

Hoeveel warmer mag het worden?

Verantwoording

Deze evaluatie is opgesteld door BertJan Heij,
met bijdragen van Bart Strengers, Bas Eickhout, Jelle van Minnen en Marcel Berk.

Met dank aan Bert Metz, Joop Oude Lohuis, Jan Verhagen (WUR), Gerbrand Komen (KNMI) en Rob van Dorland (KNMI) voor inhoudelijk commentaar.

Eindredactie: Baud Schoenmaeckers (Synergos Communicatie).

Opmaak: Uitgeverij RIVM

Omslag: Smeltwaterstroom, Groenlandse ijskap. Met dank aan NASA

Inhoudsopgave

Synthese 5

I Inleiding 9

II Effecten van klimaatverandering 13

- 1 Inleiding 13
- 2 Effecten van geleidelijke klimaatverandering 13
 - 2.1 Mondiale en Europese effecten 13
 - 2.2 Veranderingen in extreme temperaturen als gevolg van geleidelijke klimaatverandering 19
 - 2.3 Zeespiegelstijging 20
- 3 Veranderingen in het klimaatsysteem, in gang gezet door geleidelijke klimaatverandering 23
 - 3.1 Versterkte doorwerking op het Noordpoolgebied 23
 - 3.2 Afsmeltengrote ijskappen 25
 - 3.3 Thermohaline circulatie 27
- 4 Effecten voor Nederland 30

Literatuurlijst 32

Synthese

De keuze van een temperatuurdoelstelling in het kader van Artikel 2 van het VN-Klimaatverdrag vereist, naast wetenschappelijke informatie over de gevolgen en risico's van verschillende opties, ook een afweging van belangen, zoals in hoofdstuk I wordt uiteengezet. Deze evaluatie beperkt zich tot de wetenschappelijke informatie over de effecten van klimaatverandering die bij dit soort afwegingen van belang is. Verder is alleen ingegaan op de effecten van klimaatverandering op zich, en niet op kostenaspecten, noch wat betreft schade, noch wat betreft maatregelen voor aanpassing of mitigatie.

Een synthese van de resultaten van de in deze evaluatie besproken studies leidt tot de volgende conclusies (zie ook de figuur).

Wat betreft *ecosystemen* nemen de effecten toe bij een toenemende opwarming en lijken er geen drempel effecten op te treden. Als de geleidelijke temperatuurstijging beperkt blijft tot 1° Celsius sinds het einde van de preïndustriële periode, dan zullen de effecten op ecosystemen beperkt blijven, maar zijn ernstige effecten voor zeer kwetsbare ecosystemen (zoals koraalriffen) niet uit te sluiten. Een toename van de wereldgemiddelde temperatuur van ongeveer 1° Celsius leidt waarschijnlijk tot verbleking van koraalriffen op grote schaal. Indien men zou vinden dat geen waardevolle ecosystemen van substantiële omvang verloren mogen gaan, komen we uit op een range van 1-2° Celsius geleidelijke opwarming. Bij een verdere opwarming dan 2° Celsius nemen de risico's verder toe. Hierbij zullen in een groot aantal gevallen soorten met uitsterven worden bedreigd, zal de biodiversiteit in beschermde gebieden afnemen of zullen gehele ecosystemen desintegreren.

Voor wat betreft *voedselproductie* wordt tot 3 - 4° Celsius temperatuurstijging op mondiale schaal geen verlies van voedselproductie verwacht, maar bestaat al vanaf 1° Celsius geleidelijke opwarming regionaal een significant risico van verlies van productiviteit. Dit kan leiden tot een toename van het aantal mensen dat getroffen wordt door voedseltekorten. De effecten van klimaatverandering op de voedselproductie zullen sterk afhangen van het vermogen tot aanpassing door middel van gewaskeuze, (bio)technologie, het eventueel verplaatsen van de landbouw-infrastructuur, en dergelijke. Onzeker is in hoeverre daar mogelijkheden toe zijn. Indien de politieke wens is dat er geen significante regionale risico's op (extra) voedseltekorten mogen optreden, komen we uit op een opwarming die beneden de 2° Celsius zou moeten blijven.

Door de trage reactie van de oceanen op de stijging van de temperatuur aan het oppervlak als gevolg van de toename van de concentratie van broeikasgassen is een deel van de *zeespiegelstijging* deze eeuw en ook daarna al niet meer te vermijden. De relatie tussen de temperatuurstijging en de grootte van de toekomstige zeespiegelstijging is door wetenschappelijke onzekerheden nog lastig kwantificeerbaar. Deze onze-

kerheid wordt vergroot door de mogelijke grotere bijdragen door afsmelting van de grote ijskappen reeds in deze eeuw.

Als ervoor gekozen wordt om de risico's van zeespiegelstijging op zeer lange termijn (na 2100) te beperken (door te voorkomen dat de Groenlandse ijskap onomkeerbaar afsmelt), is het wenselijk om de mondiaal gemiddelde temperatuurstijging beperkt te houden tot 1-2° Celsius. De bijdrage van de Groenlandse en West-Antarctische ijskappen aan de zeespiegelstijging in deze eeuw en op de zeer lange termijn (na 2100) is overigens onzeker, omdat nog veel onbekend is over de afsmeltingsprocessen.

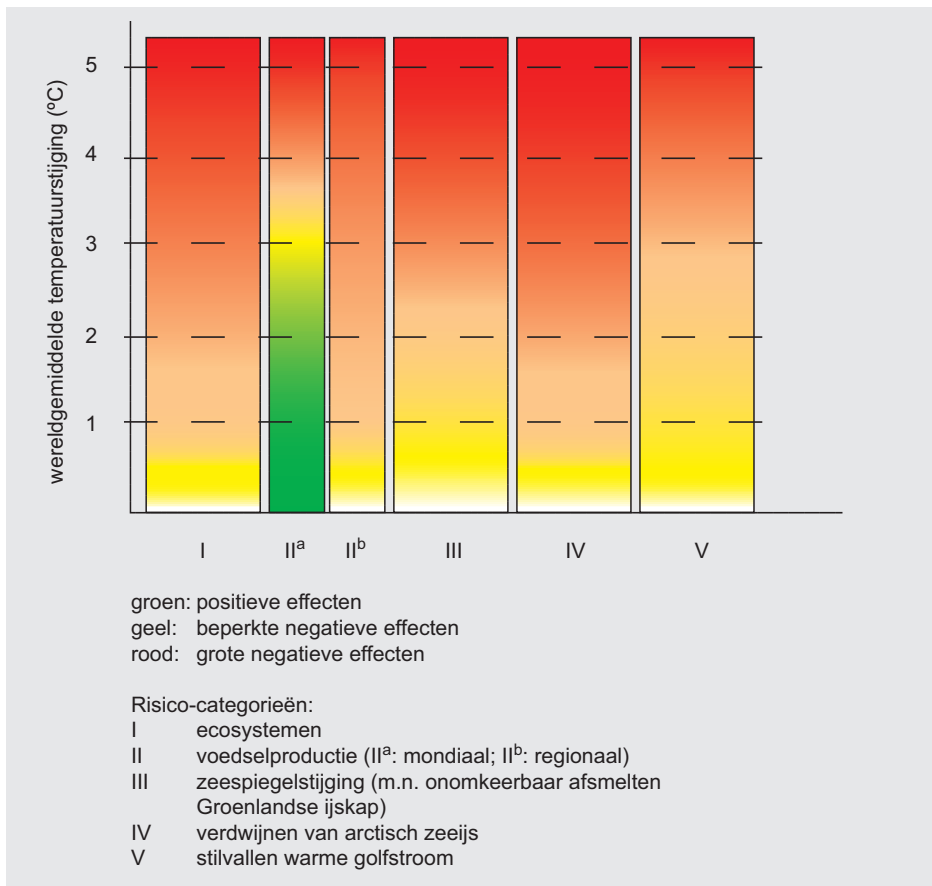
Indien ervoor gekozen wordt om de invloed van de wereldgemiddelde opwarming op het Noordpoolgebied beperkt te houden, zodanig dat het verdwijnen van het arctisch zee-ijs in de zomer voorkomen wordt, zou een wereldgemiddelde opwarming van maximaal 2° Celsius aangehouden moeten worden. Deze opwarming vertaalt zich in het Noordpoolgebied in een stijging van 4 tot 8° Celsius.

Wat betreft de *warme golfstroom* (de *thermohaline circulatie*) is het momenteel nog moeilijk om aan te geven boven welke ranges van wereldgemiddelde temperatuurstijging de risico's op het stilvallen ervan groot zijn. Voorlopig lijkt daarvan alleen sprake bij een temperatuurstijging van meer dan 4-5° Celsius. Er wordt echter nu reeds een afzwakking van de golfstroom gemeten en er zijn verschillende scenario's die uitkomen op deze temperatuurstijging aan het einde van deze eeuw. Dit is dus een punt van bijzondere aandacht.

Vergeleken met het laatste rapport van het IPCC, uit 2001, is in een aantal effecten van klimaatverandering meer inzicht verkregen en worden sommige risico's momenteel ernstiger ingeschat:

- Uit de nieuwe literatuur blijkt dat een aantal kwetsbare ecosystemen, zoals koraalriffen en mariene ecosystemen, nu al worden beïnvloed door klimaatverandering.
- In het IPCC rapport werd reeds gewezen op het risico van het afsmelten van de Groenlandse ijskap bij een toekomstige lokale temperatuurstijging groter dan 2,7° Celsius en dat dit waarschijnlijk een onomkeerbaar proces is. Sindsdien zijn er aanwijzingen dat de West-Antarctische en Groenlandse ijskappen mogelijk sneller afsmelten dan eerder werd aangenomen en reeds deze eeuw aanzienlijk kunnen bijdragen aan de mondiale zeespiegelstijging.
- De wereldgemiddelde opwarming blijkt versterkt door te werken op het Noordpoolgebied, met alle gevolgen van dien, onder andere voor de lokale bevolking en op mondiale schaal vanwege de grotere bijdrage aan de zeespiegelstijging.
- In het IPCC-rapport uit 2001 wordt gesignaleerd dat de mondiale opwarming mogelijk een rol zou kunnen spelen bij het afzwakken of zelfs stilvallen van de thermohaline circulatie. Over dit risico is wat meer zekerheid verkregen, wat blijkt uit het gegeven dat in de recente literatuur hierover inmiddels risico-uitspraken gedaan worden. Deze zijn echter nog teveel gekoppeld aan de gebruikte modelveronderstellingen om er definitievere conclusies aan te kunnen verbinden.

Bovenstaande resultaten zijn gebaseerd op een uitgebreide analyse van de literatuur, uitgekomen na het laatste IPCC rapport (2001). Het valt op dat in weinig van deze studies rekening gehouden wordt met de gevolgen van een opeenstapeling van stressfactoren. Dit betekent dat de risico's van klimaatverandering zowel kunnen worden onderschat als overschat. Ook is in veel studies niet of beperkt rekening gehouden met het vermogen tot aanpassing waarmee negatieve gevolgen van klimaatverandering kunnen worden afgezwakt. In 2007 verschijnt het Fourth Assessment Report van het IPCC. Daarin zal onder andere de stand van kennis op het gehele terrein van effecten van klimaatverandering worden weergegeven. In dat licht bezien moet de vóórliggende evaluatie beschouwd worden als een tussentijdse balans.



Risico's van klimaatverandering (synthese)

I. Inleiding

Artikel 2 van het Klimaatverdrag van de Verenigde Naties geeft aan dat gevaarlijke menselijke verstoring van het klimaatsysteem voorkomen moet worden door de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer te stabiliseren. Het stabilisatieniveau van broeikasgasconcentraties en het tijdverloop om daar te komen, moeten voldoen aan de volgende voorwaarden:

- ecosystemen moeten zich op natuurlijke wijze kunnen aanpassen;
- de voedselproductie mag niet in gevaar komen;
- de economie moet zich op een duurzame manier kunnen ontwikkelen.

Zowel de wetenschappelijke als de politieke concretisering van deze doelstellingen vormen nog onderwerp van debat. Concretisering van de doelstelling van het Klimaatverdrag vraagt om inzicht in de werking van het klimaatsysteem en de gevolgen van klimaatverandering, maar vereist ook afwegingen. Beslissingen over welke risico's acceptabel zijn hebben normatieve elementen in zich. Ze vragen dus om politieke afwegingen en keuzes. Aan dergelijke afwegingen zitten de volgende kanten:

- Of we te maken hebben met gevaarlijke menselijke verstoring wordt bepaald door aard en omvang van de gevolgen van klimaatverandering en wat in dat verband acceptabel wordt gevonden. Hierbij is ook de vraag naar het huidige aanpassingsvermogen van ecosystemen en maatschappelijke sectoren relevant en hoe en tegen welke kosten dit aanpassingsvermogen kan worden vergroot. Eveneens speelt de vraag in welke mate en tegen welke kosten klimaatverandering kan worden beperkt door emissiereducties.
- De gevolgen van klimaatverandering zijn merkbaar op alle schaalniveaus en dus ook op nationale en lokale schaal. Daarnaast vraagt het mondiale karakter van het probleem om besluitvorming op internationale schaal. Bij een afweging van belangen op nationale schaal op korte termijn, moeten risico's voor andere landen en regio's en toekomstige generaties worden meegewogen. Echter, het is niet aan de wetenschap om dergelijke waarde-afwegingen te maken. In deze evaluatie wordt daar dan ook niet verder op ingegaan. Zij beperkt zich tot het aandragen van wetenschappelijke informatie die belangrijk is bij het maken van die afwegingen - waarbij van belang is dat ook wetenschappelijke inzichten aan verandering onderhevig zijn.

In 1996 heeft de Nederlandse regering de volgende *normatieve uitgangspunten* voor haar klimaatbeleid geformuleerd, als uitwerking van Artikel 2 van het Klimaatverdrag (Vervolgnota Klimaatverandering, 1996):

- de wereldgemiddelde temperatuur mag maximaal met 2° Celsius stijgen boven preïndustrieel niveau;
- de snelheid van temperatuurstijging moet daarbij lager blijven dan 0.1° Celsius per decennium;
- de wereldgemiddelde zeespiegelstijging mag uiteindelijk niet meer bedragen dan 50 cm.

De EU heeft in 1996 ook gekozen voor de 2° doelstelling. Deze keuze is op de raadsvergadering van de EU milieuministers in december 2004 herbevestigd in het licht van de meest recente wetenschappelijke inzichten. Tegelijkertijd werd geconstateerd dat er wetenschappelijke onzekerheden bestaan met betrekking tot het terugvertalen van de temperatuurstijging van 2° Celsius naar broeikasgasconcentraties en mogelijkheden tot noodzakelijke emissiereductie (emissiepaden).

Op 8 november 2004 rezen tijdens het rondetafelgesprek met de vaste kamercommissie voor Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer over klimaatverandering en klimaatbeleid vragen over de 2° doelstelling; is deze te hoog gegrepen, vol doet zij, of is zij onvoldoende om de uitgangspunten van Artikel 2 van het Klimaatverdrag te kunnen realiseren? Vanuit het Milieu- en Natuurplanbureau (MNP) van het RIVM is het initiatief genomen om de stand van de wetenschap over de effecten van klimaatverandering in het licht van deze 2° doelstelling te evalueren. Het doel hiervan is de politiek te ondersteunen bij het bepalen van een doelstelling die past bij de uitgangspunten van Artikel 2. Er wordt in dit verband gekeken naar de effecten van klimaatverandering, via de indicator mondiaal gemiddelde temperatuurstijging ten opzichte van het preindustriële tijdperk.

De voorliggende evaluatie is niet alleen gericht op de effecten van geleidelijke opwarming door toename van de broeikasgasconcentraties in de atmosfeer. Zij richt zich tevens op een aantal risicofactoren in het klimaatsysteem die afwijkingen kunnen veroorzaken van het patroon van geleidelijke opwarming en op de mogelijke effecten daarvan. Van groot belang zijn risico's die samenhangen met de natuurlijke variabiliteit (waarop in deze evaluatie niet verder wordt ingegaan). Het laatste rapport van het IPCC (Third Assessment Rapport (TAR) dateert uit 2001. Sindsdien is veel onderzoek gedaan en is meer inzicht verkregen in een aantal effecten van klimaatverandering.

Deze evaluatie beoogt in kort bestek voor een aantal belangrijke onderwerpen de huidige stand van de wetenschap op dit moment weer te geven en is daarmee een update van de kennis zoals neergelegd in het laatste IPCC rapport. Zij kan dienen als context voor een evaluatie van de 2° doelstelling.

Er wordt niet in detail ingegaan op de terugvertaling van temperatuurstijgingen naar concentratiedoelstellingen en de relatie tussen emissies en concentraties. De recente stand van kennis hierover is samengevat in tekstbox 1.

Afbakening van deze evaluatie

Centraal in deze evaluatie staan effecten en mogelijke risico's van een range van temperatuurstijgingen op basis van het IPCC rapport uit 2001, en een assessment van de meest recente publicaties op dit gebied. De informatie wordt gepresenteerd in de vorm van wat men verwacht dat zou kunnen gebeuren bij een bepaalde wereldgemiddelde temperatuurstijging ten opzichte van het preindustriële niveau (1750), uitgaande van de huidige klimaatcondities en los van andere factoren zoals oorlogen of natuurrampen.

Tekstbox 1. Nieuwe inzichten in de klimaatgevoeligheid; implicaties voor de concentraties en emissies van broeikasgassen

De waarde van de klimaatgevoeligheid wordt uitgedrukt als de mondiaal gemiddelde toename van de (oppervlakte)temperatuur in graden Celsius die optreedt bij een verdubbeling van de CO₂ (equivalente) concentratie in de atmosfeer. Hierbij gaat het om een verdubbeling ten opzichte van het preïndustriële niveau, oftewel ca.550 ppmv. De waarde van de klimaatgevoeligheid is onzeker. De belangrijkste oorzaken voor die onzekerheid hebben te maken met het nog niet goed begrepen effect van de toename van broeikasgassen op wolkenvorming. Een toename van de concentratie van broeikasgassen leidt ook tot meer waterdamp in de atmosfeer dat zelf ook een broeikaseffect heeft. Dit effect is echter sterk afhankelijk van de hoogte van de waterdampname, en of deze toename in of juist buiten de wolken plaatsvindt. Verder kan het effect van wolken op het klimaat veranderen via wijzigingen in de geografische verdeling, is het effect afhankelijk van het type bewolking, van de hoeveelheid wolkenwater die ze bevatten, de gemiddelde druppel- en ijskristallengrootte, et cetera. Het is voorts statistisch nog niet goed mogelijk om op basis van historische temperatuurwaarnemingen de mogelijke waarde van de klimaatgevoeligheid af te bakenen (Stainforth et al, 2005).

Het IPCC hanteert een waarschijnlijkheidsrange voor de klimaatgevoeligheid van 1.5 tot 4.5, met 2,5 als centrale schatting. Op grond van deze centrale schatting zou een stabilisatie van de broeikasgasconcentraties op 550 ppmv leiden tot een uiteindelijke temperatuurstijging van bijna 2,5 graden Celsius. Om onder de 2° Celsius te blijven zouden de concentraties beneden 550 ppmv moeten worden gestabiliseerd. Inmiddels zijn er sinds het laatste IPCC rapport (2001) verschillende nieuwe studies verschenen die op basis van diverse methoden kansverdelingen hebben geconstrueerd voor de waarde van de klimaatgevoeligheid. Zo gaat het Hadley Centre (Murphy et al, 2004) uit van een 90% kans dat de waarde tussen de 2 en 4 ligt met als meest waarschijnlijke waarde 3. Er zijn ech-

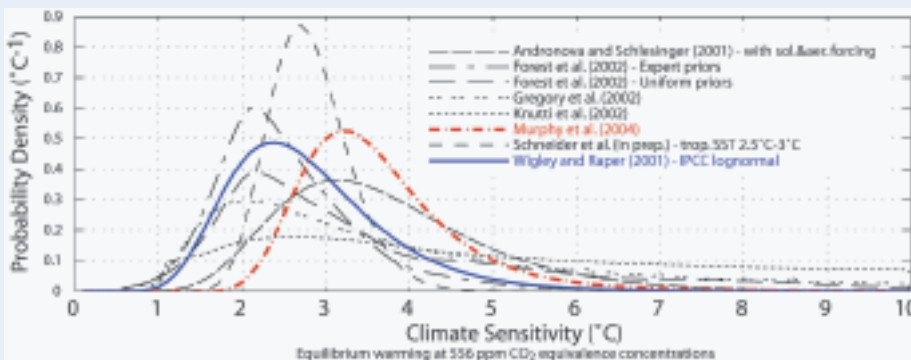
ter meerdere schattingen, zoals weergegeven in bijgaande figuur. De verdelingen laten zien dat de range van mogelijke waarden van de klimaatgevoeligheid groter is dan de IPCC-range en dat er vooral een grotere kans is op hogere waarden van de klimaatgevoeligheid: de kans dat de klimaatgevoeligheid een waarde heeft van maximaal 2.5 wordt daarmee kleiner.

De Wigley en Raper log-normale verdeling komt overeen met de IPCC range van 1.5 - 4.5 (90% zekerheidsinterval) met een meest waarschijnlijke waarde van 2.5.

Op basis van deze nieuwe schattingen is door Hare en Meinshausen (2004) en Den Elzen en Meinshausen (2005) verkend wat de implicaties zijn voor het beperken van de mondiale temperatuurstijging tot 2°, zoals door de EU wordt nagestreefd. Zij komen tot de volgende bevindingen:

- het is onwaarschijnlijk dat emissiepaden leidend tot een stabilisatie op 550 ppmv CO₂-equivalent voldoende zijn om de 2° doelstelling te halen;
- om deze doelstelling met een zekerheid van meer dan 50% te halen moeten de broeikasgasconcentraties gestabiliseerd worden op een niveau van 450 ppmv CO₂-equivalent of lager;
- dit vereist dat de mondiale emissies voor 2020 hun maximum niveau halen, gevolgd door reducties in 2050 in de orde van 30 tot 50%, vergeleken met het 1990 niveau.

Indien niet wordt uitgegaan van een blijvende stabilisatie van de concentratie van broeikasgassen, maar van het bereiken van het maximum gevolgd door een voortgaande daling, kan een deel van de opwarming die uiteindelijk zou optreden, worden vermeden. Dit betekent dat de niveaus waar concentraties het maximum bereiken tijdelijk hoger mogen liggen dan de aangegeven stabilisatiewaarden.



Kansverdelingsfuncties voor de klimaatgevoeligheid.

Bron: Hare and Meinshausen, 2004

Deze nieuwe inzichten zijn al in belangrijke mate terug te vinden in het beleid. Zo luiden de conclusies van de Europese Milieuraad van december 2004, onder meer: "RECOGNISES that recent scientific research and work under the IPCC indicates that it is unlikely that stabilization of greenhouse gas concentrations above 550 ppmv CO₂ equivalent would be consistent with meeting the 2 degrees Celsius long-term objective and that in order to have a reasonable chance to limit global warming to no

more than 2 degrees Celsius stabilization of concentrations well below 550 ppmv CO₂ equivalent may be needed; NOTES that keeping this long-term temperature objective within reach will require global greenhouse gas emissions to peak within two decades, followed by substantial reductions in the order of at least 15% and perhaps by as much as 50% by 2050 compared to 1990 levels."

De evaluatie is als volgt afgebakend:

- Er is gekozen voor de wereldgemiddelde temperatuur als algemeen gebruikte klimaatindicator, wetende dat klimaatverandering meer inhoudt dan alleen verandering van temperatuur. Ook neerslagpatronen zullen bijvoorbeeld veranderen. In de modellen waarvan de resultaten in deze studie gebruikt worden, zijn alle belangrijke klimaatparameters meegenomen. Vanuit klimaatbeleid gezien, zijn de broeikasgasconcentraties en de wereldgemiddelde temperatuurstijging de gemeenschappelijke delers waarover wereldwijd afspraken gemaakt zouden kunnen worden. Temperatuurstijging staat dicht bij de effecten van klimaatverandering dan concentratie. Omdat in de politieke doelstellingen specifiek de temperatuur wordt genoemd, worden ook de beschouwingen in deze evaluatie opgehangen aan de temperatuur.
- Er wordt alleen stilgestaan bij de *gevolgen* van temperatuurstijging als zodanig en niet bij de gevolgen van de *snelheid* van temperatuurstijging. Deze snelheid is weliswaar van belang om de 2° doelstelling te bereiken in 2100, maar hierover zijn te weinig studies beschikbaar.
- In de evaluatie wordt gekeken naar de risico's van 0,7 (wereldgemiddelde opwarming tot nu toe, UK Met Office, 2004) tot 5,8° Celsius (de bovenkant van de range zoals aangegeven door het IPCC voor het jaar 2100). Het accent ligt op de range van 2 tot 3° Celsius, omdat daarvoor de meeste informatie beschikbaar is.
- Er wordt hier niet specifiek ingegaan op de onzekerheden met betrekking tot de te verwachte temperatuurstijging. Het beschikbare materiaal wordt gebruikt in de context van de per publicatie aangegeven onzekerheden.
- Er is niet specifiek gekeken naar het intrinsieke aanpassingsvermogen van ecosystemen of sectoren.
- Deze evaluatie gaat niet in op de economische aspecten van dit vraagstuk. Voorbeeld hiervan vormen de kosten van stabilisatie-inspanningen door mitigatie (bestrijden van de oorzaken van klimaatverandering) en adaptatie (aanpassing aan klimaatverandering) in samenhang met de kosten van klimaateffecten. Basisinformatie hierover is te vinden in de meest recente IPCC-rapportage (IPCC, 2001c).

II. Effecten van klimaatverandering

1. Inleiding

In het kader van het vermijden van ‘gevaarlijke verstoring’ kan op twee manieren worden aangekeken tegen het formuleren van grenswaarden voor de effecten van klimaatverandering. De eerste soort grenswaarden hangt samen met de risico’s verbonden aan een geleidelijke klimaatverandering, inclusief veranderingen in weersextremen of variabiliteit, die leiden tot schade die door beleidsmakers bij overschrijding als onacceptabel kan worden beschouwd. Zo’n grenswaarde is het resultaat van een proces waarbij de relatieve risico’s voor verschillende sectoren en regio’s worden afgewogen tegen de kosten om die risico’s te vermijden.

Een ander type grenswaarden hangt samen met de risico’s van structurele en vaak abrupte en onomkeerbare veranderingen in het klimaatsysteem zelf. Het gaat hierbij om veranderingen die in gang gezet kunnen worden door geleidelijke klimaatverandering en die komen bovenop de daaraan verbonden effecten. Voorbeelden van dit type risico’s zijn processen die leiden tot versnelling van klimaatverandering (zogenoemde ‘runaway’ processen), zoals de afname van zonlichtreflectie en toename van bodememissies (smelten van de permafrost) bij opwarming van het Arctisch gebied, abrupte en onomkeerbare veranderingen zoals het stilvallen van de thermohaline circulatie en het afbreken en afsmelten van ijskappen. De invloed van deze processen manifesteert zich op regionale en meestal ook mondiale schaal. Hoewel de dynamiek vaak complex is, is de kans dat een dergelijk niet-lineair proces in gang wordt gezet te relateren aan de gemiddelde temperatuurstijging. Het is aannemelijk dat overschrijding van drempelwaarden, die grootschalige en onomkeerbare gevolgen met zich meebrengen, algemeen als onacceptabel en dus als ‘gevaarlijke verstoring’ zullen worden beschouwd.

2. Effecten van geleidelijke klimaatverandering

In deze paragraaf wordt gerapporteerd over de evaluatie van de literatuur langs drie assen: geografisch schaalniveau, temperatuurstijging en sectoren/systemen.

Wat betreft schaal wordt gekeken naar de mondiale en de Europese schaal. Voor de temperatuurstijging wordt de range van 0,7 tot 5,8° Celsius bekeken. De volgende terreinen komen aan de orde: ecosystemen, biodiversiteit, voedselproductie en gezondheid. Ten slotte wordt ingegaan op weersextremen.

2.1 Mondiale en Europese effecten

Ecosystemen – mondiaal

Sinds 2001 is er veel nieuwe wetenschappelijke informatie over de invloed van klimaatverandering op ecosystemen verschenen. In het algemeen gaan grotere tempera-

tuursveranderingen gepaard met een grotere snelheid van verandering van ecosystemen. Bij bepaalde snelheden zullen ecosystemen zich niet meer kunnen aanpassen.

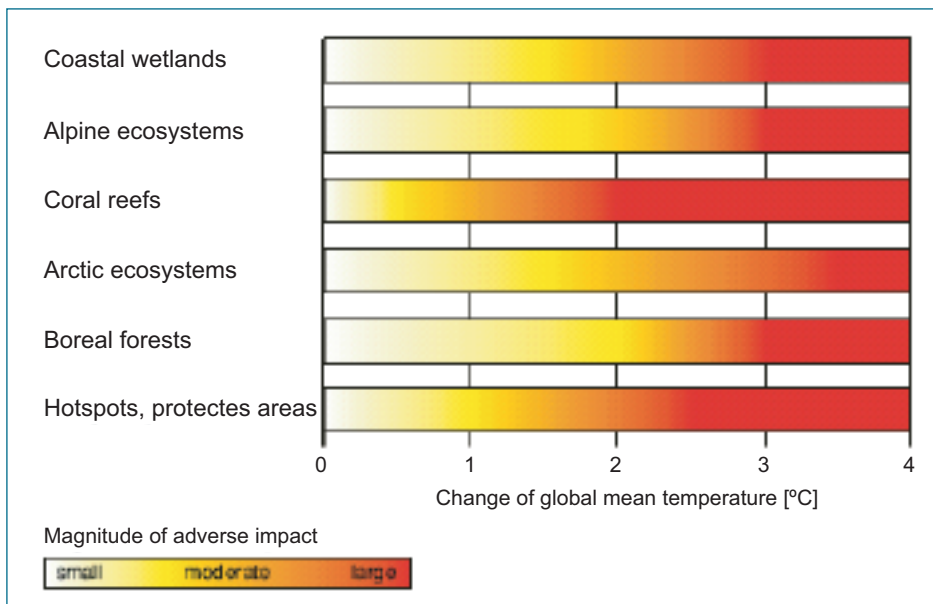
Tussen de huidige mondiaal-gemiddelde temperatuur (0,7 graad Celsius boven preïndustrieel) en een toename van 1° Celsius boven preïndustrieel kunnen kwetsbare ecosystemen reeds zwaar getroffen worden. In figuur 1 is te zien dat bij een opwarming van 1° Celsius met name koraalriffen in de gevarenzone komen (Hoegh-Guldberg, 1999; Sheppard, 2003). Daarnaast zijn er verschillende specifieke studies verschenen voor kwetsbare ecosystemen als de hooggelegen tropische bossen in Queensland, Australië (Hilbert et al., 2001; Hilbert et al., 2003; Williams et al., 2003) en de Succulent Karoo in Zuid-Afrika (Rutherford et al., 1999; Hannah et al., 2002; Midgley et al., 2002). De studies tonen aan dat deze kwetsbare ecosystemen al bij 1graad Celsius temperatuurstijging negatieve effecten ondervinden van klimaatverandering. Verder zouden ook bossen in boreale (en andere) streken beïnvloed kunnen worden doordat bosbranden frequenter zullen voorkomen (Ni, 2001).

Tussen 1 en 2° Celsius neemt de schade voor de voornoemde ecosystemen toe en zullen veel andere ecosystemen veranderingen laten zien. Ook sommige arctische en alpine ecosystemen zullen waarschijnlijk grote schade lijden (Hare, 2003; Busby, 1988; Burgmann, 1997; Theurillat & Guisan, 2001; Derocher et al., 2002).

Tussen 2 en 3° Celsius mondiale temperatuurstijging nemen de effecten verder toe. Aan de bovenkant van deze range is het risico op verdwijnen van de eerdergenoemde Succulent Karoo en de 2800 daar voorkomende plantensoorten zeer hoog. In deze range is de kans dat de Amazonewouden potentieel onomkeerbare schade lijden aanwezig, met name door de verdroging in deze gebieden. Dit kan ook leiden tot een verminderde opname van CO₂ of zelfs een omslag naar uitstoot van CO₂ (Cowling et al., 2003; Cox et al., 2004).

*Boven de 3° Celsius nemen de effecten op ecosystemen nog verder toe. Zo zijn er grote impacts te verwachten op de watervogelpopulaties in de Prairie Pothole regio in de USA (Sorenson et al., 1998). Ook zal het arctische zee-ijs oppervlak sterk afnemen, in het bijzonder in de zomer. Dit leidt tot een verdere bedreiging van de ijsberenpopulatie. Verder zal ongeveer de helft van de natuureservaten in de wereld niet in staat zijn hun huidige voorkomen te handhaven (Leemans & Eickhout, 2004). Een overzicht van de impacts op specifieke ecosystemen, bij oplopende wereldgemiddelde temperatuur is gegeven in *figuur 1*.*

Eén van de meest kwetsbare ecosystemen lijken koraalriffen te zijn (O'Neill and Oppenheimer, 2002). Koraalriffen worden gekenmerkt door een grote biodiversiteit en hebben ook economische waarde (toerisme, visvangst). Momenteel al laten veel koraalriffen grote veranderingen zien die deels veroorzaakt worden door de waargenomen temperatuurverandering. Door een te hoge zee- watertemperatuur treedt "bleaching" (verbleking) op door het afsterven van de éencellige micro-algen waarmee het koraal een symbiotische relatie heeft. Bij een voortdurende wereldwijde



Figuur 1: Effecten op ecosystemen (bron: Hare, 2003)

opwarming van meer dan 1° Celsius zal het optreden van verbleking sterk toenemen. Als de verbleking te vaak optreedt wordt het risico op het verdwijnen van koraalriffen groot.

Een ander effect dat zorgen baart is de verzuring van oceanen door de stijging in de concentraties van opgelost CO₂ (Turley, 2005). Dit effect kan het phytoplankton in de oceanen bedreigen, waardoor de capaciteit van oceanen om CO₂ op te nemen kan afnemen. Ook zou er schade kunnen optreden aan de gehele marine voedselketen. Hier is echter nog te weinig onderzoek naar gedaan om al conclusies te kunnen trekken. Wel is het zo dat deze verzuring op dit moment al wordt waargenomen en gepaard gaat met een afname in de groei van algen.

Wat betreft gletsjers is aangetoond dat over de periode 1961 tot 1998 sprake is van een afname van oppervlakte en volume van 300 gletsjers verspreid over de wereld en dat ze versneld afsmelten sinds 1980 (Dyurgerov, 2003). Het leggen van een direct verband met de mondiale opwarming ligt voor de hand, maar is toch lastig gebleken. Ten eerste omdat de afname niet alleen een functie is van afsmelting (temperatuur dus) maar ook van (verandering in) de neerslag. En ten tweede omdat, vanwege de vertraagde reactie van gletsjers op temperatuurstijging, het tijdstip van het begin van terugtrekking van veel gletsjers niet in overeenstemming is te brengen met het begin van de mondiale opwarming zoals dat uit waarnemingen is af te leiden (IPCC, 2001a), ook al is er de laatste (warme) decennia sprake van een versnelling van de terugtrekking.

Ecosystemen – Europese schaal

De meest gevoelige ecosystemen in Europa zijn wetlands, bergvegetaties en ecosystemen in Arctisch Europa. Al bij een stijging van rond de 1° Celsius van de mondiale temperatuur zullen enkele plantensoorten rond bergtoppen in hun bestaan bedreigd worden (Gitay et al, 2002), net als ecosystemen in de gevoelige wetlandgebieden van Mediterraan Europa en in de Baltische zee (Hare, 2003). Bij een stijging tussen de 2-3° Celsius (mondiaal) zullen ecosystemen in Arctische gebieden bedreigd worden (b.v. grote toendragebieden verdwijnen) en zullen grootschalige effecten op wetlandecosystemen in heel Europa waarneembaar worden (Kundzewicz et al, 2001, Hare, 2003, ACIA, 2004).

Biodiversiteit

Biodiversiteit is de biologische verscheidenheid van het leven op aarde, op het niveau van genen, soorten en ecosystemen. Biodiversiteit vertegenwoordigt de intrinsieke waarde van de natuur. Daarnaast is biodiversiteit ook van belang voor de gezondheid van de mens en speelt het een rol bij voedselvoorziening en als bron van grondstoffen. Over die functies is nog lang niet alles bekend.

Er zijn inmiddels veel publicaties beschikbaar over de sterke correlaties tussen klimaatverandering en veranderingen in het verspreidingsgebied van soorten. Ook is modelonderzoek gedaan naar de effecten van klimaatverandering op biodiversiteit. Daarbij wordt voor verschillende soorten een 'klimaatruimte' gedefinieerd waarbinnen die soort kan gedijen. Met klimaatmodellen wordt nagegaan hoe die ruimte zich verplaatst. Soms is migreren van soorten door natuurlijke (water, bergen) of menselijke barrières (landbouwgronden) moeilijk of onmogelijk omdat de fysieke ruimte ontbreekt. Zo hebben bijvoorbeeld Williams et al. (2003) een onderzoek uitgevoerd in de Australische tropische regenwouden, het biologisch rijkste gebied in Australië. Ze onderzochten de gevolgen van lokale temperatuurstijgingen tussen 1 en 7° Celsius op de verspreiding van soorten, via bio-klimaat modellering gebaseerd op 220.000 waarnemingen. Ze hebben schattingen gemaakt van de verandering in het verspreidingsgebied van iedere soort bij verschillende klimaatscenario's. Modelberekeningen voor 62 inheemse soorten die voorkomen op hoogten van meer dan 600 m gaven aan dat 1° Celsius temperatuurstijging zal resulteren in gemiddeld 40% verlies van het potentiële verspreidingsgebied. Voor 3,5° Celsius is dat 90% en voor 5° Celsius 97%. Een temperatuurstijging van 7° Celsius resulteerde in het verlies van het gehele potentiële verspreidingsgebied van alle soorten.

Bakkenes et al. (2005) hebben een vergelijkbare analyse gedaan voor 856 Europese plantensoorten waarbij het huidige verspreidingsgebied duidelijk te correleren valt aan klimaatpatronen. Zij concluderen dat bij een opwarming van 3° Celsius ten opzichte van preïndustrieel gemiddeld 10% van de Europese soorten uit verschillende Europese landen zal verdwijnen. Bij 2° Celsius concluderen ze dat op het Europese continent het doel van behoud van soorten binnen bereik komt, alhoewel in een aantal landen nog steeds verschillende plantensoorten zullen verdwijnen.

Conclusies

Samengevat blijken de gevoeligheden nogal uiteen te lopen tussen verschillende ecosystemen en regio's. In grote lijnen nemen de risico's toe met een toename van de temperatuur (zie figuur 1). Blijft de stijging beperkt tot onder de 1° Celsius dan zullen de effecten op ecosystemen beperkt zijn, maar ze zijn niet uit te sluiten, zoals nu al te zien is bij de koraalriffen. Bij een verdere stijging boven 1° Celsius nemen de risico's toe. Tussen de 1 en 2° Celsius opwarming zullen meer ecosystemen op vele plekken op aarde veranderingen laten zien en zelfs verdwijnen. Bij een verdere opwarming nemen de risico's verder toe waarbij in een groot aantal gevallen soorten dreigen uit te sterven of ecosystemen zelfs desintegreren.

Ecosystemen in Europa zijn in het algemeen wat minder gevoelig dan in vele andere delen van de wereld. Maar ook daar zal temperatuurstijging tot effecten leiden. Eerst vooral in sommige wetland gebieden, bergregio's en Arctisch Europa.

Voedselproductie

Het effect van klimaatverandering op voedselproductie wordt bepaald door verschillende factoren zoals temperatuur, waterbeschikbaarheid en CO₂-fertilisatie ('bemesting' met CO₂ uit de atmosfeer). De laatste factor leidt in het algemeen tot opbrengstverhoging. De kwetsbaarheid van de voedselproductie verschilt sterk per regio; regio's waar de productie nu al door klimatologische omstandigheden wordt beperkt zoals aride gebieden, en regio's die arm zijn waardoor ze weinig mogelijkheden voor (technologische) aanpassing hebben, zijn het meest gevoelig. Wat de effecten voor de voedselproductie betreft is ook het onderscheid tussen de mondiale en regionale schaal belangrijk: op mondiale schaal kunnen verliezen in een bepaalde regio worden gecompenseerd door toename van de productie in een andere. De mondiale kwetsbaarheid is dus kleiner dan de regionale en lokale. Vanuit het oogpunt van risico's op honger en/of ondervoeding en sociale effecten is de regionale schaal relevanter dan de mondiale schaal. Smith et al., (2001) geven als wereldbeeld dat een *opwarming van rond de 1° Celsius* gunstig is voor de voedselproductie op wereldschaal en relatief geringe schade zal veroorzaken op regionale schaal. Bijna alle ontwikkelde landen zullen voordeel ondervinden, terwijl veel ontwikkelingslanden in de tropen met waarschijnlijk kleine maar significante opbrengstdervingen te maken krijgen, vergeleken bij een onveranderd klimaat.

Tussen 2 en 3° Celsius opwarming komt de voedselproductie op wereldschaal niet in gevaar, maar zal het risico op regionale schade significant toenemen (Parry et al, 1999; Parry et al, 2001; Arnell et al, 2002; Parry et al, 2004). Met name de gewasopbrengsten in ontwikkelingslanden lijken dan zeer te gaan lijden onder hogere temperaturen. Bij een temperatuurstijging van 3° Celsius neemt bijvoorbeeld de opbrengst van granen op de huidige en potentieel toekomstige landbouwgronden in Zuid-Afrika af met ongeveer 40%. De graanopbrengst van de huidige landbouwwarealen neemt zelfs nog meer af bij dergelijke temperaturen (Fischer et al., 2001). Dóórwerking van klimaatverandering op de watervoorziening speelt hierbij een belangrijke rol.

Om graanopbrengsten te behouden zullen bij hoge temperaturen vele gebieden moe-

ten verschuiven, waarbij voor noordelijk gelegen regio's toenames in de gewasopbrengsten worden verwacht (Canada, VS, Rusland en Noord-Europa).

Voor een *opwarming van 3 tot 4° Celsius*, wordt ook de voedselproductie op wereldschaal negatief beïnvloed. Volgens één bepaalde studie (Parry et al, 2001) lopen dan 80 tot 125 miljoen mensen additioneel het risico op honger, afhankelijk van het toegepaste klimaatmodel. In Australië zal een opwarming van rond 4° Celsius waarschijnlijk hele regio's uit productie halen (Pittock et al, 2001).

De uitkomsten van het European Climate Forum Symposium (Beijing, October 2004) bevestigen dit beeld: tussen 2 en 2,5° Celsius opwarming (boven preindustriële) treden er significante regionale, min of meer ernstige risico's op voor de voedselproductie (Zuid Azië, zuidelijk Afrika, delen van Rusland). Boven deze range is er een toenemend risico voor China, Afrika, Zuid Azië en Rusland, hoewel er onzekere factoren zijn, zoals de eerder genoemde CO₂-fertilisatie.

Bij alle niveaus van opwarming zal een grote groep van arme, erg kwetsbare ontwikkelingslanden naar verwachting met toenemende voedseltekorten te maken krijgen, leidend tot meer onzekerheid in voedselvoorziening en honger in deze landen. Een toename in extremen en veranderingen in klimaatvariabiliteit zullen ook gevolgen hebben voor de landbouw in de aride en semi-aride gebieden. Kwantificering hiervan is nog niet mogelijk.

Menselijke gezondheid

De invloed van klimaatverandering op de menselijke gezondheid is lastig te bepalen omdat de gezondheid door veel andere factoren wordt beïnvloed, zoals welvaarts- en opleidingsniveau, natuurlijke weerstand en/of vatbaarheid, kwaliteit van en toegang tot de gezondheidszorg. Een groot probleem is ook dat veel effecten gekoppeld zijn aan extreme weersituaties. Hierin is de menselijke invloed in de zin van klimaatverandering weliswaar te herkennen, maar nog niet te kwantificeren (zie paragraaf 2.2).

Weersextremen kunnen grote invloed op de gezondheid hebben, zoals de extreem droge zomer van 2003 heeft aangetoond. Temperatuurstijging kan een groot risico met zich meebrengen van besmetting door ziektekiemen via (drink)water. Verder is de verspreiding van malaria en knokkelkoorts aan temperatuur gerelateerd. Andere risico's zijn de toename van water- en voedseltekorten en de toename van natuurrampen zoals overstromingen. In feite zijn alleen over malaria studies met een werelddekkend karakter en over een zeker tijdsverloop beschikbaar (Hitz and Smith, 2004).

Al met al komen Hitz and Smith tot de conclusie dat het waarschijnlijker is dat ziekte- en sterftecijfers als gevolg van een toenemende gemiddelde wereldtemperatuur eerder zullen toe- dan afnemen. Ze karakteriseren het verband tussen menselijke gezondheid en klimaatverandering als één met toenemende negatieve effecten.

Een range van temperatuurstijging, gekoppeld aan effecten, is voor dit onderwerp nog niet te geven.

2.2 Veranderingen in extreme temperaturen als gevolg van geleidelijke klimaatverandering

In de vorige eeuw is de gemiddelde temperatuur in de wereld met ruim 0,7° Celsius gestegen ten opzichte van het preïndustriële tijdperk. In de laatste 25 jaar van de twintigste eeuw was de opwarming van de aarde drie keer zo groot als in de afgelopen honderd jaar. Op het noordelijk halfrond waren de jaren negentig het warmst (bron: WMO).

Tot voor kort kon de menselijke invloed op het klimaat uitsluitend worden aangetoond in de wereldwijde opwarming of in de gemiddelde temperatuurstijging boven de grote continenten. Klein Tank (2004) laat zien dat de opwarming van de aarde ook in de extremen tot uiting komt: in Europa kwamen de afgelopen 50 jaar steeds minder koude extremen en meer warme extremen voor. De mate van de verandering in de extremen loopt niet volledig in de pas met de stijging van de gemiddelde temperatuur. Zo droeg de afgelopen decennia de toename van het aantal relatief warme dagen meer bij aan de opwarming dan de afname van het aantal relatief koude dagen. Deze ongelijke verandering in relatief koude en warme dagtemperaturen is mogelijk een vingerafdruk van de menselijke invloed op het klimaat (zie ook tekstbox 2).

Geconcludeerd kan worden dat er een statistisch verband is vastgesteld tussen de toename van extreme temperaturen en de door menselijk handelen veroorzaakte wereldwijde opwarming. Voor een beter begrip van de vastgestelde veranderingen in extremen en voor kwantificering is wel een nadere analyse nodig van de achterliggende fysische mechanismen die de trends veroorzaken. Deze analyse zou kunnen bevestigen dat de menselijke invloed niet alleen zichtbaar is in de gemiddelde opwarming, maar ook in de veranderingen in de temperatuursextremen. Ook zal zij inzicht geven in hoe de komende honderd jaar de weersextremen in Europa zouden kunnen gaan veranderen.

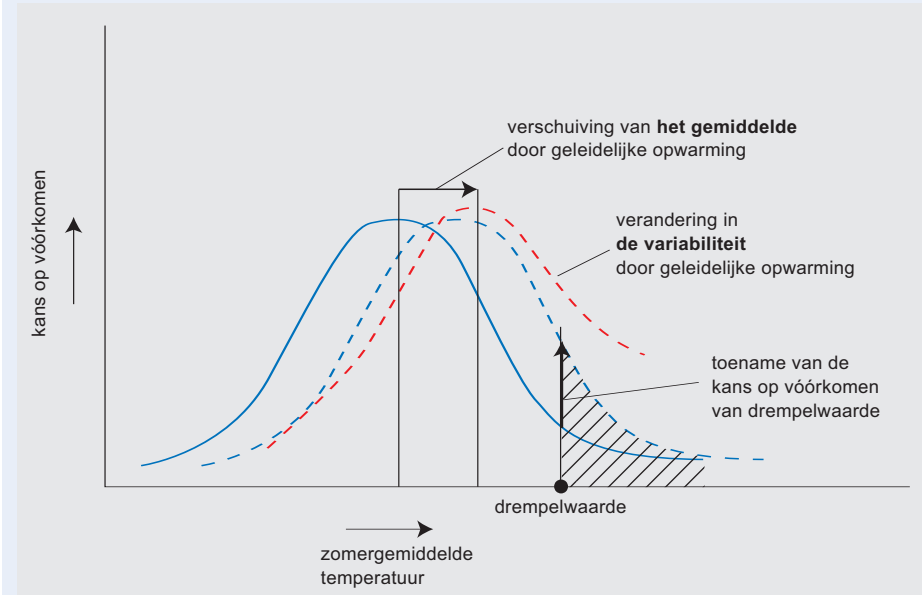
Hierop vooruitlopend zijn er al wetenschappers die iets over de effecten van die toename in weersextremen zeggen (Leemans & Van Vliet, 2004). De waargenomen ecologische veranderingen treden vaker op en zijn ook uitgesprokener dan op grond van een gemiddelde temperatuurstijging van 0,7° Celsius verwacht mag worden. Ze blijken veel beter met de veranderingen in weersextremen te correleren dan met de gemiddelde opwarming. Leemans & Van Vliet zijn van mening dat op grond van de waargenomen en te verwachten effecten de grens van 2° Celsius wereldgemiddelde temperatuurstijging te hoog is. Zelfs bij kleine veranderingen in de wereldgemiddelde temperatuur, zo stellen zij, zullen er disproportioneel grote veranderingen in frequentie en grootte van weersextremen optreden en derhalve onvoorspelbare en ongewenste effecten op soorten en ecosystemen. Zij bevelen daarom aan de wereldgemiddelde temperatuurstijging tot 1,5° Celsius boven preïndustrieel niveau te beperken en tot minder dan 0,05° Celsius per decennium.

Tekstbox 2: veranderingen in gemiddelde en extreme waarden onder invloed van een geleidelijke temperatuursverandering

De kans dat hittegolven voorkomen verandert als de gemiddelde temperatuur stijgt. De door de mens veroorzaakte opwarming verschuift de statistische verdeling van zomertemperaturen in de richting van warmere condities. Dit heeft een groot effect op de kans dat de temperaturen een gekozen drempelwaarde overschrijden in het rechterdeel van de kansverdeling: de kans op extreme zomers neemt waarschijnlijk meer

toe als het gemiddelde van de kansverdeling opschuift door de geleidelijke opwarming (zie de bijgaande figuur).

De vorm van de kansverdeling (de variabiliteit) kan mogelijk óók veranderen door menselijke invloed, maar de achterliggende fysische oorzaken zijn nog maar gedeeltelijk bekend (zie bijvoorbeeld Schär et al, 2004).



Figuur: Voorbeeld van een kansverdeling van zomergemiddelde temperaturen en de veranderingen daarin als gevolg van geleidelijke opwarming

Hoewel de effecten van de toename in weersextremen op de natuur (en ook op landbouw en volksgezondheid) in het kader van de onderhavige evaluatie zeker niet worden onderschat, is de aanbeveling voor een (aangepaste) temperatuurdoelstelling nog speculatief. In z'n algemeenheid worden veel effecten in gang gezet door weersextremen. Het is echter nog niet bekend hoe die weersextremen gaan veranderen. Inzicht hierin zal veel bijdragen aan het inschatten van de risico's van klimaatverandering.

2.3 Zeespiegelstijging

Natuurlijke zeespiegelveranderingen kunnen zeer groot zijn. Zo was gedurende de laatste glaciële periode, die ongeveer tienduizend jaar geleden eindigde, het oceaan-niveau 120 meter lager dan nu (Rapley, 2005).

Wereldgemiddelde zeespiegelstijgingen kunnen optreden door een toename in het volume oceaanwater. Gedurende de twintigste en 21ste eeuw is dit primair het gevolg van thermische uitzetting van zeewater en het afsmelten van kleine ijskappen en gletsjers als gevolg van door de mens veroorzaakte mondiale opwarming. Het proces van thermische uitzetting kenmerkt zich door een groot naijleffect op de temperatuurstijging en maakt het noodzakelijk om meerdere eeuwen vooruit te kijken.

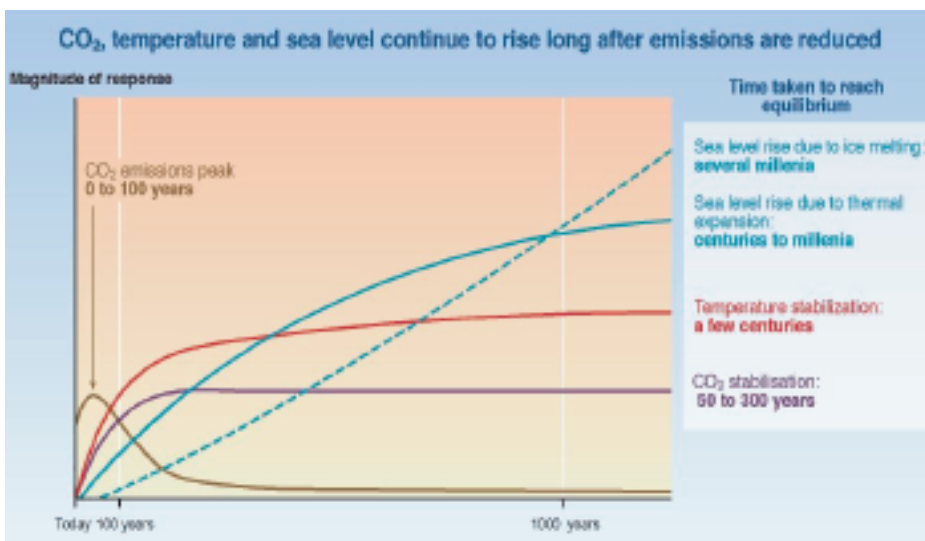
De zeespiegelverandering op een bepaalde plaats, ook wel de *relatieve* zeespiegelverandering genoemd hangt af van nog andere factoren:

- regionale variaties, onder andere veroorzaakt door niet-uniforme patronen van veranderingen in temperatuur en zoutgehalte in de oceaan; deze kunnen afwijkingen (tot 100%) veroorzaken van de wereldgemiddelde zeespiegelstijging (Gregory and Lowe, 2000)
- verticale beweging van het landoppervlak, bijvoorbeeld veroorzaakt door tektoniek of door zettingen als gevolg van grootschalige grondwaterwinning of door inklinking van veengronden.

De relatieve zeespiegelstijging is dus de som van de wereldgemiddelde zeespiegelstijging, de regionale component en de lokale, verticale component.

De zeespiegel is wereldgemiddeld gezien gedurende de twintigste eeuw met 10 tot 20 cm gestegen (Church and Gregory, 2001). Dit is afgeleid uit metingen die gecorrigeerd zijn voor verticale landbewegingen. Recente schattingen voor het laatste decennium van de twintigste eeuw op basis van satellietmetingen suggereren een wereldgemiddelde stijging van 3 mm per jaar (Cabanès et al., 2001).

Voor wat betreft de *toekomst* moet zowel rekening worden gehouden met de respons op toekomstige emissies als met de doorgaande respons op emissies uit het verleden –



Figuur 2: Vertragingen in het klimaatsysteem

het najleffect van reeds uitgestoten broeikasgassen (zie figuur 2). Deze laatste factor, die voornamelijk door de thermische uitzetting wordt bepaald, zal nog vele eeuwen een rol spelen. Dit komt door het langdurige mengproces van warmte vanuit het oppervlak met de diepere lagen in de oceaan.

Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) komt in haar rapport van 2001 op basis van een aantal emissiescenario's tot de verwachting dat de zeespiegel in 2100 gestegen zal kunnen zijn met 9 – 88 cm. Deze spreiding wordt veroorzaakt door wetenschappelijke onzekerheden en verschillende aannamen wat betreft bevolkingsgroei en economische ontwikkeling, die ook in de bandbreedte van de temperatuurprojecties terug te vinden zijn. Bovendien spelen onzekerheden in de groei van ijskappen, via neerslagveranderingen en afkalving, en de mate waarin de temperatuuroename verdeeld wordt over de oceaan een rol. De stijging zal voornamelijk te wijten zijn aan thermische uitzetting. In de range van 9 – 88 cm zitten niet de grote onzekerheden verwerkt die verbonden zijn met mogelijk grote veranderingen in de West Antarctic Ice Sheet (WAIS) en de Groenlandse ijskap. Zie hiervoor paragraaf 3.2.

Modelberekeningen geven aan dat de toekomstige wereldgemiddelde zeespiegelstijging praktisch onafhankelijk is van toekomstige emissies tot ca. 2050 (Mitchell et al., 2000). Echter, na 2050 worden toekomstige emissies steeds belangrijker bij het beheersen van de zeespiegelstijging op een termijn van eeuwen. Een wereldgemiddelde zeespiegelstijging is dus onvermijdelijk gedurende de 21e eeuw en daarna. Maar we kunnen voor de 22e eeuw en daarna de (snelheid van) zeespiegelstijging beïnvloeden door het verminderen van de emissie van broeikasgassen in deze eeuw. Door stabilisatie van de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer, via bepaalde emissietrajecten (samenhangend met mitigatiemaatregelen), kan de temperatuurstijging worden beperkt en dus ook de thermische uitzetting van het zeewater, die leidt tot zeespiegelstijging. Niettemin zullen vanwege het najleffect van emissies uit het verleden hoe dan ook adaptiemaatregelen moeten worden getroffen.

Voor een met het IMAGE-model van het MNP/RIVM doorgerekend stabilisatiescenario van 650 ppmv CO₂-equivalent komt de wereldgemiddelde temperatuurstijging in 2100 uit op waarden zoals aangegeven in de onderstaande tabel (Eickhout et al., 2003). Voor een vergelijkbaar stabilisatiescenario (S550, 550 ppmv CO₂), uitkomend op ongeveer dezelfde temperatuurstijging in 2100, is langs een andere weg de wereldgemiddelde zeespiegelstijging berekend, voor dezelfde waarden van de klimaatgevoeligheid (Nicholls and Lowe, 2004; Nicholls, 2005).

Door deze resultaten te combineren is de relatie te leggen tussen temperatuurstijging en zeespiegelstijging en is aldus de zeespiegelstijging in bijvoorbeeld 2100 te bepalen (zie tabel).

De zeespiegelstijging zal overigens na 2100 nog vele eeuwen doorgaan, vanwege het najleffect: de thermische uitzetting zal 500 jaar nadat is gestabiliseerd op 550 ppmv CO₂ een factor 4 tot 9 groter zijn. En zelfs dan zou pas de helft van de uiteindelijke stijging kunnen zijn bereikt. Modeluitkomsten laten zien dat de range hiervan zal liggen tussen 0.5 en 2 m bij 550 ppmv CO₂ en 1 tot 4 m bij 1100 ppmv CO₂ (IPCC, 2001a).

Ten slotte is in de tabel een schatting gegeven van het extra aantal mensen dat gemiddeld per jaar getroffen wordt door overstromingen door zeespiegelstijging, als

gekozen klimaat-gevoeligheid (zie tekstbox 1)	berekende wereldgemiddelde temperatuurstijging in 2100 (°C)	berekende zeespiegelstijging in 2100 (cm, t.o.v. 1990)	extra aantal door overstrooming getroffen mensen (miljoen/jaar) in 2100
1,5	1,5	13	enkele miljoenen
2,5	2,3	28	ca 25
4,5	3,5	76	ca 300

gevolg van mondiale opwarming. Dit is afgeleid uit Nicholls en Lowe (2004) op basis van daarin vermelde bevolkings- en GDP-scenario's

3. Veranderingen in het klimaatsysteem, in gang gezet door geleidelijke klimaatverandering

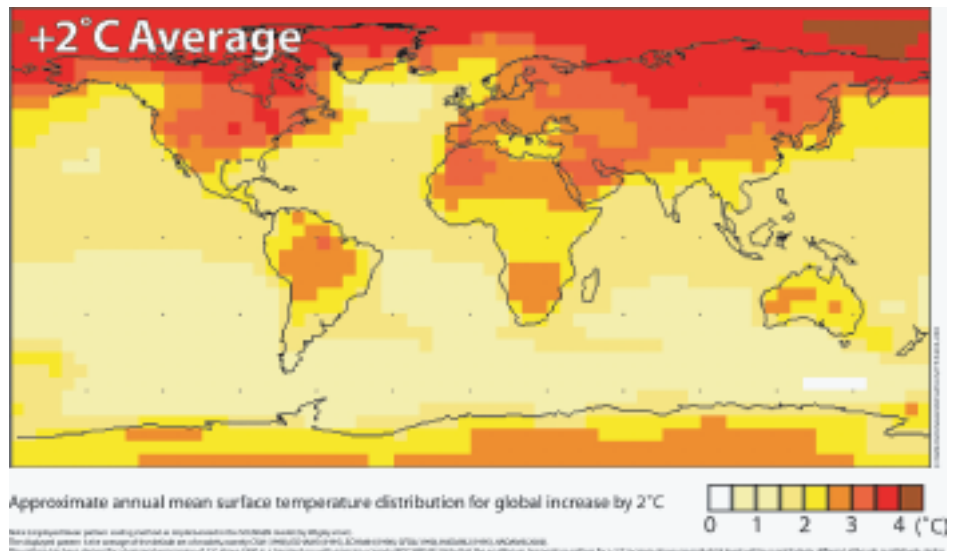
In deze paragraaf wordt stilgestaan bij niet-lineaire veranderingen in het klimaatsysteem, in gang gezet door geleidelijke klimaatverandering. Deze kunnen doorwerken op zowel mondiale als regionale als lokale schaal. Deze mechanismen vormen grote risicofactoren omdat we hierbij meestal te maken hebben met abrupte, onomkeerbare processen. Belangrijke 'zwakke schakels' in het kader van de onderhavige problematiek zijn:

1. De versterkte doorwerking van de wereldgemiddelde temperatuurstijging op het Noordpoolgebied.
2. Het afsmelten van grote ijskappen en de daarmee samenhangende zeespiegelstijging.
3. Het risico van een substantiële afname van de thermohaline circulatie (THC)

3.1 Versterkte doorwerking op het Noordpoolgebied

De gemiddelde temperatuur op de Noordpool is de afgelopen decennia bijna twee keer zo sterk gestegen als in de rest van de wereld. Er zijn weliswaar regionale variaties, veroorzaakt door windpatronen en oceaangolven, waardoor sommige gebieden meer opwarming vertonen dan andere en enkele gebieden een geringe afkoeling laten zien. Maar het Noordpoolgebied als geheel vertoont een duidelijke trend van versterkte opwarming ten opzichte van het wereldgemiddelde (zie figuur 3).

Hiervoor zijn verschillende mechanismen verantwoordelijk (zie tekstbox 3). In de Arctic Climate Assessment (ACIA 2004) wordt gerapporteerd over de gevolgen hiervan voor mens en milieu (ACIA is een eind 2004 afgeronde vierjarige studie die is uitgevoerd door meer dan 250 wetenschappers en leden van locale inheemse organisaties).



Figuur 3: Een voorbeeld van een modelberekening van de verdeling van de oppervlaktetemperatuur bij een wereldgemiddelde opwarming van 2° Celsius.

De opwarming is gepaard gegaan met smeltende gletsjers en zee-ijs, en hogere permafrost temperaturen. Afgeleide effecten zijn zeespiegelstijging en afname van het zoutgehalte in de noordelijke zeeën als gevolg van smeltend ijs en toegenomen instroom van rivierwater door smeltende gletsjers. Hierdoor kan verzwakking van de THC optreden (zie paragraaf 3.3).

De gevolgen voor het Noordpoolgebied zelf betreffen onder meer een afname van zee-ijs (met negatieve gevolgen voor allerlei zoogdieren), verandering van scheepvaartroutes (een positief effect), verschuivingen in vegetatiezones, desintegratie van de permafrost en economische en culturele gevolgen voor de inheemse bevolking. Desintegratie van permafrost leidt tot beschadiging van gebouwen, olie-/gasinstallaties en leidingen, hetgeen tot grote milieuproblemen kan leiden.

Een wereldgemiddelde opwarming van 2° Celsius correspondeert met een toename van 4 tot 8° Celsius op de Noordpool. Bij een dergelijke opwarming voorzien berekeningen met verschillende modellen het nagenoeg geheel verdwijnen van arctisch zee-ijs in de zomer tegen het eind van deze eeuw (Johannessen et al, 2004). Hierdoor worden ijsberen, ijs-afhankelijke zeehonden, walrussen en een aantal zeevogelsoorten met uitsterven bedreigd. De toendra's zijn broedplaatsen voor meer dan 20 miljoen ganzen en waadvogels. Veel van deze soorten zullen de nadelige invloed ondervinden van het verlies van toendra-ecosystemen die wordt voorzien bij een wereldgemiddelde opwarming van 2° Celsius.

Volgens het Hadley Centre (2005) was de hoeveelheid Arctisch ijs constant tot de jaren zestig. Vanaf 1970 is de hoeveelheid teruggelopen met 7,5% - wat overeenkomt met

ongeveer een miljoen vierkante kilometer. Dit is niet te verklaren uit alleen natuurlijke oorzaken. Als in het door het Hadley Centre gebruikte model menselijke activiteiten worden meegenomen, komen de modelsimulaties overeen met de observaties. Hieruit wordt geconcludeerd dat de mens de veroorzaker is van het afsmelten van Arctisch ijs.

3.2 Afsmelten grote ijskappen

Als de ijskappen van Groenland en Antarctica gaan afsmelten bij doorgaande mondiale opwarming kan dit een significante additionele bijdrage leveren aan de wereldgemiddelde zeespiegelstijging. Het *potentiële* effect van deze ijskappen op de zeespiegel als gevolg van mondiale opwarming is groot. Projecties geven aan dat in deze ijskappen gezamenlijk genoeg water is opgeslagen voor een wereldgemiddelde zeespiegelstijgingen tot 13 m over de volgende 1000 jaar (Mercer, 1978; Lowe, 2005). Recent onderzoek wijst uit dat de afsmelting van de Groenlandse en Antarctische ijskappen zelfs al in deze eeuw een grotere bijdrage aan de zeespiegelstijging zou kunnen leveren dan eerst gedacht (zie tekstbox 3).

Tekstbox 3: Het afsmelten van de Groenlandse ijskap

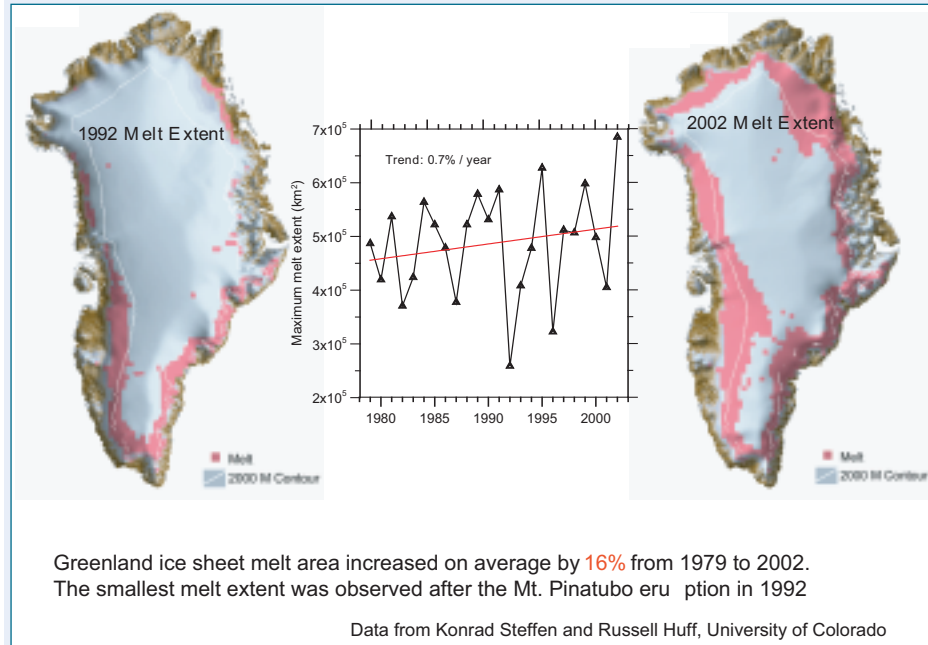
De Groenlandse ijskap is op sommige plaatsen meer dan drie kilometer dik en bevat bijna drie miljoen kubieke kilometer ijs. Smelt deze grote hoeveelheid dan zal de mondiale zeespiegel stijgen met zeven meter. Met als gevolg dat veel kustgebieden en de meeste van 's werelds grote steden onder water komen te staan ('Stabilising climate to avoid dangerous climate change', Hadley Centre, January 2005).

De toekomstige opwarming van Groenland zal groter zijn dan de wereldgemiddelde opwarming. Dit komt omdat de opwarming groter is op hogere breedten, hetgeen voornamelijk wordt veroorzaakt doordat de warmte van de zon wordt teruggekaatst; door de witte sneeuw en het ijs wordt ca. 85% van de zonne-straling weerkaatst, waardoor de Noordpool koud blijft. Door afname van sneeuw en ijs als gevolg van opwarming komt er meer oppervlak aan land en zee vrij te liggen, waardoor minder zonne-straling gereflecteerd wordt en er meer wordt geabsorbeerd. Daardoor vindt extra opwarming plaats, met smelten van meer sneeuw en ijs als gevolg. Dit veroorzaakt weer meer opwarming en zo ontstaat een zichzelf versterkend effect (een zogenoemd 'runaway effect': een onbeheersbare meekoppeling). Het afsmelten van de Groenlandse ijskap lijkt de laatste decennia steeds sneller te gaan (Abdalati and Steffen, 2001). In bijgaande figuur is te zien dat tussen 1992 en 2002 steeds grotere gebieden

van Groenland in de zomer zijn afgesmolten. Afname of aangroei van ijskappen is afhankelijk van afsmelten (de temperatuur) en neerslag (sneeuw). Voor een jaargemiddelde locale opwarming van meer dan 2,7 graden Celsius wordt op Groenland de neerslag overtroffen door de afsmelting, waardoor per saldo de ijskap dus inkrimpt (Huybrechts et al., 1991, IPCC, 2001a). Ook recent onderzoek suggereert dat een locale temperatuurstijging van een kleine 3° (waar een gemiddelde mondiale opwarming bij hoort van ca. 1,5° Celsius) de start van een onomkeerbaar afsmelten van de Groenlandse ijskap over een periode van 1000 jaar of langer in gang kan zetten (Gregory et al., 2004, Lowe, 2005). Het desintegratieproces van ijskappen is nog niet goed bekend. De dynamiek (en dus uiteindelijk het uitstromen in zee) wordt in het algemeen bepaald door de dikte en de helling van het ijs en de wrijving aan de basis van de gletsjer. Glaciologen hebben op Groenland waargenomen dat het smeltwater door de ijskap heen sijpelt en er aan de onderkant uitstroomt. Dat werkt als een smeermiddel: delen van de ijskap schuiven daardoor sneller in zee (Zwally et al., 2002, Corell, interview in Trouw, 19-2-'05). Een complicatie hierbij is dat de ijsplaten die voor de kust van Groenland (en ook Antarctica) liggen en de monding van de gletsjers die van het vasteland komen afsluiten, dunner worden of zelfs in stukken breken. Daardoor stromen de gletsjers

steeds sneller in zee (Alley, Penn State University, Washington) en wordt verwacht dat de bijdrage van Groenland en Antarctica aan de zeespiegelstijging deze eeuw wel eens veel groter zou kunnen zijn dan eerder door IPCC (2001a) is aangenomen. Het is nog niet duidelijk of deze verschijnselen van versneld afsmelten aan de mondiale opwarming te wijten zijn of dat ze natuurlijke oorzaken hebben (bijvoorbeeld: verschuivingen in de atmosferische circulatiepatronen op het noordelijk halfrond).

Zonder ijskap zal het klimaat op Groenland veel warmer zijn, omdat het landoppervlak dan veel lager zal liggen dan de bovenkant van een ijskap en minder zonlicht reflecteert. Zelfs als het mondiale klimaat en de atmosferische samenstelling weer zou worden als in de preïndustriële periode, zal er waarschijnlijk geen ijskap meer ontstaan. Dit houdt in dat de zeespiegelstijging naar alle waarschijnlijkheid onomkeerbaar zal zijn.



Figuur: Waarnemingen van de afsmeltgebieden in de zomer op de Groenlandse ijskap. De smeltzone, waar de zomerwarmte sneeuw en ijs aan de randen van de ijsplaat in een sneeuwbrig en meren van smeltwater verandert, heeft zich naar het binnenland uitgebreid en is in de afgelopen jaren tot recordhoogte gestegen. (ACIA, 2004)

In het laatste IPCC rapport wordt slechts een zeer geringe bijdrage van het smelten van ijs op Groenland aan de zeespiegelstijging in deze eeuw verwacht. Het wordt ook niet waarschijnlijk geacht dat gedurende de 21ste eeuw instabiliteit van de WAIS een significante bijdrage aan de zeespiegelstijging zal leveren (IPCC, 2001a). Het laatste IPCC-rapport karakteriseerde Antarctica in verband met klimaatverandering als een slapende reus. Wel wordt door sommige wetenschappers gesuggereerd, dat het desintegratieproces van ijskappen een niet-lineair proces is dat daardoor waarschijnlijk veel sneller verloopt dan tot nu toe werd aangenomen (sneller dan de aangroei van een ijskap).

Inmiddels zijn er duidelijke aanwijzingen voor het niet-lineair verlopen van het desintegratieproces van deze ijskappen. Er is een omvangrijker en snellere afsmelten van Groenland waargenomen en een versnelling in het schuiven van gletsjers na het opbreken en dunner worden van de drijvende ijsplakken voor de kust van Groenland en sommige delen van Antarctica (West Antarctische ijsplaat en schiereiland). Er zijn dus aanwijzingen dat de reus aan het wakker worden is, ook al vertoont Oost-Antarctica tot op heden weinig tekenen van verandering (Rapley, 2005).

Op grond van deze nieuwe waarnemingen wordt een aanzienlijk grotere bijdrage van de ijskappen aan de zeespiegelstijging in deze eeuw verwacht dan volgens IPCC (2001a) (zie ook tekstbox 3).

Voor de zeespiegelstijging op de zeer lange termijn (na de 21^e eeuw) wordt bij voortgaande mondiale opwarming, van zowel Groenland als de WAIS een significante additionele bijdrage verwacht, ook zonder versneld afsmelten.

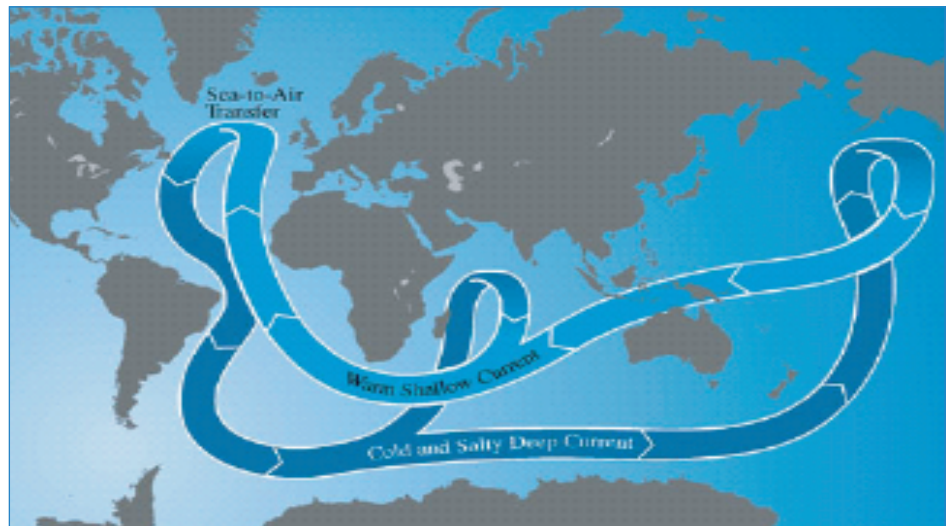
De *conclusie* is dat er weliswaar voor de langere termijn (na 2100) nog allerlei onzekerheden zijn, maar dat het waarschijnlijk is dat de Groenlandse ijskap bij een mondiale temperatuurstijging van meer dan 1-2° Celsius onomkeerbaar zal afsmelten, resulterend in een zeespiegelstijging van uiteindelijk zeven meter. Dat proces neemt wel 1000 jaar of langer in beslag (tenzij de positieve terugkoppelingen sterker zijn dan verwacht), maar kan dus al in de loop van deze eeuw een aanvang nemen. Op grond van nieuwe waarnemingen kan een aanzienlijk grotere bijdrage van de ijskappen aan de zeespiegelstijging in deze eeuw worden verwacht dan volgens IPCC (2001a).

3.3 Thermohaline circulatie

Bij oceaanstromingen spelen drie factoren een rol: getijdenwerking, wind en verschillen in dichtheid van het water. De dichtheid van zeewater wordt bepaald door de temperatuur en het zoutgehalte. De oceaanstroming die aangedreven wordt door dichtheidsverschillen wordt de thermohaline circulatie (THC) genoemd.

De THC vormt samen met wind-gedreven stroming de Golfstroom. De Noord-Atlantische oceaanstroming is hier een onderdeel van (zie figuur 4). Het is een belangrijke bepalende factor voor het klimaat in West Europa omdat hiermee warmte wordt getransporteerd vanuit de tropen naar hogere breedtegraden.

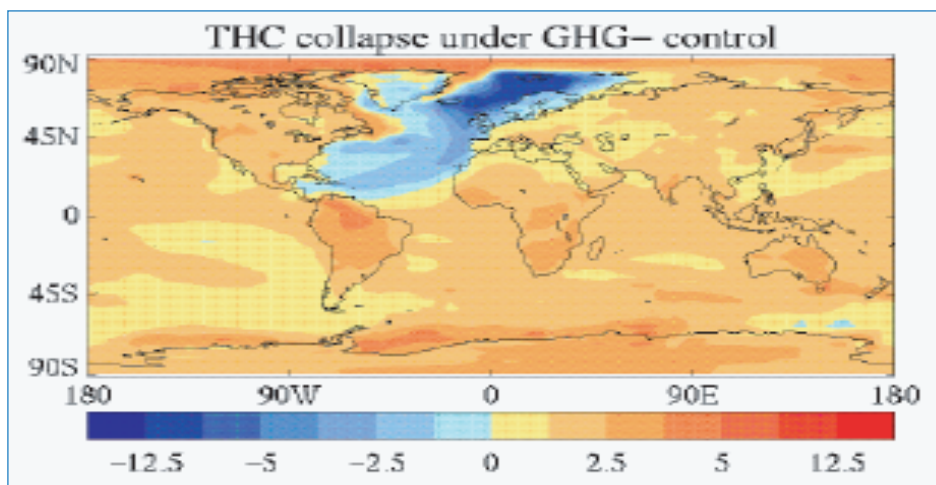
Als de dichtheid van het Noord-Atlantisch zeewater vermindert door meer input van zoet water en/of door verminderde afkoeling, kan dat tot een verzwakking van de THC leiden. De verzoeting kan het gevolg zijn van meer neerslag of het afsmelten van zee- en landijs. Het risico dat een verzwakking van de THC met zich meebrengt is tweeledig: een drempeleffect en een hysteresis-effect (dit is een onomkeerbaarheidseffect: het niet langs dezelfde curve terugkeren van de oceaanstroming naar het oude niveau, bij afname van de temperatuur). De precieze vorm van de hysteresis-curve kennen we niet, noch waar we ons momenteel bevinden op die curve.



Figuur 4: De golfstroom

Een significante afname van de thermohaline circulatie zal grote gevolgen kunnen hebben onder andere voor de Noord-Atlantische regio. Er zijn sterke aanwijzingen dat stilvallen van de THC in het verleden is voorgekomen, binnen een periode van enkele tientallen jaren. Zo is bijvoorbeeld gevonden dat het koudste interval van de laatste 20.000 jaar is opgetreden toen de Atlantische oceaancirculatie stilviel, nadat ijsbergen in de Noord-Atlantische Oceaan terecht kwamen, zo'n 17.500 jaar geleden. Deze regionale extreme klimaatgebeurtenis begon plotseling en duurde zo'n tweeduizend jaar. Dit koude interval werd gevolgd door een versnelling van de oceaancirculatie en een aanzienlijk warmer klimaat boven Noord-Europa en de Noord-Atlantische regio (McManus et al., 2004). Een NASA-onderzoek laat zien dat de Noord-Atlantische oceaancirculatie eind jaren negentig aanzienlijk verzwakt is vergeleken met de circulatie in de jaren zeventig en tachtig (Häkkinen and Rhines, 2004). Het tropische oceaانwater is veel zouter geworden gedurende de laatste 40 jaar terwijl de oceanen dichterbij de polen toe zouter zijn geworden (Curry et al., 2003). Als het noordelijk deel van de Atlantische Oceaan te zoet wordt, zou het kunnen gebeuren dat het water niet meer naar de diepte zinkt en dat de THC gaat verzwakken.

Hoe de THC zich in deze eeuw zal gaan ontwikkelen, hangt in sterke mate af van de respons van de uitwisseling van warmte en zoet water op de toenemende concentratie van broeikasgassen (Clark et al., 2002). Het IPCC-rapport van 2001 geeft aan dat een verzwakking van de THC in deze eeuw zou kunnen optreden, samenhangend met de toenemende broeikasgasconcentraties. Enkele van de in dat verband toegepaste modellen suggereren zelfs een stilvallen van de THC. Figuur 5 laat op basis van een modelberekening zien wat het stilvallen van de golfstroom voor Noordwest-Europa zou kunnen betekenen. Experts schatten momenteel dat er een kans van tenminste 5% is op een compleet stilvallen van de THC bij een mondiaal gemiddelde opwarming



Figuur 5: Een voorbeeldberekening van het stilvallen van de golfstroom (Wood et al., 2005)

van 2° Celsius ten opzichte van preïndustrieel en dat die kans zelfs groter is dan 50% als de opwarming boven de 4 à 5° Celsius komt. De experts verwachten voorts een afzwakking van de Noord-Atlantische oceaanstrooming van 10-50% in deze eeuw, bij een CO₂-verdubbelings-scenario. In een recente publicatie (Schlesinger et al., 2005) wordt gesteld dat de kans op het stilvallen van de THC tussen nu en ca. 2200 zonder klimaatbeleid groter is dan 50%.

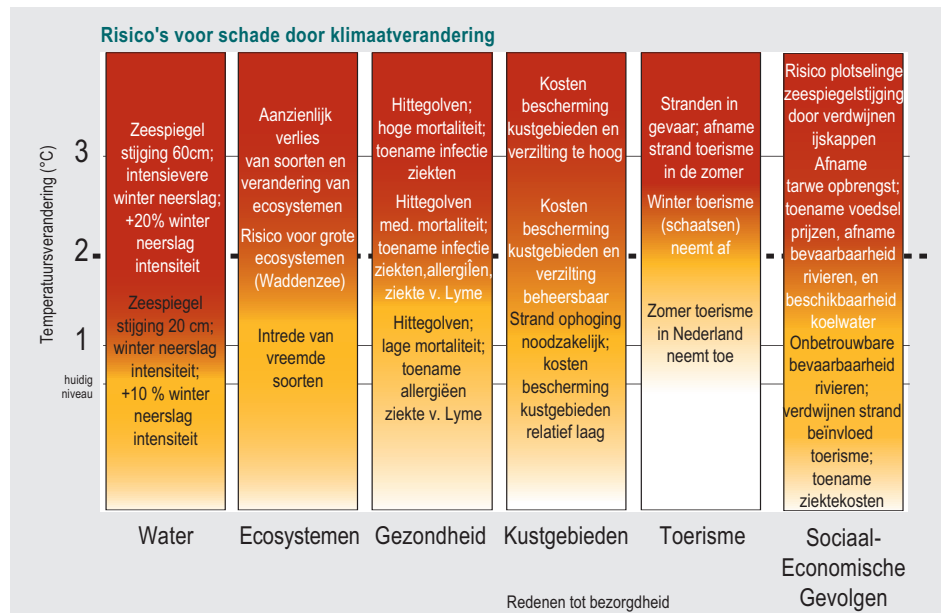
Voor een risico-assessment van het stilvallen van de THC is inzicht nodig in de waarschijnlijkheid van voorkomen en in de gevolgen daarvan. Het afschatten van de kans op een dergelijke gebeurtenis wordt bemoeilijkt door de hoge mate van onzekerheid in de toegepaste modellen (Wood et al., 2005). De hiervoor genoemde cijfers ten aanzien van het stilvallen van de THC zijn dan ook speculatief te noemen. Voor meer gedegen antwoorden zijn verdere waarnemingen en modelexperimenten noodzakelijk.

De uiteindelijke consequenties van het verzwakken of zelfs stilvallen van de THC hangen van een aantal aspecten af: de regionale afkoeling in West Europa als gevolg van het stilvallen van de THC, de regionale opwarming door het voortschrijdende broeikas-effect, en de grootte van het warmtetransport door de oceaan naar de Noord-Atlantische regio. Er is hierbij ook nog sprake van grote verschillen in *snelheid* van verandering; de afzwakking/het stilvallen van de THC zal zich, *indien* dit verschijnsel optreedt, waarschijnlijk afspelen over een periode van één tot enkele decennia, terwijl de mondiale opwarming zich zal manifesteren over periodes met een orde van grootte van honderd jaar. Overigens zal bij het stilvallen van de THC de mondiale opwarming doorgaan en kan het dus leiden tot een versterkte opwarming in andere gebieden.

4. Effecten voor Nederland

In een recent uitgevoerde studie is gekeken naar de gevolgen voor Nederland van een opwarmingsrange tot 4° Celsius voor water, ecosystemen, gezondheid, de kustzone, toerisme en naar de socio-economische gevolgen. De studie is gedaan onder leiding van het Instituut voor Milieuvraagstukken van de Vrije Universiteit Amsterdam, in het kader van het subprogramma Wetenschappelijke Assessment en Beleidsanalyse van het Netherlands Research Programme on Climate Change. De uitkomsten van deze studie, verkregen via een Participative Integrated Assessment met allerlei belanghebbenden, zijn gevisualiseerd weergegeven in figuur 6.

De conclusie uit de studie is dat één van de grootste ‘perceived reasons for concern’ voor Nederland op het gebied van water ligt; Nederland zal in ernstige mate worden beïnvloed door klimaatverandering via veranderingen in het watersysteem. Zo wordt bijvoorbeeld verwacht dat de winterafvoeren van Rijn en Maas zullen toenemen, terwijl de zomerafvoeren zullen afnemen. Een stijgende zeespiegel zal de waterafvoer naar zee belemmeren. Bij een lokale zeespiegelstijging van meer dan 3 mm per jaar (oftewel 30 cm per eeuw) zal een deel van het Waddengebied verloren gaan. De zoute kwel in gebieden rond het IJsselmeer zal naar verwachting toenemen. Het onderwater lopen van polders en zoutwater-intrusie zullen een gewoon verschijnsel worden en er zullen in de zomer watertekorten gaan optreden. Als gevolg van de verzilting en droogte- en vernattingsschade door het meer en intenser optreden van weersextremen, zullen effecten op de voedselproductie kunnen optreden (Verhagen, 2001).



Figuur 6: Redenen tot bezorgdheid voor Nederland

Ten slotte zal door de toenemende temperatuur en de afnemende waterbeschikbaarheid de beschikbaarheid van koelwater voor industrie en energiecentrales afnemen. Dit probleem kan door investering in adaptatiemaatregelen het hoofd worden geboden. Voor wat betreft waterbeheer betreffen deze maatregelen o.a. het verbeteren van retentie- berging- en afvoersystemen. De daarmee gemoeid zijnde kosten worden geschat op 1,2 miljard Euro, uitgaande van een klimaatscenario van plus 2° Celsius voor 2100.

Onder de betrokken wetenschappers en belanghebbenden in het project was er overeenstemming dat op basis van de huidige stand der wetenschap een doelstelling van 2° Celsius wereldgemiddelde temperatuurstijging de meest redelijke langetermijn doelstelling voor Nederland lijkt te zijn, met name omdat men de risico's op onomkeerbare effecten wil uitsluiten.

Opgemerkt moet word dat de keuze van een dergelijke doelstelling voorbehouden is aan de politiek.

Literatuurlijst

- Abdalati, W. and Steffen, K. (2001), Greenland ice sheet melt extent: 1979-1999, *J. Geophys. Res.*, 106 (D24), p. 33, 983-33,988
- ACIA (2004), Impacts of a warming arctic. Final Report Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, UK, 146p; Als de Noordpool warmer wordt, Uitgeverij Veen Magazines B.V.
- Arnell, N.W., Cannell, M.G.R., Hulme, M., Kovats, R.S., Mitchell, J.F.B., Nicholls, R.J., Parry, M.L. Livermore, M.T.J. and White, A. (2002), The consequences of CO₂ stabilisation for the impacts of climate change, *Climatic Change* 53, 413-446
- Arnell, Nigel, W. (2005), Climate change and water resources: a global perspective, In: abstracts of the International Symposium on Stabilisation of Greenhouse Gases: Avoiding dangerous climate change, 1-3 February, Met Office, Exeter, United Kingdom
- Bakkenes, Michel, Bas Eickhout and Rob Alkemade (2005), Ecosystem impacts of different climate stabilization scenarios, submitted to *Global Environmental Change*
- Burgmann, H. (1997), Sensitivity of forests in the European Alps to future climatic change, *Climate Research* 8, 35-44
- Busby, J.R. (1988), Potential implications of climate change on Australia's flora and fauna, in Pearman, G.I. (eds.), CSIRO Division of Atmospheric Research, Melbourne, pp. 387-388
- Cabanes, A. Cazenave, C. Le Provost (2001), *Science* 294, 840
- Church, J.A. and J.M. Gregory (2001), Sea level change, In: *Encyclopedia of Ocean Sciences*, J.H. Steele and K.K. Turekian eds., Academic Press, London
- Clark, Peter U., Nicklas G. Pisas, Thomas F. Stocker, Andrew J. Weaver (2002), The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change, *Nature*, vol. 415, p. 863 - 869, February, 2002
- Clark, Peter U., Nicklas G. Pisas, Thomas F. Stocker and Andrew J. Weaver (2002), The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change, *Nature*, vol. 415, 21 February 2002
- Council of the European Union, 15962/04 (Presse 357), 2632nd Council Meeting, Brussels 20 December 2004
- Cowling, S.A., Cox, P.M., Betts, R.A., Ettwein, V.J., Jones, C.D., Maslin, M.A. en Spall, S.A. (2003), Contrasting simulated past and future responses of the Amazon rainforest to atmospheric change; *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, in press
- Cox, P.M., Betts, R.A., Collins, M., Harris P.P., Huntingford, C. and Jones C.D. (2004), Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century, *Theoretical and Applied Climatology* 78, 137-156
- Curry, R., Dickson, B. and Yashayew, I. (2003), A change in the freshwater balance of the Atlantic Ocean over the past four decades, *Nature*, vol. 426, p. 18-25, December 2003
- Derocher, A.E., Lunn, N.J. and Stirling, I. (2002), Polar bears in a changing climate, *Integrative and Comparative Biology* 42, 1219-1219
- Dyurgerov, M. (2003), Mountain and subpolar glaciers show an increase in sensitivity to climate warming and intensification of the water cycle, *Journal of Hydrology*, vol. 282, Issues 1-4, pg. 164-176
- Eickhout, B., M.G.J. den Elzen en D.P. van Vuuren, 2003. Multi-gas emission profiles for stabilising greenhouse gas concentrations: Emission implications of limiting global temperature increase to 2°C. RIVM Rapport no. 728001026, Milieu- en Natuurplanbureau, Bilthoven
- Elzen, Michel den and Malte Meinshausen (2005), Emission implications of long-term climate targets, In: abstracts of the International Symposium on Stabilisation of Greenhouse Gases: Avoiding dangerous climate change, 1-3 February, Met Office, Exeter, United Kingdom
- European Climate Forum (ECF) (2004), Press Release, What is dangerous climate change?
- Fischer, G., Shah, M., van Velthuizen, H. and Nachtergaele, F. (2001), Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century, Laxenburg, Austria, IIASA: 33
- Folkestad, Tonje, Mark New, Jed O. Kaplan, Josefino C. Comiso, Sheila Watt-Cloutier, Terry Fenge, Paul Crowley and Lynn D. Rosentrafter (2005), Evidence and Implications of Dangerous Climate Change in the Arctic, In: abstracts of the International Symposium on Stabilisation of Greenhouse Gases: Avoiding dangerous climate change, 1-3 February, Met Office, Exeter, United Kingdom

- Gitay, H., A. Suarez, R.T. Watson, & D.J. Dokken (2002), Climate change and biodiversity; IPCC Technical paper 5, April 2002, 77p
- Gregory, J.M. and J.A. Lowe (2000), Predictions of global and regional sea-level rise using OAGCMs with and without flux adjustment, *Geophys. Res. Lett.*, 27 (19), p. 3069-3072
- Gregory, J.M., P. Huybrechts and S.C.B. Raper (2004), Threatened loss of the Greenland ice-sheet, *Nature*, 428, 6983, pg(s). 616
- Gupta, J. and Asselt van H. (eds.) Re-evaluation of the Netherlands' long-term climate targets, VU-IvM E-04/07, report in review
- Hadley Centre (2005), Stabilising climate to avoid dangerous climate change – a summary of relevant research at the Hadley Centre, Exeter
- Hannah, L., Midgely, G.F., Lovejoy, T., Bond, W.J., Bush, M., Lovett, J.C. Scott, D. and Woodward, F.J. (2002), Conservation of Biodiversity in a Changing Climate, *Conservation Biology* 16, 264-268
- Hansen, James E., A slippery slope: how much global warming constitutes 'Dangerous anthropogenic interference?', editorial submitted to *Climatic Change*
- Hare, W.L. (2003), Assessment of knowledge on impacts of climate change-Contribution to the specification of Art. 2 of the UNFCCC, Background report to the WBGU special report 94
- Hare, B. and Meinshausen, M. (2004). How much warming are we committed to and how much can be avoided? PIK report 93, Potsdam institute for climate impact research, Potsdam.
- Hare, Bill (2005), Relationship between increases in global mean temperature and impacts on ecosystems, food production, water and socio-economic systems, In: abstracts of the International Symposium on Stabilisation of Greenhouse Gases: Avoiding dangerous climate change, 1-3 February, Met Office, Exeter, United Kingdom
- Hilbert, D.W., Ostendorf, B. and Hopkins, M.S. (2001), Sensitivity of tropical forests to climate change in the humid tropics of north Queensland, *Austral Ecology* 26, 590-603
- Hilbert, D.W., Bradford, M., Parker, T. and Westcott, D.A. (2003), Golden bowerbird (*Prionodura newtonia*) habitat in past, present and future climates: predicted extinction of a vertebrate in tropical highlands due to global warming, *Biological Conservation*, in press, corrected proof
- Hitz, Samuel, Joel Smith (2004), Estimating global impacts from climate change, *Global Environmental Change* 14, 201-218
- Hoegh-Guldberg, O. (1999), Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs, *Marine and Freshwater Research* 50, 839-866
- Huybrechts, P. and de Wolde, J.J. (1999), *J. Clim.* 12, 2169-2188
- IPCC (2001a), Third Assessment Report, The Scientific Basis, Cambridge University Press
- IPCC (2001b), Third Assessment Report, Impacts, Adaptation and Vulnerability, Cambridge University Press
- IPCC (2001c), Third Assessment Report, Mitigation, Cambridge University Press
- Johannessen, O.M., Bengtsson, L., Miles, M.W., Kuzmina, S.I., Semenov, V.A., Genrikh, V.A., Nagurnyi, A.P., Zakharov, V.F., Bobylev, L.P., Petterson, L.H., Hasselmann, K. and Cattle, H.P. (2004), Arctic climate change: observed and modeled temperature and sea-ice variability, *Tellus A* 56, 328-341
- Klein Tank, Albert (2004), Changing Temperature and Precipitation extremes in Europe's Climate of the 20th century, Thesis
- Kundzewicz Z.W., M.L. Parry; W. Cramer, J.I. Holten et al (2001) Europe, In: IPCC third assessment report WGII, Chapter 13: 641-692, Cambridge University Press
- Lal, M., Harasawa, H., Murdiyarso, D., Adger, W.N., Ilyas, M. and et al. (2001), Impacts, adaptation and vulnerability, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 553-590
- Leemans, Rik, Bas Eickhout (2004), Another reason for concern: regional and global impacts on ecosystems for different levels of climate change, *Global Environmental Change* 14, 219-228
- Leemans, Rik and Arnold van Vliet (2004), Extreme weather: does nature keep up? Observed responses of species and ecosystems to changes in climate and extreme weather events: many more reasons for concern, Wageningen UR/WWF report
- Lewis, Simon, L., Oliver L. Philips, Tim R. Baker, Yadvinder Malhi and John Lloyd, (2005), Tropical forests and atmospheric carbon dioxide: current knowledge and potential future scenarios, In: abstracts of the International Symposium on Stabilisation of Greenhouse Gases: Avoiding dangerous climate change, 1-3 February, Met Office, Exeter, United Kingdom

- Lowe, Jason, A., Jonathan M. Gregory, Jeff Ridley, Philippe Huybrechts and Robert J. Nicholos (2005), The role of sea level rise and the Greenland ice sheet in dangerous climate change and issues of climate stabilisation, In: abstracts of the International Symposium on Stabilisation of Greenhouse Gases: Avoiding dangerous climate change, 1-3 February, Met Office, Exeter, United Kingdom
- McManus, J.F., Francois, R., Gherardi, J.-M., Keigwin, L.D. and Brown-Leger, S. (2004), Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes, *Nature*, vol. 428, p. 834-837, April 2004
- Mercer, J. (1978), *Nature* 27, 321
- Midgley, G.F., Hannah, L., Millar, D., Rutherford, M.C. and Powrie, L.W. (2002), Assessing the vulnerability of species in a biodiversity richness to anthropogenic climate change in a biodiversity hotspot, *Global Ecology and Biogeography* 11, 445-452
- Mitchell, J.F.B., T.J. Johns, W.J. Ingram and J.A. Lowe (2000), The effect of stabilising atmospheric carbon dioxide concentrations on global and regional climate change, *Journal of Geophysical Research*, 27, 2977-2980
- Ni, J. (2001), Carbon Storage in Terrestrial Ecosystems of China: Estimates at Different Spatial Resolutions and Their Responses to Climate Change, *Climatic Change* 49, 339-358
- Nicholls, Robert, J. (2005), Climate Stabilisation and Impacts of Sea-Level Rise, In: abstracts of the International Symposium on Stabilisation of Greenhouse Gases: Avoiding dangerous climate change, 1-3 February, Met Office, Exeter, United Kingdom
- Nicholls, R.J. and J.A. Lowe, 2004. Benefits of mitigation of climate change for coastal areas. *Global Environmental Change*, 14: 229-244.
- O'Neill, Brian C. and Michael Oppenheimer (2002), Dangerous climate impacts and the Kyoto Protocol, *Science*, vol. 296, p. 1971-1972, 14 June 2002
- Parker, David (2004), News release 16 December 2004, Met Office, Exeter, United Kingdom
- Parmesan, C. and Yohe, G. (2003), A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems, *Nature* 421, no. 6918, 37-42, 2 January
- Parry, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Fischer, G. and Livermore, M. (1999), Climate change and world food security: a new assessment, *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 9, S51-S67
- Parry, M., Arnell, N., McMichael, T., Nicholls, R., Martens, P., Kovats, S., Livermore, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A., and Fischer, G. (2001), Millions at risk: defining critical climate change threats and targets, *Global Environmental Change* 11, 181-183
- Parry, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M. and Fischer, G. (2004), Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios, *Global Environmental Change* 14, 53-67
- Pittock, B., Wratt, D., Basher, R., Bates, B., Finlayson, M., Gitay, H., Woodward, A., Arthington, A., Beets, P. and Biggs, B. (2001), Chapter 12, Impacts, adaptation and vulnerability, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 591-639
- Rapley, Ch. (2005), Antarctic ice sheet and sea level rise, British Antarctic survey, In: abstracts of the International Symposium on Stabilisation of Greenhouse Gases: Avoiding dangerous climate change, 1-3 February, Met Office, Exeter, United Kingdom
- Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R., Schneider S.H., Rosenzweig, C. and Pounds, J.A. (2003), Fingerprints of global warming on wild animals and plants, *Nature* 421, no. 6918, 57-60, 2 January
- Rutherford, M.C., Midgley, G.F., Bond, W.J., Powrie, L.W., Musil, C.F., Roberts, R. and Allsopp, J. (1999), South African Country Study on Climate Change, Pretoria, South Africa, Terrestrial Plant Diversity Section, Vulnerability and Adaptation, Department of Environmental Affairs and Tourism
- Schär, Christoph, Gerd Jendritzky, Hot news from summer 2003, *Nature*, vol. 432, p. 559 - 560, december 2004
- Schlesinger, Michael E., Jianjun Yin, Gary Yohe, Natalia G. Andronova, Sergey Malyshev, Bin Li (2005), In: abstracts of the International Symposium on Stabilisation of Greenhouse Gases: Avoiding dangerous climate change, 1-3 February, Met Office, Exeter, United Kingdom
- Schneider, Stephen, H. and Janice Lane (2005), An Overview of 'Dangerous' Climate Change, In: abstracts of the International Symposium on Stabilisation of Greenhouse Gases: Avoiding dangerous climate change, 1-3 February, Met Office, Exeter, United Kingdom
- Sheppard, C.R.C. (2003), Predicted recurrences of mass, coral mortality in the Indian Ocean, *Nature* 425, 294-297

- Smith, J.B., Schellnhuber, H.-J., Mirza, M.M.Q., Frankhauser, S., Leemans, R., Erda, L., Ogallo, L., Pittock, B., Richels, R., and Rosenzweig, C. (2001), Chapter 19: Vulnerability to climate change and reasons for concern: A synthesis, *Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 915-967
- Sorensen, L.G., Goldberg, R., Root, T.L. and Anderson, M.G. (1998), Potential effects of global warming in waterfowl populations breeding in the Northern Great Plains, *Climate Change* 40, 343-369
- Stainforth, D.A., Alna, T., Christensen, C., Collins, M., Faull, N., Frame, D.J., Kettleborough, J.A., Knight, S., Martin, M., Murphy, J.M., Piani, C., Sexton, D., Smith, L.A., Spicer, R.A., Thorpe, A.J. and Allen, M.R. (2005). Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases, *Nature* (433), pp. 403-406.
- Stott, Peter A., D.A. Stone, M.R. Allen, Human contribution to the European heatwave of 2003, *Nature*, vol. 432, p. 610 – 614, December 2004
- Theurillat, J.-P. and Guisan, A. (2001), Potential Impact of Climate Change on Vegetation in the European Alps: A Review, *Climatic Change* 50, 77-109
- Uitvoeringsnota Klimaatbeleid, deel I: Binnenlandse maatregelen, VROM, juni 1999, Den Haag
- Verhagen, A. (2001), *Klimaatverandering in Nederland: Gevolgen en aanpassingsmogelijkheden*. Eindrapportage NOP II.
- Vervolgnota Klimaatverandering, VROM, 24 juni 1996
- Williams, S.E., Bolitho, E.E. and Fox, S. (2003), Climate change in Australian tropical rainforests: an impending environmental catastrophe, *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 270, 1887-1892
- Wood, Richard, Matthew Collins, Jonathan Gregory, Glen Harris and Michael Vellinga (2005), Towards a risk assessment for shutdown of the Atlantic thermohaline circulation. In: abstracts of the International Symposium on Stabilisation of Greenhouse Gases: Avoiding dangerous climate change, 1-3 February, Met Office, Exeter, United Kingdom
- Zwally, H.J., Abdalati, W., Herrin, T., Larson, K., Saba, J. and Steffen, K. (2002), Surface melt-induced acceleration of Greenland ice-sheet flow, *Science*, vol. 297, issue 5579, p. 218-222, 12 July 2002

