



KONINKLIJKE NEDERLANDSE  
AKADEMIE VAN WETENSCHAPPEN

# KLIMAATVERANDERING, WETENSCHAP EN DEBAT



# KLIMAATVERANDERING, WETENSCHAP EN DEBAT



2011 Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen

© Sommige rechten zijn voorbehouden / Some rights reserved

Voor deze uitgave zijn gebruiksrechten van toepassing zoals vastgelegd in de Creative Commons licentie. [Naamsvermelding 3.0 Nederland]. Voor de volledige tekst van deze licentie zie <http://www.creativecommons.org/licenses/by/3.0/nl/>

Postbus 19121, 1000 GC Amsterdam

T 020 551 0702

F 020 620 4941

E [knaw@bureau.knaw.nl](mailto:knaw@bureau.knaw.nl)

[www.knaw.nl](http://www.knaw.nl)


pdf beschikbaar op [www.knaw.nl](http://www.knaw.nl)

Vormgeving en opmaak: Ellen Bouma

Redactie: Hans van Maanen

Foto omslag: istockphoto

ISBN 978-90-6984-628-6

Het papier van deze uitgave voldoet aan  iso-norm 9706 (1994) voor permanent houdbaar papier.

# KLIMAATVERANDERING, WETENSCHAP EN DEBAT

KNAW  
Mei 2011



# Inhoud

	<b>VOORWOORD</b>	<b>7</b>
1.	<b>AANLEIDING</b>	<b>9</b>
2.	<b>HET WETENSCHAPPELIJK BEDRIJF</b>	<b>13</b>
	Spanningsvelden	14
3.	<b>KLIMAATVERANDERING</b>	<b>16</b>
	Toename broeikasgassen in atmosfeer	16
	Opname extra kooldioxide door zee en land	17
	Temperaturen	18
	Oorzaak en gevolg	19
4.	<b>KLIMAATMODELLEN</b>	<b>21</b>
5.	<b>TWISTPUNTEN EN ONZEKERHEDEN</b>	<b>24</b>
	Temperaturen vroeger en nu	24
	Thermometers	26
	Vulkanisme	26
	Oceanen, waterdamp en wolken	27
	Ijs en gletsjers	27
	De zon	28
	De rol van de mens	29
	Ten slotte	30
6.	<b>ENKELE AANBEVELINGEN VOOR BELEID EN ONDERZOEK</b>	<b>31</b>
7.	<b>SAMENVATTENDE STATEMENTS</b>	<b>34</b>
	<b>VERANTWOORDING</b>	<b>35</b>



# Voorwoord

De verandering van het klimaat op aarde is een van de belangrijkste mondiale vraagstukken. Gepositioneerd op het kruispunt van maatschappij, economie en wetenschap, en in het licht van een grote publieke belangstelling, roept dit probleem vele zorgen en vragen op.

Het afgelopen jaar is klimaatverandering onderwerp van een bijzonder hevig debat geweest, zowel binnen als buiten de wetenschap – een debat dat gemakkelijk gepolariseerd en gepolitiseerd bleek te kunnen raken. De wereld wordt dan gemakshalve verdeeld in ‘alarmisten’ en ‘sceptici’ die op ideologische gronden wel of niet in klimaatverandering ‘geloven’. Daarbij hebben de verspreide e-mails van enkele klimaatwetenschappers en de ontdekking van enkele fouten in het laatste rapport van het VN-klimaatpanel IPCC – voor velen dé bron voor een actueel overzicht van de wereldwijde kennis over het klimaat – tot verdere publieke verwarring en verontwaardiging geleid. Klimaatwetenschappers zagen met lede ogen aan hoe de discussie vertroebeld raakte en men zich soms weinig aantrok van de grenzen tussen politiek, media en wetenschap. In het publieke debat bleken meningen niet altijd even zuiver op wetenschappelijke fundamenten te rusten.

In menig opzicht is dit felle debat een reflectie van het grote belang dat iedereen aan het vraagstuk van klimaatverandering hecht. Niet alleen bedreigt het een fragiele aarde, de maatregelen die gemoeid zijn met mitigatie vragen enorme inspanningen van onze samenleving en economie, die eveneens grote gevolgen zullen hebben. Een stevig debat over zo’n belangrijk onderwerp misstaat niemand. Maar, zoals de Amerikaanse Senator Daniel Patrick Moynihan zei: Iedereen heeft recht op zijn eigen mening, maar niet op zijn eigen feiten.

De complexiteit van het klimaatvraagstuk maakt het voor de eenieder die het debat op afstand volgt, een haast onmogelijke taak om feiten en meningen uit elkaar te houden, laat staan zich een zuiver oordeel te vormen over hoe de zaak nu echt in elkaar zit. Ook de aard van de wetenschap zelf draagt bij aan deze verwarring, omdat een onderzoeker van nature zijn eigen criticus is. Een toename van wetenschappelijke kennis leidt dan ook niet vanzelf tot een toename van zekerheid, en dat vraagt veel van degenen die proberen beleid te maken op basis van kennis.



De KNAW heeft zich het afgelopen jaar al op twee manieren in de discussie gemengd. Zij was nauw betrokken bij de doorlichting van de werkwijze van het IPCC door de InterAcademy Council en zij heeft toezicht gehouden op het onderzoek dat het Planbureau voor de Leefomgeving heeft verricht naar de wetenschappelijke basis van de belangrijkste conclusies van het IPCC ten aanzien van de mogelijke regionale gevolgen van klimaatverandering.

Maar de betrokkenheid van de KNAW stopt daar niet. Als onafhankelijke stem van de wetenschap, ziet de KNAW een taak voor zichzelf om de niet-wetenschappelijk ingewijde burger, ambtenaar of politicus houvast te bieden bij het vormen van een oordeel over klimaatverandering. Met deze brochure wil de KNAW, als een *honest broker* in kennis, u een zo betrouwbaar mogelijk beeld geven van de stand van zaken over klimaatverandering. Wat weten wij, en hoe zeker zijn we daarvan? Waar liggen de echte controverses, en waarom zijn die er? De inhoud is niet nieuw, wel de accenten en de afzender. De Akademie heeft bij het maken ervan een beroep gedaan op tientallen wetenschappers uit de hele breedte van de klimaatwetenschappen, van binnen en buiten haar eigen gelederen. Ik wil hen graag danken voor het enthousiasme en de zorg waarmee zij dit project hebben benaderd.

Deze brochure zet de natuurwetenschappelijke, 'harde' feiten over ons klimaat op een rijtje, en belicht de controverses en onzekerheden die in het klimaatonderzoek aan de orde zijn en die u ook in de media tegenkomt. Het begint met een uitleg over hoe wetenschap werkt en wat er van mag worden verwacht, wie er mee mogen doen aan het wetenschappelijk debat en onder welke voorwaarden. In het laatste hoofdstuk vindt u zeven samenvattende stellingen over klimaatverandering – zaken waar de wetenschap het over eens is.

Het onderzoek gaat intussen door en dit boekje is dus zeker niet te beschouwen als het laatste woord over klimaatverandering en de invloed van de mens daarop. Maar hopelijk kan het een bijdrage leveren om de discussie over klimaatverandering en alles wat daarmee samenhangt op een peil te brengen die dit belangrijke vraagstuk verdient.

Robbert Dijkgraaf  
President KNAW

# 1. Aanleiding

De maatschappelijke discussie over het klimaat op aarde en de invloed van de mens daarop wordt gekenmerkt door onduidelijkheden. Wetenschappelijke feiten, wilde speculaties en feitelijke onzekerheden worden in deze discussie veelal door elkaar gebruikt, zodat een misschien gevaarlijk, maar in ieder geval uiterst troebel mengsel is ontstaan. Voor de gemiddelde burger, maar ook voor beleidsmakers en politici wordt het steeds moeilijker helder voor ogen te krijgen welke argumenten valide, achterhaald, ad hoc of gewoon misleidend zijn. Laat staan inzicht te krijgen in de belangen die achter die argumenten kunnen schuilgaan.

Tegelijkertijd maakt het klimaatdebat, meer dan enig eerder debat, publiek duidelijk dat er grenzen aan de wetenschap zijn, gebieden waarover de wetenschap verstandige dingen kan zeggen en waarover zij moet zwijgen. Juist degenen wie wetenschap dierbaar is, kennen haar beperkingen en zij beseffen maar al te goed dat wetenschappelijke argumenten in een debat niet steeds doorslaggevend hoeven te zijn. Al was het maar omdat de wetenschap vaak beter onzekerheid en risico's in kaart kan brengen, dan zekerheid en onontkoombare beslissingen kan bieden.<sup>1</sup>

De KNAW probeert met deze brochure vooral helderheid te scheppen in het klimaatdebat en in de rol van de wetenschap daarin. Zij ziet het niet als haar taak het verlossende of beslissende woord te spreken. Zij wil zich niet boven, maar tussen de partijen opstellen, als een soort 'nette makelaar' die de stellingen en standpunten van alle discussianten zo goed mogelijk tegen het licht houdt en in begrijpelijke vorm giet. Hopelijk brengt dat partijen dichter tot elkaar, maar als dat niet lukt, dan zal in ieder geval de buitenstaander meer inzicht krijgen in de zaken waarover de partijen het oneens zijn. Voor deze buitenstaander – van geïnteresseerde leek tot politicus – is deze brochure dan ook bedoeld. Aangezien het hierbij gaat om de rol en positie van de wetenschap is het goed om ook de nodige aandacht te besteden aan de wetenschap en de daarin gehanteerde methoden.

---

1. Zie ook de KNAW-publicatie *Onzekerheden en klimaatverandering* (2008)

Het eerste deel van deze brochure gaat derhalve niet over klimaat, maar over wetenschap. De wetenschap heeft in de loop van haar lange geschiedenis een aantal vrij strenge regels opgesteld waarbinnen het spel gespeeld wordt. Die regels zijn, uiteraard, niet in beton gegoten, maar wie in de eenentwintigste eeuw nog daarvan wil afwijken, moet daar vrij sterke argumenten voor hebben.

De spelregels van het wetenschappelijke debat zijn anders dan die van het politieke debat, en niet alle wetenschappers voelen zich in het politieke debat thuis, zoals ook veel politici zich ongemakkelijk voelen in het wetenschappelijke debat. Er zou in het klimaatdebat, maar ook in andere debatten waarin wetenschappelijke inzichten een rol spelen – biodiversiteit, nanotechnologie, vaccinatieprogramma's – al veel gewonnen zijn als de spelregels van de wetenschap meer bekend zouden zijn.

De directe aanleiding voor dit rapport is, uiteraard, de ophef die is ontstaan na het verschijnen van de jongste rapportage van het IPCC, het Intergouvernementele Panel voor Klimaatverandering.

Er is ophef over de juistheid of hardheid van sommige beweringen van het IPCC, over de wetenschappelijke basis ervoor, en de wijze waarop de bevindingen in vooral de samenvattingen voor beleidsmakers zijn weergegeven. Er ontstond bovendien discussie over de vraag of alle auteursteams wel alle beschikbare informatie hebben gegeven of dat er bevindingen zijn weggemoffeld die niet goed uitkwamen. Al deze zaken zijn inmiddels onderzocht, in laatste instantie door de InterAcademy Council (waarvan de KNAW een prominent lid is en de president van de KNAW co-voorzitter is). Inzet hierbij was natuurlijk de vraag of er fouten gemaakt zijn die de conclusies van het IPCC aantasten; inzet was evenzeer, of de door het IPCC te hantieren procedures voldoende scherp zijn en op de juiste wijze worden toegepast.

'Scientific debates have always involved controversies over the value and importance of particular classes of evidence, and this can be expected to continue. Moreover, all scientific knowledge always contains some level of uncertainty, and any action based on scientific evidence inevitably involves an assessment of risk and a process of risk management. Finally, given the dependence of major facets of IPCC assessments on vast data collections and complex models whose parameters are especially difficult to assess independently, risk assessments are especially challenging. However, as the resulting controversies gained some momentum, they tended to expand beyond the IPCC assessments and raise issues ranging from the proper role of science (and scientists) in policy making to the dangers of "group think" or consensus building as a general proposition.'

[Harold T. Shapiro, voorzitter van de IAC review commissie, in zijn voorwoord bij het IAC-rapport *Climate change assessments. Review of the processes and procedures of the IPCC* (2010)]

Vervolgens gaat de brochure nader in op de klimaatwetenschap zelf. De samenstelling van de dampkring is de laatste eeuw ingrijpend veranderd, en vrijwel geen wetenschapper ontkent dat dit voor een belangrijk deel een gevolg is van menselijke activiteit. Maar de discussie begint al bij de volgende, voor de hand liggende vraag: heeft die verandering een merkbaar effect op andere onderdelen van het klimaatstelsel, en hoe ernstig zijn die effecten dan?

Een ander belangrijk facet van de klimaatdiscussie is de grote rol die modellen in de wetenschap spelen, en ook daarop zal deze brochure wat dieper ingaan. Weinig mensen zullen het natuurwetenschappelijk model betwijfelen waarin een bal die omhoog gegooid wordt ook weer naar beneden komt, maar een dergelijke stelligheid is vrij uitzonderlijk in de klimaatwetenschap – zeker waar gewerkt wordt aan de grenzen van de wetenschappelijke kennis. Hierbij moeten onderzoekers rekening houden met ruime marges, met onzekerheden, met onvolledige gegevens, en soms zijn er fundamentele grenzen aan de nauwkeurigheid van voorspellingen. Onderzoekers zijn daarmee vertrouwd, maar bij politieke besluiten wordt wel eens meer stelligheid gezocht dan de wetenschap kan bieden.

Het laatste deel van de brochure biedt enkele aanbevelingen voor zowel de onderzoeksagenda als de politieke agenda, aangezien de commissie het niet voldoende vindt om alleen een ‘afstandelijke’ beschrijving van het schouwtoneel te geven zonder daar verder enig oordeel over uit te spreken. Tevens geeft de ‘brochurecommissie’ hier een korte verantwoording van haar werkwijze.

Het IPCC, het Intergovernmental Panel on Climate Change, is ingesteld omdat de Verenigde Naties in 1988 behoefte hadden aan informatie over de oorzaken en effecten van klimaatverandering, en over de mogelijkheden het beleid op die effecten af te stemmen. In 2007 verscheen het vierde verslag, verdeeld over drie rapporten – het eerste over de natuurwetenschappelijke kennis omtrent klimaatverandering, het tweede over de effecten van die verandering op natuur en maatschappij, en het derde over methoden om de klimaatverandering voor zover mogelijk tegen te gaan. De rapporten geven zeer uitvoerig de stand van de kennis weer; in zogenaamde *technical summaries* vatten wetenschappers hun conclusies samen, en in *summaries for policy makers* wordt, in samenspraak met de beleidsmakers, bezien welke bevindingen van belang zouden kunnen zijn voor dat beleid. Het IPCC bureau doet zelf geen onderzoek, het geeft overzichten van bestaande kennis.

Een commissie van vertegenwoordigers van de deelnemende landen (inmiddels 192) stelt vast op welke punten behoefte is aan een overzicht van de stand van de kennis, en welke procedures moeten worden gevolgd bij het maken daarvan. De deelnemende landen, maar ook het bureau van de IPCC en internationale organisaties, kunnen auteurs en beoordelaars (*reviewers*) voordragen. Via een meertraps-redactieproces, waarbij alle opmerkingen en kritiek en wat daarmee is gedaan worden bijgehouden en gepubliceerd, probeert het IPCC ten slotte tot een samenhangend verslag te komen.

Mede door het feit dat er sprake is van een zeer groot aantal publicaties – die elkaar soms ook nog tegenspreken of marges van onzekerheid laten – wordt gestreefd naar een gebalanceerde weergave van de stand van de kennis, inclusief onder andere de mate van zekerheid en de witte plekken in die kennis. Men richt zich op een weergave van de feiten en de onzekerheden daaromheen, en onthoudt zich van een oordeel over de ernst van de bevindingen. Dat wordt aan de beleidsmakers overgelaten.

## 2. Het wetenschappelijk bedrijf

Belangrijke drijvende krachten achter de wetenschap zijn creativiteit en kritiek, en dan vooral openbare kritiek. Wie wetenschappelijk onderzoek doet maar de resultaten voor zichzelf houdt, of niet wil laten zien hoe het onderzoek precies is verlopen, mist de belangrijkste stap in de wetenschap: het voorleggen van de resultaten aan de collega's. Daarvoor dienen de wetenschappelijke tijdschriften. Onderzoekers die menen iets interessants te hebben gevonden, zullen niet rusten voordat hun verslag daarvan is gepubliceerd in een wetenschappelijk tijdschrift.

Het is dan ook niet eenvoudig om een artikel in een hoog aangeschreven tijdschrift te krijgen: daar gaat altijd een strenge *peer review* aan vooraf. Als de redactie het verslag interessant genoeg vindt, gaat het, meestal anoniem en vertrouwelijk, naar een aantal andere onderzoekers die in hetzelfde vakgebied werken. Die houden het verslag onbarmhartig tegen het licht, willen soms nog extra experimenten of extra gegevens, proberen foute redeneringen en berekeningen op te sporen. Het is uitdrukkelijk de bedoeling dat zo'n onderzoeksverslag zeer kritisch wordt bekeken, want alleen artikelen die door dat eerste filter komen, tellen mee als 'wetenschap'. Onderzoekers die kritiek hebben op een wetenschappelijk artikel maar hun kritiek niet in een wetenschappelijk tijdschrift publiceren, tellen ook niet helemaal mee – althans, ze worden door onderzoekers met argwaan (of erger) bekeken.

*Peer review* is een mooi systeem, maar het is uiteraard niet waterdicht. Ook bij de beste tijdschriften glipt er wel eens een artikel door de mazen dat eigenlijk had moeten worden afgewezen of ten minste grondig gecorrigeerd. En andersom, ook in minder hoog aangeschreven bladen, en zelfs buiten de 'officiële' paden, wordt uitstekend onderzoek gepubliceerd. Onderzoek dat in principe wel volgens de regels van de kunst is uitgevoerd maar om allerlei redenen niet de wetenschappelijke bladen haalt, wordt 'grijze literatuur' genoemd. Dat betreft bijvoorbeeld overheidsrapporten of studies die zo'n klein gebied bestrijken dat ze verder voor weinigen interessant zijn, maar ook jaarverslagen van de Wereldbank en gedegen rapporten

van de Verenigde Naties. Omdat de gouden standaard in de wetenschap echter het artikel in een wetenschappelijk tijdschrift is, heet alles wat daarbuiten valt, 'grijs'. Ook al is het uitstekend onderzoek, als het wil meetellen als wetenschap, zal het alsnog aan *peer review* onderworpen moeten worden.

Uiteraard is er strijd, competitie en idealisme in de wetenschap, maar uiteindelijk gaat het altijd om het inzicht te verbeteren en te vergroten, anders gezegd er wordt gestreefd naar 'waarheidsvinding'.

## Spanningsvelden

Veel wetenschappers, en met hen van oudsher en uitdrukkelijk de KNAW, zien ook een actieve maatschappelijke rol voor wetenschap weggelegd. Wetenschap kan en moet, zeggen zij, betrokken worden bij beleid – de wetenschap kan kennis leveren voor verschillende beleidsopties, gevolgen van maatregelen onderzoeken en in perspectief plaatsen, zodat wetenschappelijk inzicht een plaats krijgt in maatschappelijke en politieke kwesties.

Maar wetenschappelijk onderzoek kan ook ongewild in een maatschappelijk spanningsveld terechtkomen. Dan worden wetenschappelijke resultaten selectief gebruikt om bijvoorbeeld politieke stellingen te betrekken of maatschappelijke doelen te verwezenlijken. Of wetenschappelijke twijfel wordt gebruikt om politieke argumenten kracht bij te zetten of beleid op de lange baan te kunnen schuiven. Dit geldt uiteraard zeer sterk voor het klimaatdebat. Veertig jaar geleden was klimaatonderzoek een van de rustigste uithoeken van de wetenschap, nu staat het in het centrum van de belangstelling.

Als de wetenschap het beleid, en de samenleving als geheel, wil dienen, dan zal zij zich van vier belangrijke taken moeten kwijten. De wetenschap kan vroege signalen van komende problemen geven, als een soort *early warning system* – waarbij het goed is als er ook een *early listening system* is.

De wetenschap kan zekerheden en onzekerheden aangeven in onze kennis. In het klimaatdebat ligt de laatste tijd veel nadruk op die onzekerheden, misschien omdat die in de periode daarvoor weinig nadruk hebben gekregen, maar niet uit het oog moet worden verloren dat er ook veel zekerheden in de klimaatwetenschap zijn.

De wetenschap heeft vaak middelen om consequenties van beleidskeuzes te bepalen en zo toekomstverkenningen en -scenario's op te stellen die de verschillende gevolgen van ingrijpen en van afwachten kunnen verhelderen.

En ten slotte kan wetenschap, in de ogen van de commissie, een rol spelen in het 'zindelijk' houden van de discussie. Niet elke discussie kan door de wetenschappelijke inzichten worden beslecht, maar elke discussie kan door wetenschappelijke inzichten op een hoger peil worden gebracht.

De Akademie is, uit de aard der zaak, een warm pleitbezorger van wetenschappelijk onderzoek, en van rationele kritiek. Zij is niet blind voor de problemen van peer review, voor de wedloop die wetenschap vaak is, voor de toenemende invloed van commerciële en ‘buitenwetenschappelijke’ belangen in het onderzoek, maar zij is er tegelijkertijd van overtuigd dat wetenschap een belangrijke bijdrage kan leveren aan het oplossen van de problemen van onze tijd. Met alle tekorten die wetenschap heeft, is het toch beter de problemen met wetenschappelijk inzicht aan te pakken dan zonder wetenschappelijk inzicht. En dat geldt zeker ook in het debat over klimaatverandering.

### **Wat is klimaat?**

Het begrip ‘weer’ gebruiken we om de toestand van de atmosfeer te beschrijven op een bepaald ogenblik. Indien we ‘het klimaat’ beschrijven kijken we naar de karakteristieken van het weer over een lange periode op een bepaalde plaats of voor een regio. Het klimaat van een plaats of regio wordt niet alleen bepaald door gemiddelden (bijvoorbeeld temperatuur of uren zonneschijn) maar ook door afwijkingen van deze gemiddelden (extremen) en de kans dat deze afwijkingen voorkomen.

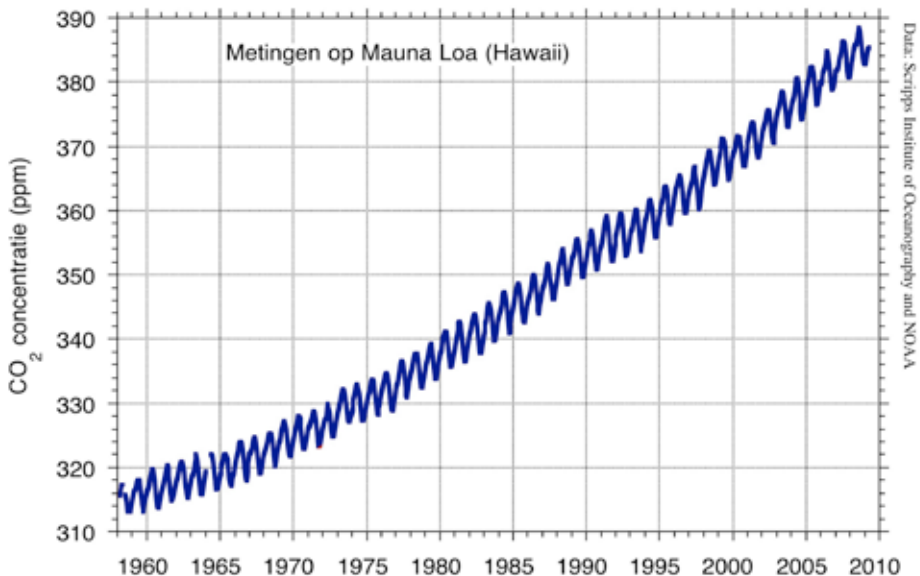
(bron: [www.klimaatportaal.nl](http://www.klimaatportaal.nl))



# 3. Klimaatverandering

## Toename broeikasgassen in atmosfeer

De samenstelling van de dampkring verandert in de loop van honderden, duizenden en miljoenen jaren voortdurend. Sinds de laatste ijstijd is die verandering echter nooit zo snel gegaan als de afgelopen eeuw, en een substantieel deel van die verandering is zeker op het conto van menselijke activiteit te schrijven. Het toenemend gebruik van fossiele brandstoffen als steenkool en aardolie heeft – samen met massale ontbossing – de afgelopen 150 jaar geleid tot een ophoping van kooldioxide in de atmosfeer. Ook de concentraties van methaan en lachgas zijn volgens vrijwel elke meting de afgelopen eeuwen toegenomen.



Kooldioxidemetingen op Mauna Loa (Hawaii)

In 1960 vond men dat in de heldere lucht boven Hawaï 317 moleculen kooldioxide op elke miljoen luchtmoleculen zaten. In 2008 was deze concentratie daar opgelopen tot 386 deeltjes per miljoen, en dit getal loopt inmiddels met ongeveer 2 per jaar op. Terugkijkend in de tijd, onder meer uit onderzoek van luchtbelletjes in eeuwenoud ijs op Antarctica, blijkt dat rond 1750, dus voor de Industriële Revolutie, de concentratie ongeveer 280 deeltjes per miljoen was.

Deze stijging wordt met zekerheid veroorzaakt door menselijke activiteiten. De verbranding van fossiele energiebronnen brengt kooldioxide in de atmosfeer, terwijl methaan en lachgas vooral zijn toe te schrijven aan de veranderingen in en de uitbreiding van de landbouw en veeteelt en het toegenomen verkeer. Deze verschillende bronnen kunnen herkend worden in de atmosfeer door gebruik te maken van specifieke eigenschappen van koolstof, zuurstof en stikstof die deze bronnen veroorzaken. Zo is koolstof in het kooldioxide afkomstig van fossiele brandstoffen eenduidig te herkennen.

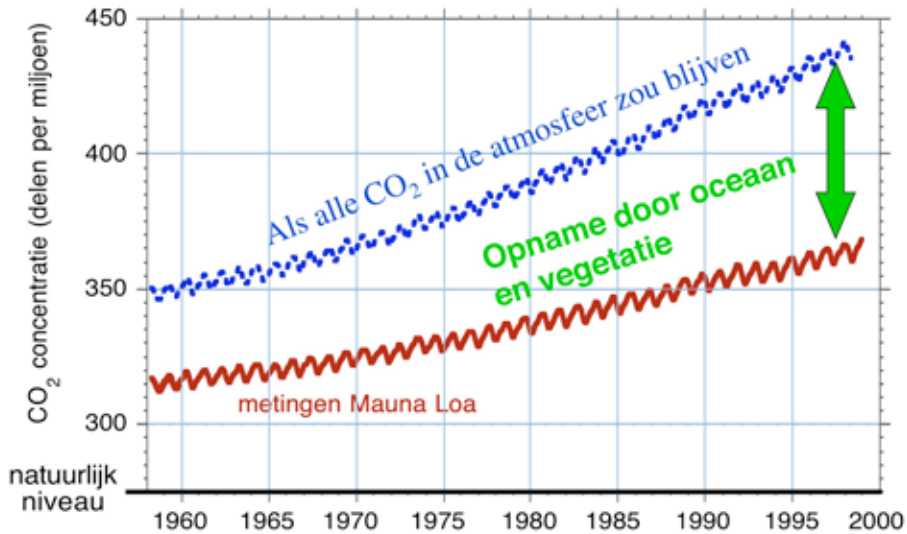
Dat de mens in staat is de samenstelling van de dampkring te wijzigen, blijkt ook wel uit de geschiedenis van het 'ozongat', de onverwachte afname van de ozonconcentratie boven het zuidpoolgebied die in 1985 werd ontdekt. De oorzaak hiervan bleek het gebruik van chloorfluorkoolwaterstoffen in spuitbussen en koelsystemen. Sinds die met het verdrag van Montreal in 1989 werden vervangen door andere stoffen, neemt hun concentratie in de dampkring langzaam weer af.

## Opname extra kooldioxide door zee en land

Uit de totale hoeveelheid gebruikte fossiele brandstoffen in de wereld valt betrekkelijk eenvoudig uit te rekenen hoeveel kooldioxide er in totaal in de atmosfeer is terechtgekomen. Dat zou, in het jaar 2000, hebben moeten leiden tot een concentratie van ongeveer 440 deeltjes per miljoen. In werkelijkheid werden 369 deeltjes per miljoen gemeten. Dat betekent dat een deel van de extra kooldioxide door verschillende ecosystemen wordt opgenomen. De oceaan speelt bij deze opname de grootste rol, en in natuurlijk landschap kan ook de vegetatie veel koolstof doorsluizen naar de bodem en naar veenpakketten. Planten groeien beter als er meer kooldioxide in de lucht is, en als er meer vegetatie is, wordt meer kooldioxide opgenomen en vastgelegd. Bodems onder graslanden blijken – meer nog dan bodems onder bossen – veel kooldioxide te kunnen opnemen. Samen blijken oceanen en landplanten tot op heden in staat ongeveer de helft van het extra kooldioxide vast te leggen.

Die absorptie van kooldioxide in het zeewater zou overigens wel een nieuw risico kunnen vormen. Het is een feit dat water door de opname van kooldioxide zuurder wordt – water plus kooldioxide geeft koolzuur. Dit gebeurt dus ook met de

oceanen. Daarmee verplaatst in ieder geval een deel van het probleem zich dus van lucht naar zee. De bezorgdheid over de verzuring is de laatste jaren gegroeid; over de exacte gevolgen bestaat nog veel onduidelijkheid.



*CO<sub>2</sub> in atmosfeer stijgt maar half zo snel als verwacht*

## Temperaturen

Terwijl de afgelopen eeuw de concentratie kooldioxide in de dampkring toenam, nam ook de gemiddelde temperatuur op aarde toe. Een oorzakelijk verband ligt voor de hand. Zeker omdat kooldioxide, net als methaan en lachgas, een zogenaamd 'broeikasgas' is.

De aarde warmt op door de zon, terwijl broeikasgassen de afkoeling van de aarde belemmeren. Er is op de lange termijn een evenwicht tussen opwarming en afkoeling, maar naarmate er meer broeikasgassen in de atmosfeer zijn, is de temperatuur waarbij dat evenwicht wordt bereikt, hoger.

De afgelopen eeuw is de temperatuur van het aardoppervlak tussen de 0,6 en 0,9 graden gestegen. Dat is een gemiddelde: terwijl de gematigde streken en de poolstreken vrij sterk opwarmden, warmden de tropen veel minder op. Koeler werd het eigenlijk de afgelopen honderd jaren nergens; de gemiddelde temperatuur van alle meetstations op aarde tezamen (de 'wereldgemiddelde temperatuur') is sinds 1980 elke tien jaar met ongeveer 0,2 graden gestegen.

De volgende vraag is dan, hoeveel warmt de aarde op als bijvoorbeeld de hoeveelheid kooldioxide in de dampkring is verdubbeld ten opzichte van voor de industriële revolutie?

De zoektocht naar het antwoord op die vraag is, in een notendop, het wetenschappelijk klimaatdebat. Het IPCC komt tot de volgende conclusie: een verdubbeling van de hoeveelheid kooldioxide leidt tot een opwarming die waarschijnlijk tussen de 1,7 en 4,4 graden ligt. Die marges zijn een maat voor de onzekerheid. Het wetenschappelijk onderzoek probeert die marges beter te onderbouwen en liefst nog te verkleinen, maar het is de vraag of dat laatste wel mogelijk is in de mate waarin we dat zouden willen.

In het klimaatdebat spelen speculaties over die onder- en bovengrens een belangrijke rol. Er zijn klimaatonderzoekers die redenen hebben te denken dat het klimaat minder gevoelig is en dat de stijging van de temperatuur bij een verdubbeling van het kooldioxidegehalte hooguit 1 graad zal zijn, en onderzoekers die menen dat de schatting van het IPCC veel te laag is. Een enkeling meent dat het door de toename van kooldioxide helemaal niet warmer zal worden; er is eigenlijk niemand die meent dat die toename leidt tot afkoeling.

De opwarming uit zich overigens ook in andere effecten. Enkele voorbeelden daarvan: De zeespiegel is in de afgelopen eeuw, mede als gevolg van klimaatverandering, met ongeveer 17 centimeter gestegen; Het totaaloppervlak zee-ijs in het noordpoolgebied is sinds 1978 met drie procent per tien jaar geslonken; En verspreidingsgebieden van diverse soorten organismen zijn daardoor gewijzigd.

## Oorzaak en gevolg

Het ligt voor de hand een oorzakelijk verband te leggen tussen de hoeveelheid kooldioxide in de atmosfeer en de temperatuurverhoging, en natuurkundig is daar ook veel voor te zeggen. Maar zo'n oorzakelijk verband is, strikt genomen, nimmer te bewijzen. Beide verschijnselen zouden bijvoorbeeld wel eens een gevolg kunnen zijn van een onbekende, achterliggende oorzaak. Bovendien is de aarde in het verleden ook wel eens door een andere oorzaak opgewarmd waardoor er meer kooldioxide in de lucht kwam. Dat gebeurde bijvoorbeeld na ijstijden, toen door veranderingen in de oceaancirculatie kooldioxide uit de diepe oceaan in de atmosfeer werd gebracht. Deze kooldioxide droeg vervolgens bij aan extra opwarming. En we kennen ook situaties in het zeer verre verleden zoals in de Krijtperiode (ongeveer 120 miljoen jaar geleden) toen er sprake was van een veel warmere aarde, gepaard gaande met een zeer hoog kooldioxidegehalte van de atmosfeer.

Maar het belangrijkste obstakel is toch, dat het klimaatsysteem een zeer complex systeem is met een haast onontwarbare kluwen van invloeden, elkaar tegenwerkende krachten en zichzelf versterkende factoren.

Naast broeikasgassen, zoals kooldioxide, methaan en waterdamp, hebben ook oceanen, ijskappen, de biosfeer – alles wat leeft op onze planeet – een belangrijke invloed op het klimaat. Ijskappen zijn bijvoorbeeld wit en reflecteren zonlicht, maar als ze smelten wordt minder zonlicht teruggekaatst.

Tegenover de opwarming staan bovendien afkoelende effecten. Zo bevorderen minieme stofdeeltjes (aerosolen) de vorming van wolken, en die kunnen zorgen voor het terugkaatsen van zonlicht.

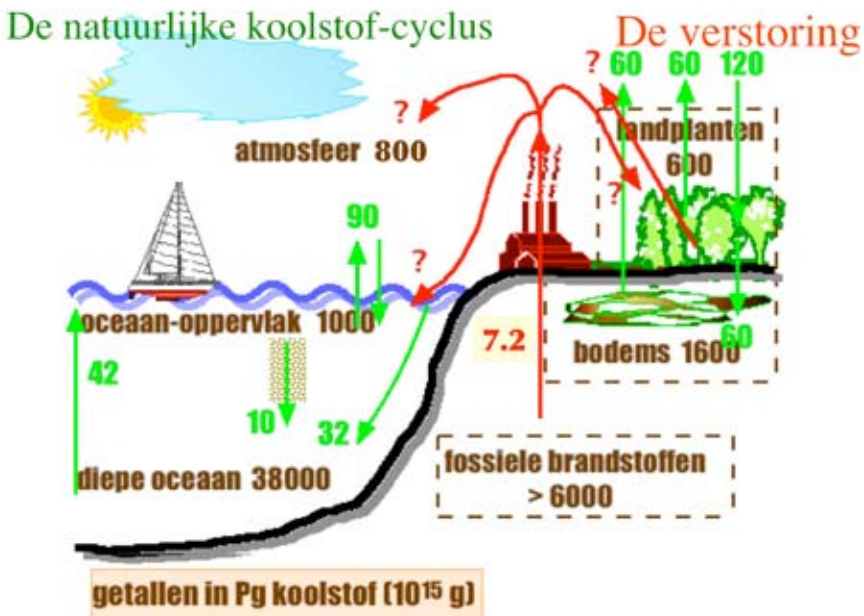
De wetenschappelijke manier om dit soort zaken aan te pakken en de kluwen te ontrafelen, is enerzijds via de bouw van modellen, anderzijds via een steeds nauwkeuriger reconstructie van klimaatveranderingen in het verleden en van de mechanismen die daarbij hebben gespeeld en waar mogelijk het in laboratoria nabootsen en onderzoeken van natuurlijke verschijnselen onder gecontroleerde omstandigheden. Het wetenschappelijk klimaatdebat gaat dus niet alleen over de interpretatie van de meetgegevens, maar ook over de bruikbaarheid van modellen bij het zoeken naar het verband tussen de toename van broeikasgassen en de opwarming van de aarde. Zijn de meetgegevens juist geïnterpreteerd en zijn de modellen niet te eenvoudig? Of juist te ingewikkeld? Wat past nog in het model en welke onverwachte ontwikkeling zou alle klimaatprojecties onderuit kunnen halen?

Omdat resultaten van klimaatmodellen een grote rol spelen in het klimaatdebat is het belangrijk een idee te geven wat een dergelijk model is, wat er met deze modellen kan worden berekend en wat de beperkingen ervan zijn.

# 4. Klimaatmodellen

In vrijwel elke wetenschap is een belangrijke rol toebedeeld aan modellen. Modellen zijn ervoor om, zowel in de sociale als in de natuurwetenschappen, verschijnselen beter te kunnen onderzoeken, te verklaren en op grond van verklaring eventueel te voorspellen.

Ook in de klimaatwetenschap zijn modellen onontbeerlijk. Met als extra probleem natuurlijk, dat het aardse klimaat uniek is. Er zijn niet een heleboel aardes waar we kunnen kijken hoe de verschillende processen zich afspelen. Er is ook



De natuurlijke koolstofcyclus: de jaarlijkse uitwisseling (in groen) tussen koolstofreservoirs (in bruin) en de verstoring door de mens (in rood)

geen tweede aarde waar we, om te oefenen, bepaalde processen constant kunnen houden en andere veranderen, en dan kunnen zien wat er gebeurt – al kunnen in laboratoriumexperimenten wel processen nagebootst en onderzocht worden, en kunnen klimaatveranderingen in het verleden onder gunstige omstandigheden wel gebruikt worden als ‘natuurlijk experiment’. We moeten het doen met onze natuurwetenschappelijke kennis, ons begrip van het verleden, en met modelberekeningen op supercomputers die het aardse klimaat zo goed mogelijk nabootsen.

Zoveel mogelijk invloeden worden zo goed mogelijk gekwantificeerd, dus in cijfers uitgedrukt, en in een computermodel verwerkt. Daarmee wordt dan geëxperimenteerd: de ene invloed laat men wat sterker worden, de andere wat zwakker, totdat het model redelijk genoeg overeenkomt met de beschikbare waarnemingen. Als nu één factor essentieel blijkt voor de overeenstemming tussen model en waarnemingen, dan zegt men dat de verandering kan worden toegeschreven aan die factor. Niet de ‘oorzaak’ wordt gezocht, maar de factor die de zaak beslissend beïnvloedt in het gekozen model. Vandaar dat klimaatonderzoekers de nadruk leggen niet alleen op modellen, maar ook op ‘kwantificeerbare’ effecten.

Klimaatmodellen hebben hun beperkingen, maar ze worden steeds beter. In de eerste klimaatmodellen, uit 1990, werden bijvoorbeeld nog geen oceaanstromingen meegenomen, terwijl in 2005, in de klimaatmodellen, deze stromingen wereldwijd in detail konden worden berekend. In de volgende generatie klimaatmodellen, voorzien in 2014, komt vooral aandacht voor een betere representatie van biologische processen zoals plantengroei, landbouw en de biologische activiteit in oceanen.

Het is onbekend hoe de concentratie broeikasgassen zal toenemen tot het jaar 2100, maar er is een aantal scenario’s gemaakt. Met behulp van deze scenario’s kunnen met klimaatmodellen ‘projecties’ – het zijn uitdrukkelijk geen voorspellingen – worden gemaakt van mogelijke gevolgen (temperatuur, neerslag) van de veranderingen in de concentraties broeikasgassen (en ook van de externe invloeden zoals vulkaanuitbarstingen). Voorspellen is moeilijk, het verkennen van mogelijke effecten is wel degelijk mogelijk.

Maar al worden de modellen steeds accurater, er zullen altijd onvolkomenheden blijven en grenzen aan de nauwkeurigheid van de projecties. De waarnemingen en rekenmethoden zijn onvolledig, onze theorieën beperkt, en de computers nog veel te traag voor wat we eigenlijk willen berekenen. Minieme veranderingen kunnen bovendien grote gevolgen hebben, waardoor sommige aspecten van het klimaatsysteem ook fundamenteel onvoorspelbaar blijven – zelfs als we heel veel meer zouden weten. Het beter begrijpen van processen leidt niet altijd tot een grotere voorspelkracht.

Het is en blijft denkbaar dat alle modellen die tot op heden zijn gebouwd, resultaten geven die ver zullen afwijken van de werkelijkheid van het jaar 2011. Maar ze zijn gebaseerd op de beste kennis die we nu hebben, en ze verklaren belangrijke ontwikkelingen in het klimaat van de vorige eeuw. De projecties met deze modellen

geven aan dat het in 2100, als we het scenario volgen van een toenemend gebruik van fossiele brandstoffen, op aarde gemiddeld tussen de 1,1 en 6,4 graden warmer zal zijn dan in 1990. Dat lijkt misschien niet zoveel, maar hierbij moet worden bedacht dat een temperatuurverhoging van enkele graden, mede afhankelijk van de plaats op aarde, zeer ingrijpende gevolgen kan hebben!

Politici lijken aan te nemen dat deze grenzen nog wel nauwkeuriger worden als het onderzoek vordert, maar dat is, alweer, niet noodzakelijk: het kan best zijn dat in nader onderzoek nieuwe onzekerheden opduiken, waardoor de onzekerheidsmarges zelfs breder worden. Wie wacht tot de wetenschap honderd procent zekerheid biedt, miskent het grillige karakter van het unieke klimaatsysteem waarin chaotisch gedrag en positieve terugkoppelingen kunnen optreden.



# 5. Twistpunten en onzekerheden

Sommige invloeden die in klimaatmodellen worden meegenomen zijn onomstreden of vrijwel onomstreden, over andere wordt nog veel getwist. Niet zozeer over de vraag of een bepaalde invloed in het model verwerkt moet worden, maar vooral over de vraag hoe groot het effect dan is, hoe het aangrijpt op andere effecten, en hoe gevoelig de modelresultaten zijn voor kleine en grote veranderingen in de begintoestand. En natuurlijk over de vraag hoe goed de waarnemingen vervolgens overeenstemmen met het model en omgekeerd.

## Temperaturen vroeger en nu

Waren de Romeinen al begonnen met het nauwkeurig bijhouden van de temperatuur, dan zou het klimaatdebat misschien eenvoudiger zijn. En als er op elke vierkante kilometer op aarde een thermometer stond, zou het ook een stuk schelen. Zoals de zaken er nu voor staan, zitten er nog veel gaten in de ‘temperatuurbestanden’.

De wereldgemiddelde temperatuur is de laatste vijftig jaar gestegen en we horen regelmatig dat er weer records zijn gebroken. De uitersten van de ‘natuurlijke variatie’, die ook zonder ophoping van kooldioxide kunnen worden bereikt, zijn echter nog niet goed bekend. Als we ons hierbij beperken tot het recente verleden (omdat alleen die periode relevant is voor de nabije toekomst) dan zijn er in de dertiende, de zeventiende en de negentiende eeuw perioden geweest die relatief koel waren en ook zijn er wel relatief warmere periodes geweest. Misschien dat het rond 1935 wat warmer was dan de rekenmodellen als uitkomst geven. Het IPCC wijst er niet ten onrechte op dat het altijd om waarschijnlijkheden gaat: eens in de zoveel jaar zal, door een samenloop van natuurlijke omstandigheden, zoals een periode met weinig vulkaanuitbarstingen samen met een sterke El Niño en toevallig hoge zonneactiviteit, de temperatuur onverwachts kunnen stijgen.

Ook critici van het IPCC onderkennen deze onzekerheid, maar zij menen dat daardoor juist de stelling dat er sprake is van opwarming door de toename van broeikasgassen wordt ondergraven. Als het IPCC zo onzeker is over de temperaturen van vroeger, hoe kan het dan zeggen dat het nu zoveel warmer is dan vroeger? Daarmee komt ook de tegenwerping van critici dat het vroeger veel warmer was dan nu, een beetje op losse schroeven te staan. Misschien degen de temperatuurgegevens van rond 1935, of van de dertiende eeuw, ook niet helemaal. En zelfs als het in de middeleeuwen veel warmer was dan het nu is, zeggen klimaatonderzoekers verder, dan betekent dit alleen dat de wisselvalligheden van het klimaat groter zijn dan we dachten, niet dat de fysica van het broeikaseffect ondergraven wordt.

Meetreeksen van instrumenten zoals de thermometer zijn pas voor de laatste twee eeuwen beschikbaar en dan nog voor een beperkt deel van onze aarde. Willen we het klimaat weten van langer geleden, kunnen we gebruik maken van 'indirecte maten' – *proxy's* in jargon. Zo kunnen verschuivingen van de bosgrens bepaald worden aan de hand van boompollen in sediment, en dat vormt dan een maat voor de temperatuur. Een minder nauwkeurige maar meer aansprekende proxy is de datum van de start van de wijnoogst in Frankrijk, die informatie geeft over de zomertemperatuur. De in de ijskappen van Groenland en Antarctica opgeslagen sneeuw levert door de eigenschappen van de zuurstofatomen eveneens een maat voor de temperatuur. Elke proxy moet worden 'gekalibreerd' met andere directe en indirecte maten. Dat is een bron van onzekerheid die niet moet worden vergeten bij de presentatie en discussie van proxy-meetreeksen.

Ook moderne temperatuurmetingen liggen af en toe onder vuur. Toen onderzoekers de temperaturen op grote hoogten in de dampkring gingen meten, zagen ze tot hun verrassing dat die niet overeenstemden met de verwachtingen. Als het in de lagere delen van de atmosfeer warmer wordt, moet het in de hogere luchtlagen, de stratosfeer, afkoelen. Uit satellietmetingen bleek het tegendeel: ofwel de theorie klopte niet, ofwel de metingen klopten niet. Het laatste bleek het geval te zijn. Toen de data beter werden bestudeerd en een aantal fouten eruit werden gehaald in de verwerking ervan, bleek er wel degelijk sprake van het verwachte effect. Niet helemaal – de temperatuurontwikkelingen in de tropen kunnen nog steeds niet helemaal worden verklaard – maar de meeste onzekerheden zijn er wel uit: het wordt inderdaad koeler in de stratosfeer.

## Thermometers

Iets dergelijks geldt voor de plaatsing van de thermometers op aarde. Het klinkt eenvoudig, maar ook hieraan zitten allerlei haken en ogen die klimaatonderzoekers pas langzamerhand, zelf of op aangeven van critici, hebben onderkend.

Een bekende is het 'urban heat effect': thermometers staan van oudsher in en rond steden, maar steden worden groter, produceren meer warmte, en drijven dus de temperaturen op. Dat vertekent de metingen. Inmiddels wordt voor dit effect in de observaties gecorrigeerd; de omvang van dit effect blijkt overigens klein te zijn.

Een vergelijkbaar effect waarmee rekening moet worden gehouden, is dat de thermometers steeds vaker bij vliegvelden staan – eveneens flinke 'warmte-eilanden'. Ook wil de kwaliteit van de stations nog wel eens te wensen overlaten, ze voldoen niet allemaal aan de hoogste meteorologische eisen. Die kritiek hebben de klimaatwetenschappers zich evenzeer aangetrokken, en het is een van de factoren die maakt dat de onzekerheden af en toe groter worden door wetenschappelijk onderzoek in plaats van kleiner.

Ten slotte is niet iedereen ervan overtuigd dat voor de onregelmatige verdeling van de thermometers op aarde geheel gecorrigeerd kan worden: de afgelopen decennia zijn veel stations ontmanteld, vooral in het hoge noorden van Canada en Siberië. Maar ook als die uit de eerdere metingen worden verwijderd, blijft het opwarmingseffect bestaan. Er is tot nu toe geen studie die uitkomt op een afkoeling of zelfs maar een nagenoeg constante temperatuur in de afgelopen vijftig jaar.

## Vulkanisme

Bij de uitbarsting van vulkanen wordt veel gas en as in de atmosfeer geworpen. Die beïnvloeden het klimaat op allerlei ingewikkelde manieren, en bovendien is de samenstelling van het gas en de as per uitbarsting nogal onvoorspelbaar. Het staat wel vast dat vulkaanuitbarstingen, zoals van de Pinatubo in 1991 en de Tambora in 1815, leidden tot stevige en soms rampzalige afkoeling – het jaar 1816 staat bekend als het 'jaar zonder zomer': het gemiddelde van de temperaturen op aarde daalde zeker 0,4 graden en misschien zelfs 0,7 graden.

Hierdoor kan een broeikaseffect verbloemd worden, zowel in heden als verleden. Maar geologen hebben geen enkele aanleiding om te denken dat er enig systeem zit in de vulkanische activiteit op deze termijn. Na een vulkaanuitbarsting duurt het een paar jaar, niet tientallen jaren, voor alle stof is neergedwarreld en het effect op de wereldtemperatuur is verdwenen.

## Oceanen, waterdamp en wolken

Het grootste hiaat in de kennis betreft waarschijnlijk de effecten van oceaanstromingen, waterdamp en wolken. Door opwarming van de aarde kan de warmere atmosfeer meer waterdamp bevatten. Waterdamp is op zichzelf een broeikasgas, dus zou dat de opwarming op zijn beurt kunnen versterken. Maar uit waterdamp ontstaan wolken die zonnestraling kunnen tegenhouden. En er zijn ook wolkentypes die het broeikaseffect juist versterken.

Ook roet en andere broeikasgassen als methaan en lachgas hebben subtiele effecten, ook weer in wisselwerking met kooldioxide, en die zijn nog lang niet allemaal in kaart gebracht. Deze onzekerheden bepalen voor een groot deel de discussie over de 'klimaatgevoeligheid': als in een klimaatmodel de rol van waterdamp als broeikasgas domineert, is het netto broeikaseffect veel groter dan wanneer waterdamp vooral een rol krijgt toebedeeld in wolkvorming. Er zijn critici van het IPCC die menen dat waterdamp de meeste opwarming kan verklaren, maar er zijn ook critici die menen dat het IPCC de gevaren van toenemende waterdamp in de atmosfeer juist onderschat. Nader onderzoek zal hier duidelijkheid moeten scheppen.

Dat geldt ook voor de al eerder genoemde rol die oceanen spelen. Bekend is dat oceanen circa dertig procent van het extra kooldioxide uit de dampkring kunnen opnemen, maar er zijn aanwijzingen dat dit in de komende decennia minder zal worden – bovendien wordt door opwarming van de oceanen weer kooldioxide in de dampkring gebracht – waardoor de oceanen netto minder kooldioxide opnemen. Overigens is nog niet duidelijk wat deze opname voor gevolgen heeft voor het leven in de oceanen; de zorgen daarover nemen echter toe. Veel van dit onderzoek staat nog in de kinderschoenen.

## Ijs en gletsjers

Uit de cijfers van het IPCC blijkt dat de gletsjers wereldwijd aan het krimpen zijn. Het is niet zonder meer duidelijk hoe groot de menselijke invloed daarbij is (via het broeikaseffect) en wat aan natuurlijke variatie is toe te schrijven (de gletsjers krimpen en groeien altijd afhankelijk van bijvoorbeeld veranderingen in de neerslag). Het is hoe dan ook opmerkelijk dat de jongste terugtrekking van de gletsjers al begonnen is voordat de hoeveelheid kooldioxide in de dampkring toenam. Een complicerende factor bij de ijskappen is de lange reactietijd. Zo reageert de Antarctische ijskap bijvoorbeeld nog op de overgang van de laatste ijstijd naar het huidige interglaciaal die ongeveer 10.000 jaar geleden plaatsvond. De ijskap is voortdurend in beweging waardoor een precieze diagnose nog onmogelijk is. Dit bemoeilijkt het inschatten van het toekomstig gedrag van de ijskap aanzienlijk.

Ook hier geldt dat alleen goede metingen en goede modellen uitkomst bieden. Zeker is dat het gedrag van ijs – zowel van zee- als landijs – lastig te begrijpen is.

Het IPCC vestigde ongewild nogal de aandacht op de gletsjers door een merkwuurde fout in zijn laatste deelrapport over de effecten van klimaatverandering uit 2007: in plaats van te schrijven dat alle gletsjers in de Himalaya in 2350 zouden zijn verdwenen, stond er '2035'. Die misser was door alle onderzoekers en redacteurs over het hoofd gezien doch er werd ook niet ontkennd dat het een fout was, en het IPCC was niet in staat de publicitaire storm die opstak snel tot bedaren te brengen. Het was de aanleiding voor een kritisch rapport over het IPCC dat op verzoek van de Verenigde Naties werd opgesteld door de InterAcademy Council. Daarin werd onder meer aanbevolen de bestuursstructuur van het panel grondig te herzien, en de procedures nog verder aan te scherpen en zo transparant mogelijk te werken – op de samenvattende conclusies van de IPCC rapporten werd overigens niet afgedongen.

## De zon

De warmtestraling van de zon varieert in een cyclus van ongeveer elf jaar, en dat heeft effect op de aardse temperaturen. Daarnaast zijn er langere perioden van wisselende activiteit, die sterrenkundigen nog niet helemaal kunnen verklaren. Ook de kortere cyclus is nog niet zo goed doorgrond als de deskundigen wel zouden willen.

Deze onduidelijkheid, plus de waarneming dat de zon misschien een deel van de verklaring van vroegere klimaatveranderingen vormt, maakt de zon tot één van de favoriete wapens van critici van het door de mens versterkte broeikas-effect. Juist omdat de zon en de variaties in de zonneactiviteit niet goed worden begrepen, worden daar door sommigen grote effecten aan toegeschreven – waarmee de rol van broeikasgassen navenant kleiner wordt.

Het is volgens sommige onderzoekers zelfs niet ondenkbaar dat de zonneactiviteit de komende jaren zo vermindert dat de temperatuur op aarde zal dalen.

Maar ook al is de invloed van de zon nog niet volledig in beeld – allerlei mogelijke versterkingsmechanismen zijn nog onvoldoende in kaart gebracht —, in klimaatmodellen waarin met de zon rekening wordt gehouden, blijkt haar invloed klein te zijn. Er wordt gespeculeerd over andere manieren waarop de zon een rol van betekenis zou kunnen spelen, maar tot op heden zijn er geen overtuigende mechanismen naar voren gebracht.

En alweer, de invloed van de zon maakt de zaak wel ingewikkelder, maar ondergraaft de mogelijke gevolgen van het versterkte broeikaseffect niet.

## De rol van de mens

De wereldbevolking kent de afgelopen periode een spectaculaire groei. Waar rond het begin van onze jaartelling naar schatting 300 miljoen mensen de aarde bevolkten, bereikten we het eerste miljard rond 1800 en groeien we naar zeven miljard mensen in 2011. Die sterk gegroeide populatie heeft een toenemende invloed op de staat van 'planeet Aarde' en is op haar beurt gevoelig voor klimaatveranderingen. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de sterk toegenomen bevolkingsconcentraties in voor zeespiegelstijging gevoelige gebieden.

De mens heeft overigens meer invloed op het klimaat dan alleen door de uitstoot van broeikasgassen. Zo is veranderend landgebruik een belangrijke factor. En ingrepen die we om diverse redenen doen, kunnen verschillend uitpakken. Zo zouden maatregelen om de lucht schoner te maken, kunnen leiden tot een opwarming van de aarde (bij schonere lucht is er minder koeling door stofdeeltjes), terwijl de aanplant van bossen en beter beheer van graslanden de opwarming wellicht kunnen verminderen.

Hierbij dient bedacht te worden dat beleidskeuzen niet alleen klimatologische, maar ook politieke, economische, sociale en psychologische aspecten hebben. De derde werkgroep van het IPCC is op deze wisselwerkingen veel dieper ingegaan, hier stippen wij slechts enkele voorbeelden aan. Zo kan de overheid besluiten tot opslag van kooldioxide in de diepe ondergrond, maar het recente verleden laat zien dat zij daarbij niet kan voorbijgaan aan de maatschappelijke gevolgen van zo'n maatregel. Belasting op uitstoot van kooldioxide en energieheffingen zijn ingrepen die al evenzeer allerlei verwachte maar ook onverwachte en ongewenste gevolgen kunnen hebben. Maatregelen die het autogebruik moeten beperken, kunnen ingrijpen op de privacy. Keuzes voor bepaalde energiedragers en geavanceerde ecologische landbouwmethoden kunnen zeer verstrekkende consequenties hebben – op klimaatgebied, maar ook voor bijvoorbeeld economische ontwikkeling. Dat vormt zeker voor landen in de Derde Wereld een kans maar ook vaak een ernstig dilemma.

## Ten slotte

Onderzoek naar het klimaat, en zeker naar de veranderingen in het klimaat, is pas sinds kort goed op gang gekomen. De natuurlijke variaties kunnen vrij groot zijn, het aantal waarnemingen is veelal nog beperkt. Daardoor is het moeilijk toevallige schommelingen van echte trends te scheiden – laat staan er een oorzaak voor te vinden. ‘De tijdreeksen zijn te kort’, zeggen klimaatwetenschappers dan. Zij hebben dan ook vanaf het begin op de onzekerheden gewezen. Het IPCC heeft ervoor gekozen de onzekerheidsmarges – veelal gebaseerd op oordelen van deskundigen – alleen in woorden uit de drukken: *likely, very likely, unlikely, ...*. In de praktijk blijken media en politici deze termen te negeren of niet te begrijpen, wat weer koren op de molen was van critici.

Ondertussen zijn niet alle bezwaren die door critici worden geuit nog even actueel – voor het ‘urban heat effect’ wordt allang gecorrigeerd, maar het wordt door sommigen nog steeds als ernstige ondergraving gepresenteerd. Zo ook is de rol van de zon weliswaar onzeker, maar voor de nu vastgestelde globale veranderingen in ieder geval tot op heden ingeschat als klein. Tot er misschien nieuwe inzichten komen, is er geen reden de betrouwbaarheid van alle projecties voor de nabije toekomst in twijfel te trekken op grond van onbegrepen variaties in zonnestraling.

En uiteraard moeten we hierbij niet uit het oog verliezen dat er wel degelijk feiten liggen waar we niet omheen kunnen, zoals het snel stijgende kooldioxidegehalte van de atmosfeer en een, mondiaal gezien, stijgende gemiddelde temperatuur.

Het is hierbij van groot belang om de resultaten van onderzoek zo helder mogelijk te presenteren met de bijbehorende (on)zekerheidsmarges en ook ruimte te blijven bieden voor verschillende wetenschappelijke theorieën waar het de interpretatie van metingen betreft. Dat is een belangrijke opgave voor het IPCC.

Op verschillende tijdstippen, in verschillende landen en bij verschillende groepen maakt men over al deze punten, zelfs al zouden ze buiten kijf staan, verschillende afwegingen – de een is meer risicomijdend dan de ander, voor de ene groep staan meer of andere belangen op het spel dan voor de andere. Het klimaatdebat is dan ook, naast een wetenschappelijk debat, een onvervalst politiek debat. Dat hoort het ook te zijn: de politiek beschouwt zelf de onzekerheden, en neemt mede op basis daarvan zelf beslissingen. De wetenschap kan onderzoek doen en risico’s, kansen en grenzen aangeven, de politiek besluit tot afwachten, licht bijsturen of krachtig ingrijpen.

## 6. Enkele aanbevelingen voor beleid en onderzoek

Er is de laatste jaren al veel vooruitgang geboekt, maar het leren begrijpen van het klimaatsysteem blijkt een buitengewoon ingewikkeld probleem voor de wetenschap. Het maken van projecties van de veranderingen in dat klimaat voor de komende eeuw is een nog veel grotere uitdaging. Zoals aangeduid in vorige hoofdstukken zijn vele factoren nog onvoldoende begrepen, de manier waarop ze elkaar beïnvloeden, versterken en verzwakken nog minder, en het samenbrengen van al die factoren en wisselwerkingen in modellen vergt grote inspanningen. Nog lastiger is het een eenvoudig antwoord te geven op de vraag welke beleidsmaatregelen snel en doeltreffend zijn om klimaatverandering tegen te gaan of op te vangen.

Aan de verandering van het klimaat kleven grote en kleine risico's, en het is lastig daarmee om te gaan – al was het maar omdat er bij klimaatverandering soms zelfs nog geen overeenstemming is over de ernst van die risico's. Elk menselijk ingrijpen, en elke technologische ontwikkeling, heeft onoverzienbare consequenties, maar ook niet-ingrijpen en niet-innoveren heeft consequenties.

De Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen is ervan overtuigd dat er geen aanleiding meer is de gevolgen van de toegenomen concentratie kooldioxide en andere broeikasgassen in de atmosfeer te bagatelliseren of weg te wuiven. Zeker, de materie is complex, maar de tot nu toe waargenomen veranderingen zijn zo evident, en de eventuele consequenties kunnen zo groot zijn, dat er alle reden is de verschijnselen serieus te nemen.

Het zou stellig van weinig wijsheid getuigen een beleid te voeren alsof er geen probleem is, alsof de problemen vanzelf wel verdwijnen, of alsof er vanzelf een oplossing voor zal worden bedacht.

Beter is het al, te kiezen voor een 'beleid zonder spijt': een beleid dat, mocht het verkeerd uitpakken, zonder veel moeite teruggedraaid kan worden, en dat gerechtvaardigd kan worden op grond van baten buiten de sfeer van het klimaat. Ook al zou



de klimaatverandering milder uitpakken dan verwacht dan nog is het, in het kader van andere overwegingen zoals zorg om toekomstige energievoorziening en duurzame ontwikkeling, verstandig in het beleid rekening te houden met de klimaatverandering zoals die wordt verwacht in de rapporten van het IPCC.

Maar de KNAW acht zo'n 'beleid zonder spijt' wel erg minimaal. Niet alleen omdat de discussie daarmee in feite wordt verplaatst naar de vraag welke maatregelen dan tot dat beleid zouden behoren, maar ook omdat hiermee het beleid tot een regionaal en nationaal probleem wordt gereduceerd, terwijl een internationale, gezamenlijke inspanning nodig is.

Er staan, nu nog, voldoende betrekkelijk eenvoudige beleidsopties open om de eventuele opwarming te vertragen en de effecten ervan te verkleinen. Het voert in het kader van deze brochure te ver hier een uitgebreide opsomming te geven en alle voordelen tegen alle nadelen in overweging te geven, maar gewezen kan worden op voortgaand onderzoek gericht op het bevorderen van het gebruik van niet-fossiele brandstoffen en materialen, het verhogen van de efficiëntie van energieopwekking, het ontwikkelen van schonere productieprocessen, het uitbreiden van de markt voor broeikasgasemissierechten en opvang van kooldioxide met name door de vergroting van de hoeveelheid vegetatie op aarde.

Bovendien, en dat wordt nogal eens uit het oog verloren, is klimaatverandering bepaald niet alleen een technologisch probleem met alleen technologische oplossingen. Er wordt al uitgebreid nagedacht en gediscussieerd over maatschappelijke veranderingen – in consumptiegedrag, in productiemiddelen, in bedrijfsvoering, bestuur en beleid. Het is daarom goed dat de sociale wetenschappen steeds meer een rol gaan spelen bij de discussies over klimaatverandering, en dat ook binnen de KNAW steeds meer belangstelling bestaat voor een brede aanpak over de disciplines heen.

Het IPCC zal zich moeten inspannen, vooral door verbetering van communicatie, het vertrouwen terug te winnen van overheden en publiek. De adviezen van de InterAcademy Council over de werkwijze van het IPCC bij het komende, vijfde rapport zullen, zo heeft het panel toegezegd, ter harte worden genomen, en ook voor het overige is het IPCC zich ervan bewust dat de keuzes en de werkwijze nog transparanter en minder opiniërend kunnen. Het is goed dat ook ruimte aan critici en buitenstaanders wordt gegeven om een bijdrage aan de discussie te leveren.

Veel is al bekend over het klimaat van vroeger en nu, maar er is ook nog veel onderzoek nodig door wetenschappers uit alle relevante disciplines. Het klimaatdebat maakt niet alleen duidelijk dat de wetenschap middenin het maatschappelijke krachtenveld staat en nog beter moet leren hoe daar mee om te gaan, het maakt ook duidelijk dat er nog talloze belangrijke en minder belangrijke hiaten in onze kennis zitten. Ook daarmee moet de wetenschap, en de samenleving, omgaan en leren omgaan.

Voor de maatschappelijke besluitvorming is het van groot belang dat er een goed en breed gedeeld beeld bestaat van risico's en van zekerheids- en onzekerheidsmarges. De rol van de media is hierbij ook van groot belang.

De toon van het klimaatdebat was de afgelopen jaren verhard, maar lijkt inmiddels weer wat milder te worden. 'Sceptici', 'neutralen' en 'alarmisten' binnen en buiten de wetenschap raken weer in gesprek, en de discussie gaat weer over de aannames, analyses, diagnose en conclusies. De Akademie juicht dat, uiteraard, zeer toe en kan slechts hopen dat de nodige discussies op niveau kunnen worden gevoerd, op basis van wetenschappelijke gegevens en rationele argumenten.

# 7. Samenvattende statements

- a. De mensheid verandert de samenstelling van de dampkring snel en ingrijpend. De toegenomen concentratie kooldioxide en andere broeikasgassen kan niet gebagatelliseerd worden.
- b. Ongeveer de helft van het door de mens extra geproduceerde kooldioxide blijft in de atmosfeer. De rest wordt door de oceanen en de landvegetatie/-bodem opgenomen.
- c. De absorptie van kooldioxide in oceanen leidt tot verzuring van hun water. Ontbossing en urbanisatie leidt tot een verminderde opname van kooldioxide door de bodem.
- d. De laatste vijftig jaar is er sprake van een stijging van de wereld gemiddelde temperatuur. De periode 2001-2010 was het warmste decennium sinds de systematische metingen rond 1850 begonnen.
- e. De huidige klimaatmodellen verklaren klimaatveranderingen in de 20<sup>e</sup> eeuw in hoge mate. Volgens deze modellen is de waargenomen stijging van de gemiddelde temperatuur op aarde niet goed te verklaren zonder het effect van de door de mens extra geproduceerde broeikasgassen in de berekeningen te betrekken.
- f. Als we het scenario volgen van het gebruik van steeds meer fossiele brandstoffen geven de modelprojecties aan dat de gemiddelde temperatuur op aarde in het jaar 2100 tussen de 1,1 en 6,4 graden hoger zou kunnen zijn dan in 1990.
- g. Minieme veranderingen kunnen grote gevolgen hebben voor het klimaat. Deze eigenschap is, zeker voor een uniek systeem als het klimaat, een dwingende reden om grote abrupte (op de tijdschaal van tientallen jaren) veranderingen (b.v. een enorme stijging van kooldioxide) zoveel mogelijk te beperken.

# Verantwoording

De KNAW heeft begin 2010, mede in het licht van de soms felle, deels gepolariseerde discussies, besloten om in een brochure aan te geven wat de stand van de wetenschap rond klimaatverandering is en wat we van de wetenschap al dan niet mogen verwachten. Daartoe is een ad-hoccommissie geformeerd, bestaande uit de Akademieleden Henk Dijkstra, Louise Fresco, Henry Hooghiemstra, Hans Opschoor en Rudy Rabbinge, waarbij laatstgenoemde als voorzitter fungeerde.

Deze commissie heeft onder meer een discussiebijeenkomst georganiseerd waarin de problematiek van klimaatverandering vanuit diverse invalshoeken is gepresenteerd en bediscussieerd, met een zekere nadruk op controversiële aspecten zoals die in het publieke debat naar voren waren gekomen. De resultaten daarvan en uiteraard de nodige andere informatie hebben input gevormd voor de brochure. De conceptopzet daarvan is besproken in een speciale bijeenkomst voor KNAW-leden. Het concept van de brochure is vervolgens via het KNAW-bestuur onderworpen aan een *review-procedure*. De resultaten daarvan zijn weer verwerkt door de commissie, waarna het KNAW-bestuur de tekst voor publicatie heeft vastgesteld.

De commissie is vanuit het KNAW-stafbureau bijgestaan door Linda Groen, Irene van Houten en Jaap Kuiper. Wetenschapsjournalist Hans van Maanen heeft de tekst van de brochure geredigeerd.

Met dank aan prof. dr. Harro A.J. Meijer (Rijksuniversiteit Groningen) voor het ter beschikking stellen van figuren.