

# **Broeikaseffect, Klimaatverandering en het Weer**

P. Vellinga en W.J. van Verseveld

R-99/03

Januari 1999

**In opdracht van het Wereld Natuur Fonds**



IVM

Instituut voor Milieuvraagstukken

Vrije Universiteit

De Boelelaan 1115

1081 HV Amsterdam

Tel. 020-4449 555

Fax. 020-4449 553

E-mail: [secr@ivm.vu.nl](mailto:secr@ivm.vu.nl)

Deze publicatie kan besteld worden bij:

V.U. Boekhandel/Uitgeverij

De Boelelaan 1105

1081 HV Amsterdam

Tel. 020 - 4449410

Fax. 020 - 6462719

E-mail: [info@vubookhandel.nl](mailto:info@vubookhandel.nl)

En is tevens verkrijgbaar op website:

<http://www.vu.nl/IVM/projects/research/klimaat.pdf>

**ISBN: 90-5383-653-5**

**Copyright © 1999, Instituut voor Milieuvraagstukken**

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de houder van het auteursrecht.

## Voorwoord

De komende jaren zullen in Nederland forse inspanningen worden gedaan op het gebied van energiebesparing en duurzame energie. Het beleid zal minder vrijblijvend worden. Het belangrijkste motief voor deze inspanningen is het klimaatprobleem. Energiebesparing en (zeker met het oog op de toekomst) duurzame energie vormen de kern van de strategie om de noodzakelijke trendbreuk in CO<sub>2</sub>-emissies te realiseren. Het gaat daarbij om grote bedragen. Alleen al om de Kyoto-verplichting te halen zal jaarlijks ca. tien miljard gulden moeten worden geïnvesteerd.

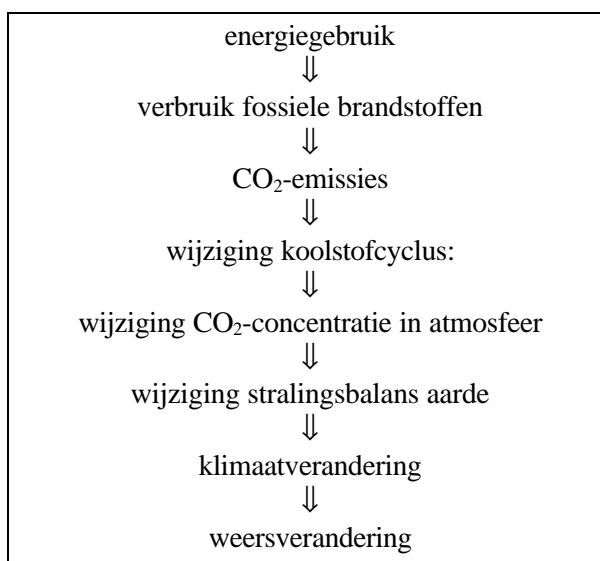
De extra inspanningen op het gebied van energiebesparing en duurzame energie kunnen alleen succesvol zijn wanneer de samenleving erachter staat, wanneer duidelijk is waarom deze inspanningen nodig zijn. Vastgesteld moet echter worden dat met name het thema energiebesparing op dit ogenblik onvoldoende leeft. Iedereen is voor energiebesparing, maar een gevoel van urgentie ontbreekt. Energiebesparing wordt gezien als een oud thema dat al voor het grootste deel is aangepakt. De overtuiging dat er dankzij nieuwe en technologische ontwikkelingen nog enorme besparingsmogelijkheden zijn, is te weinig aanwezig. Het oude milieumotief - de eindigheid van fossiele brandstoffen - wordt mede door nieuwe vondsten en betere winningstechnieken nauwelijks meer als urgent gezien. Bovendien is door de lage energieprijzen de economische aantrekkelijkheid van veel ingrijpende energiebesparingsmaatregelen beperkt.

Tegelijkertijd moet worden vastgesteld dat het nieuwe probleem - klimaatverandering - nog te veel wordt gezien als een abstract milieuprobleem dat zich pas in de verre toekomst zal manifesteren. Bovendien is de relatie tussen energiegebruik en klimaatverandering nauwelijks bekend. Velen denken eerder aan spuitbussen. Er is met andere woorden een communicatieprobleem.

Laten we voorop stellen dat klimaatverandering inderdaad een buitengewoon complex en omvattend milieuprobleem is. Het gaat in feite om een reeks relaties, waarvan een aantal nog met grote onzekerheden is omgeven.

Als we ons beperken tot de CO<sub>2</sub>-emissies, in Nederland verantwoordelijk voor 80% van de uitstoot van broeikasgassen, kan het probleem als volgt worden gedefinieerd (zie kader):

Het schema beschrijft het verband tussen ons energieverbruik en het weer. De CO<sub>2</sub>-uitstoot is bekend. De veranderingen in de koolstofcyclus en in de stra-



lingsbalans van de aarde zijn op hoofdlijnen bekend. Op verzoek van het Wereld Natuur Fonds heeft het Instituut voor Milieuvraagstukken van de VU een antwoord gezocht op de vraag in hoeverre de menselijke invloed op het klimaat nu al meetbaar is en wat moet worden verwacht bij een voortgaande concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer.

Het Wereld Natuur Fonds vindt de uitkomsten van deze studie verontrustend en concludeert op basis van dit rapport dat het verantwoord is om het klimaatprobleem kernachtig samen te vatten in de volgende uitspraak: ons energiegebruik brengt het weer in de war. Dat is wat ons betreft de nieuwe realistische milieuboodschap waarmee energiebesparing en duurzame energie moeten worden 'verkocht'. De klimaatverandering mag niet uit de hand lopen. de gevolgen daarvan voor zowel de samenleving als de natuur kunnen dramatisch zijn.

Wij willen daarbij voor alle duidelijkheid benadrukken dat het wetenschappelijk gezien niet mogelijk is om afzonderlijke gebeurtenissen zoals bijvoorbeeld de extreme regenval in Nederland van de afgelopen tijd één-op-één te koppelen aan klimaatverandering. Om een vergelijking te maken: we weten dat roken longkanker veroorzaakt, maar we kunnen van een individueel geval van longkanker nooit met zekerheid zeggen of dit het gevolg is van roken.



Sible Schöne

Wereld Natuur Fonds

## **Inhoud**

Voorwoord

1. Inleiding en Samenvatting	1
2. Waargenomen veranderingen in het klimaat	2
Temperatuur	2
Neerslag	3
Zeespiegelstijging	4
Gletsjers	4
Luchtcirculatiepatronen	5
El Niño	5
Cyclonen	6
Koraalriffen, insecten en alpine planten	6
3. Toekomstige veranderingen in het klimaat	8
Temperatuur	8
Neerslag	9
Zeespiegelstijging	9
Circulatiepatronen en cyclonen	9
Ecosystemen	10
Maatschappelijke aspecten	10
4. Risico's ten aanzien van een destabilisatie van het klimaat	12
Warme golfstroom	12
Antarctica	12
Overige processen	13
5. Conclusies	15
Referenties	17

## 1. Inleiding en Samenvatting

Op verzoek van het Wereld Natuur Fonds hebben wij als onderzoekers van het Instituut voor Milieuvraagstukken van de Vrije Universiteit van Amsterdam een overzicht en een analyse gemaakt van de wetenschappelijke kennis over het broeikasewfect, klimaatverandering en het weer.

Wij hebben hierbij gebruik gemaakt van het rapport van het Intergovernmental Panel on Climate Change van 1995 én van de meest recente studies van klimaatverandering en het optreden van extreme weersgebeurtenissen.

Een groot deel van het materiaal dat wij hebben geïnventariseerd en geanalyseerd is direct voor iedereen beschikbaar via het internet. Als lezer kunt u via internet nadere informatie inwinnen over de waarnemingen en de conclusies die door ons naar voren worden gebracht.

De vraag die in deze studie centraal staan is de volgende: in hoeverre is de menselijke invloed op klimaat nu al meetbaar en wat moet worden verwacht bij een voortgaande stijging van de concentraties van broeikasgassen.

Onze voorzichtige conclusie is dat de eerste effecten van de uitstoot van CO<sub>2</sub> en andere broeikasgassen op het wereldklimaat zichtbaar beginnen te worden. Het gaat hierbij om veranderingen in temperatuur, neerslag, zeespiegelstijging, luchtcirculatiepatronen en ecosystemen. Voor specifieke gebieden gaat dit gepaard met veranderingen in de aard en de frequentie van extreme weersomstandigheden.

Wij trekken deze conclusie voorzichtig, omdat de waargenomen veranderingen theoretisch ook toegeschreven kunnen worden aan een spontane, natuurlijke verandering van het klimaat. De kans hierop is echter klein.

De onderbouwing van onze conclusies is weergegeven in dit rapport en de daarin besproken studies. De opbouw van het rapport is als volgt. Hoofdstuk 2 is gewijd aan de metingen en de signalen van klimaatverandering die daaruit naar voren komen. Het gaat daarbij om temperatuur, neerslag, zeespiegelstijging, gletsjers, El Niño, cyclonen, luchtcirculatiepatronen en ecosystemen. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op mogelijke toekomstige klimaatontwikkelingen. Tot slot behandelt hoofdstuk 4 de mogelijkheden van een destabilisatie van het wereldklimaat. De conclusies volgen in hoofdstuk 5.

Het onderzoek is uitgevoerd door prof. dr. ir. P. Vellinga en W.J. van Verseveld van het Instituut voor Milieuvraagstukken. De onderzoekers zijn veel dank verschuldigd aan dr. A.P.M. Baede van het KNMI voor het attenderen op recente literatuur en voor zijn review van een eerdere versie van dit rapport. De verantwoordelijkheid voor de eindtekst en de conclusies berust geheel bij de onderzoekers van het IVM.

## 2. Waargenomen veranderingen in het klimaat

Het klimaat en de gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak zijn afhankelijk van de inkomende energie van de zon en de uitgaande energie in de vorm van infrarode straling die de aarde uitzendt. De broeikasgassen houden een deel van de uitgaande infrarode straling vast, met als gevolg dat de aarde een gemiddelde temperatuur heeft van 15 graden Celsius. Zonder dit natuurlijke broeikasewffect zou de temperatuur op aarde ver beneden het vriespunt zijn.

De concentraties van de broeikasgassen koolstofdioxide, methaangas, lachgas en andere broeikasgassen zoals CFK's zijn gestegen sinds het pre-industriële tijdperk, vooral sinds 1960. Zo ging koolstofdioxide van 280 ppmv<sup>1</sup> naar 360 ppmv, methaangas van 700 naar 1720 ppmv en lachgas van 275 naar 310 ppmv. Deze trends zijn voor een groot deel het gevolg van menselijke activiteiten zoals de verbranding van fossiele brandstoffen, landgebruik en industriële processen. Menselijke activiteiten leiden op deze wijze tot een versterking van het broeikasewffect, met klimaatverandering als gevolg. Uiteraard heeft dit gevolgen voor het weer en het optreden van extreme weersomstandigheden.

### Temperatuur

De gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak is over de afgelopen 130 jaar tussen de 0.3 en 0.6 graden gestegen. Omdat het klimaat ook op natuurlijke wijze varieert over decennia en eeuwen, is deze temperatuurstijging niet zonder meer toe te schrijven aan het versterkte broeikasewffect. Toch is uit systematische observaties naar voren gekomen dat het zeer onwaarschijnlijk is dat de mondiale opwarming en het ruimtelijk patroon daarvan geheel aan natuurlijke variabiliteit kan worden toegeschreven. Dit is dan ook de reden dat het IPCC2 in 1995 heeft geconcludeerd dat "the balance of evidence suggests a discernible human influence on global climate" (IPCC, 1995). Met andere woorden, het versterkte broeikasewffect draagt naar alle waarschijnlijkheid nu al bij aan de waargenomen veranderingen van het wereldklimaat.

Sinds deze uitspraak van de IPCC is de wereldgemiddelde temperatuur verder gestegen. Het jaar 1997 was tot voor kort het warmste jaar ooit gemeten. Maar inmiddels is bekend dat 1998 nog warmer is geweest. De top tien van de warmste jaren ooit wereldwijd gemeten (over de afgelopen 120 jaar), inclusief 1997 en 1998, vielen allemaal na 1981. De zes warmste hiervan deden zich sinds 1990 voor. Het temperatuurverloop over de afgelopen 100 jaar en andere metingen van het klimaat zijn te vinden op internet:

<http://www.ncdc.noaa.gov/ol/climate/research/1998/ann/ann98.html>

De temperatuursverandering is niet op alle plaatsen op aarde gelijk. De recente opwarming is het grootst tussen 40°N en 70°N. In een aantal gebieden, zoals de Noord Atlantische

---

1 280 ppmv is de pre-industriële concentratie van CO<sub>2</sub> in de atmosfeer; ppmv is parts per million by volume.  
2 Intergovernmental Panel on Climate Change, het panel waarin de klimaatonderzoekers wereldwijd samenwerken en periodiek verslag uitbrengen van hun bevindingen.

ocean ten noorden van 30°N en een aantal aangrenzende gebieden, is de temperatuur de afgelopen tientallen jaren gedaald (Houghton *et al.*, 1996).

Met de toename van de wereldgemiddelde temperatuur zal ook de aard en de frequentie van extreme weersomstandigheden veranderen. Het lijkt alsof dit verschijnsel in sommige delen van de wereld nu al zichtbaar wordt (Francis en Hengeveld, 1998). De logica hiervan is duidelijk: verschuiving van het gemiddelde brengt ontegenzeggelijk verandering in de aard en de frequentie van extremen. Het zou ook merkwaardig zijn wanneer we er nog niets van zouden merken, immers de gemiddelde wereldtemperatuur is reeds significant gestegen. Omdat het per definitie gaat om zeldzame gebeurtenissen (kans 1 op 100 of 1 op 1000 per jaar) zal het nog vele jaren van metingen kosten voordat dit verschijnsel statistisch volledig hard gemaakt kan worden.

## Neerslag

Een mondiale opwarming zal gemiddeld gesproken leiden tot meer verdamping en, daarmee samenhangend, tot meer neerslag. Toch is het moeilijk iets te zeggen over de precieze veranderingen die zich voordoen binnen de hydrologische cyclus. Enerzijds vanwege de complexe processen van verdamping, transport en neerslag en anderzijds vanwege de beperkte kwaliteit van de meetgegevens, korte meetperioden en gaten in de tijdreeksen. Ondanks deze beperkingen zijn er toch specifieke veranderingen gevonden in de neerslaghoeveelheden en -patronen.

Tussen 30°N en 70°N is er over het algemeen een stijging in de gemiddelde neerslag waargenomen. Dit geldt ook voor het gebied tussen de 0° en 70° Zuiderbreedte. In het gebied tussen de 0° en 30° Noorderbreedte is er over het algemeen sprake van een daling in de gemiddelde neerslag (Houghton *et al.*, 1996).

Naast globale veranderingen in de gemiddelde neerslag zijn er ook een aantal regionale veranderingen in de gemiddelde neerslag waargenomen. Zo is in Noord Amerika de jaarlijkse neerslag toegenomen (Karl *et al.*, 1993b; Groisman and Easterling, 1994). In het noorden van Canada en Alaska is een trend van toenemende neerslag waar te nemen gedurende de laatste 40 jaar (Groisman and Easterling, 1994). Gegevens van het zuiden van Canada en het noorden van de Verenigde Staten laten een stijging zien van 10-15% (Findlay *et al.*, 1994; Lettenmaier *et al.*, 1994). In het algemeen is er sprake van een stijging in de neerslag in Noord Europa en een daling in Zuid Europa. De hoeveelheid neerslag in de Sahel, West Afrika in de periode van 1960 tot 1993 was beduidend lager dan in de perioden daarvoor (Houghton *et al.*, 1996).

In een warmere wereld zal zeer waarschijnlijk meer neerslag tegelijk vallen en de gemiddelde bui zal daarbij zwaarder zijn. Of er ergens neerslag valt hangt af van de relatieve vochtigheid: de verhouding tussen de concentratie van waterdamp en de verzadigingswaarde. Wanneer de relatieve vochtigheid 100% bereikt condenseert de waterdamp en is er neerslag mogelijk. Computermodellen laten zien dat de verspreiding van de relatieve vochtigheid nauwelijks verandert als het klimaat zich wijzigt. Wat wel verandert bij oplopende temperaturen is de concentratie waterdamp in de lucht op het moment dat het verzadigingspunt bereikt wordt (toename van 6% per graad Celsius temperatuurstijging). In een warmer klimaat zal daarom niet zozeer een verandering optreden in de neerslagfre-

quentie (gerelateerd aan het aantal malen dat de relatieve vochtigheid de 100% bereikt), maar wel in de *hoeveelheid* neerslag die dan valt (samenhangend met de hoeveelheid waterdamp die op het punt van verzadiging in de lucht aanwezig is).

Verscheidene analyses van neerslagwaarnemingen geven aan dat de buien-intensiteit de afgelopen tientallen jaren is toegenomen. In de Verenigde Staten valt bijvoorbeeld gemiddeld 10% van de jaarlijkse neerslag tijdens de zeer hevige buien (waarbij minstens 50 mm valt op een dag). Aan het begin van deze eeuw was dit minder dan 8% (Karl *et al.*, 1997).

### Zeespiegelstijging

Over de laatste 100 jaar is het gemiddelde zeeniveau wereldwijd tussen de 10 en 25 cm gestegen. Op zich kan deze stijging beschouwd worden als een voortzetting van een eeuwenlange autonome zeespiegelstijging, zij het dat de stijging de afgelopen 100 jaar groter is dan daarvoor. In de afgelopen 20 jaar is een versnelling opgetreden in de stijging van de zeespiegel. Een grote onzekerheid in het vaststellen van de snelheid van zeespiegelstijging zijn de verticale landbewegingen die in de metingen in meer of mindere mate worden meegenomen. Sinds 1990 zijn er verbeterde methoden ontwikkeld om de verticale landbewegingen uit de metingen te filteren. Inmiddels kan er met zekerheid worden vastgesteld dat het volume aan oceaanwater is toegenomen.

Het is zeer waarschijnlijk dat deze volumetoename en de stijging van de zeespiegel is gerelateerd aan de toename van de gemiddelde temperatuur op aarde. Anders geformuleerd: het is onwaarschijnlijk dat een wereldwijd gemiddelde temperatuurstijging geen invloed heeft op het niveau van de zee. Immers, alleen al het opwarmen van de oppervlaktelaag van de oceanen (met 0,3 à 0,6°C over de afgelopen 100 jaar) en de daarmee gepaard gaande expansie van het volume aan oceaanwater leidt tot 2 tot 7 cm zeespiegelstijging. Het smelten en terugtrekken van gletsjers en ijskappen, zoals is waargenomen, geeft een additionele zeespiegelstijging van 2 tot 5 cm.

De waargenomen zeespiegelstijging zou kunnen wijzen op het smelten van ijsmassa's op Antarctica en Groenland. Maar deze ijskappen kunnen ook groeien vanwege een toename van (sneeuw)neerslag. De waarnemingen aan deze ijskappen zijn vooralsnog onvoldoende nauwkeurig om hierover een uitspraak te doen (IPCC, 1995).

### Gletsjers

Gletsjers smelten over de gehele wereld. In de afgelopen eeuw hebben de gletsjers op de Mount Kenya 92% van hun massa verloren en op de berg Kilimanjaro 73%. Het aantal gletsjers in Spanje is gedaald van 27 naar 13 sinds 1980. In de Europese Alpen is het verlies aan ijs ongeveer 50% gedurende de afgelopen eeuw. De Nieuw-Zeelandse gletsjers zijn in volume afgenomen met 26% sinds 1980. In Rusland heeft de Kaukasus ongeveer 50% van zijn glaciële ijs verloren in de laatste 100 jaar. Met laserinstrumenten is aangetoond dat de meeste gletsjers in Alaska zich terugtrekken. Theoretisch kan een warmere atmosfeer in de winter meer vocht vasthouden met een toename van sneeuwval als gevolg (zie ook bij 'Neerslag'). Omdat deze sneeuw niet meteen smelt kunnen de gletsjers en ijskappen groeien. In werkelijkheid echter hebben de warmere en langere zomers in de meeste gevallen de gletsjers sneller doen smelten dan ze in de winter worden opgebouwd.

Het is duidelijk waarneembaar dat gletsjers de afgelopen 100 jaar significant zijn geslonken in volume en oppervlakte, vooral in gebieden op midden- en lage breedten.

### Luchtcirculatiepatronen

Landoppervlakten kunnen minder warmte absorberen dan oceanen. Daarom zullen als gevolg van het versterkte broeikasewfect de oppervlaktetemperaturen boven land naar verwachting sneller stijgen dan boven oceanen. Hierdoor zullen de luchtcirculatiepatronen, de windsnelheden en het gedrag van depressies worden beïnvloed.

In sommige gebieden (de Verenigde Staten, de oostkust van Australië en de Noord Atlantische Oceaan) is er inderdaad een verandering waargenomen, in de vorm van een toename in het aantal lagedrukgebieden. In andere gebieden zoals de Duitse Bocht is geen stijgende trend in het aantal lagedrukgebieden waarneembaar (Houghton *et al*, 1996). In Nederland en noordwest Europa is er in de afgelopen 10 jaar sprake van een uitzonderlijk hoge gemiddelde temperatuur en van een aantal bijzonder zware neerslagepisodes. De waargenomen verschijnselen worden in verband gebracht met het optreden van een bepaald luchtcirculatiepatroon in de winter: cyclonale west-circulatie boven West- en Midden Europa. Dit circulatiepatroon gaat gewoonlijk gepaard met gemiddeld hogere temperaturen. De frequentie waarmee dit circulatiepatroon voorkomt en de daarmee samenhangende wintertemperaturen waren in de afgelopen 10 jaar aanzienlijk hoger dan in de voorgaande perioden met een overwegende west-circulatie. Ook de in Nederland opgetreden regenval in de Bilt in 1998 is hoger dan ooit gemeten. Indien we de historische meetreeks als maatstaf gebruiken is de kans op een jaarneerslag van de omvang van 1998 ongeveer 1:200 à 1:1000 per jaar (afhankelijk van de gekozen statistische benadering).

Het is niet goed mogelijk een één-op-één relatie te leggen tussen een bepaalde weersgebeurtenis of een bijzonder jaar en de wereldwijd waargenomen verhoging van de gemiddelde temperatuur. Een neerslag met een kans van 1 op 1000 per jaar is ook mogelijk binnen het normale klimaat. Het is echter wel opmerkelijk.

Een ander verschijnsel dat samenhangt met een verandering van circulatiepatronen is de recente droogte in Noord Afrika. De afgelopen 25 jaar is de Sahel veel droger geworden. In deze jaren is de grootste daling in regenval opgetreden en de daling bestrijkt de langste periode ooit, sinds er gemeten wordt met instrumenten. Dit heeft vermoedelijk te maken met verandering van oppervlaktetemperaturen van het zeewater van de Atlantische Oceaan. Lagere temperaturen ten noorden van de evenaar en hogere temperaturen ten zuiden van de evenaar zijn gecorreleerd aan de lagere neerslag in de Sahel. De verandering van de temperaturen van het oceaanwater leiden waarschijnlijk tot een verandering in de atmosferische circulatie die vervolgens een verandering geeft in de neerslag in de Sahel (Hulme and Kelly, zie internet:

[http://www.uea.ac.uk/menu/acad\\_depts/env/all/resgroup/cserge/](http://www.uea.ac.uk/menu/acad_depts/env/all/resgroup/cserge/).

### El Niño

De oost-west passaatwinden boven de Grote Oceaan zorgen ervoor dat het oppervlaktewater van de oceaan westwaarts wordt verplaatst. Het oppervlaktewater wordt hierbij warmer door de steeds langere blootstelling aan zonnearmte. El Niño's zijn de perioden

waarin de oost-west passaatwinden zwakker worden, waardoor het warmere water ineens weer oostwaarts beweegt en de Zuidamerikaanse kust bereikt. El Niño is een natuurlijk klimaatverschijnsel en komt gemiddeld circa eens in de 4 jaar voor. El Niño's worden in verband gebracht met droogtes en overstromingen in verschillende delen van de wereld. Het optreden van een El Niño heeft grote gevolgen voor landbouw, bossen (bosbranden), neerslag, watervoorraden, menselijke gezondheid en de samenleving in het algemeen (Trenberth, 1996).

El Niño's komen vaker voor sinds 1975 en de intensiteit en duur van de 1990-95 El Niño is een absoluut record gezien de metingen van de afgelopen 120 jaar. Volgens Van Oldenburgh, oceanografisch onderzoeker van het KNMI, is er echter op dit moment nog geen direct verband aan te tonen tussen de toename in intensiteit van El Niño's en de toename in de concentratie van broeikasgassen. Zoals hieronder is aangegeven wijzen andere onderzoekers echter wel op een dergelijk verband.

Waarnemingen over een groot gebied met een driehoekige vorm in de subtropische en tropische Stille Oceaan wijzen op een persistente en significante opwarming van de oceaantemperatuur aan de oppervlakte. Vanaf 1900 is deze snelheid  $+0.41^{\circ}\text{C}$  per 100 jaar, en vanaf 1971  $+2.9^{\circ}\text{C}$  per 100 jaar. De waargenomen trend kan niet goed verklaard worden als alleen rekening wordt gehouden met natuurlijke klimaatvariabiliteit. Het patroon van de temperatuurstijging komt sterk overeen met de klimaatmodeluitkomsten, aldus de onderzoekers Knutson en Manabe van het Nationale Oceanografische en Atmosferisch Instituut van de Verenigde Staten (Knutson and Manabe, 1998).

## **Cyclonen**

Verwacht mag worden dat klimaatverandering gepaard gaat met een verandering in het voorkomen en gedrag van cyclonen.

De afgelopen 10 jaar is een aantal zeer schadelijke cyclonen opgetreden, zoals Andrew en Mitch in het Caraïbisch gebied. Toch kan vooralsnog geen uitspraak worden gedaan over een samenhang van deze cyclonen met het versterkte broeikasewfect. Ook in het verleden zijn er perioden geweest met verhevigde cycloonactiviteit.

## **Koraalriffen, insecten en alpine planten**

Koraalriffen zijn complexe biologische systemen die bestaan uit een samenlevingsverband tussen algen en koraal. Verbleking van koraalriffen, veroorzaakt door abnormaal hoge oceaantemperaturen, houdt in dat de dichtheid van de algen afneemt of dat de hoeveelheid alg-pigmenten terugloopt. In 1980, 1982, 1987, 1992, 1994 en 1998 zijn koraal "bleaching episodes" (letterlijk: verblekingsperioden) waargenomen in de Great Barrier Reef nabij Australië. Koraal bleaching episodes zijn sinds de jaren '80 over de hele wereld frequenter geworden en IPCC concludeert dat deze grootschalige episodes gerelateerd zijn aan stijgende oceaantemperaturen.

Insecten zijn zeer gevoelig voor veranderingen in temperatuur en neerslag en behoren daarmee tot de beste indicatoren voor een veranderend klimaat. Het leefgebied van de di-

verse insectensoorten in Noord Amerika en Europa schuift noordwaarts, zo wordt gerapporteerd door diverse onderzoekers (Parmesan, 1996).

Alpine planten migreren naar grotere hoogten in de centrale Alpen van Oostenrijk en het oosten van Zwitserland, volgens onderzoekers van de Universiteit van Wenen. Lokale waarnemingen wijzen hier op een temperatuurstijging van 0.7°C in de afgelopen 90 jaar (Grabherr *et al.*, 1994).

### 3. Toekomstige veranderingen in het klimaat

Statistische analyse geeft met een grote mate van waarschijnlijkheid aan dat de recente stijging van de gemiddelde temperatuur op aarde in ieder geval voor een deel het gevolg is van de stijging van de concentratie van broeikasgassen. Dit geldt ook wanneer rekening wordt gehouden met de invloed van zonnevlekken en aerosolen<sup>3</sup> (Tol en Vellinga, 1998).

Met behulp van gedetailleerde modelstudies zijn de waargenomen patronen van temperatuurverandering vergeleken met berekeningen van de klimaatverandering als gevolg van de toename van broeikasgassen en de toename van sulfaatdeeltjes in de atmosfeer. Deze vergelijkingen zijn gemaakt zowel voor de temperatuur aan het oppervlak van de aarde als voor verticale doorsneden van de atmosfeer. De studies geven een duidelijke overeenkomst weer tussen de waargenomen veranderingen en de modelberekeningen (IPCC, 1995).

De kwaliteit van de modellen, ook met betrekking tot kortere voorspelperioden zoals El Niño, is sterk toegenomen. Toch zal het zeer moeilijk, zo niet onmogelijk zijn om, voor een specifieke plaats op aarde, precieze voorspellingen te doen over het toekomstige klimaat.

Op mondiale schaal kunnen natuurlijke klimaatveranderingen zowel leiden tot versterking als tot maskering van de effecten van het versterkte broeikasewfect. Op regionale schaal is voorspelling nog moeilijker vanwege de complexiteit van het systeem. Toch kunnen er met enige mate van zekerheid uitspraken worden gedaan over een aantal te verwachten veranderingen ten aanzien van de temperatuur, neerslag, zeespiegelstijging, atmosferische circulatie, cyclonen en bepaalde ecosystemen. Deze veranderingen worden hieronder beschreven. Daarbij wordt kort ingegaan op de maatschappelijke aspecten van klimaatverandering. De risico's ten aanzien van destabilisatie van het wereldklimaat komen in het hoofdstuk daarna aan de orde.

#### Temperatuur

De modellen die gebruik maken van de bekende IPCC emissiescenario's (broeikasgas- en aerosolenuitstoot) geven aan dat er naar verwachting een verandering in de gemiddelde temperatuur zal optreden van tussen de 1.0°C en 3.5°C in het jaar 2100, afhankelijk van het scenario. De verwachte snelheid waarmee de opwarming plaatsvindt, is voor alle scenario's aanzienlijk groter dan ooit in de laatste 10.000 jaar. Indien alleen rekening gehouden wordt met de broeikasgassen en niet met de aerosolen, die het zonlicht weerspiegelen en daarom een koelende werking hebben, dan geven de modellen voor verschillende scenario's een temperatuurstijging tussen de 1.5°C en 4.5°C, met een beste schatting van 2.5°C. Het gaat bij deze temperatuurstijging steeds om wereldgemiddelden. De modellen geven aan dat de stijging op het landrijke Noordelijk Halfrond boven landmassa's 2 à 3 maal

---

3 Aerosolen zijn kleine stofdeeltjes in de atmosfeer; de concentratie ervan is toegenomen als gevolg van het verbranden van fossiele brandstoffen en andere menselijke activiteiten; aerosolen hebben een zeer korte verblijftijd in de atmosfeer (ca. 10 dagen) in vergelijking met CO<sub>2</sub>.

zo groot is dan de wereldgemiddelde stijging, dat wil zeggen 5 à 7,5°C als beste schatting; terwijl de stijging boven de oceanen van het Zuidelijk Halfrond lager is dan het wereldgemiddelde.

### Neerslag

Nagenoeg alle modelberekeningen wijzen op een toename van het voorkomen van hevige buien bij stijgende broeikasgasconcentraties. In het algemeen zal bij de opwarming van de aarde de hydrologische cyclus intenser worden (Houghton *et al.*, 1996). Hierbij neemt de wereldgemiddelde neerslag naar verwachting toe met 10 à 20%. De verschillen per regio zijn echter groot.

Verscheidene onderzoekers (Cubasch *et al.*, 1995b; Gregory and Mitchell, 1995) hebben aangetoond dat een verschuiving in de dagelijkse hoeveelheid neerslag naar zwaardere buien in sommige gebieden kan leiden tot een toename in het aantal droge dagen. Het aantal droge dagen zal ook toenemen in gebieden waar de gemiddelde neerslag afneemt. Hierdoor kunnen droge perioden langer worden. Zo zou de kans op een droge periode van 30 dagen in Zuid-Europa bij het verdubbelen van de CO<sub>2</sub>-concentratie kunnen toenemen met een factor 2 tot 5, terwijl de gemiddelde neerslag afneemt met maar 22% (Houghton *et al.*, 1996).

### Zeespiegelstijging

De modellen geven aan dat in het jaar 2100 de zeespiegel tussen de 38 en 55 cm zal zijn gestegen, indien wordt uitgegaan van de “best geschatte” waarden voor het smelten van sneeuw en ijs en de “best geschatte” waarden voor de klimaatgevoeligheid. De gevonden waarden zijn afhankelijk van de wijze waarop de autonome zeespiegelstijging wordt meegenomen in de projecties. Wanneer rekening wordt gehouden met de verschillende schattingen die er zijn voor smelten, zeewaterexpansie en klimaatgevoeligheid dan geven de modellen een zeespiegelstijging aan tussen de 15 en 95 cm in 2100. Indien de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer vervolgens stabiliseert zal de stijging van het zeeniveau nog enkele honderden jaren doorgaan, waarbij het zeeniveau naar beste schatting verder stijgt tot 1,50 m boven het huidige niveau.

Veranderingen in zeeniveau zullen niet uniform zijn. Regionale verschillen zullen optreden als gevolg van regionale verschillen in opwarming en oceaan circulatieveranderingen. De voorspelde stijging wordt vooral veroorzaakt door thermische expansie van het oceaanwater; het smelten van ijskappen en gletsjers levert een kleinere bijdrage. Een toename van sneeuwval op Groenland en op de Zuidpool zal een omgekeerde bijdrage leveren. Op termijn zal deze omgekeerde bijdrage afnemen terwijl de kans op afbraak van ijs in deze gebieden toeneemt. Er moet daarom op termijn (honderden jaren) rekening worden gehouden met de mogelijkheid van grote veranderingen in de volumes van de ijskappen waarbij de zeespiegel vele meters kan stijgen (IPCC, 1995).

### Circulatiepatronen en cyclonen

De meeste modellen laten een afname zien in de kracht van de noordelijke Noord Atlantische Oceaan Circulatie. Hierdoor kan de Noord Atlantische Oceaan afkoelen. De stijging

in neerslag op hogere breedten leidt tot een afname van de zoutconcentratie in het oppervlaktewater. Nu nog is het zinken van zout water in het relatief lichtere water van de poolzee een motor die de warme golfstroom richting Noord Atlantische Oceaan 'trekt'. Als dit zinken van water op hogere breedten minder wordt kan het uiteindelijke gevolg zijn dat de aandrijvende kracht van de 'warme golfstroom' afneemt, zodanig zelfs dat deze warmtebron voor Noord en West Europa op termijn kan stilvallen.

De meeste modellen geven aan dat de El Niño-Southern Oscillatie (ENSO) ook bij verhoogde broeikasgasconcentraties zal blijven optreden. De intensiteit van ENSO's zou echter kunnen toenemen. Omdat de gemiddelde tropische zeewatertemperatuur stijgt, zal ook de verdamping stijgen met, naar verwachting, een toename van de bestaande neerslagvariabiliteit geassocieerd met ENSO-perioden als gevolg.

De vorming van tropische cyclonen hangt niet alleen af van de zeewatertemperatuur maar ook van een aantal atmosferische factoren. Met modellen kunnen deze cyclonen vrij goed worden nagebootst, maar het wetenschappelijk inzicht in het ontstaan van dit fenomeen is nog onvoldoende om met enige zekerheid uitspraken te doen over het gedrag van tropische cyclonen. Het aantal zou gelijk kunnen blijven, maar de hevigheid neemt waarschijnlijk toe.

### **Ecosystemen**

Populaties die onderdeel zijn van ecosystemen op het land kunnen alleen overleven als de temperatuur en de beschikbaarheid van water binnen bepaalde grenzen varieert. Worden deze grenzen overschreden dan zal deze populatie vervangen worden door een andere populatie. Bij sommige soorten is deze verplaatsing langzaam (bijvoorbeeld bomen), bij andere soorten juist snel. Daarom zullen er naar verwachting onevenwichtigeden en/of verstoringen ontstaan in ecosystemen, met plotselinge veranderingen als mogelijk gevolg. Dit kan zeer nadelig zijn voor de mens (natuurrampen, plantenziekten enzovoorts) en de biodiversiteit.

### **Maatschappelijke aspecten**

Klimaatverandering zal naar verwachting grote gevolgen hebben voor de maatschappij. De eerste effecten zullen zichtbaar worden door een verandering in de aard en de frequentie van extreme weersomstandigheden. Het gaat hierbij vooral om overstromingen, stormen, hittegolven en droogtes. Aangezien een historische reeks van weersgebeurtenissen geen goede maat meer is voor de toekomst, zullen extreme weersgebeurtenissen als verrassing optreden. De schade ervan zal daarmee zeer groot kunnen zijn.

Daarnaast zal de verandering van het klimaat naar verwachting een ontwrichtende werking hebben op bepaalde ecosystemen, omdat wisselwerking tussen onderling afhankelijke soorten wordt verstoord (met onder meer bomen- en plantenziekten tot gevolg).

Klimaatverandering zal ook voordelen met zich meebrengen zoals hogere landbouwopbrengsten, uitbreiding van toerisme en lagere stookkosten. De agrarische zones in de noordelijke streken zoals Canada en Rusland kunnen wellicht profiteren van het gecombineerde effect van hogere temperaturen en een hogere koolstofdioxideconcentratie. Het kost echter tijd om dit voordeel te oogsten omdat de samenleving in deze streken niet is voorbe-

reid op zo'n situatie. Er zal bijvoorbeeld eerst een nieuwe infrastructuur moeten worden aangelegd (ontginning, wegen, water, steden). De bereidheid om hier in te investeren zal sterk afhangen van de zekerheid met betrekking tot de aard van de toekomstige klimaatveranderingen.

Door het opwarmen van de aarde zullen de stookkosten in de noordelijke landen lager zijn, daar staat echter tegenover dat er in de zomer meer airconditioning nodig zal zijn. Scheepsroutes die de noordelijke continenten verbinden zijn nu niet toegankelijk maar zijn wel een stuk korter dan de bestaande scheepsroutes. Minder ijs in de zee door opwarming kan deze routes economisch aantrekkelijk maken.

In feite komt klimaatverandering neer op een mondiale herverdeling van kosten en baten van het weer. De kosten zullen echter naar verwachting veel groter zijn dan de baten. Bovendien heeft de (wereld)maatschappij geen instrument om zo'n herverdeling te compenseren of de schade te vereffenen. Dit kan leiden tot grote politieke spanningen. Tot slot is klimaatverandering een additionele onzekerheid/stressfactor, waarvoor geldt dat de historische weer- en klimaatgegevens niet zonder meer een betrouwbare basis zijn voor het ontwerp van bijvoorbeeld waterkeringen, drainagestelsels, gebouwen en landbouwsystemen.

## 4. Risico's ten aanzien van een destabilisatie van het klimaat

### Warme golfstroom

Een klimaatrisico anders dan de geleidelijke verhoging van temperatuur en zeespiegel is de mogelijkheid van snelle, niet-lineaire veranderingen van het klimaat. Het gaat hierbij om zeer ingrijpende veranderingen met een kleine maar niet verwaarloosbare kans van voorkomen.

Eén van de mogelijke snelle veranderingen is het stagneren van de "warme golfstroom". Door de "warme golfstroom" is het in Noord en West Europa ca. 8 graden Celsius warmer dan gemiddeld op deze breedtegraad. Stilvallen van de warme golfstroom zou in dit gebied tot een klimaat leiden zoals nu in Labrador en Siberië met 6 maanden sneeuwbedekking per jaar.

Het oceaan circulatiepatroon is gevoelig voor veranderingen in toevoer van zoet water door het afsmelten van ijsbergen of door een toename in de neerslag. Klimaatmodellen geven een toename aan van de neerslag op hogere breedte. Hierdoor zou de warme golfstroom op langere termijn, 100-300 jaar, inderdaad kunnen stilvallen in een tijdsbestek van 10 jaar of minder. Ijskernmetingen geven aan dat de temperatuur 7°C daalde toen de golfstroom in het verre verleden stilviel. De ijskerngegevens en -modellen laten zien dat de golfstroom zich weer kan herstellen na honderden of duizenden jaren (Broecker, 1996).

### Antarctica

Een ander risico heeft te maken met Antarctica als geheel en de West Antarctische ijskap in het bijzonder. Want als deze ijskap bezwijkt kan de zeespiegel in korte tijd met 4 tot 6 meter stijgen.

De meeste klimaatmodellen geven als uitkomst een matige temperatuurstijging rond Antarctica voor de komende 50 jaar. In deze periode zal de gestegen neerslag in de vorm van sneeuw de gestegen afsmelting aan de oppervlakte waarschijnlijk overcompenseren. Over 50 jaar zou Antarctica echter kunnen opwarmen, waarbij bepaalde delen van de ijskap smelten.

Over het algemeen zijn interpretaties van wat zich voordoet op Antarctica en wat zich zou kunnen voordoen nogal complex en in sommige gevallen tegenstrijdig.

Zo is aan de westkust van het Antarctisch schiereiland over de afgelopen 50 jaar een klimaatverandering opgetreden waarbij de gemiddelde temperatuur ongeveer 2°C is gestegen. Klimaatmodellen geven aan dat dit niet direct gekoppeld kan worden aan de algehele opwarming van de aarde. Waarschijnlijk zijn lokaal opererende mechanismen verantwoordelijk voor de gemeten verandering. De ijsbergen rondom dit gebied zijn verdwenen maar hebben geen bijdrage geleverd aan zeespiegelstijging omdat ze al dreven (Vaughan, 1998).

In 1974 werd er een simpel model ontwikkeld door Weertman over het gedrag van de grens tussen een ijskap en de rand van de ijskap drijvend in de zee. Dit model leidde tot het idee dat de West Antarctische ijskap instabiel was. De uitkomst van de modellen die nu gebruikt worden trekken de instabiliteit in twijfel.

- Het is niet langer duidelijk of mariene ijskappen beïnvloed worden door het verdwijnen van de randen (Hindmarsh, 1993);
- Het is niet langer duidelijk of de opwarming, voorspeld als resultaat van de uitstoot van broeikasgassen, het verdwijnen van de Ross en Filchner-Ronne ijsranden bevordert (Doake and Vaughan, 1995);
- Het is zeer goed mogelijk dat een kleine toename in de temperatuur van de Wedell Zee vlakbij de Filchner-Ronne ijsrand een reductie met zich meebrengt in de zee-ijsproductie. Dit zou kunnen leiden tot een vermindering van de thermohaline circulatie beneden de ijsrand, een vermindering in afsmelten en uiteindelijk tot een toename in volume van de ijsrand (Nicholls, 1997).

Ander wetenschappelijk werk heeft echter juist weer twijfels en bezorgdheid teweeg gebracht.

- Het is onduidelijk hoe dicht Antarctica bij een evenwicht is omdat het zeer lang duurt (50.000 jaar) voordat een evenwicht wordt bereikt in een bepaald klimaat;
- Er kunnen interne stroominstabiliteiten zijn die ervoor zorgen dat de ijskap onregelmatig reageert op het klimaat (MacAyeel, 1992);
- Het is duidelijk dat op zich kleine veranderingen in de West Antarctische ijskap kunnen leiden tot een zeespiegelstijging van enkele meters. Het meest waarschijnlijke scenario bij voortgaande stijging van de uitstoot van broeikasgassen is dat binnen 500-700 jaar de ijskap in de oceaan verdwijnt, maar er is ook een zeer kleine kans dat het in de komende 100 jaar zal gebeuren. De zeespiegel zou dan vrij plotseling met 4 – 6 m stijgen.

### Overige processen

Hieronder wordt nog een aantal klimaatveranderingsprocessen beschreven met een kleine kans van voorkomen, maar met verregerende consequenties:

- Er bestaat een potentiële terugkoppeling tussen klimaatverandering en methaan, ingevangen in watermoleculen op de continentale helling in de oceanen. Methaan wordt ingevangen doordat bij een bepaalde temperatuur en druk een ijsachtige substantie ontstaat van watermoleculen die methaan insluiten. Meestal is het methaan van biologische oorsprong. Wereldwijd is er een zeer grote hoeveelheid methaan ingevangen, genoeg om het klimaat volledig te destabiliseren. Door opwarmen van de oceaan zou er op termijn een instabiele situatie kunnen ontstaan, resulterend in het vrijkomen van ingevangen methaan. Of dit zou kunnen gebeuren en of methaan de atmosfeer dan bereikt is vooralsnog zeer onzeker (Harvey, 1994).
- Het koele en humide klimaat van de boreale zone (het noorden van Europa en Azië) is zeer geschikt voor het opslaan van koolstof in de bodem. De hoeveelheid die hier ligt opgeslagen komt ongeveer overeen met 40% van de hoeveelheid koolstof die op aarde in bossen is opgeslagen. Opwarming van de aarde zou deze situatie kunnen veranderen waardoor er meer koolstof wordt afgebroken en er een versterkende positieve terug-

koppeling ontstaat. In de boreale bodems is het koolstof reservoir 1,2 – 1,5 keer groter dan in de atmosfeer (Posch *et al.*, 1995).

- De oplosbaarheid van koolstofdioxide in de oceanen zou kunnen dalen door het stijgen van de oceaantemperaturen ten gevolge van het opwarmen van de aarde, hierdoor zouden regionale ‘putten’ kunnen veranderen in bronnen met een snelle toename van de concentratie van CO<sub>2</sub> als gevolg.

Bij de risico's ten aanzien van een destabilisatie van het wereldklimaat gaat het om kleine kansen met zeer grote gevolgen. Aangezien het klimaat een zeer complex systeem is kunnen verrassingen niet worden uitgesloten. Vermindering van de uitstoot van broeikasgassen zal leiden tot een verkleining van dit risico.

In het algemeen geldt dat vermindering van de uitstoot van broeikasgassen, met enige na-ijling, leidt tot een vermindering van de snelheid van klimaatverandering en een verkleining van de kans op een destabilisatie van het wereldklimaat.

## 5. Conclusies

1. De stijging van de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer zal leiden tot een verandering van het wereldklimaat. Over de snelheid waarmee, en de mate waarin dit gebeurt, bestaat onzekerheid. Een kleine klimaatverandering heeft echter direct gevolgen voor de frequentie en de aard van extreme weersomstandigheden in een bepaald gebied.
2. De concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer is volgens de metingen inmiddels 30% hoger dan vóór de industriële revolutie. Vooral de laatste 40 jaar is de concentratie snel opgelopen. De gemiddelde temperatuur op aarde is de afgelopen 100 jaar met ongeveer 0,5°C gestegen. Vooral de laatste 20 jaar gaat deze stijging relatief snel. Het jaar 1998 was warmer dan 1997 en 1997 was warmer dan alle jaren daarvoor. Systematische waarnemingen van de gemiddelde mondiale temperatuur en van het ruimtelijke patroon van de temperatuurverandering geven aan dat de opwarming van de aarde groter is, en het patroon van opwarming anders is dan mag worden verwacht op basis van natuurlijke variabiliteit. Dit is dan ook de reden dat het IPCC concludeert dat 'the balance of evidence suggests a discernable human influence on global climate'. Met andere woorden: het versterkte broeikasewfect draagt naar alle waarschijnlijkheid nu al bij aan de waargenomen veranderingen van het wereldklimaat.
3. Wereldwijde metingen van temperatuur, neerslag, zeeniveau, het afsmelten van gletsjers, circulatiepatronen en El Niño geven aan dat er mondiaal en regionaal veranderingen optreden in het gemiddelde van deze grootheden. Daarnaast zijn er duidelijke aanwijzingen van een toename van extreme weersgebeurtenissen in een aantal plaatsen in de wereld. Theoretisch kunnen deze veranderingen en de toename van extreme weersgebeurtenissen het gevolg zijn van een natuurlijke variatie van het klimaat. De kans hierop is echter klein. Het ligt meer voor de hand te concluderen dat deze veranderingen de eerste signalen zijn van de doorwerking van het versterkte broeikasewfect.
4. Een voortgaande stijging van de concentraties van broeikasgassen in de atmosfeer zal leiden tot verdere veranderingen in het klimaat. Dit zal naar verwachting zichtbaar worden in een verdere stijging van de mondiaal gemiddelde temperatuur, een toename van extreme neerslaggebeurtenissen, een snellere stijging van de zeespiegel en veranderende circulatiepatronen van oceaan en atmosfeer. Nauwkeurige regionale voorspellingen zijn daarbij nog niet te geven. De ecologische en maatschappelijke schade kan zeer groot worden. In feite komt klimaatverandering neer op een herverdeling van kosten en baten van het weer, waarbij de schade aanzienlijk groter is dan de baten. Bovendien heeft de (wereld)maatschappij geen instrument om zo'n herverdeling te vereffenen. Klimaatverandering zal daarom naar verwachting leiden tot grote politieke spanningen.
5. Naast een stapsgewijze toenemende maatschappelijke schade wordt het grootste risico van de versterking van het broeikasewfect gevormd door een mogelijke destabilisatie van het wereldklimaat. Deze kan optreden door het stagneren van de oceaanstrooming die Noord en West Europa warmte brengt, of door het versneld afsmelten van de ijskap

op de Zuidpool, of door het vrijkomen van extra broeikasgassen als gevolg van de opwarming van toendragebieden en/of oceanen.

6. In het algemeen geldt dat vermindering van de uitstoot van broeikasgassen, met enige na-ijling, leidt tot een vermindering van de snelheid van klimaatverandering en een verkleining van de kans op een destabilisatie van het wereldklimaat.

## Referenties

- Anonymous (1998). *World's Glaciers Continue to Shrink According to New CU-Boulder Study*. University of Colorado News Release, May 26, 1998. (Zie internet: [http://www.colorado.edu/PublicRelations/NewsReleases/1998/Worlds\\_Glaciers\\_Continue\\_To\\_Sh.html](http://www.colorado.edu/PublicRelations/NewsReleases/1998/Worlds_Glaciers_Continue_To_Sh.html))
- Broecker, W.S. (1996). U.S. Global Change Research Program Second Monday Seminar Series, *Climate Implications of Abrupt Changes in Ocean Circulation*. (Zie internet: <http://www.usgcrp.gov/usgcrp/960123SM.html>)
- Cubasch, U., G. Waszkewitz, Hegerl, and J. Perlwitz (1995b). Regional Climate changes as simulated in time slice experiments. MPI Report 153. *Clim. Change*, 31, pp. 321-304.
- DeAngelo, B. J., J. Harte, D.A. Lashof, and R.S. Saleska (1997). Terrestrial Ecosystems Feedbacks to Global Climate Change. In: *Annual Review of Energy and the Environment*, 1997 edition, volume 22.
- Doake, C. S. M., and D.G. Vaughan (1991). Rapid disintegration of Wordie ice shelf in response to atmospheric warming. *Nature*, Vol. 350. No. 6316, pp. 328-330.
- Epstein, P.R. (1996). Global Climate Change. From an Abstract of Remarks by Scientists at the National Press Club, Washington, D.C., *Newsletter*, Volume 1, Number 1, Nov. 3, 1996.
- Findlay, B.F., D.W. Gullet, L. Malone, J. Reycraft, W.R. Skinner, L. Vincent, and R. White-wood (1994). Canadian national and regional standardized annual precipitation departures. In: *Trends '93: A Compendium of Data on Global Change*, T.A. Boden, D.P. Kaiser, P.J. Sepanski and F.W. Stoss (eds.), ORN/CDIAC-65, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, U.S.A, pp. 800-828.
- Francis, D., and H. Hengeveld (1998). *Extreme Weather and Climate Change*, ISBN 0-662-268490, Climate and Water Products Division, Atmospheric Environment Service, Ontario, Canada.
- Grabherr, G., M. Gottfried, H. Pauli (1994). Climate effects on mountains plants. *Nature*, Vol. 369, No. 6480, 9 June 1994.
- Gregory, J.M., and J.F.B. Mitchell (1995). Simulation of daily variability of surface temperature and precipitation over Europe in the current 2 x CO<sub>2</sub> climates using the UKMO climate model. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 121, pp. 1451-1476.
- Groisman, P.Ya, and D.R. Easterling (1994). Variability and trends of precipitation and snowfall over the United States and Canada. *J. Climate*, 7, pp. 184 – 205.
- Harvey, D. (1994). *Potential Feedback Between Climate and Methane Clathrate*. University of Toronto, Department of Geography, Toronto, Ontario, Canada. (Zie internet: <http://harvey.geog.utoronto.ca:8080/harvey/index.html>)
- Hindmarsh, R. C. A. (1993). *Qualitative dynamics of marine ice sheets*. NATO ASI Series I 12, pp. 68-69.
- Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell (1996). Climate Change 1995, The Science of Climate Change, Contribution of Working Group 1 to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

- Change, published for the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 1995)(see also IPCC, 1995, Cambridge University Press).
- Hulme, M., and Kelly, M. (1993). *Climate Change, Desertification and Desiccation, with particular Emphasis on the African Sahel*. Climatic Research Unit, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich, United Kingdom, GEC93-17, pp. 37. (Zie internet: [http://www.uea.ac.uk/menu/acad\\_depts/env/all/resgroup/cserge/](http://www.uea.ac.uk/menu/acad_depts/env/all/resgroup/cserge/)).
- IPCC (1995). *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, Cambridge University Press, see also Houghton et al., 1995.
- Khain, A., and I. Ginis (1991). The mutual response of a moving tropical cyclone and the ocean. *Beitr., Phys. Atmosph.*, 64, pp. 125-141.
- Karl, T.R., P.Y. Groisman, R.W. Knight, and R.R. Heim, Jr. (1993b). Recent variations of snowcover and snowfall in North America and their relation to precipitation and temperature variations. *J. Climate*, 7, pp. 1144 - 1163.
- Karl, T.R., R.W. Knight, D.R. Easterling, and R.G. Quayle (1995). Trends in U.S. climate during the twentieth century. *Consequences 1995*; 1, pp. 2 - 12.
- Karl, TR., R.W. Knight, and N. Plummer (1995). Trends in high-frequency climate variability in the twentieth century. *Nature*; 377, pp. 217-220.
- Karl, T.R., N. N. Nicholls, and J. Gregory (1997). The Coming Climate, Meteorological records and computer models permit insights into some of the broad weather patterns of a warmer world. *Scientific American*, May 1997. (Zie internet: <http://www.sciam.com/0597issue/0597karl.html>)
- Knutson, T.R., and S. Manabe (1998). Model assesment of decadal variability and trends in the tropical Pacific Ocean. *Journal of Climate*, September 1998.
- Lettenmaier, D., E.F. Wood, and J.R. Wallis (1994). Hydroclimatological trends in the continental United States, 1948-88. *J. Climate*, 7, pp. 586-607.
- NOAA internet site: <http://www.ncdc.noaa.gov/ol/climate/research/1998/ann/ann98.html>
- Parmesan, C. (1996). Climate change and species range. *Nature*, 382, pp. 765 - 766.
- Posch, Maximilian, Pekka Tamminen, Michael Starr, Pekka E. Kauppi (1995). *Climatic Warming and Carbon Storage in Boreal Soils*. RIVM, the Netherlands.
- Trenberth, K.E. (1996). Global Climate Change, From an Abstract of Remarks by Scientists at the National Press Club, Washington, D.C., Climate Analysis Section, *Newsletter, Volume 1, Number 1, Nov. 3, 1996*.
- Tol, R, and Vellinga, P. (1998). Climate Change, the Enhanced Greenhouse Effect and the Influence of the Sun: A Statistical Analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 61, pp. 1 - 7.
- Vellinga, P., R.S.J. Tol (1993). Climate Change: Extreme Events and Society's Response. *Journal of Reinsurance*, Claude C. Lilly (ed.), Vol. 1, No. 2, pp. 59-72.
- Vaughan, D. G. (1998). *Antarctica: climate change and sea level*. Statement prepared by Ice and Climate Division, British Antarctic Survey. (Zie internet: <http://bsweb.nerc-bas.ac.uk/public/icd>)