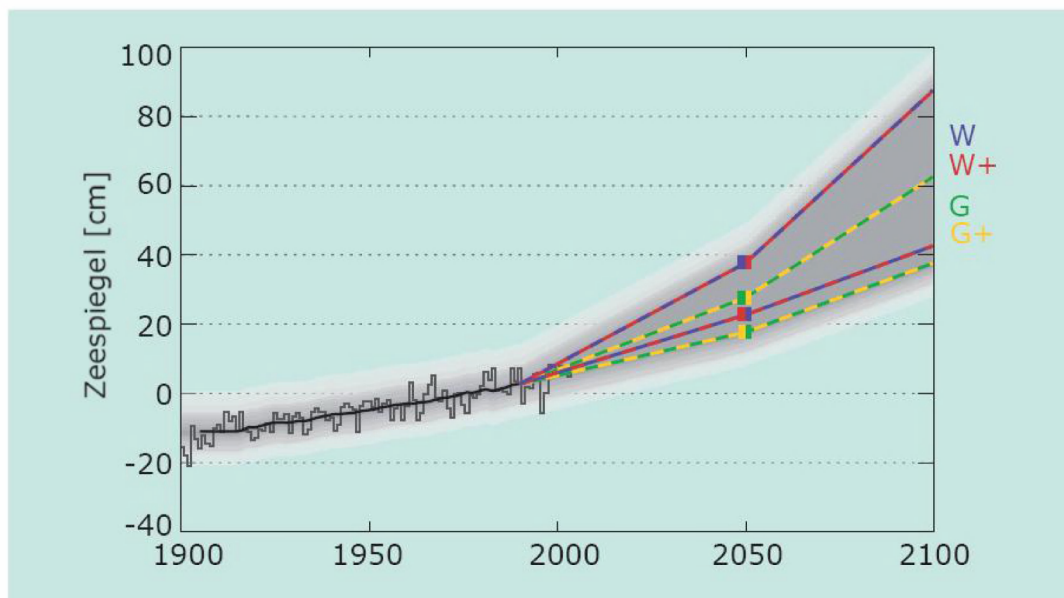
Er is in de getallen van tabel 4.1.1 geen rekening gehouden met een mogelijke versnelling van de ijsuitstroom van de randen de ijskappen van Groenland en Antarctica. Wordt aangenomen dat de waargenomen versnelling hiervan van de laatste tijd zich doorzet, evenredig met de temperatuurstijging, dan zou dat een extra bijdrage van 10 tot 20 cm aan de zeespiegelstijging opleveren aan het eind van de 21^e eeuw (IPCC, 2007, Tabel 10.7 – p.820).

Het smelten van het ijs van de Noordpool heeft, in tegenstelling tot het landijs van Groenland en Antarctica, geen invloed op de gemiddelde zeespiegel, omdat het drijfijjs betreft. Water dat bevriest zet uit. Omdat bevroren van water geen extra water en dus ook geen extra gewicht oplevert, betekent dat, dat het soortelijk gewicht van ijs lager is dan van water. Dat is dan ook de reden dat van een ijsberg nog een stukje boven het water uitsteekt. De wet van Archimedes leert dat de opwaartse kracht gelijk is aan het gewicht van de verplaatste hoeveelheid water. De gesmolten ijsberg neemt precies evenveel ruimte in als de verplaatste hoeveelheid water. De conclusie is dan ook dat het smelten van drijfijjs, zoals van de Noordpool, niet bijdraagt aan de zeespiegelstijging.

4.2 KNMI'06 klimaatscenario's voor Nederland

In 2006 presenteerde het KNMI vier nieuwe klimaatscenario's voor Nederland. Deze scenario's geven een beeld van mogelijke veranderingen in temperatuur, neerslag, wind en zeespiegel in de 21^e eeuw voor Nederland. De vraag rijst dan natuurlijk hoe deze nieuwe scenario's zich verhouden tot de huidige scenario's voor zeespiegelstijging in het kustbeleid (zie paragraaf 1.2) en die van het IPCC (zie hierboven). Figuur 4.2.1 geeft de KNMI'06 scenario's voor de absolute zeespiegelstijging, bij benadering de stijging ten opzichte van het NAP. De G staat voor gematigd, de W voor warm, terwijl de + aangeeft of er sprake is van gewijzigde luchtstromingspatronen. De invloed van dit laatste op de zeespiegelstijging voor

de Nederlandse kust is niet onderzocht. Er blijven derhalve twee scenario's over: W/W+ en G/G+.



Figuur 4.2.1 De gemiddelde zeespiegel langs de Nederlandse kust. De zwarte lijnen geven de waarnemingen weer tussen 1900 en 2004, de trendlijn geeft het voortschrijdend 30-jaar gemiddelde in de waarnemingen. De gekleurde gestippelde lijnen verbinden de klimaatscenario's voor 2050 en 2100 met het basisjaar 1990. De grijze band geeft de jaarlijkse variatie, die is afgeleid uit de waarnemingen [KNMI, 2006a].

Het KNMI geeft een range van 35-85 cm voor het jaar 2100 ten opzichte van 1990. Daarbij hoort dus een "centrale" waarde van 60 cm. Het 4^e assessment rapport van het IPCC geeft een range van projecties voor zeespiegelstijging tussen 18 en 59 cm (tabel 4.1.1). Dit verschilt dus van de KNMI'06 scenario's, hoewel die gebaseerd zijn op de dezelfde studies als de IPCC-scenario's. Het verschil zit hem met name in een extra regionale zeespiegelstijging in het noordoosten van de Atlantische Oceaan van 0-15 cm (het IPCC geeft een mondiaal gemiddelde stijging), omdat het water van de Warme Golfstroom hier naar de diepte gaat. Niet allen het water aan het oppervlak, maar ook op grotere diepte warmt dus op, met als gevolg meer uitzetting, en in een (nog zeer onzekere) bijdrage van de waargenomen versnelde ijsuitstroom aan de randen van de Groenlandse en Antarctische ijskap, welke het KNMI wel en het IPCC niet in de cijfers heeft verwerkt. Als de 10-20 cm voor de versnelde ijsuitstroom uit het IPCC-AR4-rapport (2007) wordt opgeteld bij de 18-59 cm, worden de verschillen met de KNMI'06-scenario's al een stuk kleiner.

Tabel 4.2.1 KNMI'06 klimaatscenario's voor zeespiegelstijging (in cm) ten opzichte van 1990

gevoeligheid zeespiegel	laag scenario (G, G+)		hoog scenario (W, W+)	
	2050 (+1°C)	2100 (+2°C)	2050 (+2°C)	2100 (+4°C)
laag	15	35	20	40
hoog	25	60	35	85

Het minimale scenario van 20 cm per eeuw dat in het kustbeleid wordt gehanteerd, is bij benadering gelijk aan de waargenomen zeespiegelstijging in de 20^e eeuw langs de

Nederlandse kust en is geen ondergrens van de projecties (schattingen voor de toekomst m.b.v. modellen) voor 2100, zoals dat bij de KNMI'06 klimaatscenario's wel het geval is.

Bij het ontwerpen van (versterkingen van) waterkerende constructies met een langere ontwerpduur wordt volgens de beleidsscenario's voor zeespiegelstijging uit de 3^e kustnota (zie paragraaf 1.1) uitgegaan van het midden scenario van 60 cm per eeuw. Dit was een centrale waarde van de range aan projecties (resultaten van berekeningen met een klimaatmodel voor een bepaald verloop van de toestand van de atmosfeer) die destijds beschikbaar waren. Als het in de toekomst minder blijkt te worden, dan is een extra reserve aan veiligheid opgebouwd, als het tegenvalt zorgt de ruimtereservering onder toepassing van het maximale scenario (85 cm per eeuw plus 10% windtoename) dat landwaartse versterking nog mogelijk is.

Centrale waarde en bovengrens van de KNMI'06 scenario's voor zeespiegelstijging zijn dus getalsmatig in overeenstemming met de waarden van het vigerende middenscenario respectievelijk maximum scenario voor het kustbeleid. Er zit alleen een licht verschil in de beschouwde periode (110 jaar respectievelijk 100 jaar).

Geconcludeerd kan worden de KNMI'06 klimaatscenario's op zich geen reden geven de huidige scenario's voor zeespiegelstijging voor het kustbeleid aan te passen. Men zou ook kunnen zeggen dat de scenario's van de kustnota ondersteund worden door de KNMI'06-klimaatscenario's.

In 2009 publiceerde het KNMI aanvullingen op de KNMI'06 klimaatscenario's, zie (Klein Tank en Lenderink, 2009). In deze brochure wordt geconcludeerd dat de dynamische processen die aanleiding geven tot de recente fluctuaties in de afkalving van ijs aan de randen van de Groenlandse en Antarctische ijskap nog onvoldoende begrepen zijn en daardoor nog nauwelijks gemodelleerd. Het is daarom lastig de bijdrage hiervan aan de zeespiegelstijging in de scenario's te verwerken. Mogelijk dat ze in de toekomst moeten worden bijgesteld. Vooralsnog blijven dus de KNMI'06 klimaatscenario's voor de zeespiegelstijging van kracht.

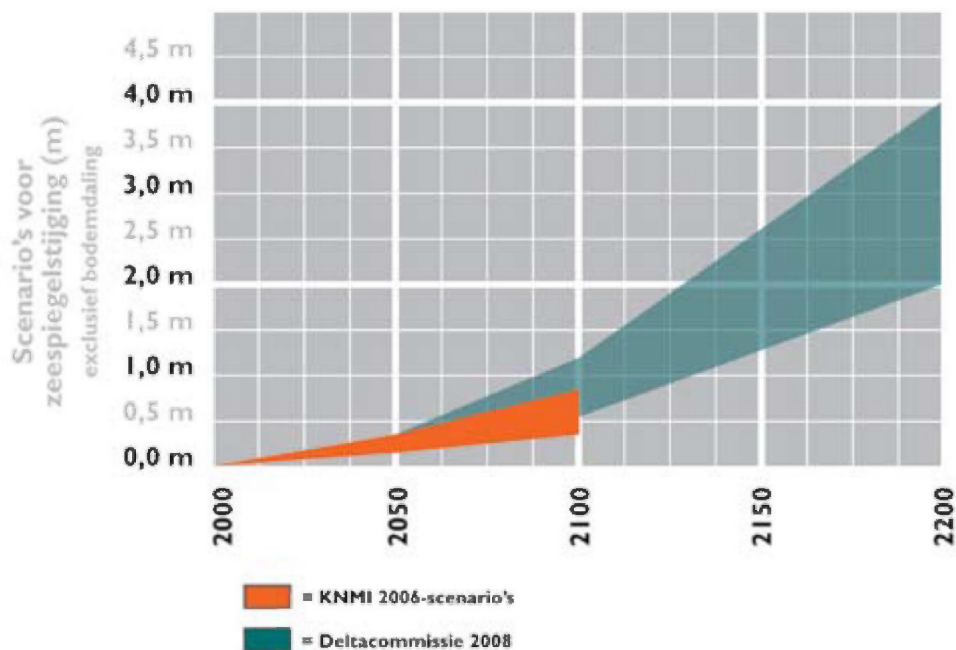
4.3 Bovengrensscenario van de Delatcommissie 2008

In haar rapport "Samen werken met Water" (Deltacommissie, 2008) stelt de Deltacommissie dat er rekening moet worden gehouden met een absolute zeespiegelstijging van 0,55 tot 1,20 meter in 2100 en van 2 tot 4 meter in 2200 (indicatief), rekening houdend met een temperatuurstijging van 2° tot 6° C in 2100 t.o.v. 1990. Dit is volgens de grenzen voor de temperatuur stijging van het A1FI-scenario van het IPCC. Daarbij is overwogen dat de werkelijke emissies van broeikasgassen in de atmosfeer sinds 2000 in lijn zijn of zelfs uitstijgen boven dit hoogste IPCC-scenario. Met nadere analyses en aannames in de belangrijkste bijdragen aan de scenario's voor de mondiale en lokale zeespiegelstijging komt de Deltacommissie op haar getallen. Het bovengrensscenario van de Deltacommissie is samen met de KNMI'06-scenario's weergegeven in figuur 4.3.1. De scenario's zijn niet zondermeer met elkaar vergelijkbaar, omdat de KNMI'06-scenario's de hele band aan mogelijke emissies van het IPCC meeneemt en het Deltacommissiescenario zich concentreert op het A1FI-scenario van het IPCC.

Tot 2050 vallen het scenario van de Deltacommissie samen met de KNMI'06-scenario's. De wereldgemiddelde temperatuurstijging over deze periode is nog vrijwel onafhankelijk van het gekozen emissiescenario.

De gemiddelde autonome bodemdaling langs de kust van Nederland, veroorzaakt door glaciële isostasie en compactie van de ondergrond, bedraagt volgens de Deltacommissie ruim 10 cm tot 2100. Per saldo betekent dit voor Nederland een (relatieve) 'zeespiegelstijging' van 0,65 tot 1,30 meter in 2100. Deze getallen worden veel genoemd en gebruikt.

De schatting van de autonome bodemdaling in hoofdstuk 2 van het onderhavige rapport wijkt af van die in het rapport van de Deltacommissie en is landelijk niet uniform. Het verdient in het algemeen aanbeveling uit te gaan van scenario's voor absolute zeespiegelstijging. Afhankelijk van het doel kan dan bepaald worden welke bodemdaling daarbij opgeteld moet worden om de gewenste relatieve zeespiegelstijging te krijgen. Voor het onderhoud van het kustfundament is de daling van de diepe ondergrond van belang, terwijl voor de bepaling van inundatiedieptes de daling van het maaiveld belangrijker is. Dat laatste verschilt per regio nog veel meer. Vooral voor de holocene veenpakketten, maar ook voor gebieden waar gas wordt gewonnen, is die daling veel groter dan de autonome.



Figuur 4.3.1 Scenario's voor absolute zeespiegelstijging voor Nederland volgens het KNMI en volgens de Deltacommissie. Het scenario van de Deltacommissie is een bovengrensscenario, waarbij wordt uitgegaan van het A1FI-scenario van het IPCC. Deze figuur is overgenomen uit het rapport van de Deltacommissie (2008).

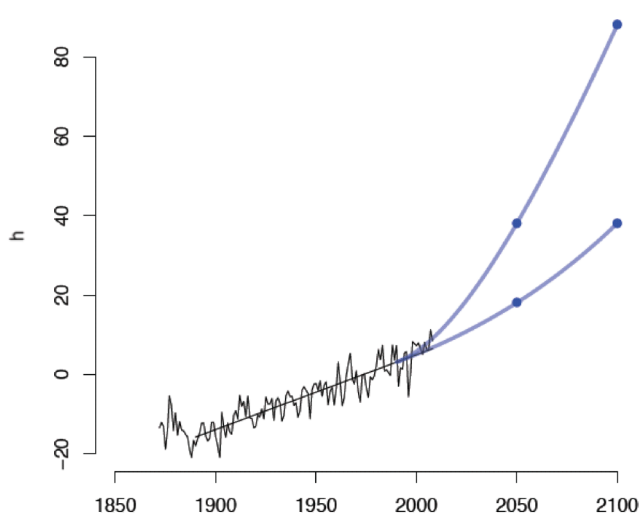
Omdat in het huidige kustbeleid uitgegaan wordt van de KNMI'06-scenario's wordt het bovengrensscenario van de Deltacommissie 2008 hier verder buiten beschouwing gelaten.

4.4 Koppeling van de tijdreeksen met de KNMI'06 scenario's

In figuur 4.4.1 zijn twee mogelijke ontwikkelingen voor het verloop van de gemiddelde zeespiegel van de zes stations getekend, zodanig dat ze exact door de KNMI'06-scenario's voor 2050 en 2100 gaan. Dat is gedaan door vanaf 1990 een exponentiële functie toe te voegen aan de lineaire regressielijn over de jaren 1890-1990, zodanig dat deze functie raakt aan deze regressielijn in het jaar 1990. Het eindjaar 1990 is gekozen, omdat IPCC en KNMI hun projecties voor 2050 en 2100 tot nu toe geven ten opzichte van het jaar 1990. Figuur 4.3.1 geeft een indruk van een mogelijk verloop volgens de data en de KNMI'06-scenario's

samen. Er zijn meerdere krommen denkbaar dan de hier gekozen kromme. Bijbehorende getallen voor de zeespiegelstijging zijn gegeven in tabel 4.3.1. Deze getallen zijn slechts bedoeld om een indruk van de snelheidstoename te geven. Met name de forcering door het hoge scenario voor 2050 zorgt voor een zeer snelle toename in de stijgsnelheid in de eerste decennia.

Voor het jaar 2010 geven de getrokken lijnen van figuur 4.3.1 een stijging van 49 cm/eeuw voor het W/W^+ (hoge) scenario en 23 cm/eeuw voor het G/G^+ (lage) scenario. Voor het hoge scenario moet de zeespiegelstijging nu of binnenkort een niet-realistisch lijkende grote versnelling laten zien om de scenariowaarden nog te kunnen halen. Deze versnelling staat nu al op gespannen voet met de waarnemingen.



Figuur 4.4.1 Extrapolatie van de gemiddelde zeestand, gemiddeld over de zes hoofdstations op basis van een lineaire regressie over de periode 1890-1990 en een daarop gesuperponeerde exponentiële functie vanaf 1990 door de KNMI'06-scenario's voor 2050 en 2100.

Tabel 4.4.1 Relatieve zeespiegelstijging volgens de toegepaste fit door de meetdata en de KNMI'06-scenario's

jaar	relatieve zeespiegelstijging G/G^+ -scenario [cm/eeuw]	relatieve zeespiegelstijging W/W^+ -scenario [cm/eeuw]
1990	19	19
2000	21	34
2010	23	49
2020	25	60
2030	27	71
2040	29	79
2050	32	87
2060	35	93
2070	38	98
2080	41	103
2090	45	107
2100	49	110

Opgemerkt moet worden dat de metingen relatieve zeespiegelstijging weergeven, terwijl de getallen van de KNMI'06-scenario's betrekking hebben op absolute zeespiegelstijging (dus zonder bodemdaling). Door het meenemen van bodemdaling komen de KNMI-scenario's ongeveer 5 cm hoger te liggen.

Het meebeschuiven van het zogenaamde gravitatie-effect (zie paragraaf 5.4), laat de KNMI-scenario's echter 5 cm lager uitvallen. De Pleistocene bodemdalingscomponent en het gravitatie-effect compenseren elkaar min of meer. Om die reden is besloten hier de trend in de metingen door te trekken naar de oorspronkelijke (afgeronde) getallen van de KNMI'06-scenario's.

Volgens de huidige waarnemingen sluit het verloop van de zeespiegelstijging volgens het lage scenario veel beter aan bij de metingen dan het hoge scenario. Een zeer snelle toename volgens het hoge scenario is de komende 5 tot 10 jaar niet te verwachten. Voor de toekomstige suppletiebehoefte lijkt het daarom verstandig voorlopig uit te gaan van de fit door de meetdata en de punten van het lage KNMI scenario (zie tabel 4.3.1). Als dan blijkt dat het toch meer de kant van het hoge scenario opgaat, kan relatief gemakkelijk overgeschakeld worden op een hoger scenario. Geleidelijke overschakeling over een periode van enkele decennia naar een verdubbeling, verdrie- of zelfs verviervoudiging van de huidige suppletiehoeveelheid zal niet tot grote problemen lijden. De beschikbare hoeveelheden zand en de benodigde baggercapaciteit zijn geen beperkende factoren. Door alert te zijn zal geen grote suppletie-achterstand ontstaan.

4.5 Samenvatting

Een van de gestelde vragen is, of voor het schatten van de huidige zeespiegelstijging ook rekening gehouden moet worden met verwachtingen voor de toekomst. Ook voor het schatten van de toekomstige suppletiehoeveelheden is dat van belang. Omdat de ontwikkelingen in de toekomst niet bekend zijn, wordt gebruik gemaakt van emissiescenario's (mogelijke plausibele ontwikkelingen) voor de uitstoot van broeikasgassen en wordt met behulp van modellen berekend wat de mogelijke gevolgen daarvan zijn voor o.a. de temperatuur en de zeespiegel. Het IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change) geeft mondiaal gemiddelde projecties voor de toekomst, het KNMI richt zich vooral op Nederland.

De IPCC-scenario's van het 4^e assessmentrapport (2007) geven een range van 18 tot 59 cm zeespiegelstijging, mondiaal gemiddeld, voor het jaar 2100 ten opzichte van 1990. De KNMI'06-scenario's geven een range van 15 tot 35 cm zeespiegelstijging voor het jaar 2050 ten opzichte van 1990 en een range van 35 tot 85 cm voor het jaar 2100 ten opzichte van 1990. De KNMI'06-scenario's zijn gebaseerd op dezelfde studies en modelberekeningen als de IPCC-scenario's, maar zijn toegespitst op de Nederlandse situatie, immers de zeespiegelstijging is niet over de hele wereld gelijk, maar verschilt per regio (zie ook hoofdstuk 5). Bovendien is in de KNMI'06-scenario's een bijdrage opgenomen voor de versnelde afkalving van de randen van Groenland en Antarctica.

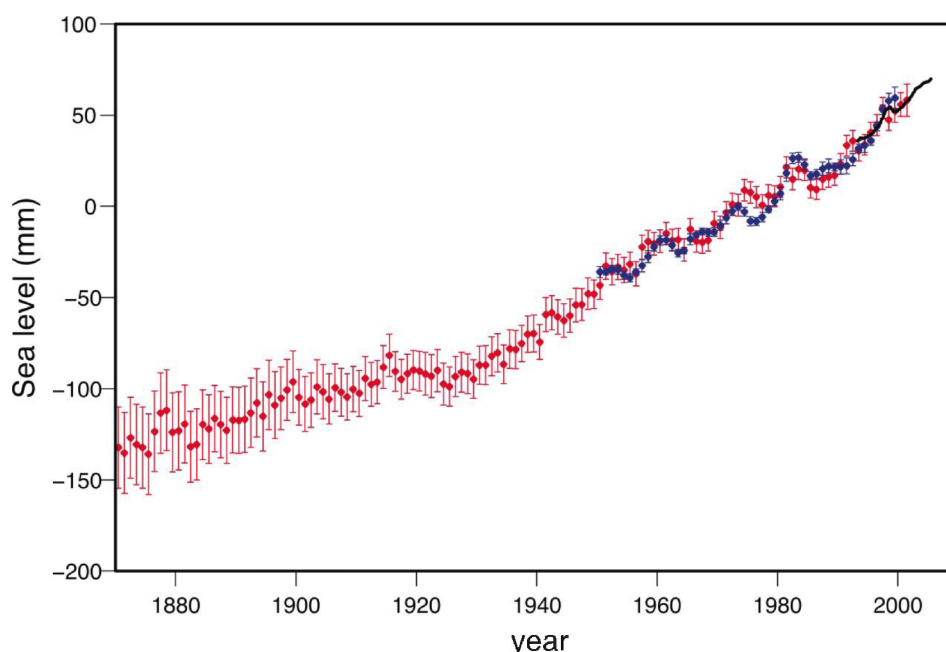
Het bovengrensscenario van de Deltacommissie 2008 heeft betrekking op het A1FI-scenario van het IPCC en komt tot 2050 overeen met de KNMI'06-scenario's. Met bepaalde aannames en nadere analyses in de belangrijkste bijdragen aan de scenario's voor de mondiale en lokale zeespiegelstijging komt de Deltacommissie op een bovengrensscenario van 55 tot 120 cm in 2100 ten opzichte van 1990. Omdat in het huidige kustbeleid uitgegaan wordt van de KNMI'06-scenario's blijft het bovengrensscenario van de Deltacommissie hier verder buiten beschouwing.

Voor de toekomstige suppletiebehoefte lijkt het verstandig vooralsnog uit te gaan van de fit door de meetdata en de punten van het lage KNMI scenario. Voor de bepaling van de suppletiebehoefte over 5 of 10 jaar kan relatief gemakkelijk overgeschakeld worden op een hoger scenario als tegen die tijd duidelijk blijkt dat het die kant op gaat.

5 Mondiale zeespiegelstijging

In hoofdstuk 3 ging het vooral over de zeespiegelstijging zoals die gemeten wordt langs de Nederlandse kust. In dit hoofdstuk gaat het om de mondiale zeespiegelstijging. De vraag daarbij is of inzicht in de gemeten mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging toegevoegde waarde heeft voor de situatie langs de Nederlandse kust.

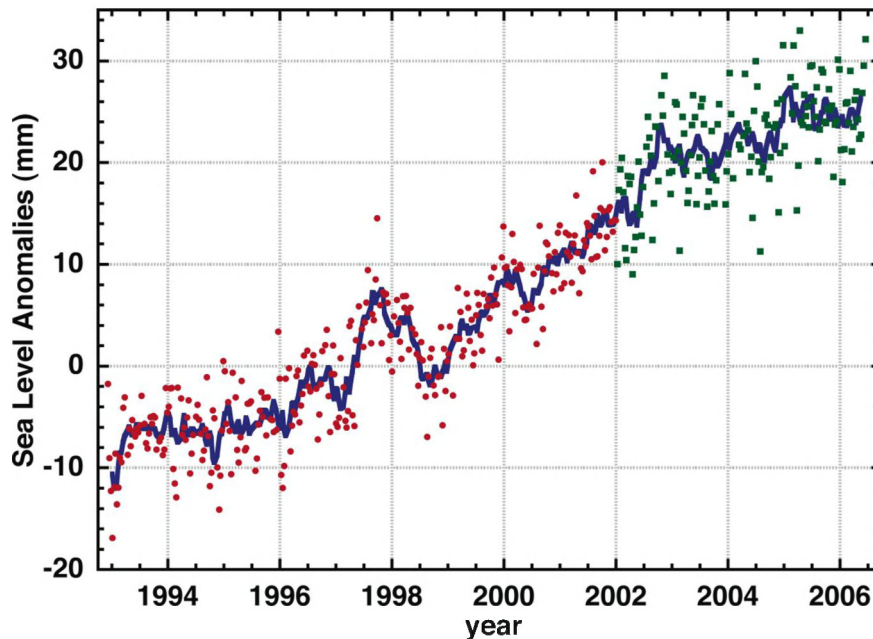
5.1 Het 4^e assessmentrapport van het IPCC (2007)



Figuur 5.1.1 Jaargemiddelden van de mondiaal gemiddelde zeespiegel (mm) volgens het 4^e assessmentrapport van het IPCC, werkgroep 1, hoofdstuk 5. De rode lijn volgt uit gereconstueerde zeespiegelvelden, de blauwe lijn uit metingen van peilmeetstations vanaf 1950 en de zwarte lijn uit satellietaltimetrie. De rode en blauwe lijn zijn uitgezet t.o.v. hun gemiddelde over de periode 1961-1990, de zwarte lijn t.o.v. het gemiddelde over de periode 1993-2001. De verticale balken geven de 90%-betrouwbaarheidsintervallen.

Tot de komst van de TOPEX/Poseidon satelliet werd de zeespiegelstijging over de afgelopen decennia vooral afgeleid uit metingen aan peilschalen/peilmeetstations. De meeste lange tijdreeksen zijn afkomstig van meetpunten op het noordelijk halfrond en vooral langs continentale kustlijnen. Dat maakt het berekende gemiddelde hieruit minder representatief voor het mondiaal gemiddelde. Op basis van metingen van kwalitatief goede stations in stabiele gebieden (qua verticale bodembeweging) wordt de mondiale zeespiegelstijging in de 20^e eeuw geschat op 17 cm/eeuw (zie figuur 5.1.1, uit het 4^e assessment rapport (2007) van het IPCC, het Intergovernmental Panel on Climate Change van de VN). Gereconstrueerde zeespiegelvelden laten een versnelling zien in de mondiaal gemiddelde zeespiegel in de 30'er jaren van de 20^e eeuw, een periode met weinig vulkanische activiteit. Figuur 5.1.1 geeft aan dat het eind van de 20^e eeuw de zeespiegelstijging hoger was dan aan het eind van de 19^e eeuw.

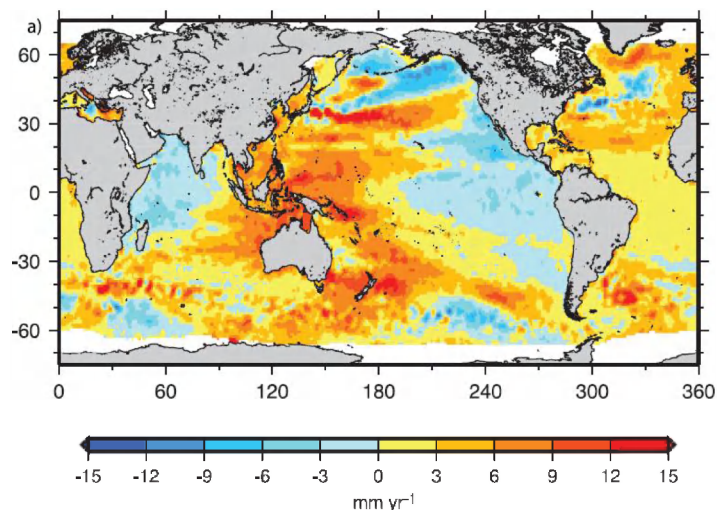
Vanaf 1993 zijn meetgegevens van de zeespiegel beschikbaar vanuit satellieten (figuur 5.1.2). De zeespiegelstijging volgens de satellietaltimetrie bedraagt over de periode 1993-2003 gemiddeld ongeveer 3 mm per jaar (dit komt overeen met 30 cm per eeuw). De vraag is nu of dat betekent dat de zeespiegelstijging de laatste decennia is versneld.



Figuur 5.1.2 10-daagse gemiddelden van de mondiaal (tussen 65° N.B. en 65° Z.B.) gemiddelde zeespiegel (mm) uit satellietaltimetrie volgens het 4^e assessmentrapport van het IPCC, werkgroep 1, hoofdstuk 5. De rode stippen zijn van de TOPEX/Poseidon-satelliet, de groene van de Jason-satelliet. De blauwe lijn geeft het lopend gemiddelde over 60 dagen

Gezien de fluctuaties in de tijdreeksen van de gemiddelde zeestanden en de relatief korte tijdreeks van de satellietmetingen is dat maar zeer de vraag. Op het oog wijkt het karakter van het verloop volgens de satellietaltimetrie niet significant af van dat van de peilmeetstations. Voor de Nederlandse kust is een versnelling in ieder geval nog niet significant. Een duidelijke uitspraak over een waargenomen versnelling van de zeespiegelstijging als gevolg van menselijk handelen (versterkt broeikas effect) is dan ook nog niet te geven. De discussie daarover is nog gaande. Er zal nog een aantal jaren langer gemeten moeten worden. Maar dat een versnelling op zal gaan treden, daarover bestaat weinig twijfel, gezien de gestegen temperatuur van de atmosfeer.

De satellietmetingen zijn ruimtedekkend en geven daarom een goed beeld van de verschillen in zeespiegelstijging. Figuur 5.1.3 laat zien dat over de periode 1993-2003 er gebieden zijn met een zeespiegelstijging die een aantal malen groter is dan de mondiaal gemiddelde waarde. Ook zijn er gebieden met de zeespiegeldaling over deze periode. Dat betekent dus dat de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust ook kan afwijken van de mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging. Het verloop van de mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging geeft derhalve onvoldoende informatie over de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust.



Figuur 5.1.3 Geografische verdeling van de lineaire trend in de gemiddelde zeespiegel, berekend over de periode 1993-2003 en gebaseerd op de TOPEX/Poseidon satellietaltimetrie volgens het 4^e assessmentrapport van het IPCC, bijdrage werkgroep 1, hoofdstuk 5, blz. 412.

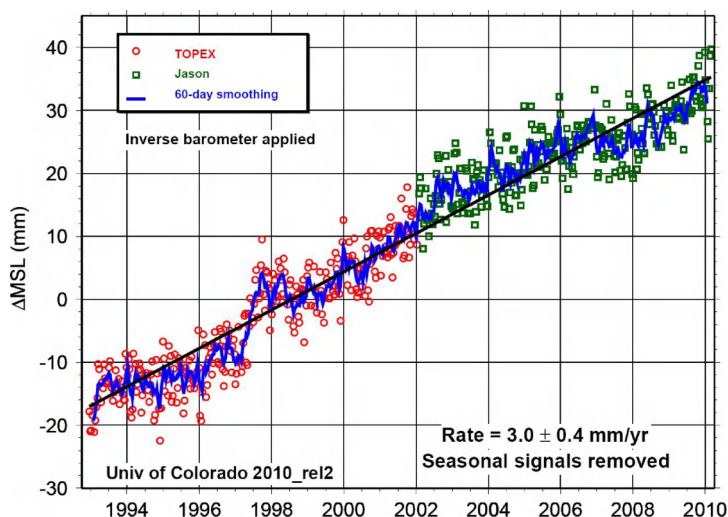
5.2 Satellietdata op Internet

Veel informatie, o.a. recente tijdreeksen en kaarten, is tegenwoordig op internet te vinden, bijvoorbeeld op <http://sealevel.colorado.edu/>.

Of: <http://www.avisioceanobs.com/en/news/ocean-indicators/mean-sea-level/>.

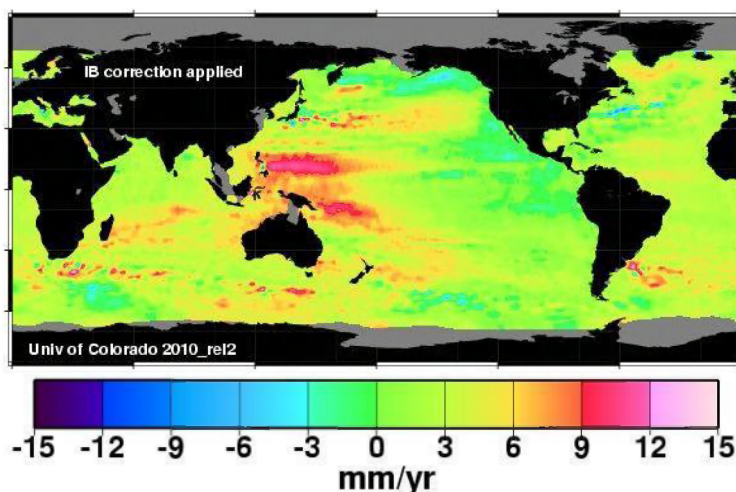
Deze laatste site geeft nog een aantal keuzemogelijkheden, zoals de mogelijkheid in te zoomen op bepaalde gebieden.

Figuur 5.2.1 Geeft de meest recente trendlijn, vergelijkbaar met figuur 5.1.2.



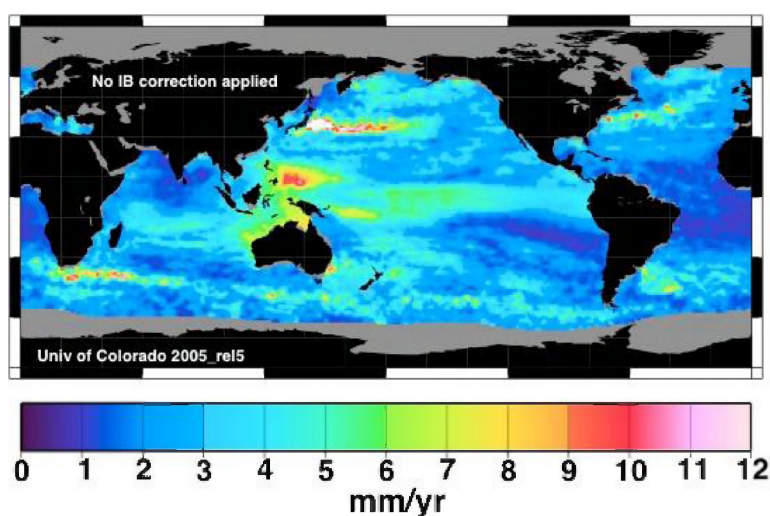
Figuur 5.2.1 Lineaire trend in de wereldwijd gemiddelde zeespiegel. "Inverse barometer applied" betekent dat er gecorrigeerd is voor het effect van variaties in de luchtdruk op het zeespiegelniveau. Data tot begin 2010 zijn verwerkt.

De bijbehorende recente geografische verdeling, overeenkomstig figuur 5.1.3, wordt gegeven in figuur 5.2.2.



Figuur 5.2.2 Recente geografische verdeling van de lineaire trend in de gemiddelde zeespiegel, berekend over de periode 1993-2010 en gebaseerd op de TOPEX/Poseidon/Jason satellietaltimetrie

In grote lijnen lijken de karakteristieken van de figuren 5.1.3 en 5.2.2 op elkaar, maar er zijn ook verschillen die samenhangen met de relatief korte periode waarover de trends zijn berekend en de gevoeligheid van het resultaat daarvoor. Vooral nog laten de satellietmetingen een mondiaal (binnen de begrenzing van het gebied dat bestreken wordt door de satellieten) gemiddelde zeespiegelstijging zien van $3,0 \pm 0,4$ mm/jaar (oftewel 30 ± 4 cm per eeuw). Bedacht dient te worden dat de figuren ook de gevolgen weergeven van klimaatvariabiliteit op een schaal van 10 tot 20 jaar op de regionale distributie van de zeespiegelstijging.



Figuur 5.2.3 Geografische verdeling van de nauwkeurigheid van de berekende trends. Merk op dat de dataset hierin korter (tot 2005) is dan in figuur 5.2.1 en 5.2.2

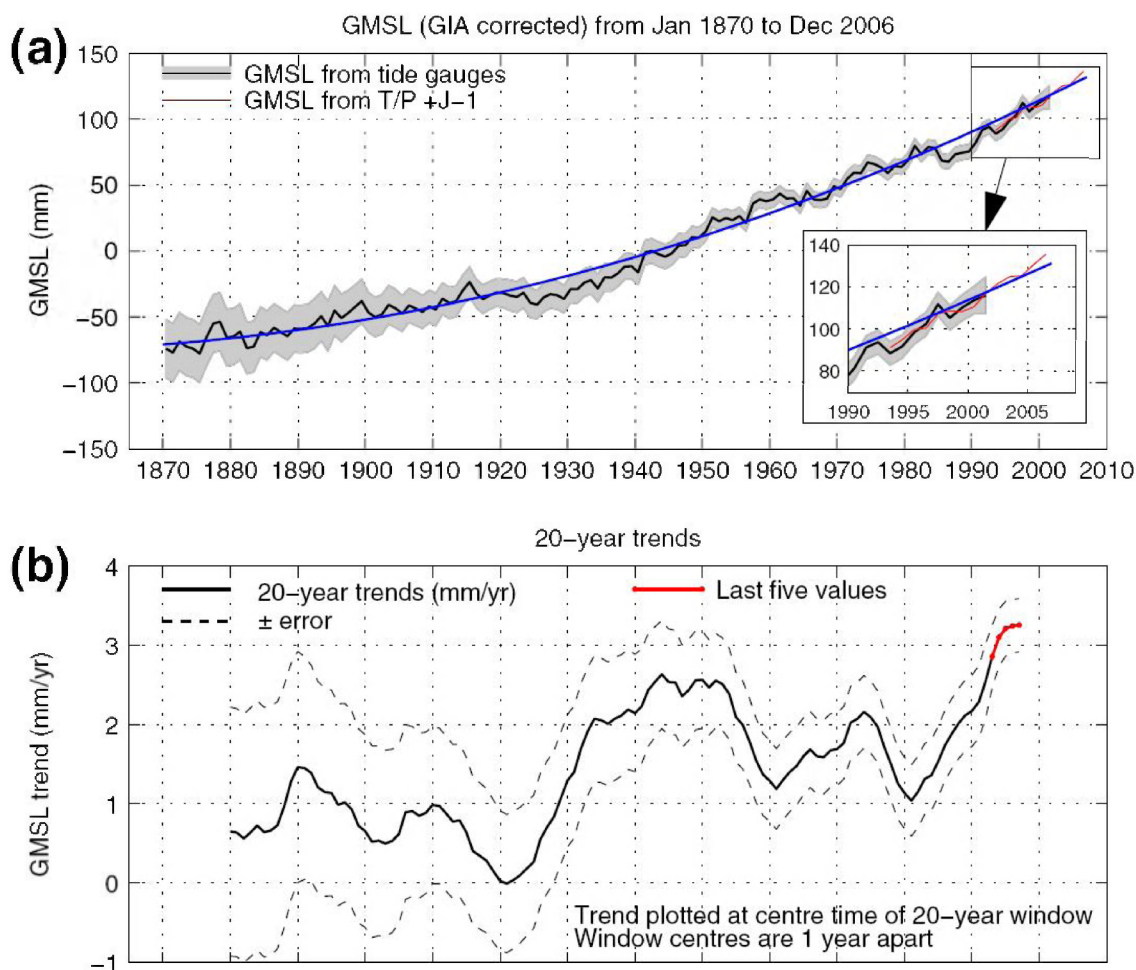
Satellietmetingen hebben een nadeel. Ze geven een goede indruk van de mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging en de geografische verdeling van de trends. Ze zijn echter

minder geschikt om te bepalen wat er precies 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 op zeg 50 km uit de kust goede waarden worden verkregen, maar dichters langs de kust de satellietmetingen worden "vervuild", omdat het vaste land daar binnen de footprint valt. Als men wil weten wat er langs de kust aan zeespiegelvariatië plaats vindt, geven de peilmeetstations aan de kust de beste informatie.

5.3 Recente literatuur.

De literatuur over zeespiegelstijging en alles wat ermee te maken heeft is overstelpend. De assessmentrapporten van het IPCC geven telkens een overzicht van de relevante literatuur en de daaruit te trekken conclusies. Drie artikelen van na het 4^e assessment rapport worden hier nog genoemd.

In Church et al., (2008) worden de satellietmetingen en de metingen van getijmeetstations nog eens naast elkaar gezet.



Figuur 5.3.1 (a) mondiaal gemiddelde zeespiegel van 1870 tot 2006 met een schatting van de betrouwbaarheid (één maal de standaardafwijking). Het rode lijntje geeft de satellietmetingen. (b) de lineaire trends over periodes van 20 jaar en betrouwbaarheidsband (één maal de standaardafwijking). De figuur is overgenomen uit (Church et al., 2008)

Figuur 5.3.1.a geeft min of meer dezelfde informatie als figuur 5.1.1 (afkomstig uit het 4^e assessmentrapport van het IPCC, 2007). Toegevoegd is een gestileerde kromme trendlijn om te illustreren dat over de periode 1870 - 2010 de zeespiegelstijging versneld is. In het werkelijke verloop kunnen twee knikken worden onderscheiden: rond 1930 een versnelling en rond 1960 een (kleinere) vertraging. Dergelijke veranderingen worden over het algemeen toegeschreven aan vulkanische (in)activiteit. Veel vulkanische as in de atmosfeer leidt tot afkoeling. Ook figuur 5.3.1 (b) laat zien dat de mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging volgens de peilmeetstations de laatste jaren dicht komt bij de resultaten van de satellietmetingen. Gezien de fluctuaties in zowel de krommen van de getijstations als van de satellieten valt nog niet aan te tonen dat de huidige zeespiegelstijging significant groter is dan het gemiddelde van 18 cm/eeuw berekend over de periode 1961-2003.

Ook in Woodworth et al. (2009) wordt melding gemaakt van de krommingen in de gemiddelde zeespiegelcurves rond 1930 en 1960 bij veel afzonderlijke getijmeetstations met lange meetreeksen. Sommige stations vertonen echter slechts één van deze krommingen, of zelfs geen. Erkend wordt, hoewel er redelijke consensus bestaat over deze trendveranderingen en de oorzaken daarvan, dat de beschikbare gegevens waarop deze gebaseerd zijn nog beperkt zijn.

In Prandi et al. (2009) wordt de gemiddelde zeespiegelstijging langs de kusten, berekend over de periode 1993-2007 uit een set van 91 zorgvuldig geselecteerde peilmeetstations, vergeleken met de mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging uit satellietmetingen over dezelfde periode. De trends over de hele periode komen goed met elkaar overeen; er wordt geen significant verschil gevonden. De gemiddelde zeespiegel langs de kust vertoont wel meer jaarlijkse variabiliteit dan de mondiaal gemiddelde zeespiegel. De kustdata reflecteren meer de tijdelijke fluctuaties in het patroon van de zeespiegel, welke worden uitgemiddeld bij de mondiale zeespiegel uit de satellietmetingen.

5.4 De invloed van de gravitatiekrachten van de landijsmassa's van Groenland en Antarctica

Een interessant fenomeen, het zogenaamde gravitatie-effect, zit nog niet in de scenario's van het KNMI verwerkt. Het belang hiervan is in de geofysische wereld lang bekend, maar is eigenlijk pas vrij recent doorgedrongen in de wereld van de klimaatwetenschap.

Gravitatie is het verschijnsel dat twee massa's elkaar aantrekken. Bekend is natuurlijk de zwaartekracht van de aarde, maar ook de aantrekkingskrachten tussen aarde en maan en aarde en zon, waardoor het getij ontstaat. In het geval van de zeespiegel gaat het om de aantrekkingskracht die een ijsmassa als op Groenland uitoefent op het omringende water. De zeespiegel loopt daardoor richting Groenland omhoog (geldt natuurlijk niet alleen voor Groenland). Als nu al het landijs van Groenland smelt, betekent dat een over de oceanen gemiddelde zeespiegelstijging van ongeveer 7 meter. Het betekent echter ook dat de massa van Groenland sterk afneemt, waardoor het olopande effect van de zeespiegel naar Groenland toe verdwijnt, of in ieder geval veel minder wordt. Nederland ligt op zodanige afstand van Groenland dat dit effect nog goed merkbaar is. Berekend is dat van de mondiaal gemiddelde stijging van de zeespiegel als gevolg van het smelten van Groenland ongeveer een kwart overblijft ter plaatse van Nederland. Vlak bij Groenland zelf zal zelfs sprake zijn van een zeespiegeldaling. Voor Antarctica geldt dat Nederland ongeveer 10% meer krijgt dan de mondiaal gemiddelde stijging als gevolg van het smelten van het landijs aldaar. De bijdrage van het smelten van de ijskappen van Groenland en Antarctica is nu nog relatief gering, waardoor het genoemde gravitatie-effect vooral in de toekomst merkbaar zal zijn.

Het gravitatie-effect wordt in beginsel niet teruggevonden in de mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging, al zal dat door de huidige begrenzing van het door de satellieten bestreken gebied toch enigszins het geval zijn. Het is vooral van lokaal belang. Het IPCC hoeft er dus geen (of beperkt) rekening mee te houden zolang ze alleen mondiaal gemiddelde waarden geeft.

In (KNMI, 2009), bijlage 4, paragraaf B4.5 worden getallen genoemd voor de G/G+- en W/W+-scenario's voor zeespiegelstijging in 2100 t.o.v. 1990, wanneer er wel rekening gehouden wordt met het gravitatie-effect. Men komt dan op 30-50 cm respectievelijk 40-80 cm. Vanwege de nog bestaande onduidelijkheid over de bijdrage van het gravitatie-effect is, is in de brochure over de aanvullingen op de KNMI'6-scenario's (Klein Tank en Lenderink, 2009) vastgehouden aan de bestaande getallen van de KNMI'06-scenario's. De verwerking van het gravitatie-effect zal worden meegenomen bij de volgende generatie KNMI-scenario's.

5.5 Samenvatting

In recente literatuur die zich bezig houdt met lange tijdreeksen (meer dan 50 jaar) wordt een significante versnelling gevonden rondom het jaar 1930. Deze knik is in de Nederlandse data niet zichtbaar. Rond 1960 wordt een kleinere vertraging gevonden, die eveneens in de Nederlandse data niet zichtbaar is.

Vanaf 1993 zijn ook satellietdata van de zeespiegel beschikbaar. Ze laten een trend zien van rond de 3 mm/jaar (30 cm/eeuw). De trend in de satellietdata komt goed overeen met de trend in de data verkregen met peilmeetstations wanneer de overeenkomstige perioden vergeleken worden, de uitkomsten zijn dus niet tegenstrijdig. De trend in de satellietdata (1993-2008) is groter dan de trends verkregen over lange perioden uit data van peilmeetstations. Dat heeft waarschijnlijk te maken met fluctuaties met de duur van één tot enkele decennia.

Satellietdata laten zien dat de zeespiegelstijging vanaf 1993 over de oceanen verschilt van enkele malen de mondiaal gemiddelde waarde tot gebieden waar die zelfs daalt. Satellietdata zijn pas betrouwbaar enkele tientallen kilometers uit de kust. Voor het vaststellen van de zeespiegelstijging langs de kust geven de peilmeetstations de beste informatie.

Voor het vaststellen van de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust dient derhalve uitgegaan te worden van de data van de Nederlandse peilmeetstations.

6 Hydraulische randvoorwaarden 2011 en gebruikte zeespiegelstijging

Doel van dit hoofdstuk is om na te gaan hoe er bij het vaststellen van hydraulische randvoorwaarden voor het toetsen van de waterkeringen is omgegaan met zeespiegelstijging, en of dat ook bruikbaar is voor het schatten van de zeespiegelstijging voor het bepalen van de benodigde suppletiehoeveelheden. Gelijke uitgangspunten hebben de voorkeur, als dat mogelijk en zinvol is. Daartoe wordt eerst kort beschreven op welke peilen de hydraulische randvoorwaarden langs de kust gebaseerd zijn. Daarna wordt beschreven hoe ze voor de hydraulische randvoorwaarden 2006 (HR2006) zijn actualiseerd met het oog op zeespiegelstijging.

6.1 Basis- en ontwerppeilen

In 1995 verscheen het rapport “De basispeilen langs de Nederlandse kust; de ruimtelijke verdeling en overschrijdingslijnen” als afsluiting van het hernieuwde basispeilenonderzoek [Philippart et al, 1995]. In dat rapport zijn de basis- en ontwerppeilen langs de gehele Nederlandse kust gegeven, alsmede de overschrijdingslijnen van alle peilmeetstations in het kustgebied buiten de stormvloedkeringen.

Basispeilen zijn stormvloedstanden die per definitie overal langs de kust een overschrijdingsfrequentie hebben van 10^{-4} per jaar. De ontwerppeilen zijn gekoppeld aan de normen, zoals die voor de onderscheiden dijkkringgebieden zijn opgenomen in de Wet op de Waterkering van 1996, thans opgenomen in de Waterwet van 2009. Deze normen zijn voor de kust overeenkomstig die van de Deltacommissie en uitgedrukt in een gemiddelde overschrijdingskans per jaar van de hoogste hoogwaterstand waartegen de betrokken primaire waterkering bestand moet zijn.

De kern van het basispeilenonderzoek wordt gevormd door het statistisch onderzoek [Dillingh et al, 1993], gebaseerd op meetgegevens tot en met het jaar 1985. De resultaten van het statistisch onderzoek zijn getoetst met het fysisch onderzoek [Philippart et al, 1993], waarbij verbanden gelegd zijn tussen peilmeetstations met behulp van hydrodynamische modellen. Vervolgens zijn de schattingen voor het basispeil volgens het statistisch onderzoek gecombineerd met schattingen volgens het fysisch onderzoek voor de stations waarvoor lange meetreeksen beschikbaar waren [Van Urk, 1993]. Tenslotte zijn door interpolatie, mede op basis van modelresultaten, voor alle locaties langs de kust basis- en ontwerppeilen afgeleid.

Alle voor het basispeilenonderzoek gebruikte hoogwaterstanden zijn voor de stijging van de gemiddelde hoogwaterstanden gecorrigeerd naar de toestand van 1985. De afgeleide peilen en overschrijdingslijnen gelden daarom voor de hydrologische toestand van 1985. In die zin wordt dan ook gesproken over de basis- en ontwerppeilen 1985.

6.2 Gekozen aanpak voor de HR2006

Men zou ervoor kunnen kiezen elke vijf jaar opnieuw basispeilen en overschrijdingslijnen af te leiden op grond van telkens met vijf jaar waarnemingen verlengde datasets, gecorrigeerd voor veranderingen in de hoogwaterstanden door zeespiegelstijging en getijverandering naar

het laatste jaar van de datasets. Een dergelijk onderzoek is echter vrij omvangrijk en alleen zinvol wanneer de datasets aanzienlijk langer zijn dan bij het genoemde basispeilenonderzoek, de statistische kennis aanmerkelijk is toegenomen, of de kennis van het fysische proces (meteorologie en waterbeweging) sterk is verbeterd. Bovendien is het ongewenst uit oogpunt van continuïteit dat de hoogwaterstanden behorende bij de geldende norm voor een bepaalde dijkkring elke vijf jaar omhoog of omlaag bijgesteld moeten worden, afhankelijk van de uitkomst van de nieuwe statistische analyse.

Vanwege het belang van de ontwerppeilen van 1985 als basis voor het ontwerpen en toetsen van de primaire zeekeringen, apart vastgesteld door de minister, is er tot nu toe voor gekozen de zogenaamde toetspeilen, dat zijn de peilen waarop de bestaande waterkeringen getoetst worden en daarom onderdeel zijn van de hydraulische randvoorwaarden, te baseren op de ontwerppeilen van 1985. Er moet dan nog wel bepaald worden hoeveel de toetspeilen hoger moeten zijn dan de ontwerppeilen van 1985 als gevolg van zeespiegelstijging en getijverandering sindsdien. Als richtjaar daarvoor is voor de HR2006 gekozen voor het jaar 2011, het einde van de toetsperiode 2006-2011, immers de veiligheid moet gegarandeerd zijn tot het eind van de toetsperiode.

6.3 Getijverandering

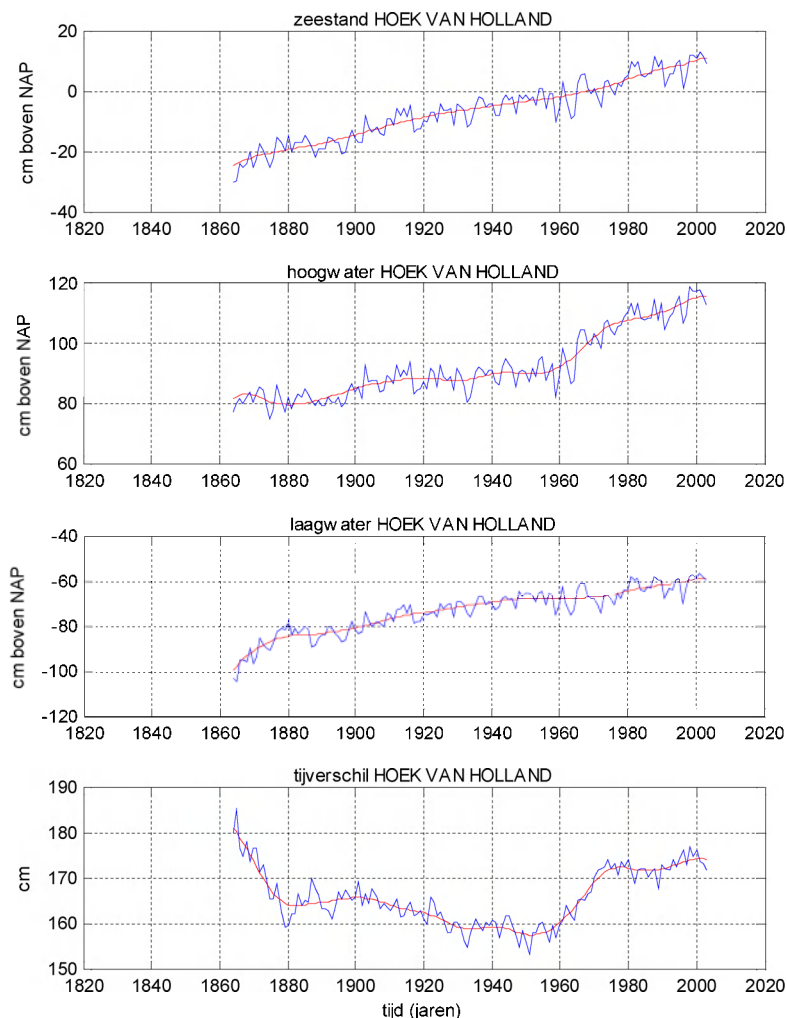
Niet alleen de gemiddelde zeestanden stijgen, maar ook de gemiddelde hoogwater- en laagwaterstanden. De gemiddelde hoogwaterstanden blijken langs de Nederlandse kust veelal sneller te stijgen dan de gemiddelde zeespiegel en de gemiddelde laagwaterstanden langzamer. De tijverschillen nemen dus toe. Deze verandering van de getijkrommen blijkt slechts voor een gering deel te verklaren uit de beïnvloeding van de getijvoortplanting door de zeespiegelstijging. Hier is dan ook vooral sprake van gevolgen van menselijke ingrepen en de morfologische consequenties ervan.

Het getij bij Hoek van Holland (zie figuur 6.3.1, uit [Dillingh, 2006]) bijvoorbeeld, is sterk beïnvloed door de Deltawerken, werken in de Nieuwe Waterweg en de Maasvlakte.

De niet-lineaire trendlijn is berekend met SSA (Singular Spectrum Analysis). De SSA-methode (Singuliere Spectrum Analyse) biedt de mogelijkheid tijdreeksen te analyseren op niet lineaire trends en periodieke componenten. Voor meer achtergronden wordt verwezen naar [Heinen, 1992].

De aanleg van de Afsluitdijk zorgde voor een vrij plotselinge vergroting van de getij-amplitude in de Westelijke Waddenzee, terwijl de gemiddelde zeestand er niet of nauwelijks direct veranderde. Een derde voorbeeld is het toegenomen tijverschil op de Westerschelde, dat grotendeels terug te voeren is op de vrijwel doorlopende baggerwerkzaamheden.

Het gemiddelde hoogwater stijgt gemiddeld ongeveer 5 cm/eeuw sneller dan de gemiddelde zeestand. De stijgsnelheid van het gemiddelde hoogwater is van belang voor de veiligheid, die immers gebaseerd is op overschrijdingskansen van extreem hoge hoogwaterstanden. Voor het afleiden van de hydraulische randvoorwaarden voor de vijfjaarlijkse toetsing van de waterkeringen worden de toetspeilen dan ook gecorrigeerd voor de stijging van het gemiddelde hoogwater (Dillingh, 2006).



Figuur 6.3.1 Verloop gemiddelde zeeniveaus Hoek van Holland. De trendlijn is bepaald m.b.v. een SSA-analyse. Uit (Dillingh, 2006)

6.4 Zeespiegelstijging en de HR2006

Om tot een definitieve bepaling voor de toeslagen over de periode 1985 - 2011 te komen is uiteindelijk de volgende algemene gedachtegang gevolgd:

- De ontwerppeilen van 1985 zijn berekend op basis van overschrijdings-frequenties van extreme hoogwaterstanden. De stijging van de gemiddelde hoogwaterstand is daarom een goede maat voor de correctie op de ontwerppeilen als gevolg van zeespiegelstijging en getijverandering.
- Zonder menselijke ingrepen stijgt langs onze kust het gemiddelde hoogwater bij benadering even snel als de gemiddelde zeestand. De extra laag water als gevolg van de zeespiegelstijging is te gering om de getijbeweging merkbaar te beïnvloeden.

De stijging van de gemiddelde zeestand geeft dus ook een schatting voor de toe te passen correctie op de ontwerppeilen. In estuaria kan de reactie op een stijgende zeespiegel ingewikkelder zijn.

- De stijging van de gemiddelde zeestand op zee vertoont een gelijkmatig grootschalig patroon. Langs onze kust zullen de verschillen niet groot zijn, zeker niet bij nabijgelegen stations. Door getijverandering als gevolg van menselijke ingrepen is het patroon van de stijging van het gemiddelde hoogwater bij peilmeetstations echter niet zo gelijkmatig.
- Als de schatting van de stijging van de gemiddelde zeestand meer bedraagt dan die van de gemiddelde hoogwaterstand, dan wordt die voor de gemiddelde zeestand aangehouden. In beginsel wordt dus uitgegaan van de hoogste van beide schattingen.
- Een SSA-analyse kan een niet-lineaire trend in een signaal goed weergeven. Toch is voorzichtigheid geboden bij de interpretatie van de SSA-analyses. Schommelingen of plotselinge veranderingen in het verleden kunnen nog doorwerken in het verloop van de trendlijn over de laatste decennia. Het kan in dergelijke gevallen beter zijn een lineaire trendlijn toe te passen. Het is daarom noodzakelijk het verloop van de gemiddelde zeestanden per station kritisch te bekijken en niet alleen blind te varen op de uitkomsten van de SSA-analyses.

6.5 Samenvatting

Voor het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden wordt uitgegaan van de stijging van het gemiddelde hoogwater en wordt niet gewerkt met een landelijk gemiddelde, maar met regionale verschillen. Voor het toetsen van waterkeringen is dat van belang, omdat regionale afwijkingen ten opzichte van het landelijk gemiddelde kunnen leiden tot het ten onrechte te vroeg of te laat afkeuren van waterkeringen.

Met de gebruikte SSA-methode (singular spectrum analysis) kunnen niet-lineaire trends in de reeksen voor gemiddeld hoogwater en gemiddelde zeestand bepaald worden. Bij de interpretatie van de SSA-analyses is echter de nodige voorzichtigheid geboden vanwege het doorwerken van schommelingen of plotselinge veranderingen in het verleden. De methode is daarom niet zo robuust. Om die reden is in het onderhavige onderzoek niet voor deze methode gekozen.

De uitgangspunten voor de wijze waarop bij de hydraulische randvoorwaarden en bij de suppletiebehoefte de zeespiegelstijging in rekening wordt gebracht verschillen van elkaar. Voor het toetsen van de waterkeringen is de stijging van de gemiddelde hoogwaterstand van belang, evenals regionaal maatwerk. Voor het bepalen van de suppletiebehoefte gaat het om de stijging van de gemiddelde zeestand. Omdat het suppletiezand van buiten het kustfundament in een strook langs de kust wordt gebracht, en verder in het kuststelsel verspreid wordt door natuurlijke processen, kan volstaan worden met een landelijk gemiddelde waarde voor de zeespiegelstijging. Wat de analysemethode betreft kunnen beide aandachtsgebieden van elkaar leren.

7 Conclusies en advies

7.1 Conclusies

Nederlandse Data

De data van zes Nederlandse peilmeetstations, goed verspreid langs de kust en alle met een lange meethistorie, zijn gecombineerd om tot een representatieve zeespiegelcurve voor de Nederlandse kust te komen.

De hoogten van de NAP-bouten in de nulpalen bij de peilmeetstations zijn in 2005 aangepast aan de nieuwe inzichten ten aanzien van het NAP-vlak. De maximale aanpassing bedraagt - 3,0 cm. De gemiddelde aanpassing van de zes stations bedraagt -1,8 cm. De waterstand ten opzichte van het NAP is na de aanpassing dus 1,8 cm lager dan ervoor, gemiddeld over de zes stations. De voor deze studie gebruikte data van 2005 en later zijn hiervoor gecorrigeerd. De gecorrigeerde data geven de relatieve zeespiegelstijging weer ter plekke van de kust. De daling van de kust ten opzichte van het NAP-vlak is hierin meegenomen.

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 degelijke reeks zuiverder.

De analyse van de Nederlandse data toont dat er een significante 18,6-jarige cyclus aanwezig is met een amplitude van 1,5 cm. Ten behoeve van de trendanalyses is eerst gecorrigeerd voor deze 18,6-jarige fluctuatie.

Voor het betrouwbaar vaststellen van een lineaire trend in de zeespiegelstijging is het noodzakelijk over een lange waarnemingsreeks te beschikken. Zelfs 30 jaar is weinig. Bij kortere reeksen wordt de betrouwbaarheidsband van de trend snel groter.

De Whittaker smoother (een functievrije fittingsmethode) laat een sterkere stijging zien in de meer recente jaren. Het is echter (nog) niet mogelijk om de statistische significantie ervan te berekenen. Deze methode is vooral geschikt voor een visuele presentatie van het verloop van de gemiddelde zeespiegel en de zeespiegelstijging in de loop der jaren..

De Nederlandse data over de periode 1890-2008 tonen wel fluctuaties in de zeespiegelstijging, maar (nog) geen systematische versnelling. De lineaire stijging (periode 1890 - 2008) bedraagt 19 cm per eeuw met een bijbehorende betrouwbaarheidsband van 17 - 20 cm per eeuw (alle waarden afgerond op hele cm's).

Deze schatting, op basis van de tijdreeksen van het gemiddelde van de tijdreeksen van jaargemiddelde (gecorrigeerde) waterstanden van de zes hoofdstations, wordt thans de beste schatting geacht van de huidige relatieve zeespiegelstijging (t.o.v. het pleistoceen) op basis van de meetdata alleen en van belang voor het kustsuppletiebeleid.

Mondiale zeespiegelstijging

Er zijn duidelijke aanwijzingen te vinden in de literatuur dat de mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging is versneld in de afgelopen 100 jaar. De mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging aan het begin van 20^e eeuw is significant lager dan die aan het eind van de 20^e eeuw. Dit wordt vooral veroorzaakt door een onregelmatigheid (knik) rondom het jaar

1930. Deze knik is in de Nederlandse data niet zichtbaar. Duidelijk is ook dat de zeespiegelstijging fluctueert; naast versnellingen zijn ook vertragingen waar te nemen.

Alle literatuur waarin analyses van satellietdata zijn gegeven, laat een trend zien van rond de 3 mm/jaar (30 cm per eeuw). De trend in de satellietdata komt goed overeen met de trend in de data verkregen met peilmeetstations wanneer de overeenkomstige perioden vergeleken worden, de uitkomsten mogen dus onderling vergeleken worden. De trend in de satellietdata (1993-2008) is groter dan de trends verkregen over lange perioden uit data van peilmeetstations. In de literatuur is te vinden dat er sprake is van meerjarige fluctuaties met de duur van een tot enkele decennia. De hogere stijging van de zeespiegel over de periode 1993 – 2008 (satellietdata) is hier mogelijk (deels) aan te wijzen.

De satellietdata geven een ruimtelijk beeld van de zeespiegelstijging over de oceanen en laten gebieden zien waar de zeespiegelstijging enkele malen groter is dan de mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging en gebieden waar de zeespiegel zelfs daalt. De zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust kan dus afwijken van de mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging.

Satellietdata van zeespiegelstijging zijn minder nauwkeurig langs de kust vanwege de "footprint" van het meetsignaal dat de satelliet uitzendt, dat bij de kust deels over het land valt. Pas enkele tientallen kilometers uit de kust zijn de satellietdata betrouwbaar.

Voor het vaststellen van de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust geven de Nederlandse peilmeetstations de beste informatie.

Fits door data en KNMI'06-scenario's

De toekomstverwachting ten aanzien van de zeespiegel is overduidelijk een versnelling van de stijging. Door het KNMI zijn een aantal scenario's voor zeespiegelstijging opgesteld met een stijging van de zeespiegel over de periode 1990-2100 van 35 – 85 cm. Voor het hoge en het lage scenario is de som van een lineaire en een exponentiële functie gefit door de gemeten data en de KNMI-projecties. Voor het jaar 2010 geeft dit respectievelijk een stijging van 49 cm/eeuw (hoge scenario) en 23 cm per eeuw (lage scenario).

7.2 Advies

Voor de toekomstige suppletiebehoefte tot 2100 kan ten aanzien van de toekomstige zeespiegelstijging voornamelijk uitgegaan worden van een fit door de meetdata en de punten van het lage KNMI'06-scenario (zie onderstaande tabel). Gekozen is voor het lage KNMI'06-scenario omdat voor de bepaling van de suppletiebehoefte over 5 of 10 jaar relatief gemakkelijk overgeschakeld kan worden op een hoger scenario als tegen die tijd duidelijk blijkt dat het die kant op gaat.

Relatieve zeespiegelstijging volgens de fit door de meetdata en het G/G+-scenario (lage KNMI'06-scenario)

jaar	relatieve zeespiegelstijging (cm/eeuw)
1990	19
2000	21
2010	23
2020	25
2050	32
2100	49

Voor de bepaling van de huidige zeespiegelstijging (2010) kan uitgegaan worden van twee scenario's:

- 1 Uitgaan van een lineaire regressie op de lange reeks waarnemingen tot nu toe: 19 cm/eeuw
- 2 Uitgaan van de koppeling van waarnemingen en het lage KNMI'06-scenario: 23 cm/eeuw

Op dit moment wordt 20 cm per eeuw gehanteerd. Gezien de geringe verschillen en de grote onzekerheden in de scenario's is het advies om op dit moment nog te blijven uitgaan van deze 20 cm per eeuw en om iedere 5-6 jaar aan de hand van de nieuwste gegevens en informatie deze waarde indien nodig bij te stellen. Deze cyclus komt overeen met die van de hydraulische randvoorwaarden voor de landelijke toetsing van de primaire waterkeringen en van de assessmentrapporten van het IPCC en de hieraan gerelateerde KNMI-klimaatscenario's. Aanbevolen wordt de uitvoering daarvan door Deltares te laten doen, in overleg met het KNMI.

8 Literatuur

- 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, G.B.M (2002): *Oorzaken van de bewegingen van de meetpunten van het NAP*, rapport MDGAP-2002.26, Rijkswaterstaat, 2002.
- 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.
- 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, Delft, maart 2005.
- Church, John A., Neil J. White, Thorkild Aarup, W. Stanley Wilson, Philip L. Woodworth, Catia M. Domingues, John R. Hunter, Kurt Lambeck (2008) *Understanding global sea levels: past, present and future*, Sustain Sci (2008) 3:9-22, Springer 2008,
- DOI 10.1007/s11625-008-0042-4.
- Dillingh, D. (2006) *Waterstanden Nederlandse kust en estuaria, statistieken t.b.v. de hydraulische randvoorwaarden 2006*. Rapport RIKZ/2006.012, Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Eilers, P.H.C. (2003) *Analytical Chemistry* 75, 3299-3304.
- Eilers, P.H.C. (2006) *Statistische Analyse van Trends in Zeewaterstanden*, in opdracht van RWS-RIKZ, EDAS, Dordrecht, 2006.
- Deltacommissie (2008) *Samen werken met water, Een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst*, Bevindingen van de Deltacommissie 2008,
- Hoek Ostende, E.R. van den; J. van Malde (1989): *De invloed van de bepalingswijze op de berekende gemiddelde zeestand*, nota GWAO-89.006, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

- KNMI (2006a) *Klimaat in de 21e eeuw, vier scenario's voor Nederland*. Brochure, KNMI, De Bilt.
- KNMI, (2006b), *KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands*, KNMI Scientific report WR 2006-01, KNMI, De Bilt.
- KNMI (2009) *Klimaatschetsboek Nederland, het huidige en toekomstige klimaat*, report 223, KNMI, De Bilt, 2009
- Klein Tank, A.M.G. en G. Lenderink (red), 2009: *Klimaatverandering in Nederland; Aanvullingen op de KNMI'06 klimaatscenario's*, KNMI, De Bilt, juli 2009.
- Kösters A. en K. van Onselen (2002), *Relatieve bodembeweging bij analyse van peilmeetreeksen*, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat.
- Min. VenW (2000), *3^e Kustnota, Traditie, Trends en Toekomst*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, december 2000.
- Onselen, Kyra van (2000) *The influence of data quality on the detectability of sea-level height variations*. Ph-D Thesis, Technical University Delft.
- Pierre Prandi, Anny Cazenave, Mélanie Becker (2009) Is coastal mean sea level rising faster than the global mean? A comparison between tide gauges and satellite altimetry over 1993-2007, *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L05602, doi:10.1029/2008GL036564, 2009.
- Reudink, R.H.C. en R. Klees (2009) *Vertical control of NAP 2009 – results of the measurement campaign 2009*, Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, DEOS/PSG, november 2009.
- 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.
- Ronde, J.G. de (1983): *Nauwkeurigheid gemiddelde zeestanden*, Nota J.d.R.83.21, Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, 18 oktober 1983.
- Ronde, J.G. de (2008): *“Toekomstige langjarige suppletiebehoefte”*, Deltares, rapport Z4582.24, 2008
- Woodworth P.L., N.J. White, S. Jevrejeva, S.J. Holgate, J.A.Church, W.R. Gehrels (2009) *Evidence for the accelerations of sea level on multi-decade and century timescales*, *Int. J. Climatol.* 29:777-789 (2009), DOI: 10.1002/joc.1771
- Vellinga, P., Katsman C.A., A. Sterl and J.J. Beersma, (eds), (2008), *Onderzoek naar bovengrensscenario's voor klimaatverandering voor overstromingsbescherming van Nederland: een internationale wetenschappelijke beoordeling, 2008* (De Nederlandse vertaling). Dit rapport is een publicatie van KNMI en Wageningen UR (Alterra, Earth System Science and Climate Change Group)

A 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 marmere 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 peilmeetstions sterk uitgebreid.

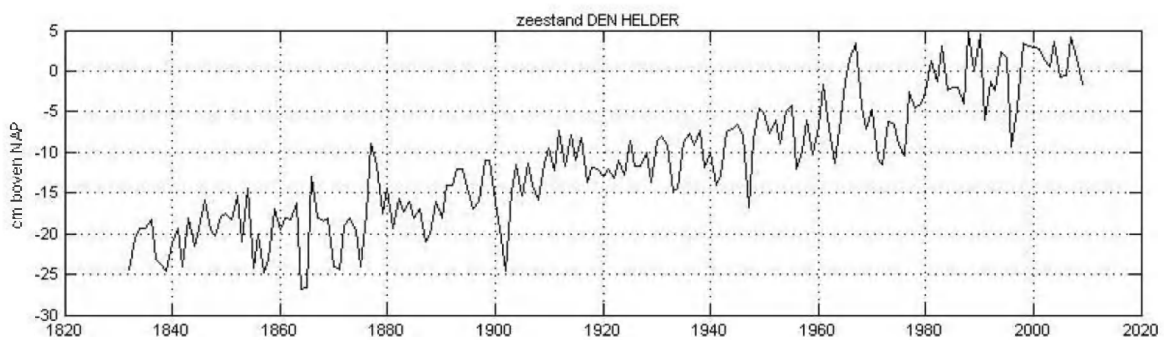
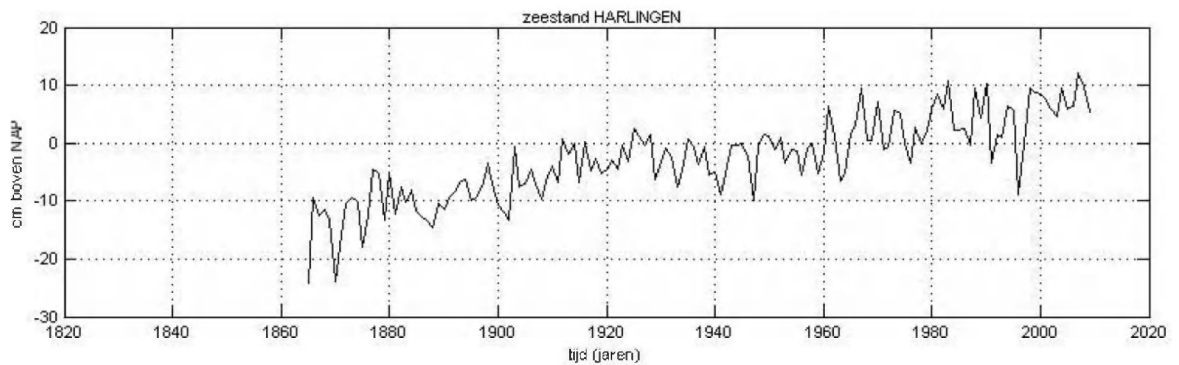
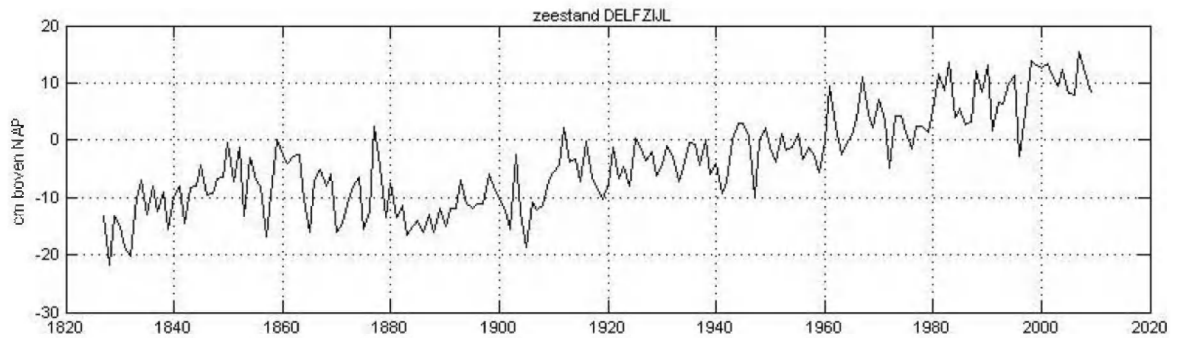
Na de 3^e NWP werden de hoogten van ondergrondse merken niet aangepast, ze leken stabiel genoeg. De resultaten van de 4^e NWP bevestigden de stabiliteit van de ondergrondse merken, reden om de hoogten van de ondergrondse merken van het primaire net ook nu niet opnieuw te berekenen, al bestonden toen 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.

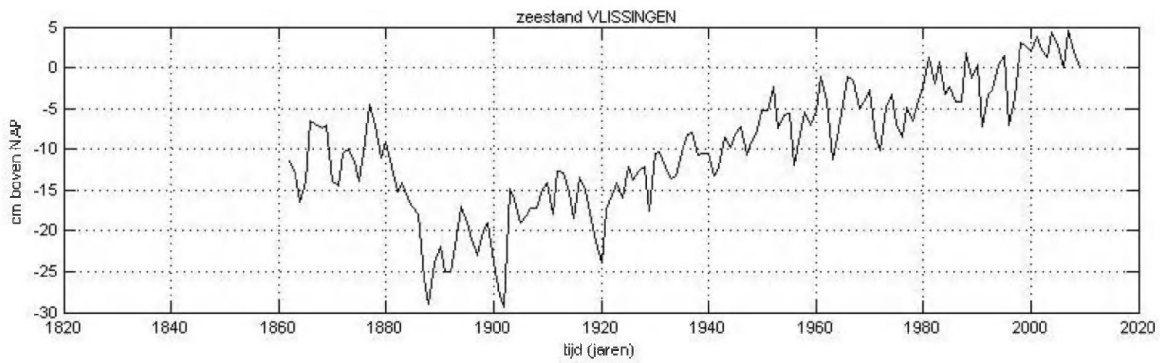
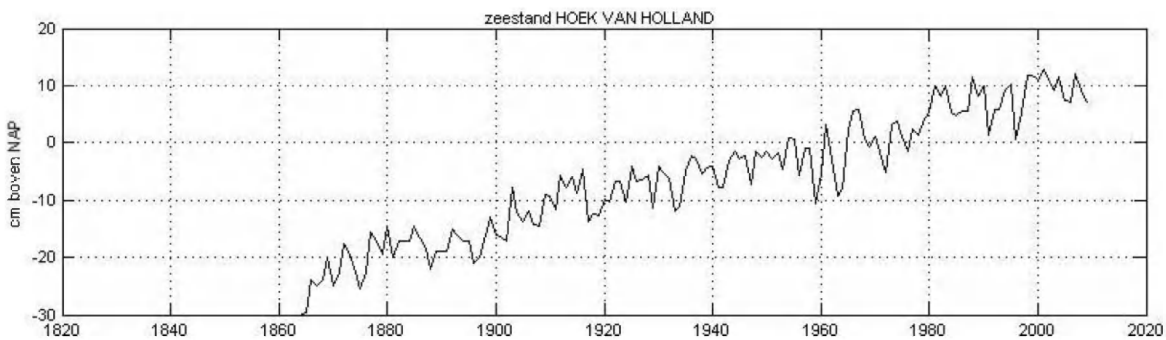
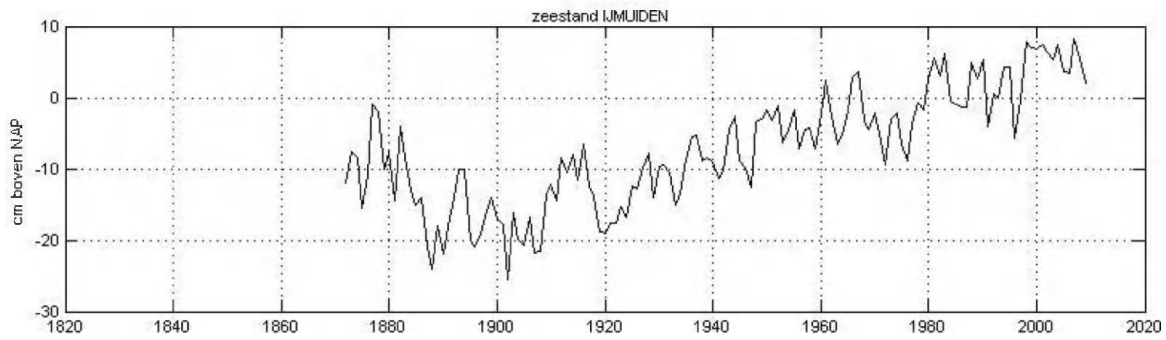
Bij de 5^e NWP (1996-1999) werden voor het eerst in Nederland optische en hydrostatische waterpassing, satellietplaatsbepaling en zwaartekrachtmeting gecombineerd. De waterpassingen vormen de basis van het primaire net van het NAP. De zwaartekrachtmetingen vormen een onafhankelijke meting voor het vaststellen 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.

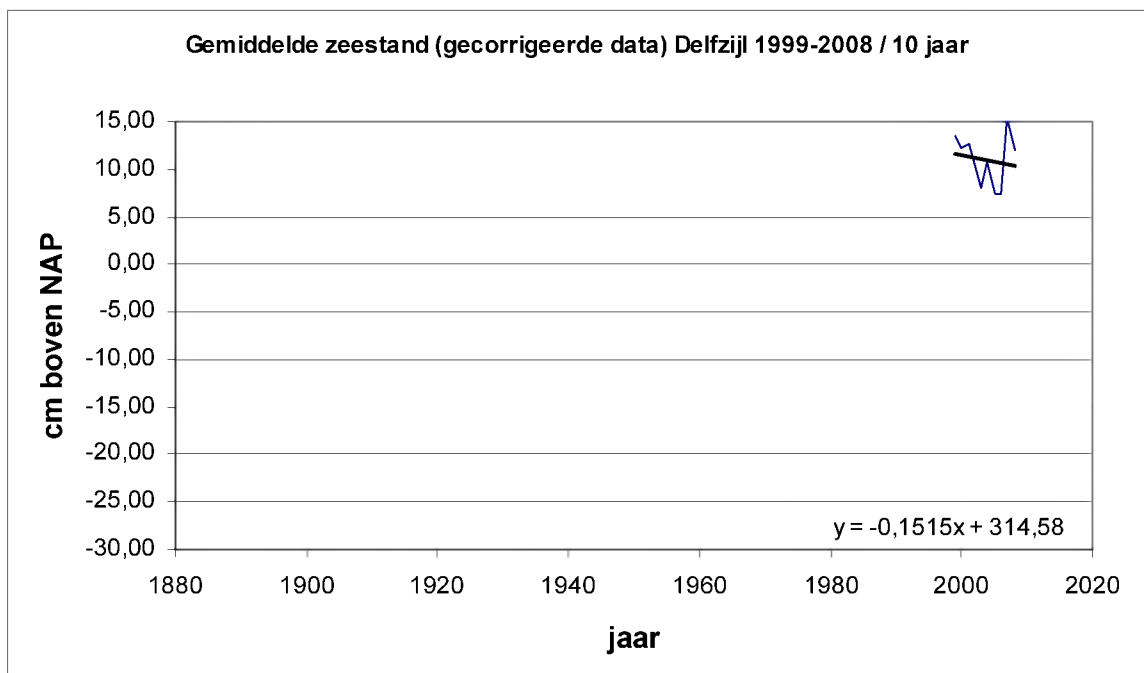
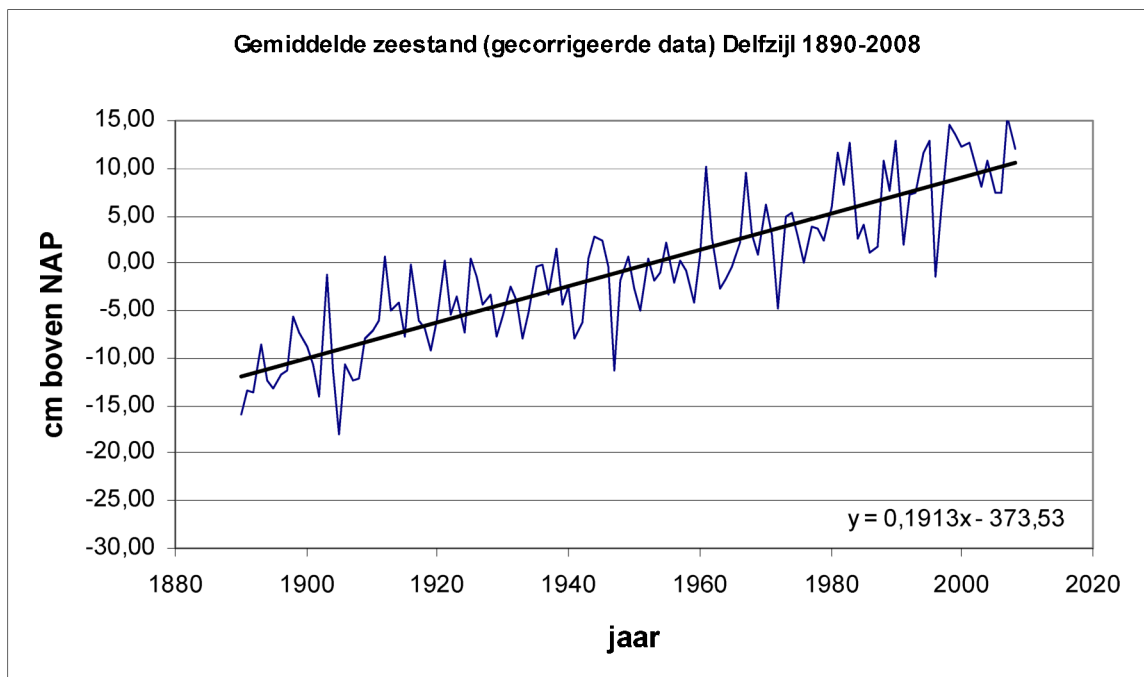
De resultaten van de 5^e NWP plus aanvullende analyses hebben uiteindelijk geleid tot de NAP-publicatie van 2005.

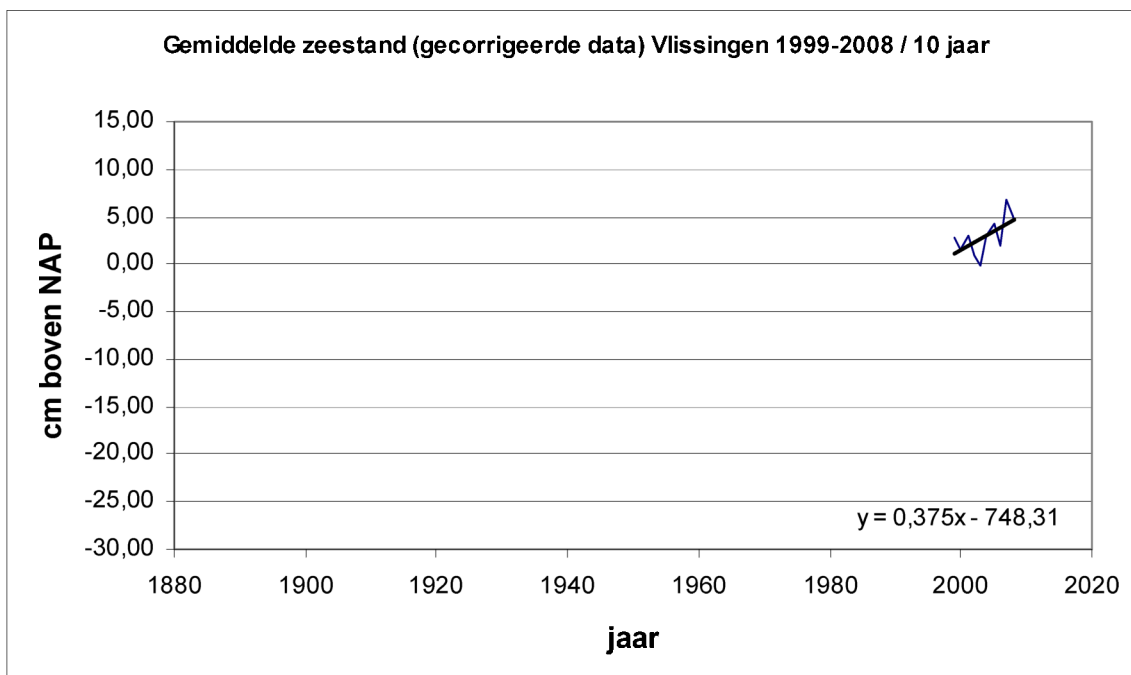
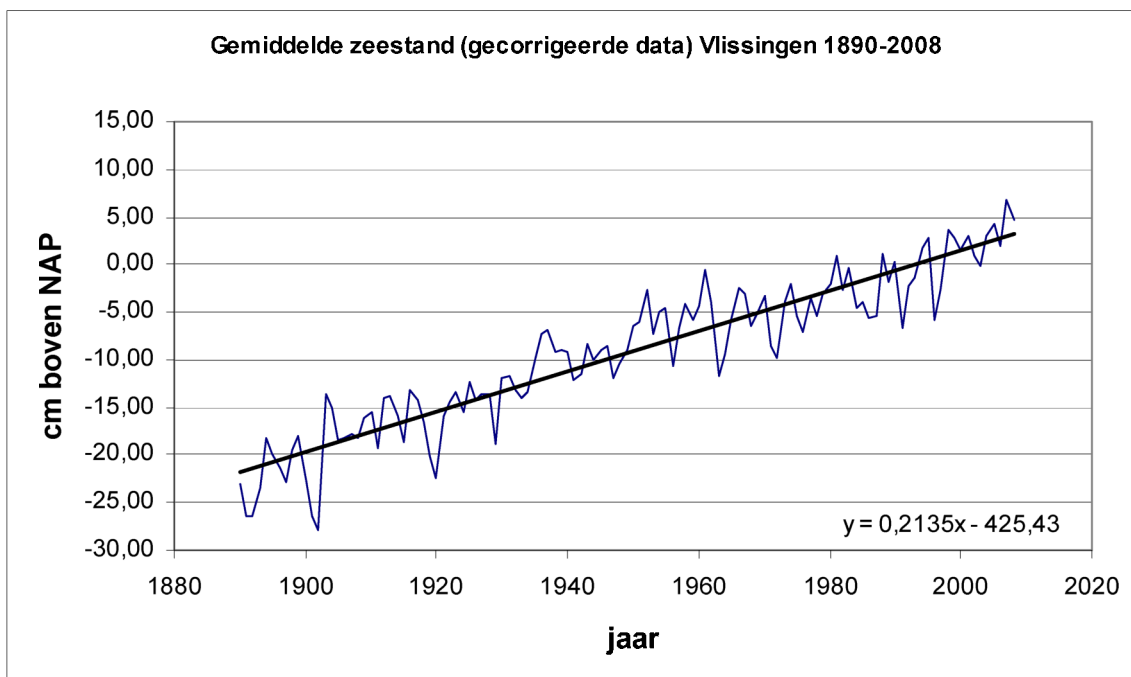
B Gemiddelde zeestanden zes hoofdstations, ongecorrigeerde data



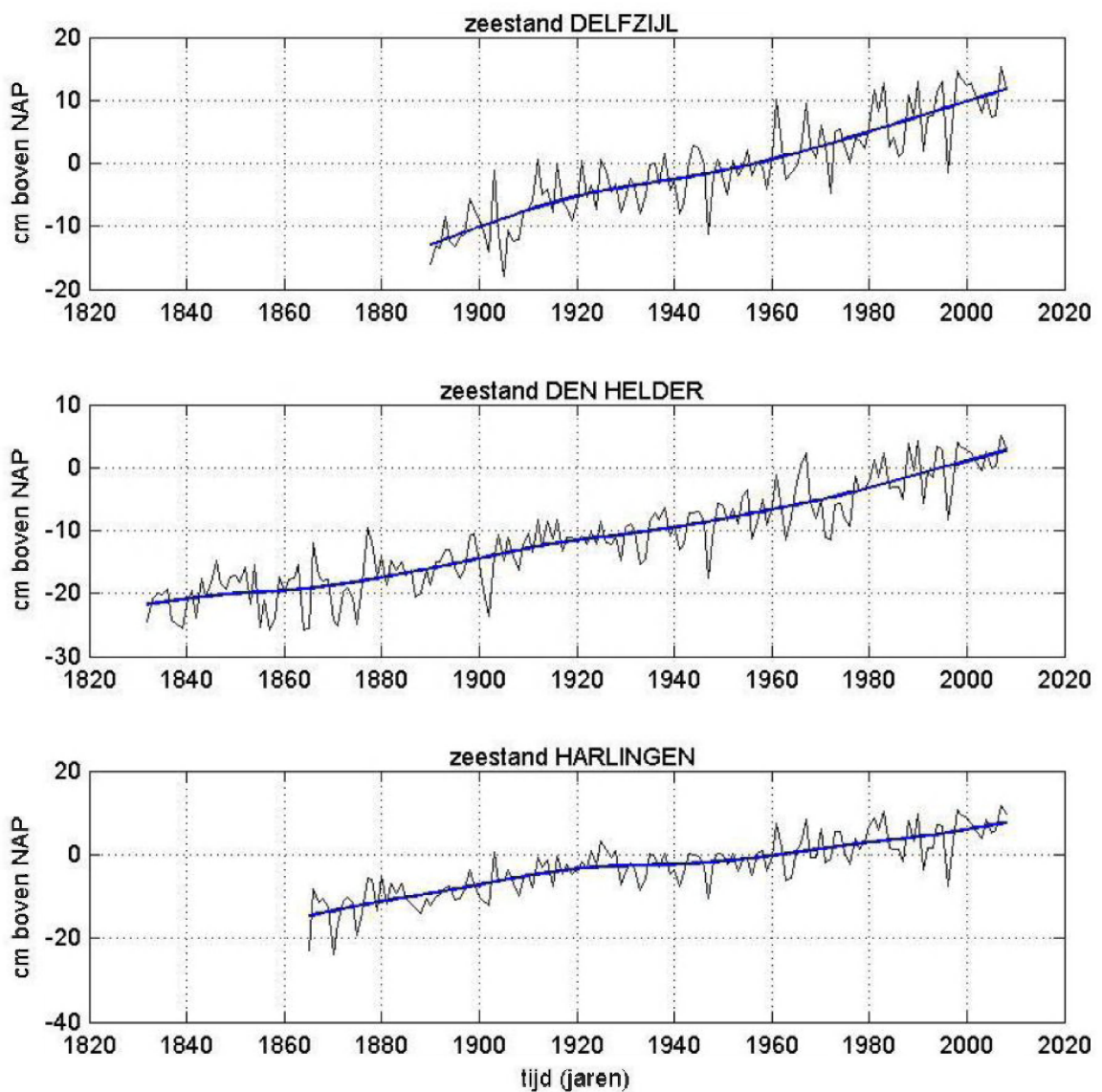


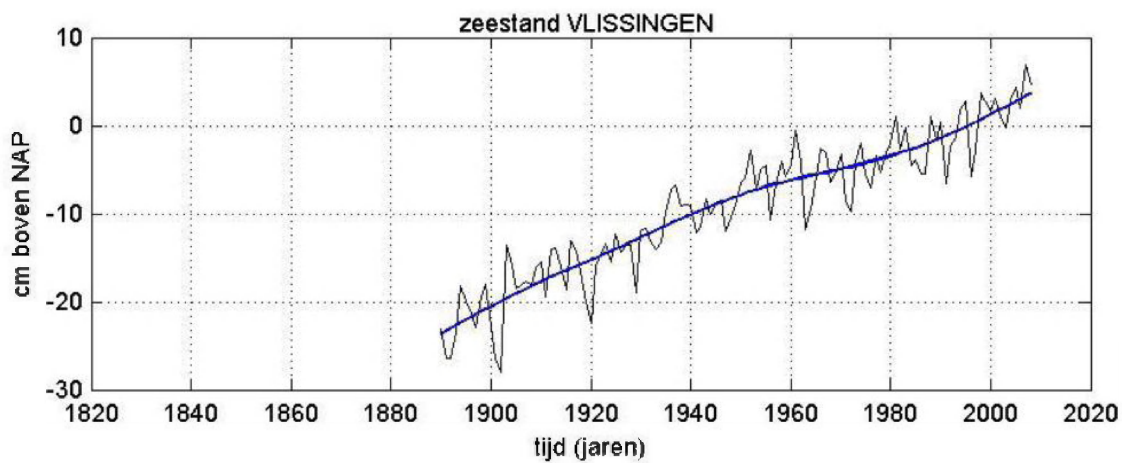
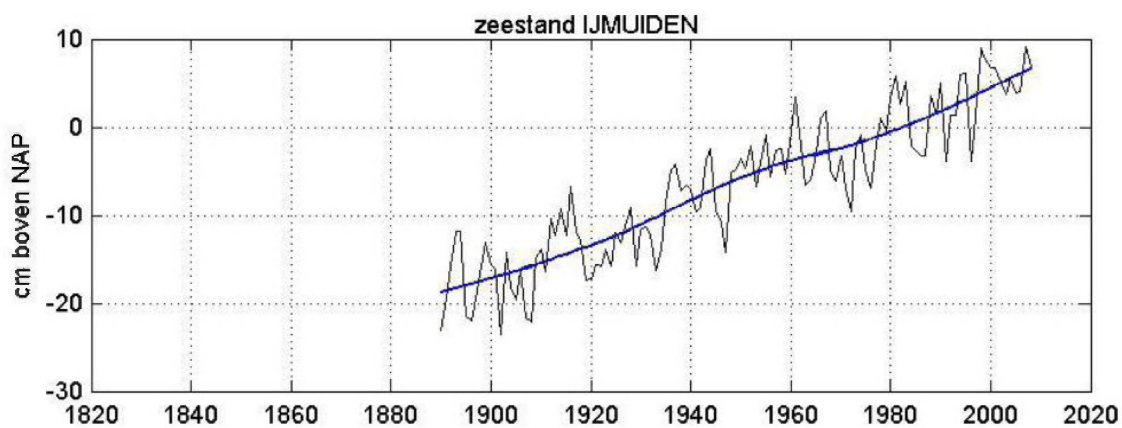
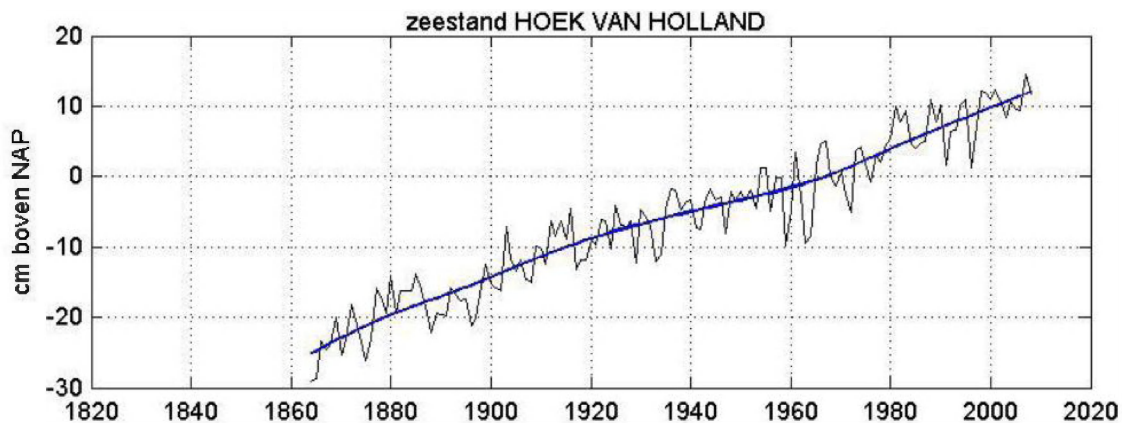
C Lineaire trends gecorrigeerde data; illustratie invloed analyseperiode voor Delfzijl en Vlissingen



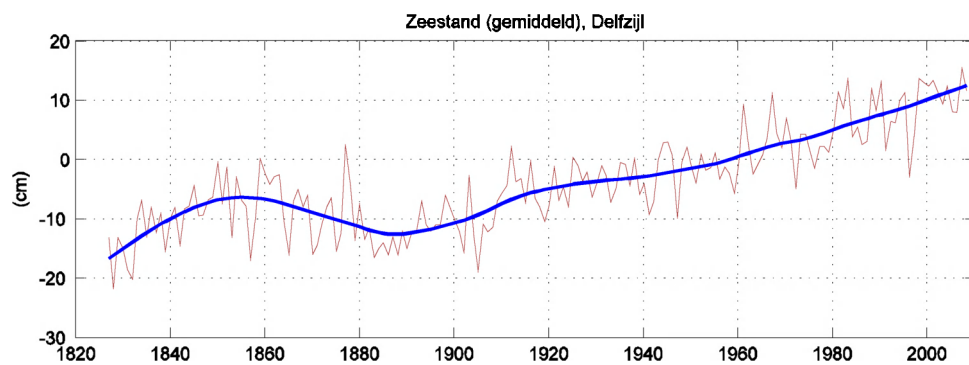
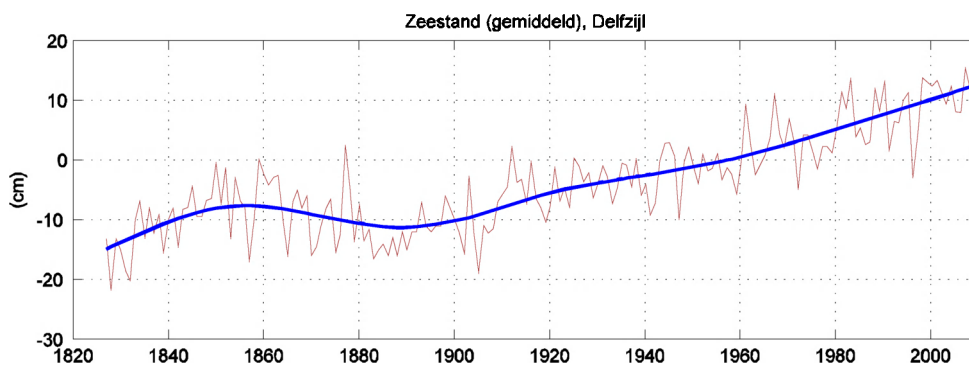
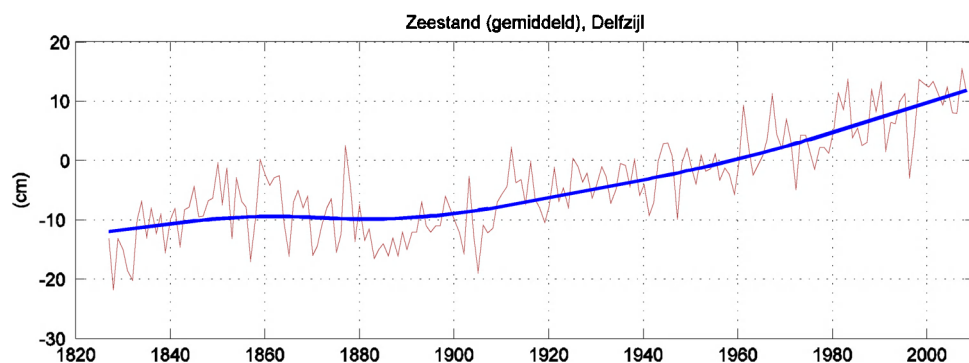


D Gemiddelde zeestanden hoofdstations, gecorrigeerde data; trends berekend met de Whittaker smoother, $\lambda=10^4$





E Gemiddelde zeestanden Delfzijl, ongecorrigeerde data; trends berekend met de Whittaker smoother voor driewaarden van λ

 $\lambda=10^3$  $\lambda=10^4$  $\lambda=10^5$

F Stijgsnelheden van de gemiddelde zeestanden volgens de Whittaker smoother, gecorrigeerde data, $\lambda=10^4$

