

## Bijlage 3

### Toelichting op door de Deltacommissie gebruikte klimaatscenario's<sup>78</sup>

#### Inleiding

Deze bijlage heeft als doel een beknopte achtergrond te geven over klimaatscenario's en om de door de Deltacommissie in het advies gehanteerde klimaatscenario's te positioneren ten opzichte van IPCC 2007 mondiale klimaatscenario's en KNMI 2006 regionale klimaatscenario's.

Het advies van de Deltacommissie is gebaseerd op de meest recente wetenschappelijke inzichten ten aanzien van de te verwachten mondiale en regionale zeespiegelstijging, verandering van windcondities boven de Noordzee en de neerslagveranderingen die leiden tot veranderingen in afvoeren van grote rivieren. De Deltacommissie heeft een aanvullend onderzoek laten uitvoeren om de meest recente informatie over klimaatscenario's systematisch in kaart te brengen (Vellinga et al, 2008). In dit onderzoek heeft een twintigtal vooraanstaande nationale en internationale klimaatdeskundigen, onder wie enkele IPCC auteurs, een aanvulling gemaakt op de scenario's voor 2100 van IPCC 2007 en KNMI 2006.

In hun verkenningen van de scenario's voor zeespiegelstijging zijn deze deskundigen uitgegaan van een wereldgemiddelde temperatuurstijging van 2 tot 6 °C in 2100, dat overeenkomt met het IPCC-scenario met hoge economische groei en een ruim, wereldwijd gebruik van fossiele brandstoffen, met name steenkool. Dit scenario is aangeduid als A1FI. In het onderzoek is veel aandacht besteed aan plausibele bovengrenzen voor toekomstige zeespiegelstijging. De ontwikkelde scenario's moeten worden beschouwd als bovenwaarden, ofwel waarden die als referentie kunnen dienen voor een langere termijn robuustheidstoets van te nemen maatregelen en investeringen.

Door het internationale team van onderzoekers zijn ook schattingen gemaakt van de bovengrens voor zeespiegelstijging voor het jaar 2200. Deze schattingen zijn weliswaar omklemd met zeer grote onzekerheden, maar het lijken de beste schattingen die gemaakt kunnen worden op basis van *huidige* kennis en inzichten. Het internationale team van deskundigen geeft aan dat deze schattingen kunnen worden bijgesteld wanneer het inzicht in onder andere het smeltproces van de ijskappen van Groenland en Antarctica groeit en er additionele waarnemingen beschikbaar komen.

#### De IPCC-emissiescenario's

Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) heeft in 2000 scenario's opgesteld voor mogelijke sociaal-economische ontwikkelingen in de wereld en de daaraan gerelateerde emissies van broeikasgassen. Deze scenario's zijn onder meer gebruikt voor het derde (2001) en het vierde (2007) IPCC Assessment Rapport, als de basis voor scenario's voor de veranderingen in het klimaat en de impacts daarvan. De scenario's hebben een tijdshorizon tot 2100. De wereld zal dan op een manier veranderd zijn die men zich nu nog moeilijk kan voorstellen, net zoals het voor iemand aan het begin van de 20<sup>ste</sup> eeuw moeilijk zou zijn geweest om zich de wereld van vandaag voor te stellen. Desalniettemin kunnen niet alleen zulke toekomstbeelden worden ontwikkeld, maar móet dit ook worden gedaan om betekenisvolle uitspraken te kunnen doen over mogelijke veranderingen in het klimaat over een eeuw of meer.

De IPCC heeft gekozen voor een viertal 'scenariofamilies', waarbij voor iedere familie andere veronderstellingen zijn gekozen voor wat betreft veranderingen in

de demografische, economische en technologische ontwikkelingen, die leiden tot toenemende divergentie over de tijd. In verband met de lange tijdschaal gaat het hierbij expliciet niet om extrapolaties van huidige trends, maar over mogelijke, plausibele toekomstbeelden. Omdat de toekomst in principe onkenbaar is, doet IPCC expliciet geen uitspraak over de mate van waarschijnlijkheid van de scenario's. Geen van de scenario's veronderstelt enige vorm van klimaatbeleid dat verder gaat dan wat in 2000 was vastgesteld. De scenario's beogen niet een volledig beeld te geven van alle mogelijke toekomstbeelden. Extreme scenario's met grote discontinuïteiten in sociaal-economische ontwikkelingen - zoals in oorlogs-, rampen- of utopische scenario's - zijn bijvoorbeeld niet meegenomen. Wel omvatten de ontwikkelde scenario's een belangrijk deel van wat de auteurs als plausibel beschouwden.

Het gaat om scenario's met vele dimensies, zodat ervoor is gekozen om ze geen (ééndimensionale) namen te geven, maar letter-cijfercombinaties (A1, B1, A2 en B2) rond twee assen: enerzijds de nadruk op een materialistische economische groei dan wel op duurzaamheid, anderzijds de nadruk op internationale convergentie ('mondialisering') dan wel fragmentatie ('regionalisering'). De A-scenario's benadrukken economische groei als belangrijkste drijvende kracht, maar verschillen wat betreft de mate van sociale en economische convergentie, met name tussen de arme en rijke landen. De B-scenario's benadrukken duurzame ontwikkeling als belangrijkste drijvende kracht, en verschillen eveneens wat betreft de mate van sociale en economische convergentie.

De A1-scenariofamilie beschrijft een wereld met snelle economische groei, een mondiale bevolkingsomvang die in het midden van deze eeuw een maximum bereikt en daarna afneemt, en de snelle introductie van nieuwe en efficiëntere technologie. De belangrijkste thema's in dit wereldbeeld zijn convergentie en toenemende sociale en culturele interacties tussen regio's, met als gevolg een substantiële afname in inkomensverschillen tussen de regio's. IPCC heeft voor dit door veel dynamiek gekenmerkte wereldbeeld gekozen voor verschillende mogelijke richtingen van de technologische ontwikkeling, met name in de energiesector. Deze technologische ontwikkeling zou zich kunnen onderscheiden door een voortdurende aandacht voor het toegankelijk maken en benutten van fossiele energiebronnen (A1FI - Fossil Intensive, zie kader), maar ook door een snelle groei van niet-fossiele bronnen (A1T). Ook zou de energievoorziening zich niet speciaal op één vorm van energieopwekking kunnen richten, onder de veronderstelling dat dezelfde verbeteringssnelheid voor alle energie opwekkings- en energieverbruikstechnologieën gelden (A1B).

De A2-scenariofamilie beschrijft een veel heterogenere wereld. Hier ligt het accent op zelfvoorziening in regio's en bescherming van de lokale identiteit. In dit scenario groeien de vruchtbaarheidscijfers tussen de regio's veel langzamer naar elkaar toe, met een gestaag doorgroeiende wereldbevolking als resultaat. Economische ontwikkeling is primair gericht op de regio en inkomensgroei en technologische ontwikkelingen vertonen een veel gefragmenteerder beeld en zijn trager dan in de andere scenario's.

De B1-scenariofamilie beschrijft een convergerende wereld, met een bevolking die net als in A1 toeneemt tot halverwege de eeuw en dan afneemt. In deze scenario's beweegt de wereld zich echter minder in een materiaalintensieve richting en ligt het accent op een diensten- en informatiegerichte economie met sterke reducties in materiaalintensiteit en de invoering van schone en efficiënte technologieën. In B1 spelen internationale oplossingen voor economische, sociale en milieuproblemen een hoofdrol bij het streven naar duurzame ontwikkeling, inclusief verminderen van de inkomenskloof tussen arm en rijk, maar exclusief een oplossing voor het klimaatprobleem.

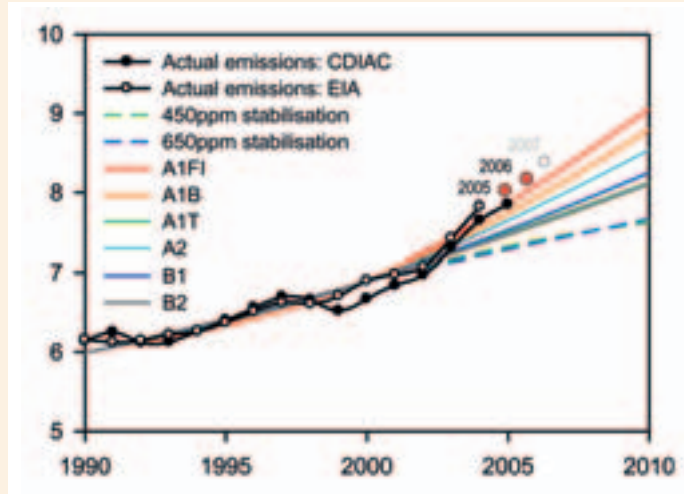
**A1FI: gematigde bevolkingsgroei, snelle technologische ontwikkeling, toch hoge emissies**

Het A1FI emissiescenario en de daarbij behorende stijging van de wereldgemiddelde temperatuur van maximaal 6 °C in 2100 is door de Deltacommissie gebruikt als een van de uitgangspunten voor aanvullende scenario's voor bovengrenzen van de zeespiegelstijging. Net zoals de andere A1 scenario's, wordt dit scenario gekenmerkt door snelle economische groei, een voorkeur voor het oplossen voor problemen via de markt, hoge investeringen in onderwijs en technologieontwikkeling (inclusief energie-efficiëntie), en internationale mobiliteit van ideeën, mensen en

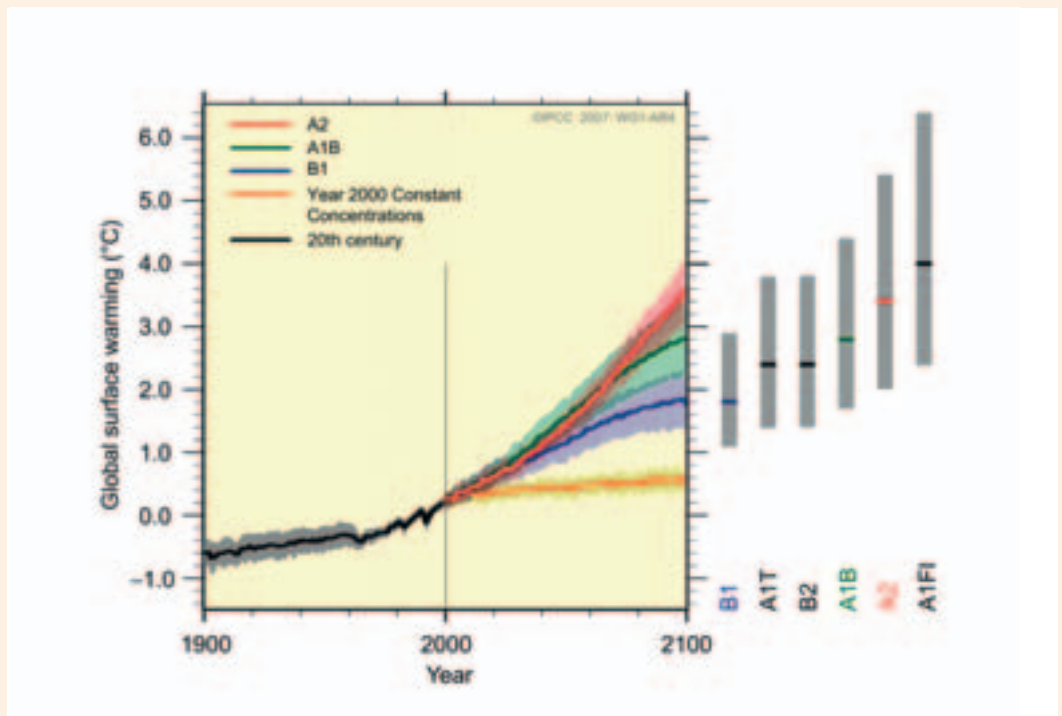
technologie. De belangrijkste reden dat dit scenario toch tot heel hoge emissies leidt, is dat de investeringen in nieuwe technologie zich concentreren op fossiele energie als de drijvende kracht van de wereldeconomie, inclusief het gebruik van de overvloedig aanwezige kolenvoorraden en onconventionele olievoorraden in teerzanden en olieschales, met hoge CO<sub>2</sub>-emissies per

eenheid energieverbruik. Het effect hiervan op emissies is groter dan het positieve effect van verbeteringen van de energie-efficiëntie. Dat het A1FI-scenario niet onrealistisch is, mag blijken uit het feit dat de werkelijke emissies sinds 2000 in lijn zijn of zelfs uitstijgen boven dit hoogste van de IPCC-emissiescenario's (zie figuur 1)

Figuur 1: Gerealiseerde mondiale emissies van fossiele brandstoffen in vergelijking met de IPCC SRES scenario's. Het A1FI-scenario gaat uit van een groeisnelheid van 2,71% per jaar. Gemiddeld over 2000-2006 bedroeg de groeisnelheid 3,3% (aangepast van Raupach et al. 2007, PNAS).



Figuur 2: Klimaatscenario's van het IPCC (2007)



Ook in B2 zijn sociale, economische en ecologische duurzaamheid belangrijke drijvende krachten van sociaal-economische ontwikkelingen, maar wordt vooral naar lokale en regionale oplossingen gezocht. De wereldbevolking blijft weliswaar toenemen, maar veel langzamer dan in A2. Economische groeisnelheden zijn hoger dan in A2, maar lager dan in A1 en B1. Dat laatste geldt ook voor technologische ontwikkeling: die is meer divers, en iets langzamer dan in A1 en B1.

### **De IPCC- klimaatscenario's**

IPCC heeft de bovengenoemde emissiescenario's, waarvan 4 in de A-familie (A1B, A1T, A1FI en A2) en twee in de B-familie (B1 en B2) aangeduid als illustratief. Deze zes emissiescenario's zijn vervolgens als input gebruikt voor berekeningen van veranderingen in het klimaatstelsel, waarvoor 23 mondiale klimaatmodellen zijn gebruikt, die een range van uitkomsten geven en een groot deel van de onzekerheden omspannen. IPCC heeft voor de belangrijkste variabelen zoals temperatuur, neerslag en zeespiegelstijging zowel in het Derde Assessmentrapport in 2001 als in het Vierde Assessment Rapport in 2007 tot 2100 resultaten gerapporteerd (zie figuur 2). De spreiding in de verwachte mondiale opwarming voor het einde van de 21<sup>ste</sup> eeuw bedraagt 1,1 tot 6.4 °C (figuur 2). Deze spreiding wordt enerzijds (vooral na 2050) bepaald door de verschillende emissiescenario's, maar daarnaast ook door de verschillen tussen de gebruikte klimaatmodellen, vooral in termen van klimaatgevoeligheid (berekende mate van opwarming als gevolg van een bepaalde toename in atmosferische concentratie van de broeikasgassen).

### **De KNMI 2006-scenario's in relatie tot IPCC-scenario's**

Het KNMI heeft in 2006 vier klimaatscenario's voor Nederland gepresenteerd. Ze zijn gebaseerd op de uitkomsten van berekeningen met klimaatmodellen die verspreid over de hele wereld zijn uitgevoerd ten behoeve van het vierde IPCC rapport. De berekende veranderingen in de wereldtemperatuur en de luchtstroming boven West-Europa zijn gebruikt als uitgangspunt. Vervolgens zijn deze projecties 'vertaald' naar meer gedetailleerde veranderingen in temperatuur, neerslag, verdamping, wind, en zeespiegel in Nederland.

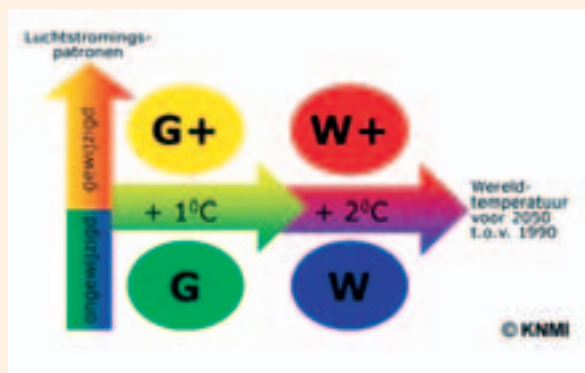
Voor de neerslag (en daarmee voor droogte en de afvoer van de grote rivieren) spelen de luchtstromingspatronen in onze regio een doorslaggevende rol. De huidige generatie klimaatmodellen laten ofwel nauwelijks verandering in de luchtstroming zien, ofwel een duidelijke verandering. Om met deze onzekerheid om te gaan, heeft het KNMI gekozen voor een scenario zonder en een scenario met verandering van de luchtstroming bij een wereldwijde opwarming van +1 °C en +2 °C in 2050 (+2 °C of +4 °C in 2100).

Het KNMI heeft de onzekerheid over ons toekomstige klimaat zo goed mogelijk in kaart gebracht door zich te baseren op de berekeningen met een groot aantal verschillende klimaatmodellen in plaats van één enkel model, zoals veelal gebruikelijk is in onze buurlanden. De vier scenario's (zie figuur 3) omspannen samen een brede range van mogelijke veranderingen. Met de huidige kennis is niet aan te geven welke van de vier scenario's het meest waarschijnlijk is. Het feit dat volgens het vierde IPCC-rapport lagere of hogere waarden voor de wereldwijde opwarming mogelijk zijn dan waar het KNMI van uitgaat (bijvoorbeeld +6.4°C in 2100 als bovengrens van de waarschijnlijke spreiding bij het A1FI-emissiescenario), speelt een ondergeschikte rol voor de klimaatverandering in Nederland tot 2100. Voor scenario's van zeespiegelstijging is het verschil wel van belang omdat die onder andere samenhangen met de mondiaal gemiddelde temperatuur. Tot 2050 (het zichtjaar waar de KNMI 2006-scenario's zich primair op richten) zijn de door IPCC gerapporteerde projecties voor de wereldgemiddelde temperatuur vrijwel

onafhankelijk van het gekozen emissiescenario. In de KNMI 2006-scenario's voor 2050 wordt bijna de volledige spreiding van de geprojecteerde wereldgemiddelde temperatuur, en de daarmee samenhangende scenario's voor zeespiegelstijging, gebruikt.

De vier scenario's laten zien dat de veranderingen in de extremen in Nederland waarschijnlijk anders zullen zijn dan de veranderingen van het gemiddelde klimaat. Zo neemt in de scenario's met verandering in de luchtstroming de temperatuur op hittegolfdagen veel sterker toe dan de temperatuur van een gemiddelde zomerdag. Ook komen zomerbuien gemiddeld minder vaak voor, maar als ze optreden zijn ze zwaarder. Dit heeft belangrijke implicaties voor klimaatadaptatievraagstukken. In overeenstemming met de werkwijze van het IPCC, worden nieuwe wetenschappelijke inzichten in een volgende generatie KNMI klimaatscenario's verwerkt. Die staat gepland voor omstreeks 2012.

Figuur 3: De KNMI 2006-klimaatscenario's



### Scenario's voor zeespiegelstijging

Op verzoek van de Deltacommissie is de mondiale zeespiegelstijging en de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust voor de jaren 2100 en 2200 onderzocht. De scenario's voor zeespiegelstijging die hier worden gepresenteerd, zijn gebaseerd op een ander uitgangspunt dan eerder gepubliceerde scenario's voor mondiale (IPCC 2007) en regionale (KNMI 2006) zeespiegelstijging. De analyse richt zich hier nadrukkelijk op de bovengrens van de mogelijkheden onder gedane aannames in plaats van op de bandbreedte van meest waarschijnlijke mogelijkheden. De gepresenteerde scenario's zijn daarmee een voor het werk van de Deltacommissie essentiële aanvulling op de bestaande scenario's (IPCC 2007; KNMI 2006).

Gezien de hiaten in onze kennis over huidige zeespiegelveranderingen en de onzekerheden in het modelleren ervan, moeten de gepresenteerde scenario's beschouwd worden als plausibele bovengrensscenario's van wat de groep van geconsulteerde zeespiegeldeskundigen op basis van de huidige wetenschappelijke kennis mogelijk acht. Zoals voor alle langetermijn(klimaat)scenario's het geval is, moet er rekening mee worden gehouden dat deze bovengrensscenario's kunnen veranderen naar aanleiding van voortschrijdend wetenschappelijk inzicht.

### a. Mondiaal 2100

Het bovengrensscenario voor mondiale zeespiegelstijging gaat uit van een mondiale temperatuurstijging van 2 tot maximaal 6 °C, overeenkomstig het IPCC Assessment Rapport 4 (AR4) emissiescenario A1FI (2007). Daarnaast is een inschatting gemaakt van de mogelijke effecten van snelle ijsdynamica op de bijdragen van de Groenlandse en Antarctische ijskap aan de mondiale zeespiegelstijging.

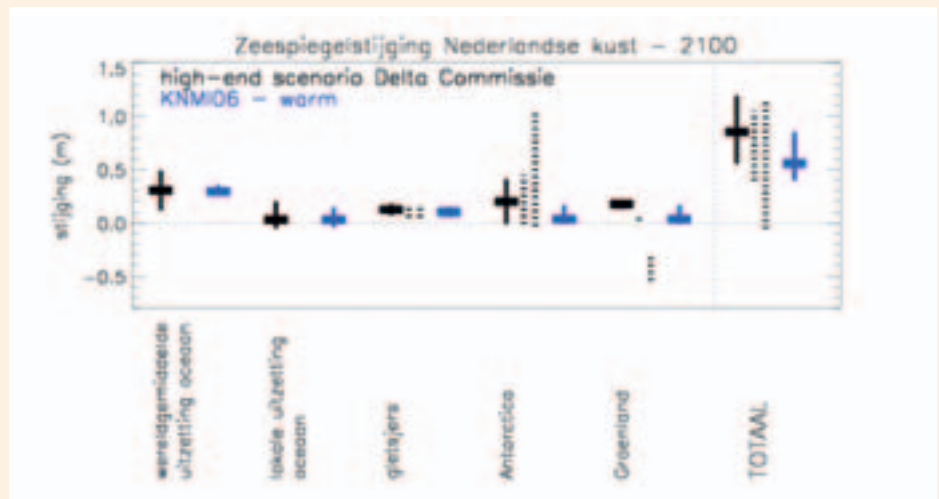
Tabel 1: Aannames in de belangrijkste bijdragen aan de scenario's voor de wereldwijde zeespiegelstijging voor het jaar 2100 zoals gepresenteerd door de Deltacommissie en IPCC AR4 (2007, A1FI-scenario).

	<b>IPCC AR4 – A1FI (inclusief extra uitstroom ijskappen<sup>1</sup>)</b>		<b>bovengrensscenario Deltacommissie</b>		<b>motivatie verschil in aanpak/uitkomst</b>
<b>totaal<sup>2</sup></b>	<b>+0.25 tot +0.76 m</b>		<b>+0.55 tot +1.10 m</b>		
uitzetting oceaan	+0.17 tot +0.41 m	Uitkomsten klimaatmodellen	+0.12 tot +0.49 m	Analyse eenvoudig verband tussen uitzetting en atmosfeertemperatuur gesimuleerd door klimaatmodellen (Katsman et al, 2008; Rahmstorf 2007)	Er is een grotere bandbreedte in temperatuurstijging beschouwd dan wordt bereikt door de klimaatmodellen <sup>3</sup>
gletsjers	+0.08 tot +0.17 m	Eenvoudig verband tussen ijsafname en atmosfeertemperatuur op basis van waarnemingen <sup>4</sup>	+0.07 tot +0.18 m	cf. IPCC 4AR	De minimale verschillen zijn het gevolg van kleine verschillen in aannames over het temperatuurverloop
Antarctica	-0.14 tot -0.03 m	(i) toename sneeuwval op basis van klimaatmodellen  (ii) schatting ijsuitstroom	-0.01 tot +0.41 m	(i) cf. IPCC 4AR  (ii) voortzetting dan wel versnelling van recent waargenomen ijsuitstroom in de Amundsen Zee, op Oost-Antarctica en op het Antarctisch schiereiland	-  (ii) In de genoemde gebieden is de ijskap kwetsbaar als gevolg van de geografische eigenschappen <sup>5</sup> . Recente observaties laten zien dat de ijskap daar nu in beweging is. Of deze beweging vermindert, voortzet of versnelt, is nu niet met zekerheid te voorspellen.
Groenland	+0.02 tot +0.12 m	(i) volumeverandering op basis van ijskapmodellen  (ii) ijsuitstroom zoals waargenomen tussen 1993 en 2003  (iii) toename afsmelten in de zomer	+0.13 tot +0.22 m	(i) cf. IPCC AR4  (ii) versnelling van gletsjers aan de randen van de ijskap die uitstromen in zee  (iii) cf. IPCC AR4	-  Recente metingen tonen aan dat deze gletsjers zeer snel kunnen reageren op veranderende omstandigheden  -
extra uitstroom ijskappen	-0.0 tot +0.17 m	Extrapolatie van de ijsuitstroom op basis van het recent waargenomen verband tussen ijsuitstroom en temperatuurstijging	-	-	<sup>6</sup>

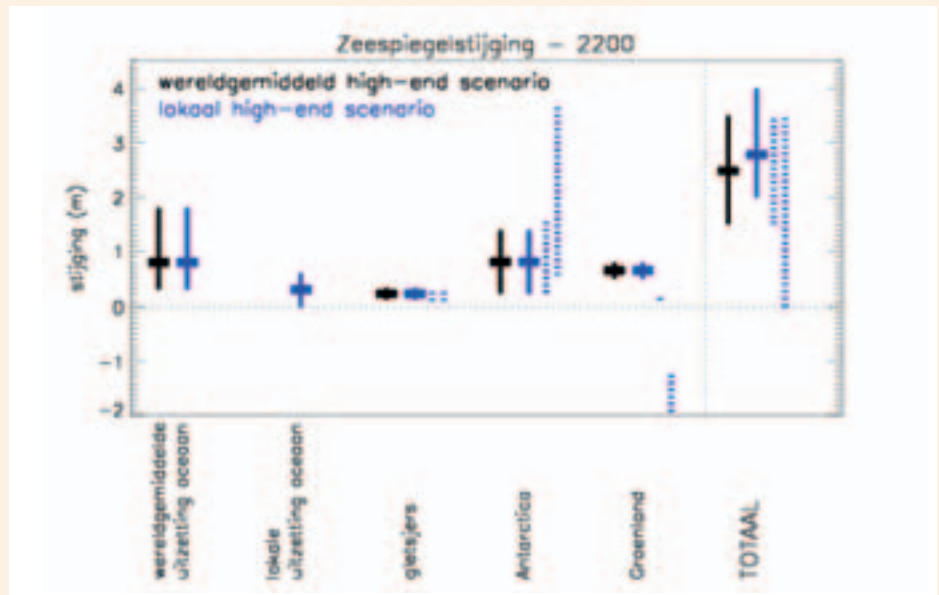
Figuur 4: Bijdragen van de belangrijkste componenten en totalen van de scenario's voor wereldgemiddelde zeespiegelstijging voor het jaar 2100, zoals gepresenteerd door de Deltacommissie (zwart) en IPCC AR4 (2007, A1FI-scenario inclusief extra uitstroom ijskappen, blauw).



Figuur 5: Bijdragen van de belangrijkste componenten en totalen van de scenario's voor lokale zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust voor het jaar 2100 zoals gepresenteerd door de Deltacommissie (zwart getrokken lijn: geen gravitatie-effecten meegenomen; stippellijnen inclusief mogelijke gravitatie effecten) en KNMI 2006 ('warm'-scenario, blauw, zonder gravitatie-effect). Alle scenario's zijn exclusief bodemdaling.



Figuur 6: Bijdragen van de belangrijkste componenten en totalen van de bovengrens-scenario's voor zeespiegelstijging voor het jaar 2200 zoals gepresenteerd door de Deltacommissie (zwart: wereldgemiddeld; blauw: langs de Nederlandse kust; getrokken lijn: geen gravitatie-effecten meegenomen; stippellijnen: inclusief mogelijke gravitatie-effecten). Alle scenario's zijn exclusief verticale landbeweging.



## b. Regionaal langs de Nederlandse kust - 2100

De lokale zeespiegelstijging kan sterk afwijken van de gemiddelde stijging. Er zijn twee lokale effecten beschouwd in het scenario voor de Nederlandse kust dat in het achtergrondrapport is uitgewerkt.<sup>79</sup> Ten eerste is rekening gehouden met mogelijke extra lokale uitzetting van de oceaan als gevolg van veranderingen in oceaanstromingen. Een tweede factor van belang is de verdeling van smeltwater afkomstig van landijs over de oceanen.<sup>80</sup> De kwantificering van dit tweede effect, aangeduid als het gravitatie-effect, is op dit moment onderwerp van wetenschappelijk debat. Het bepaalt in belangrijke mate de lokale bijdrage van de Groenlandse en de Antarctische ijskap en is daarom van groot belang voor het uiteindelijke scenario voor lokale zeespiegelstijging dat wordt verkregen. De discussie over de kwantificering van het gravitatie-effect is technisch van aard; het achterliggende fysische principe van de verdeling van het smeltwater is helder.

In het achtergrondrapport (Vellinga et. al, 2008) worden scenario's op basis van twee rekenmethodes voor het gravitatie-effect uitgewerkt. Deze resultaten zijn ook weergegeven in figuren 5 en 6. Het feit dat de bovengrenzen van de twee scenario's vrijwel samenvallen, is toeval. Een voorkeur voor één van de twee rekenmethodes kan op dit moment niet uitgesproken worden en vereist meer onderzoek. Daarom is er door de Deltacommissie voor gekozen om een bovengrensscenario te presenteren waarin het gravitatie-effect niet is meegenomen. KNMI 2006-scenario's voor zeespiegelstijging houden evenmin rekening met dit mogelijke effect.

Tabel 2: Aannames in de belangrijkste bijdragen aan de scenario's voor de lokale zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust voor het jaar 2100 zoals gepresenteerd door de Deltacommissie (gravitatie-effect niet meegenomen) en KNMI 2006 ('warm'-scenario). Beide scenario's zijn exclusief verticale beweging van het land (bodemdaling).

	KNMI 2006 ('warm'-scenario)		bovengrensscenario Deltacommissie (gravitatie-effect niet meegenomen)		motivatie
<b>totaal</b>	<b>+0,40 tot +0,85 m</b>		<b>+0,55 tot +1,20 m</b>		
uitzetting oceaan	+0,27 tot +0,35 m	Analyse eenvoudig verband tussen uitzetting en atmosfeertemperatuur berekend door klimaatmodellen	0,12-0,49 m	Extrapolatie van dit eenvoudige verband tussen uitzetting en atmosfeertemperatuur op basis van twee methodes (cf. KNMI'06 en Rahmstorf, 2007)	Er is een grotere bandbreedte in temperatuurstijging beschouwd dan in KNMI'06 <sup>7</sup>
lokale uitzetting oceaan	-0,04 tot +0,15 m	Analyse eenvoudig verband tussen lokale uitzetting en atmosfeertemperatuur berekend door klimaatmodellen	-0,05 tot +0,2 m	Extrapolatie van dit eenvoudige verband tussen uitzetting en atmosfeertemperatuur	Er is een grotere bandbreedte in temperatuurstijging beschouwd dan in KNMI'06
gletsjers	+0,06 tot +0,15 m	Eenvoudig verband tussen ijsafname en atmosfeertemperatuur op basis van waarnemingen <sup>8</sup>	+0,07 tot +0,18 m	cf. Tabel 1	Methodiek sluit aan bij IPCC AR4; grotere bandbreedte in temperatuurstijging beschouwd
Antarctica	-0,01 tot +0,17 m <sup>9</sup>	Schatting op basis van recent waargenomen ijsverlies en modelberekeningen van de gevoeligheid van de ijskap voor veranderingen in de atmosfeertemperatuur	-0,01 tot +0,41 m	cf. Tabel 1	Nieuwe inzichten op basis van recente observaties; rekening gehouden met mogelijke effecten van snelle ijsdynamica die niet direct gerelateerd zijn aan veranderingen in de atmosfeertemperatuur
Groenland	-0,01 tot +0,17 m	cf. Antarctica	+0,13 tot +0,22 m	cf. Tabel 1	Nieuwe inzichten op basis van recente observaties



### c. Mondiaal en regionaal langs de Nederlandse kust – 2200

De bovengrensscenario's voor 2200 gepresenteerd in dit rapport geven een indicatie van de *mogelijke* zeespiegelstijging, niet van de meest waarschijnlijke. De scenario's voor de 21<sup>e</sup> eeuw worden begrensd doordat het huidige tempo van zeespiegelstijging bekend is uit observaties en omdat een grote versnelling in dit tempo onwaarschijnlijk is op een tijdschaal van enkele tientallen jaren. Voor de 22<sup>e</sup> eeuw ontbreekt een dergelijke begrenzing.

	wereldgemiddeld bovengrens scenario		lokaal bovengrens scenario (gravitatie-effect niet meegenomen)	
totaal	+1,5 tot +3,5 m		+2,0 tot +4,0 m	
wereldgemiddelde uitzetting oceaan	+0,3 tot +1,8 m	Extrapolatie op basis van vereenvoudigd verband tussen uitzetting en atmosfeertemperatuur berekend door klimaatmodellen	cf. wereldgemiddeld	
lokale uitzetting oceaan	-	-	0,0 tot +0,6 m	mogelijke lokale effecten van veranderingen in oceaancirculatie
gletsjers	+0,1 tot +0,3 m	extrapolatie eenvoudig verband tussen ijsafname en atmosfeertemperatuur op basis van waarnemingen	cf. wereldgemiddeld	
Antarctica	+0,2 tot +1,4 m	voortzetting van veranderingen in het tempo van afsmelten aangenomen voor 2100 (Tabel 1)	cf. wereldgemiddeld	
Groenland	+0,5 tot +0,8 m	gebaseerd op zelfde aannames als voor 2100 (Tabel 1)	cf. wereldgemiddeld	

Tabel 3: Aannames voor de beschouwde bijdragen aan de bovengrensscenario's voor wereldgemiddelde zeespiegelstijging en lokale zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust (gravitatie-effect niet meegenomen) voor het jaar 2200 zoals gepresenteerd door de Deltacommissie.

### d. Schattingen bovengrensscenario voor mondiale zeespiegelstijging vanuit paleoklimatologisch perspectief

Paleoklimatologische studies bieden inzicht in de veranderingen die in het verleden in ons klimaatstelsel hebben plaatsgevonden. Veranderingen in de wereldwijde zeespiegel worden onder meer gereconstrueerd uit isotopenconcentraties (die indicatief zijn voor de balans tussen water opgeslagen op het land en in de oceanen) en uit groeiringen van koralen. Reconstructies van de zeespiegel in periodes die sterke overeenkomsten vertonen met de huidige of verwachte toestand van het klimaat zijn een nuttige aanvulling op de hierboven besproken klimaatscenario's voor zeespiegelstijging.

Tijdens het laatste interglaciaal (het Eemian, 125.000 jaar geleden) was de wereldgemiddelde temperatuur iets warmer dan tegenwoordig en bestonden er alleen grote ijskappen op Antarctica en Groenland. Tijdens het Eemian steeg de zeespiegel wereldwijd in een tempo van ruwweg 1 tot 2 meter per eeuw. De reconstructies zijn niet gedetailleerd genoeg om met zekerheid te kunnen zeggen hoe lang een dergelijk tempo van zeespiegelstijging kan aanhouden, noch hoe snel het klimaatstelsel kan overgaan van een situatie met nauwelijks zeespiegelstijging (vergelijkbaar met het huidige klimaat) naar een dergelijk snel tempo. Op basis van reconstructies van het verleden zou een dergelijke overgang op z'n snelst in enkele tientallen jaren kunnen plaatsvinden.

Op basis van deze paleoklimatologische gegevens kan een alternatief bovengrensscenario voor wereldwijde zeespiegelstijging worden geformuleerd. Indien wordt aangenomen dat de zeespiegelstijging vanaf nu in een tijdsbestek van enkele tientallen jaren (wanneer

naar verwachting de wereldgemiddelde temperaturen net zo hoog zijn als destijds in het Eemian) zal gaan stijgen tot een tempo van tegen de 2 meter per eeuw, resulteert dit in bijna anderhalve meter wereldwijde zeespiegelstijging in het jaar 2100 en ruim drie meter wereldwijde zeespiegelstijging in het jaar 2200. De bovengrensscenario's voor de wereldgemiddelde zeespiegelstijging op basis van paleoklimatologische reconstructies van het verleden zijn dus hoger dan de hierboven besproken bovengrensscenario's voor zeespiegelstijging (zie tabel 4)

Methode /aannames	Geschatte zeespiegelstijging in 2050 (m)	Geschatte zeespiegelstijging in 2100 (m)	Geschatte zeespiegelstijging in 2200 (m)
~ 1,7 meter zeespiegelstijging per 100 jaar op basis van de paleo data van Rode Zee gebied	~ 0,5	~ 1,4	~ 3,1
~ 2,4 meter zeespiegelstijging per 100 jaar op basis van de laatste interglaciaal	~ 0,7	~ 1,9	~ 4,3

Tabel 4: Schattingen voor bovengrensscenario's voor de wereldgemiddelde zeespiegelstijging op basis van paleoklimatologische reconstructies (Vellinga et al, 2008)

### Scenario's voor stormcondities op de Noordzee

Het onderzoek naar mogelijke veranderingen in windsterkte en -richting, golven en wateropzet in de zuidelijke Noordzee en langs de Nederlandse kust is op de volgende bronnen gebaseerd:

- het vierde Assessment Report (AR4) van het IPCC;
- de KNMI 2006-scenario's;
- recent gepubliceerd onderzoek waarbij gebruik werd gemaakt van regionale klimaatmodellen, en
- recente resultaten van het ESSENCE project, waarbij de toekomstige ontwikkeling van het klimaat voor het A1b scenario 17 keer is doorgerekend, gekoppeld met een wateropzet model voor de Noordzee (WAQUA/DCSM98).

Deze bronnen zijn niet onafhankelijk van elkaar en vullen elkaar aan. De KNMI 2006-scenario's zijn op dezelfde modellen gebaseerd als het IPCC AR4, en de regionale klimaatmodellen gebruiken resultaten van dezelfde IPCC AR4 modellen als randvoorwaarde. Tenslotte is het klimaatmodel dat in ESSENCE gebruik is, ECHAM5/MPI-OM, een van de IPCC AR4 modellen. De regionale modellen verschaffen meer regionale details dan de globale modellen, en de ESSENCE en ESSENCE-WAQUA/DCSM98 integraties zorgen voor een redelijke tot solide statistische basis om de 10.000-jaar terugkeerwaardes te kunnen bepalen, die de *Deltawet* voorschrijft. De berekeningen met ESSENCE-WAQUA/DCSM98 werden specifiek voor de Deltacommissie uitgevoerd. De resultaten van het recente onderzoek (regionale modellering en ESSENCE) bevestigen en preciseren de uitspraken uit de KNMI 2006-scenario's.

De resultaten betreffende windcondities en golven kunnen als volgt worden samengevat:

- de geprojecteerde toekomstige veranderingen zijn klein ten opzichte van de natuurlijke variabiliteit, en ten opzichte van de onzekerheid inherent aan de statistische bewerking van relatief korte reeksen van waarnemingen ;
- de patronen van verandering over de Noordzee verschillen per model;
- er is geen duidelijke afhankelijkheid van de gebruikte scenario's van de toekomstige uitstoot van broeikasgassen;
- er is een tendens naar vaker optredende (zuid-)westen winden, maar geen aanwijzingen voor meer of sterkere noordelijke winden. Winden vanuit het noorden veroorzaken de hoogste wateropzetten aan de Nederlandse kust.

De waarneemreeks is te kort om de benodigde 10.000-jaar terugkeerwaarden voor de wateropzet nauwkeurig te schatten. Dat geldt ook voor tijdreeksen uit klimaatmodellen die gebaseerd zijn op 1 modelintegratie van de 20<sup>ste</sup> en 21<sup>ste</sup> eeuw. Op dit moment bevat alleen het 17 leden tellende ESSENCE-WAQUA/DCSM98 ensemble genoeg data om de 10.000-jaar terugkeerwaarde van de wateropzet met een statistische nauwkeurigheid van  $\pm 0,5$  m te bepalen. De resultaten van dit onderzoek geven aan dat de hoogte van de extreme wateropzetten in de toekomst niet hoger is dan nu. Omdat de andere IPCC AR4 modellen ook geen toename van noordelijke winden laten zien is dit resultaat waarschijnlijk onafhankelijk van het in ESSENCE gebruikte klimaatmodel.

### **Scenario's voor afvoer van de Rijn**

#### *Veranderingen in de gemiddelde afvoer van de Rijn*

De veranderingen in de gemiddelde afvoer (zie tabel 5) zijn gebaseerd op de KNMI 2006-klimaatscenario's in combinatie met hydrologische modellen voor de Rijn. In de winter is er onder alle klimaatscenario's een toename in de gemiddelde afvoer, maar in de zomer is er vrijwel geen verandering tot een forse afname van de gemiddelde afvoer mogelijk. In 2100 zijn de veranderingen ruwweg dubbel zo groot als in 2050. Vergeleken met eerdere klimaatscenario's (bijv. WB21) is de mogelijk forse afname van de gemiddelde afvoer in de zomer (in de KNMI 2006-klimaatscenario's waarin de luchtstromingspatronen veranderen) het meest opvallend.

#### *Veranderingen in de maatgevende afvoer van de Rijn*

Bij de veranderingen in de maatgevende afvoer zijn naast de KNMI 2006-klimaatscenario's ook individuele klimaatmodellen als scenario gebruikt. Dit vanwege de grote gevoeligheid van de piekafvoer van de Rijn voor veranderingen in de variabiliteit van meerdaagse neerslag en het feit dat een mogelijke, maar zeer onzekere, verandering in deze variabiliteit niet is meegenomen in de KNMI 2006-klimaatscenario's. Door de statistische extrapolatie naar een herhalingstijd van 1250 jaar heeft de huidige maatgevende afvoer, die is vastgesteld op 16.000 m<sup>3</sup>/s, een 95% betrouwbaarheidsinterval van 13.000 tot 18.500 m<sup>3</sup>/s.

De geprojecteerde veranderingen in de maatgevende afvoer voor 2050 en 2100 (tabel 6) hebben een bovengrens (resp. 19.000 en 22.000 m<sup>3</sup>/s) die uitstijgt boven de bovengrens van het betrouwbaarheidsinterval voor de huidige situatie. Belangrijk is dat bij de resultaten in tabel 6 geen rekening is gehouden met het dempende effect van overstromingen in Duitsland op de piekafvoer bij Lobith waardoor deze resultaten vooral een theoretisch karakter hebben.

Onder de huidige dijksituatie zullen zeer grote piekafvoeren tot overstromingen in Duitsland leiden waardoor de afvoerpiek bij Lobith sterk wordt gereduceerd. Het is op dit moment niet duidelijk wat de dijksituatie in Duitsland in 2050 en 2100 zal zijn. Wel kan het effect van overstromingen in Duitsland op de piekafvoer bij Lobith bepaald worden op basis van de dijksituatie in Duitsland in 2020 (die wel vrij nauwkeurig bekend is). De resultaten van combinatie van de dijksituatie in Duitsland in 2020 met de klimaatprojecties voor 2050 en 2100 op de piekafvoer bij Lobith zijn gegeven in tabel 7. De reductie van de piekafvoeren is aanzienlijk. Uiteindelijk zullen de piekafvoeren bij Lobith afhangen van de werkelijke dijksituaties in 2050 en 2100 in Duitsland. Nu kan echter al wel gesteld worden dat om afvoerpieken van rond de 22.000 m<sup>3</sup>/s Lobith te laten passeren aanzienlijke aanpassingen in Duitsland nodig zijn.

Grensoverschrijdende overstromingen behoren ook tot de mogelijkheden. Bij de Duitse dijksituatie in 2020 bedraagt de afvoercapaciteit in het noorden van de Duitse Niederrhein ongeveer 17.500 m<sup>3</sup>/s. Wanneer als gevolg van klimaatverandering en hogere dijken

bovenstrooms in Duitsland afvoerpieken groter dan 17.500 m<sup>3</sup>/s het noorden van de Duitse Niederrhein kunnen bereiken, zal dit tot ongecontroleerde overstromingen in dit gebied leiden en, als gevolg van grensoverschrijdende overstromingen via oude rivierbeddingen, ook tot ongecontroleerde overstromingen in delen van het oosten van Nederland.

Tabel 5. Gemiddelde Rijnaivoer (m<sup>3</sup>/s) aan het eind van de 20e eeuw, en projecties voor 2050 en 2100 (zinvolle resultaten voor 2200 zijn niet beschikbaar). Zomer heeft betrekking op de maanden augustus t/m oktober en winter op januari t/m maart.

	1968-1998	2050	2100	2200
Gem. zomeraivoer (m <sup>3</sup> /s)	1700	1100 – 1700	700 – 1700	n.b.
Verandering in gem. zomeraivoer (%)		-35 – 0	-60 – 0	n.b.
Gem. winteraivoer (m <sup>3</sup> /s)	2750	2950 – 3200	3100 – 3600	n.b.
Verandering in gem. winteraivoer (%)		+5 – +15	+15 – +30	n.b.

Tabel 6. Piekafvoer bij Lobith (m<sup>3</sup>/s) in 2050 en 2100. De referentie afvoer correspondeert met de maatgevende afvoer voor de Rijn. De onzekerheden in de hydrologische modellen en hydraulische effecten (o.a. overstromingen in Duitsland) zijn niet meegenomen.

	Referentie afvoer	2050	2100	2200
Piekafvoer (m <sup>3</sup> /s)	16.000	16.500 – 19.000	17.000 – 22.000	n.b.
Verandering piekafvoer %		3 – 19	6 – 38	n.b.

Tabel 7. Piekafvoer bij Lobith (m<sup>3</sup>/s) in 2050 en 2100 uit tabel 6 aangepast voor de effecten van overstromingen in Duitsland onder aanname van de dijkcondities in Duitsland in 2020.

	Referentie afvoer	2050	2100	2200
Piekafvoer (m <sup>3</sup> /s)	16.000	15.500 – 17.000	16.000 – 17.500	n.b.

#### Tabellennoten

- In IPCC AR4 wordt deze extra ijsuitstroom aangeduid als 'scaled-up ice discharge'
- De totalen zijn afgerond op 5 cm, en worden als volgt berekend. Eerst wordt voor elke component de centrale schatting  $x$  bepaald (meestal het gemiddelde van de gegeven bandbreedte). De centrale schatting voor het totaal  $X$  is de som van de centrale waarden van de componenten ( $X = \sum x$ ). De totale bandbreedte  $dX$  volgt uit de kwadratische sommatie van de gegeven bandbreedtes voor de componenten:  $dX^2 = \sum (x-X)^2$ . De gegeven bandbreedte voor het totaal is  $(X-dX, X+dX)$ . Deze procedure is de juiste wanneer wordt aangenomen dat de onzekerheden in de individuele componenten onafhankelijk van elkaar zijn, en wordt gevolgd in zowel IPCC AR4 als in dit rapport.
- Het bovengrensscenario van de Deltacommissie beschouwt wereldgemiddelde temperatuurstijgingen van 2 - 6 °C. Klimaatmodellen laten voor het A1FI-emissiescenario wereldgemiddelde temperatuurstijgingen van maximaal 5,2 °C zien, maar houden geen rekening met mogelijke terugkoppelingen tussen het klimaat en de koolstofcyclus.
- De analyse houdt rekening met de afname van de gevoeligheid van de gletsjers voor temperatuurveranderingen (de meest kwetsbare delen verdwijnen het snelst) en de afname van het totale ijsvolume (hooggelegen delen van de gletsjer die overblijven, verdwijnen langzamer dan laaggelegen delen).
- Het gesteente waarop de genoemde gletsjers rusten, ligt onder zeeniveau en helt naar beneden naar de rand van de ijskap. Dergelijke mariene gletsjers kunnen in theorie helemaal verdwijnen, zij het over een periode van een eeuw of meer.
- De bijdrage van snelle ijsdynamica is verwerkt in de individuele bijdragen van Antarctica en Groenland. In het scenario voor de Deltacommissie is met name de bijdrage van snelle ijsdynamica ten gevolge van veranderingen in de Antarctische ijskap hoger ingeschat dan in IPCC AR4.
- Het bovengrensscenario van de Deltacommissie beschouwt wereldgemiddelde temperatuurstijgingen van 2 - 6 °C. Het KNMI 2006 'warme scenario' gaat uit van een wereldgemiddelde temperatuurstijging van 4 °C. Klimaatmodellen laten wereldgemiddelde temperatuurstijgingen van maximaal 5,2 °C zien, maar houden geen rekening met mogelijke terugkoppelingen tussen het klimaat en de koolstofcyclus.
- In KNMI 2006 is een iets eenvoudiger verband gebruikt dan in IPCC AR4
- In KNMI 2006 zijn de bijdragen van de Groenlandse en Antarctische ijskap gezamenlijk beschouwd. In deze tabel is deze gezamenlijke bijdrage evenredig verdeeld.