



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Tijdsafhankelijke klimaatscenario's voor zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust

Caroline Katsman, Sybren Drijfhout and Wilco Hazeleger

De Bilt, 2011 | Technical report; TR-318

Tijdsafhankelijke klimaatscenario's voor
zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust

Versie 1.0

Datum	5 juli 2011
Status	Definitief

Tijdsafhankelijke klimaatscenario's voor zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust

Caroline Katsman
Sybren Drijfhout
Wilco Hazeleger
(KNMI / Mondiaal Klimaat) *

maart 2011

*Met dank aan Fedor Baart (TU Delft / Deltares) voor het beschikbaar stellen van analyses van gemeten variaties in het relatieve zeeniveau langs de Nederlandse kust (Figuur 2B, 3, 4 en 5).

Samenvatting

In deze studie presenteert het KNMI een set tijdsafhankelijke klimaatscenario's voor de zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust. Deze klimaatscenario's zijn volledig consistent met de bestaande KNMI'06 klimaatscenario's voor zeespiegelstijging [1]. De laatsten geven alleen een schatting voor de jaren 2050 en 2100. In [1] is ook een ruwe schatting gegeven voor de zeespiegelstijging op de zeer lange termijn, voor het jaar 2300.

De tijdsafhankelijke klimaatscenario's voor zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust zijn geformuleerd op basis van de aannames dat het zeeniveau stijgt in de loop van de tijd, zodanig dat

- (de bandbreedte van) de KNMI'06 klimaatscenario-waarden worden bereikt in 2050 en in 2100, en
- (de bandbreedte van) de ruwe lange termijn schattingen worden bereikt in 2300.

Dit wordt gerealiseerd door aan te nemen dat het zeeniveau verandert volgens een derdegraadsvergelijking.

Net als de KNMI'06 klimaatscenario's zijn deze tijdsafhankelijke klimaatscenario's representatief voor de gehele kustlijn.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
1 Inleiding	4
2 Begripsbepaling	4
3 Gemeten zeespiegelstijging	5
4 Bestaande scenario's voor zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust	8
4.1 KNMI'06 klimaatscenario's voor zeespiegelstijging	8
4.2 Lange termijn klimaatscenario's voor zeespiegelstijging	10
4.3 Beleidsscenario's voor zeespiegelstijging gehanteerd voor de kust- bescherming (Rijkswaterstaat)	11
5 Recente wetenschappelijke ontwikkelingen	12
5.1 Klimaatscenario's voor zeespiegelstijging in het vierde Assessment Report van het IPCC (2007)	12
5.2 Bovengrensscenario voor zeespiegelstijging van de Deltacommissie (2008)	13
5.3 Aanvulling op de KNMI'06 klimaatscenario's (2009)	13
6 Tijdsafhankelijke klimaatscenario's voor zeespiegelstijging aan de Ne- derlandse kust	14
Referenties	20
Appendix	21

1 Inleiding

In 2006 heeft het KNMI een set klimaatscenario's voor Nederland gepubliceerd [1], met daarin onder meer klimaatscenario's voor de stijging van het zeeniveau in de jaren 2050 en 2100 ten opzichte van het niveau van 1990 (zie ook §4.1). Naast deze verwachtingen voor de eenentwintigste eeuw blijkt er behoefte aan informatie over het tijdsverloop van de zeespiegelstijging, met name voor de periode tot 2050. In deze studie worden daarom tijdsafhankelijke klimaatscenario's voor de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust gepresenteerd. Deze tijdsafhankelijke klimaatscenario's zijn volledig consistent met de bestaande KNMI'06 klimaatscenario's. Ze kunnen met name dienen ter onderbouwing van beleidskeuzes op een termijn van enkele decennia.

Belangrijke begrippen worden geïntroduceerd in §2, en in §3 worden de gemeten veranderingen in het zeeniveau (wereldwijd en lokaal) besproken. In §4 worden bestaande scenario's voor zeespiegelstijging besproken. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen klimaatscenario's en beleidsscenario's. Recente wetenschappelijke inzichten op het gebied van de toekomstige zeespiegelstijging worden besproken in §5. De nieuw ontwikkelde tijdsafhankelijke KNMI klimaatscenario's voor zeespiegelstijging zijn het onderwerp van §6. Meer details over de constructie van deze klimaatscenario's worden gegeven in de Appendix.

2 Begripsbepaling

Het **absolute** zeeniveau is gedefinieerd als de gemiddelde waterstand. In reactie op de al geconstateerde en nog verwachte opwarming van de atmosfeer zal dit absolute zeeniveau in de loop van de eenentwintigste eeuw hoogstwaarschijnlijk stijgen [2], als gevolg van het smelten van gletsjers en kleine ijskappen, de uitzetting van het zeewater en het slinken van de ijskappen op Groenland en Antarctica. De (lokale) **relatieve** zeespiegelverandering is de som van de verandering van het absolute zeeniveau en de lokale bodembeweging. In Nederland hebben we te maken met bodemdaling en absolute zeespiegelstijging, en dus ook met relatieve zeespiegelstijging (zie Figuur 1). De natuurlijke bodemdaling is zeer plaatsafhankelijk (zie bijvoorbeeld www.natuurinformatie.nl/ndb.mcp/natuurdatabase.nl/i000877.html). De gemiddelde daling langs de Nederlandse kust bedraagt ongeveer 2 cm per eeuw (0.2 millimeter per jaar).

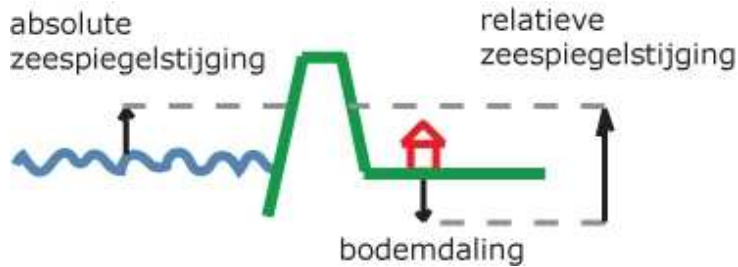
Het begrip 'scenario' wordt in verschillende betekenissen gebruikt. In dit

rapport wordt onderscheid gemaakt tussen klimaatscenario's en beleidscenario's. **Klimaatscenario's** zijn wetenschappelijke scenario's die consistente beelden geven van een mogelijk toekomstig klimaat. In mei 2006 publiceerde het KNMI een set van klimaatscenario's voor Nederland (§4.1) die de meest waarschijnlijke veranderingen in het lokale klimaat in kaart brengt. Klimaatscenario's zijn altijd geassocieerd met een onzekerheid, omdat toekomstige (socio-economische) ontwikkelingen niet altijd goed te voorspellen zijn. Zo wordt bij de KNMI'06 klimaatscenario's een bepaalde wereldgemiddelde temperatuurstijging aangenomen. Impliciet wordt verondersteld dat de aarde opwarmt ten gevolge van de uitstoot van fossiele brandstoffen. Omdat de toekomstige uitstoot onbekend is worden hier verschillende scenario's voor gedefinieerd en doorgerekend (zie ook §4.1). Klimaatscenario's zijn daarom meestal geformuleerd in termen van een bandbreedte van mogelijke uitkomsten. **Beleidsscenario's** worden ontwikkeld met het oog op een specifieke toepassing. Zo staan in de Derde Kustnota [3] beleidscenario's voor klimaatverandering, uitgewerkt in de vorm van randvoorwaarden waarmee rekening gehouden dient te worden bij kustlijnverzorging en veiligheid tegen overstromen (§4.3). Bij de ontwikkeling van beleidscenario's ten behoeve van het klimaat kunnen naast wetenschappelijke argumenten over klimaatverandering ook afwegingen over bijvoorbeeld de risico's, economische belangen en (gebrek aan) flexibiliteit van beleidskeuzes een rol spelen.

De klimaatscenario's die het KNMI levert aan beleidsmakers dienen ter onderbouwing en ondersteuning van beleidsbeslissingen. De beleidscenario's die uiteindelijk worden geformuleerd door de verantwoordelijke instantie zijn niet noodzakelijk een deelverzameling van de klimaatscenario's. Klimaatverandering (en in het bijzonder zeespiegelstijging) is een langzaam proces. Wanneer de beleidsbeslissing voor een korte termijn geldt en het bovendien makkelijk aan te passen is kan het verdedigbaar zijn om (bijvoorbeeld uit financieel oogpunt) het beleid voor die korte termijn te baseren op de extrapolatie van historische meetreeksen. Voor de langere termijn wordt meestal wel rekening gehouden met klimaatverandering, en vallen de beleidscenario's binnen de set klimaatscenario's (zie ook §4.3).

3 Gemeten zeespiegelstijging

Veranderingen in de zeespiegel worden gemeten met behulp van peilschalen aan de kust en (sinds 1992) met satellieten. Wereldwijd is de zeespiegel gedurende de twintigste eeuw gestegen met een gemiddelde snelheid van 18 ± 5 centimeter per

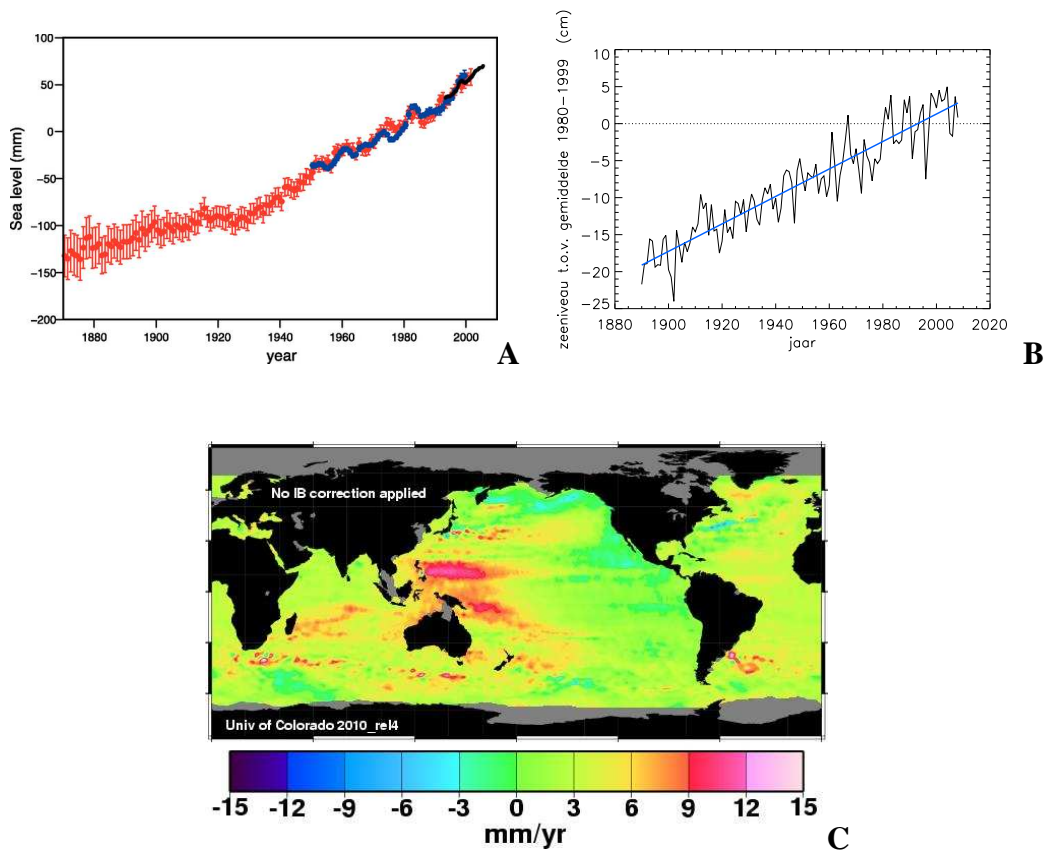


Figuur 1: Schematische weergave van de situatie in Nederland, ter illustratie van de definitie van (de stijging van) het relatieve zeeniveau, het absolute zeeniveau, en bodemdaling.

eeuw (1.8 ± 0.5 millimeter per jaar (mm/jr) [2], rode en blauwe curve in Figuur 2A). De zeespiegel stijgt de laatste decennia sneller: satellietmetingen laten over de periode 1993–2003 een wereldgemiddelde snelheid van zeespiegelstijging van 31 ± 7 cm/eeuw (3.1 ± 0.7 mm/jr) zien [2]. Ook in Figuur 2A is op het oog al zichtbaar dat het wereldgemiddelde zeeniveau in de tweede helft van de twintigste eeuw sneller is gestegen dan in de eerste helft.

Aan de Nederlandse kust wordt tot nu toe geen significante versnelling in de stijging van het zeeniveau gedetecteerd: gemiddeld over zes kuststations (Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl) is het zeeniveau over de hele twintigste eeuw gestegen met een gemiddelde snelheid van bijna 19 cm/eeuw (Tabel 3.1.3 in [4]; Tabel 1). Dit is niet in tegenspraak met de satellietgegevens. Uit deze metingen weten we dat lokale veranderingen van het zeeniveau sterk kunnen afwijken van de wereldgemiddelde verandering (Figuur 2C).

Het tijdsverloop van de stijging van het zeeniveau langs de Nederlandse kust, gemiddeld over de zes kuststations, is zeer grillig (Figuur 2B). Als gevolg daarvan hangt de verkregen waarde van de gemiddelde stijging van het zeeniveau sterk af van de periode waarover deze wordt geanalyseerd (zie bijvoorbeeld Figuur 3.1.3 en Tabel 3.1.4 in [4]). Voor 1890–2008 bedraagt de onzekerheid in de berekende gemiddelde stijging ongeveer 0.07 mm/jr (één standaarddeviatie, Tabel 1). Over de afgelopen 50 jaar (1959–2008) is de gemiddelde stijging van het zeeniveau iets hoger dan over de gehele eeuw maar is ook de onzekerheid aanmerkelijk groter (Tabel 1). Dat er aan de Nederlandse kust geen significante toename van de snelheid van zeespiegelstijging te zien is betekent daarom niet met zekerheid dat een dergelijke toename niet al is ingezet: een eventuele snelheidstoename kan nog verborgen zijn in de grilligheid van het signaal. Bij wereldwijde metingen



Figuur 2: Gemeten veranderingen in het zeeniveau. **A** Tijdsverloop van de stijging van het wereldgemiddelde zeeniveau, overgenomen uit [2] (rood: reconstructie, blauw: peilschaalmetingen aan de kust, zwart: satellietmetingen). De grafiek loopt tot 2006, de meest recente satellietmetingen zijn te vinden op <http://sealevel.colorado.edu>; **B** Tijdsverloop van de stijging van het relatieve zeeniveau gemiddeld over zes meetstations aan de Nederlandse kust (blauw: lineaire fit door de tijdserie, bron data: F. Baart); **C** Lokale verandering in het zeeniveau gemiddeld over 1992–2010 (in mm/jr) gemeten door satellieten (bron: University of Colorado, <http://sealevel.colorado.edu>). De wereldgemiddelde verandering over deze periode bedraagt ruim 3 mm/jr. De data in **A** en **B** zijn geplote ten opzichte van het gemiddelde niveau over 1980–1999.

periode	gemiddelde trend (mm/jr)	standaard deviatie (mm/jr)
1890–2008	1.85	0.068
afgelopen 50 jaar (1959–2008)	1.95	0.30
afgelopen 40 jaar (1969–2008)	1.83	0.42
afgelopen 30 jaar (1979–2008)	1.25	0.67

Tabel 1: Lineaire trends in het zeeniveau langs de Nederlandse kust en de onzekerheid daarin (standaarddeviatie), in mm/jr, voor verschillende analyse periodes (bron: F. Baart). In Figuur 2B is de lineaire trend over 1890–2008 geplot als een blauwe lijn.

(Figuur 2A) wordt een groot deel van deze grilligheid uitgemiddeld. Dit verbetert de signaal-ruis verhouding aanzienlijk en maakt de toename van de snelheid van zeespiegelstijging ten opzichte van de eerste helft van de twintigste eeuw wel detecteerbaar.

4 Bestaande scenario's voor zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust

In deze paragraaf worden de bestaande KNMI'06 klimaatscenario's voor zeespiegelstijging en de bijbehorende lange termijn schatting in meer detail besproken. Daarnaast worden de beleidscenario's van Rijkswaterstaat bediscussieerd.

4.1 KNMI'06 klimaatscenario's voor zeespiegelstijging

De KNMI'06 klimaatscenario's zijn gebaseerd op berekeningen met behulp van klimaatmodellen. De uitkomsten van deze klimaatmodellen vormen ook de basis voor de klimaatscenario's voor de wereldgemiddelde zeespiegelstijging gepresenteerd in [2]. Hoeveel de zeespiegel zal stijgen in de komende eeuw(-en) hangt sterk af van (1) de stijging van de temperatuur in de atmosfeer, omdat die voornamelijk bepaalt hoe snel het landijs smelt en hoe snel en waar de oceanen zullen opwarmen en (2) de hoeveelheid broeikasgassen en aerosolen (kleine zwevende roet- en stofdeeltjes die een bijdrage leveren aan het broeikaseffect) in de atmosfeer, omdat die voornamelijk bepaalt hoe sterk de luchttemperatuur zal stijgen. Omdat de uitstoot van broeikasgassen en aerosolen een onzekere factor is worden

klimaatscenario	wereldwijde temperatuurstijging	absolute lokale zeespiegelstijging
1990–2050		
gematigd	+1 °C	15–25 cm
warm	+2 °C	20–35 cm
1990–2100		
gematigd	+2 °C	35–60 cm
warm	+4 °C	40–85 cm
1990–2300		
gematigd	[niet gespecificeerd]	1.0–1.8 m
warm	[niet gespecificeerd]	1.2–2.5 m

Tabel 2: Absolute lokale zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust en bijbehorende wereldgemiddelde temperatuurstijging voor de periodes 1990–2050 en 1990–2100 volgens de KNMI’06 klimaatscenario’s (§4.1, [1] en §7 in [6]). De ruwe schatting voor het jaar 2300 is een lineaire extrapolatie van de waarden voor 2100 (§4.2, §7.9 in [6]).

de stijging van de luchttemperatuur en van de zeespiegel berekend voor verschillende scenario’s voor het tijdsverloop van de hoeveelheid broeikasgassen en aerosolen. Deze zogenaamde SRES scenario’s zijn gespecificeerd door het IPCC in hun Special Report on Emissions Scenarios [5]. In eerste benadering geldt dat hoe groter de stijging van de luchttemperatuur is hoe groter ook de zeespiegelstijging zal zijn.

Maar de bandbreedte van de klimaatscenario’s voor zeespiegelstijging is niet alleen een gevolg van het rekenen met een verschillend verloop van de uitstoot van broeikasgassen in de tijd. Gegeven een zeker emissiescenario zijn de klimaatmodellen waarmee deze berekeningen worden gedaan het in detail niet eens over de grootte en de ruimtelijke patronen van de opwarming omdat bepaalde natuurkundige processen (nog) moeilijk in de huidige modellen te representeren zijn. Daarom is niet precies bekend hoe groot hun bijdrage aan de zeespiegelstijging op een bepaald moment zal zijn. Ook kennen sommige processen een intrinsieke onzekerheid en onvoorspelbaarheid die niet kan worden geëlimineerd door het vergroten van de wetenschappelijke kennis.

De KNMI’06 klimaatscenario’s [1, 6] en toekomstige herziene versies [7] zullen daarom nooit een exact antwoord kunnen geven op de vraag hoe het zeeniveau aan de Nederlandse kust zal veranderen. Ze zijn geformuleerd als een bandbreedte

van de mogelijke absolute zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust (bodemdaling is niet verdisconteerd, Figuur 1) in een specifiek jaar ten opzichte van 1990.

Voor de periode 1990–2050 bedraagt de bandbreedte voor de verwachte zeespiegelstijging 15–25 cm voor het gematigde klimaatscenario (gebaseerd op een wereldwijde stijging van de atmosfeertemperatuur van $+1^{\circ}\text{C}$ in die periode) en 20–35 cm voor het warme klimaatscenario (atmosfeertemperatuur $+2^{\circ}\text{C}$). Voor de periode 1990–2100 bedragen deze bandbreedtes 35–60 cm en 40–85 cm voor respectievelijk het gematigde en het warme klimaatscenario, gebaseerd op een wereldwijde stijging van de atmosfeertemperatuur van $+2^{\circ}\text{C}$ en $+4^{\circ}\text{C}$ in die periode (Tabel 2).

De bandbreedtes van de twee klimaatscenario's omspannen samen de meest waarschijnlijke uitkomsten van mogelijke veranderingen in het zeeniveau langs de Nederlandse kust, op grond van de huidige kennis. Meer precieze kansuitspraken over het toekomstige klimaat in Nederland zijn (nog) niet mogelijk.

4.2 Lange termijn klimaatscenario's voor zeespiegelstijging

De stijging van het zeeniveau zal naar verwachting ook na het jaar 2100 nog aanhouden [2, 6]. Zowel het uitzetten van de oceaan als het slinken van de ijskappen van Groenland en Antarctica gaan nog eeuwen door vanaf het moment dat de concentraties broeikasgassen en aerosolen in de atmosfeer constant blijven, blijkt uit modelberekeningen. Daarom heeft het KNMI destijds ook een ruwe schatting voor het jaar 2300 gepubliceerd als een lange termijn klimaatscenario voor zeespiegelstijging (§7.9 in [6]).

Het is waarschijnlijk dat de stijging van het zeeniveau zal versnellen in de loop van de eenentwintigste eeuw, maar wanneer later de atmosfeertemperatuur niet langer stijgt omdat de hoeveelheid broeikasgassen en aerosolen stabiliseert zal de stijging van het zeeniveau naar verwachting afvlakken en ook stabilizeren. Uit modelstudies blijkt dat een redelijke schatting voor de stijging tot het jaar 2300 kan worden verkegen door de bandbreedte van de zeespiegelstijging voor 1990–2100 lineair te extrapoleren. Voor de stijging langs de Nederlandse kust impliceert dit een bandbreedte van ruwweg 1.0 tot 1.8 m voor het gematigde klimaatscenario, en 1.2 m tot 2.5 m voor het warme klimaatscenario (Tabel 2, afgerond op 10 cm).

beleidsscenario	tempo relatieve zeespiegelstijging	toepassingsgebied en ontwerpduur
minimaal	20 cm/eeuw	beslissingen met korte ontwerpduur (~ 5 jaar), geringe investering of hoge mate van flexibiliteit (zandsuppleties)
midden	60 cm/eeuw	beslissingen met langere ontwerpduur (~ 50 – 100 jaar), grote investering en weinig flexibiliteit (dijken en stormvloedkeringen)
maximaal	85 cm/eeuw +10% wind toename	reservering van ruimte

Tabel 3: Beleidsscenario's voor de snelheid van relatieve zeespiegelstijging gehanteerd voor de kustbescherming. Afhankelijk van het toepassingsgebied en de ontwerpduur wordt gekozen voor het minimale, het midden of het maximale beleidsscenario [3].

4.3 Beleidsscenario's voor zeespiegelstijging gehanteerd voor de kustbescherming (Rijkswaterstaat)

In de Derde Kustnota [3] worden de beleidsscenario's voor zeespiegelstijging beschreven die Rijkswaterstaat (RWS) hanteert bij de kustbescherming. Ze zijn geformuleerd in termen van een constante snelheid van zeespiegelstijging. Afhankelijk van de toepassing van de beleidsbeslissing (met name van de relevante tijdshorizon) wordt uitgegaan van één van de scenario's in Tabel 3. Hoe langer de periode waarover een beleidsbeslissing wordt genomen, hoe hoger de snelheid van zeespiegelstijging waar rekening mee wordt gehouden. Het minimale beleidscenario is gebaseerd op de waargenomen snelheid van zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust.

De RWS beleidsscenario's zijn gedefinieerd voor de relatieve zeespiegelstijging, dat wil zeggen inclusief de lokale bodembeweging (Figuur 1).

5 Recente wetenschappelijke ontwikkelingen

Na het uitkomen van de KNMI'06 klimaatscenario's in 2006 zijn er verscheidene relevante publicaties over klimaatscenario's verschenen. In februari 2007 publiceerde het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, klimaatpanel van de Verenigde Naties) het vierde Assessment Report over klimaatverandering [2], met daarin onder andere klimaatscenario's voor de wereldgemiddelde zeespiegelstijging. In september 2008 is het advies van de Deltacommissie (commissie Veerman) [8] gepresenteerd. In dit rapport is vooral veel aandacht besteed aan 'plausibele bovengrenzen' voor toekomstige zeespiegelstijging [9], gekoppeld aan de primaire opdracht van de commissie: "Hoe kan Nederland zo worden ingericht dat ons land ook op de zeer lange termijn veilig is tegen overstromingen?". Tenslotte publiceerde het KNMI in november 2009 een brochure met aanvullingen op de KNMI'06 klimaatscenario's [7].

5.1 Klimaatscenario's voor zeespiegelstijging in het vierde Assessment Report van het IPCC (2007)

Volgens het vierde Assessment Report van het IPCC (IPCC 4AR) zal de zeespiegel gedurende de eenentwintigste eeuw wereldwijd met 18 tot 59 cm stijgen ten opzichte van het niveau van 1980–1999, als gevolg van de uitzetting van het zeewater, het smelten van gletsjers en kleine ijskappen en het gestage slinken van de grote ijskappen op Groenland en Antarctica. Op sommige plaatsen is de afkalving aan de randen van de Groenlandse en de West-Antarctische ijskap de laatste jaren sterk toegenomen (zie bijvoorbeeld het overzicht in [9]). Als deze versnelde afkalving doorzet in de eenentwintigste eeuw stijgt de zeespiegel met nog 10 tot 20 centimeter extra, stelt het IPCC. Op het moment van publiceren was niet in te schatten of de trend inderdaad doorzet [2], en ook met de huidige kennis is dat nog niet met zekerheid te zeggen.

De KNMI'06 klimaatscenario's zijn gebaseerd op dezelfde modelstudies waarop het IPCC zich baseert. Het verschil in bandbreedte tussen de klimaatscenario's is voornamelijk het gevolg van twee verschillen in de aanpak:

- In de KNMI'06 klimaatscenario's zijn regionale effecten meegenomen voor de uitzetting van het zeewater. Naar verwachting zal de zeespiegel in het noordoosten van de Atlantische Oceaan ongeveer 0 tot 15 cm meer stijgen dan het wereldgemiddelde.

- In het IPCC rapport wordt de grootte van de bovengenoemde mogelijke bijdrage van versnelde afkalving van de Groenlandse en West-Antarctische ijskap apart genoemd en niet opgenomen in de schatting voor de totale zeespiegelstijging. Het KNMI heeft er voor gekozen deze bijdrage van versneld afkalven wel op te nemen in de klimaatscenario's.

5.2 Bovengrensscenario voor zeespiegelstijging van de Deltacommissie (2008)

In het rapport van de nieuwe Deltacommissie (commissie Veerman) [8] en het daarvoor uitgevoerde onderzoek [9] is een extreem klimaatscenario voor zeespiegelstijging ontwikkeld. In dit extreme klimaatscenario zijn nieuwe inzichten op het gebied van ijskapdynamica verwerkt en wordt uitgegaan van een wereldgemiddelde temperatuurstijging tot +6°C tussen 1990 en 2100. De Deltacommissie heeft geen apart klimaatscenario opgesteld voor 1990–2050, en gaat voor die periode uit van het warme KNMI'06 klimaatscenario (Tabel 2). Het door de Deltacommissie gepresenteerde bovengrensscenario voor de zeespiegelstijging voor 2100 (55 tot 120 cm, exclusief bodemdaling [8]) is een aanvulling op de bestaande KNMI'06 klimaatscenario's.

Naar aanleiding van het rapport van de Deltacommissie [8] heeft de regering een deltagcommissaris aangesteld. Deze heeft tot taak om elk jaar een Deltaprogramma op te stellen om de veiligheid van Nederland voor hoogwater te garanderen en om te zorgen voor een goede zoetwatervoorziening. Het eerste Deltaprogramma [10] is in september 2010 aan de Tweede Kamer aangeboden. Het is gebaseerd op metingen en de KNMI'06 klimaatscenario's; het extreme klimaatscenario van de Deltacommissie [8] wordt niet meegenomen in dit beleidsplan.

5.3 Aanvulling op de KNMI'06 klimaatscenario's (2009)

In 2009 heeft het KNMI een brochure uitgebracht [7] waarin wordt nagegaan wat de onderzoeksresultaten van de afgelopen jaren betekenen voor de klimaatscenario's uit 2006. Ook worden aanvullende gegevens gepresenteerd en wordt de koers geschetst naar de volgende generatie klimaatscenario's voor Nederland. Deze zullen omstreeks 2013 gepubliceerd worden, aansluitend op het dan te verschijnen vijfde Assessment Report van het IPCC. In [7] worden twee onderwerpen besproken die relevant zijn voor zeespiegelstijging: de eerder genoemde waargenomen versnelde afkalving van de Groenlandse en West-Antarctische ijskap en de onze-

kerheid over de verdeling van smeltwater afkomstig van landijs over de oceanen (§2.3 en §2.4 in [7]). Volgens de huidige inzichten zou een herzien klimaatsscenario voor de zeespiegelstijging dat deze effecten in rekening brengt nauwelijks afwijken van de KNMI'06 klimaatsscenario's [11].

6 Tijdsafhankelijke klimaatsscenario's voor zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust

De KNMI'06 klimaatsscenario's [1] zijn destijds geconstrueerd voor twee specifieke zichtjaren (2050 en 2100) en gerelateerd aan twee schattingen voor de wereldwijde stijging van de atmosfeertemperatuur (§4.1). Er zijn geen uitspraken gedaan over het tijdsverloop van de stijging van het zeeniveau in de tussenliggende periode. Ook is een ruwe schatting voor een termijn van drie eeuwen gepresenteerd (§4.2). In deze studie worden klimaatsscenario's voor het verloop van de zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust in de tijd ontwikkeld (zie de Appendix voor meer details over de berekeningen). Ze vormen een (volledig consistente) aanvulling op de bestaande KNMI'06 klimaatsscenario's. De gegevens waarop de klimaatsscenario's voor zeespiegelstijging zijn gebaseerd zijn niet gedetailleerd genoeg om onderscheid te maken tussen de verschillende locaties aan de Nederlandse kust. Net als de KNMI'06 klimaatsscenario's zijn de uitkomsten daarom representatief voor de gehele kustlijn.

Hoewel niet expliciet vermeld gaan de KNMI'06 klimaatsscenario's uit van een toename van de snelheid van zeespiegelstijging in de loop van de eenentwintigste eeuw (de gemiddelde snelheid tussen 1990 en 2050 is lager dan die tussen 2050 en 2100). Ook de resultaten van klimaatmodellen laten een dergelijke toename van de snelheid in de loop van de eeuw zien (zie bijvoorbeeld Figuur 10.31 in [2]). Dit is een logisch gevolg van de trage reactie van de oceanen en ijskappen op de (gerealiseerde en nog verwachte) opwarming van de atmosfeer.

Deze versnelling in de stijging van het zeeniveau zal echter niet voor altijd aanhouden. Er zijn verschillende negatieve terugkoppelingen in het klimaatstelsel aan te wijzen die er voor zullen zorgen dat de stijging van het zeeniveau na langere tijd minder snel gaat verlopen [2]. Zo zal de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer uiteindelijk stabiliseren, bij gebrek aan fossiele brandstoffen. Als gevolg daarvan neemt op de lange termijn de temperatuur van de atmosfeer niet meer toe. In reactie daarop zal de warmteopname in de oceaan minder groot zijn naarmate het temperatuurverschil tussen het zeeoppervlak en de atmosfeer klei-

ner wordt. Dat heeft weer tot gevolg dat de uitzetting van de oceaan minder snel verloopt. Een tweede voorbeeld van een negatieve terugkoppeling is de bijdrage van het smelten van gletsjers aan de stijging van het zeeniveau. Wanneer een gletsjer smelt neemt het ijsvolume af, en trekt de tong zich terug. De (kleine) gletsjer bevindt zich dan op grotere hoogte waar de lucht kouder is, en zal vervolgens minder makkelijk smelten. Dergelijke negatieve terugkoppelingen zorgen er voor dat de stijging van het wereldgemiddelde zeeniveau naar verwachting een S-curve zal beschrijven op een termijn van eeuwen (zie bijvoorbeeld Figuur 10.35 in [2]). Ook voor de hier ontwikkelde tijdsafhankelijke klimaatscenario's wordt een dergelijk tijdsverloop gerealiseerd, door aan te nemen dat het zeeniveau verandert volgens een derdegraadsvergelijking¹.

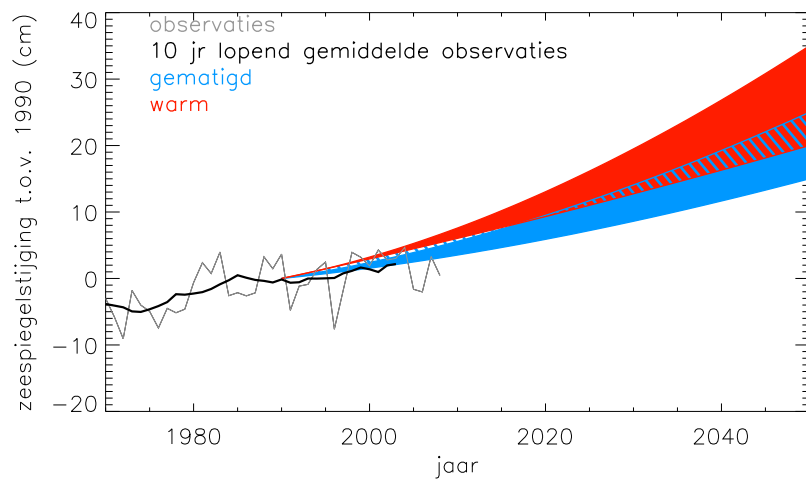
Deze derdegraadsvergelijking voor het zeeniveau wordt volledig vastgelegd door de drie randvoorwaarden dat het zeeniveau

- in 2050 en 2100 de KNMI'06 klimaatscenario-waarden voor die jaren bereikt, en
- in 2300 de waarden van de ruwe lange termijn schattingen bereikt.

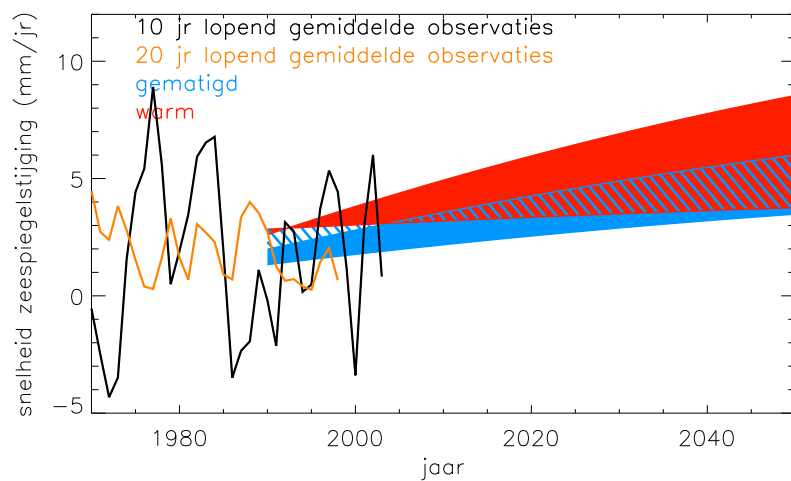
Er worden vier klimaatscenario's geconstrueerd die aansluiten bij respectievelijk de ondergrens en de bovengrens van de bandbreedte van het gematigde en het warme KNMI'06 klimaatscenario en de bijbehorende lange termijn schattingen (Tabel 2). Het verloop van de zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust en de snelheid daarvan volgens de hier geconstrueerde tijdsafhankelijke klimaatscenario's zijn weergegeven in Figuur 3 voor de periode tot 2050 en Figuur 4 voor de periode tot 2100. Een overzicht in cijfers voor verschillende jaren is te vinden in Tabel 4.

Bij de bepaling van de tijdsafhankelijke klimaatscenario's is de snelheid van zeespiegelstijging niet vastgelegd door middel van de randvoorwaarden. De vier curves in Figuur 3 hebben dan ook een verschillende startsnelheid in 1990, variërend van 1.3 tot 2.8 mm/jr. De verkregen waarden liggen ruim binnen de onzekerheidsmarges van de gemeten snelheid van zeespiegelstijging over de afgelopen decennia, zowel voor het lopend gemiddelde over 10 jaar als over 20 jaar (Figuur 3B).

¹Op nog langere termijn (300–3000 jaar) kunnen positieve terugkoppelingen die te maken hebben met het slinken van de ijskappen op Groenland en Antarctica en veranderingen in de koolstofuitwisseling tussen oceaan en atmosfeer weer de overhand krijgen. Daardoor kan de stijging van het zeeniveau weer versnellen.

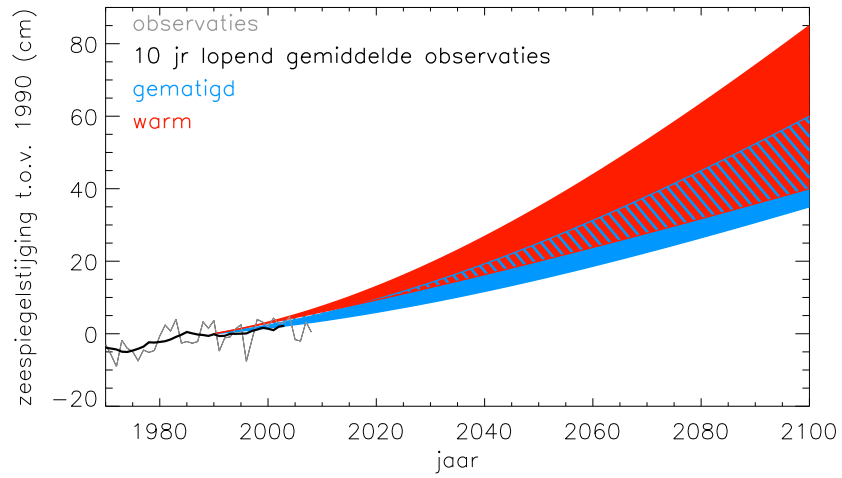


A

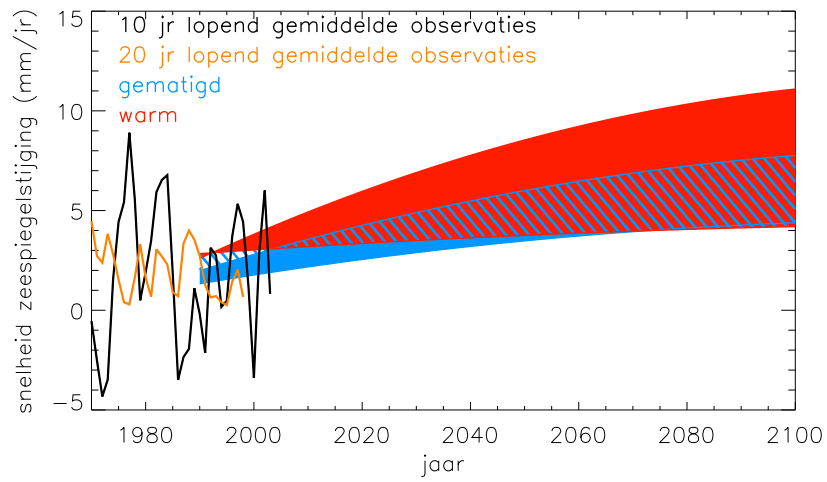


B

Figuur 3: Tijdsverloop van **A** het zeeniveau ten opzichte van 1990 en **B** de snelheid van zeespiegelstijging, volgens het gematigde (blauw) en warme (rood) tijdsafhankelijke KNMI klimaatscenario, voor de periode 1970–2050. De grijze en zwarte lijn in **A** geven respectievelijk de gemeten veranderingen in het zeeniveau aan de Nederlandse kust weer (als in Figuur 2A) en het lopend gemiddelde over 10 jaar. Beide curves zijn gecorrigeerd voor de gemiddelde bodemdaling van 0.2 mm/jr. In **B** is vanwege de grote grilligheid van het signaal alleen het lopende gemiddelde over 10 jaar (zwarte lijn) en over 20 jaar (oranje lijn) geplot.



A



B

Figuur 4: Als Figuur 3, voor de periode 1970–2100.

	gematigd	warm
stijging t.o.v. 1990 (cm)		
2000	1.5–2.4	2.9–3.2
2010	3.5–5.6	6.0–7.6
2020	5.9–9.5	9.3–13.0
2030	8.6–14.1	12.7–19.5
2040	11.7–19.3	16.3–26.8
2050	15.0–25.0	20.0–35.0
2075	24.4–41.4	29.7–58.4
2100	35.0–60.0	40.0–85.0
snelheid		
zeespiegelstijging (mm/jr)		
2000	1.8–2.8	3.0–3.8
2010	2.2–3.6	3.2–4.9
2020	2.5–4.3	3.4–6.0
2030	2.9–4.9	3.5–6.9
2040	3.2–5.5	3.6–7.8
2050	3.5–6.0	3.8–8.5
2075	4.0–7.1	4.0–10.1
2100	4.4–7.8	4.2–11.1

Tabel 4: Stijging van het zeeniveau t.o.v. het niveau van 1990 en de snelheid van zeespiegelstijging volgens de tijdsafhankelijke KNMI klimaatscenario's voor de Nederlandse kust (§6).

Referenties

- [1] KNMI. *Klimaat in de 21e eeuw - vier scenarios voor Nederland*. Verkrijgbaar op www.knmi.nl/bibliotheek/klimbrochure.html, 2006.
- [2] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Mille, editors. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- [3] Ministerie van Verkeer en Waterstaat. *Derde Kustnota - Traditie, Trends en Toekomst*. Verkrijgbaar op www.wateractueel.nl, 2000.
- [4] D. Dillingh, F. Baart, and J. G. de Ronde. *Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte. Rekenmodel t.b.v. handhaven kustfundament*. Deltares, 2010.
- [5] N. Nakicenovic, editor. *Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2000.
- [6] B. J. J. M. van den Hurk, A. M. G. Klein Tank, G. Lenderink, A. P. van Ulden, G. J. van Oldenborgh, C. A. Katsman, H. W. van den Brink, F. Keller, J. J. F. Bessembinder, G. Burgers, G. J. Komen, W. Hazeleger, and S. S. Drijfhout. *KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands*. Technical report WR-2006-01, KNMI, 2006. Available from www.knmi.nl/climatescenarios.
- [7] KNMI. *Klimaatverandering in Nederland. Aanvulling op de KNMI'06 klimaatscenario's 2009*. Verkrijgbaar op www.knmi.nl/bibliotheek/klimbrochure.html, 2009.
- [8] Deltacommissie. *Working together with water: a living land builds for its future*. 2008. Available from www.deltacommissie.com.
- [9] C. A. Katsman, A. Sterl, J. J. Beersma, H. W. van den Brink, J. A. Church, W. Hazeleger, R. E. Kopp, D. Kroon, J. Kwadijk, R. Lammersen, J. Lowe, M. Oppenheimer, H.-P. Plag, J. Ridley, H. von Storch, D. G. Vaughan, P. Vellinga, L. L. A. Vermeersen, R. S. W. van de Wal, and R. Weisse. *Exploring*

high-end scenarios for local sea level rise to develop flood protection strategies for a low-lying delta - the Netherlands as an example. *Climatic Change*, 2011. in press.

- [10] Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, and Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. *Deltaprogramma 2011. Werk aan de delta. Investeren in een veilig en aantrekkelijk Nederland, nu en morgen*. Verkrijgbaar op www.deltacommissaris.nl, 2011.
- [11] C. A. Katsman, W. Hazeleger, S. S. Drijfhout, G. J. van Oldenborgh, and G. Burgers. Climate scenarios of sea level rise for the northeast Atlantic Ocean: a study including the effects of ocean dynamics and gravity changes induced by ice melt. *Climatic Change*, 2008. doi:10.1007/s10584-008-9442-9.

Appendix

De klimaatscenario's voor zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust gepresenteerd in §6 zijn gedefinieerd als derdegraads vergelijkingen voor de zeespiegelstijging als functie van de tijd:

$$H = at^3 + bt^2 + ct \quad (1)$$

met H het zeeniveau ten opzichte van het niveau van 1990 (in millimeters) en t de tijd (in jaren). Het tijdstip $t = 0$ is het jaar 1990. Het tempo van zeespiegelstijging dH/dt is

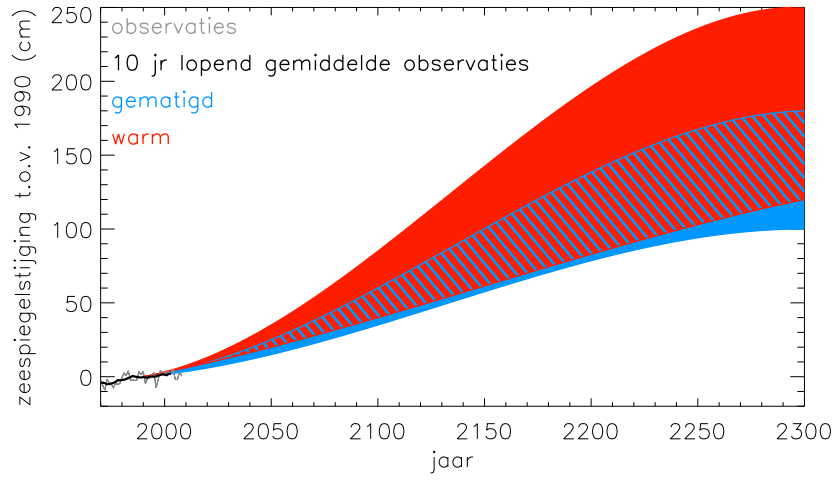
$$\frac{dH}{dt} = 3at^2 + 2bt + c.$$

Voor de onder-en bovengrenzen van het warme en het gematigde klimaatscenario wordt een derdegraads vergelijking voor H als in (1) gedefinieerd die voldoet aan de onderstaande voorwaarden:

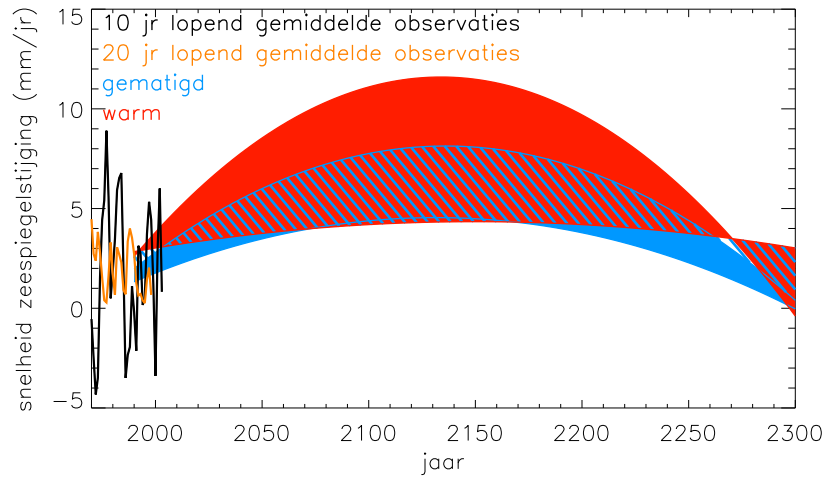
- in 2050 ($t = 60$) en in 2100 ($t = 110$) is het zeeniveau H gestegen in overeenstemming met de onder- of bovengrens van de KNMI'06 klimaatscenario-waarden (Tabel 2);
- in 2300 ($t = 310$) is het zeeniveau gestegen in overeenstemming met de onder- of bovengrens van de lange termijn schatting (Tabel 2).

Tabel 5 geeft een overzicht van de resulterende coëfficiënten a , b en c van de derdegraads vergelijkingen voor de boven- en ondergrens van de twee klimaatscenario's. Figuur 3 en 4 geven het verloop van de zeespiegelstijging H en het tempo van zeespiegelstijging dH/dt in de eenentwintigste eeuw, Figuur 5 loopt tot het jaar 2300.

Coëfficiënt c geeft de snelheid van zeespiegelstijging in 1990 (dH/dt op het tijdstip $t = 0$). Dit is niet door de randvoorwaarden vastgelegd en verschilt per klimaatscenario. De waarden zijn desondanks in overeenstemming met de recent gemeten zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust (§6).



A



B

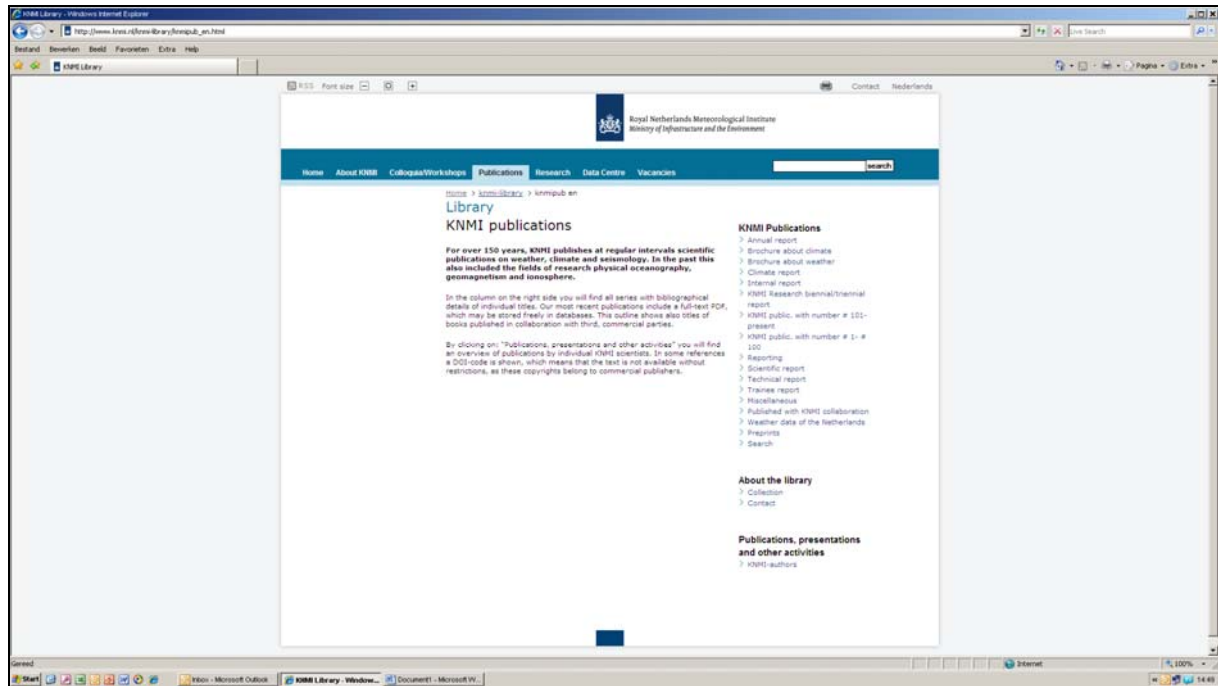
Figuur 5: Als Figuur 3 en 4, voor de periode 1970–2300.

klimateenario	a (mm/jr^3)	b (mm/jr^2)	c (mm/jr)
gematigd			
ondergrens	$-5.37 \cdot 10^{-5}$	$2.28 \cdot 10^{-2}$	1.33
bovengrens	$-9.60 \cdot 10^{-5}$	$4.21 \cdot 10^{-2}$	1.99
warm			
ondergrens	$-1.96 \cdot 10^{-5}$	$9.38 \cdot 10^{-3}$	2.84
bovengrens	$-1.45 \cdot 10^{-4}$	$6.25 \cdot 10^{-2}$	2.61

Tabel 5: Coefficienten a , b en c van de derdegraads vergelijkingen voor de zeespiegelstijging die de boven- en ondergrenzen van het warme en het gematigde klimateenario vastleggen. Coefficient c is gelijk aan de snelheid van zeespiegelstijging in het jaar 1990 (dH/dt op $t = 0$).

A complete list of all KNMI -publications (1854 – present) can be found on our website

www.knmi.nl/knmi-library/knmipub_en.html



The most recent reports are available as a PDF on this site.

