

Hoezo klimaatverandering







PIER VELLINGA

HOEZO KLIMAATVERANDERING

*Feiten, fabels
en open vragen*



UITGEVERIJ BALANS



Copyright © 2011 Pier Vellinga / Uitgeverij Balans, Amsterdam

Alle rechten voorbehouden.

Omslagontwerp Anton Feddema

Omslagillustratie [?]

Redactionele bewerking Louise Koopman

Boekverzorging Jos Bruystens, Maastricht

Druk Wilco, Amersfoort

ISBN 978 94 600 3303 2

NUR 740

www.uitgeverijbalans.nl





Inhoud

Inleiding	9
1 Klimaatverandering – wie moeten we geloven?	11
Extra broeikasgassen, waar komen ze vandaan en wat is hun invloed?	11
Wat is klimaat?	15
De zon, vulkanen en El Niño	16
Invloed van de mens	19
Beperken van broeikasgassen, dijken verhogen of afwachten?	20
Internationale samenwerking	21
2 Overdrijven de klimaatonderzoekers?	23
Modellen en scenario's	24
De Club van Rome	26
Zure regen	31
De ozonlaag	34
De communicatie tussen wetenschap en politiek	37
3 Hoe reëel is de opwarming zolang het IJsselmeer nog dichtvriest?	41
Wordt het wel warmer?	44



De rol van de zon	46
De ‘vingerafdruk’ van de zon en van broeikasgassen	48
Het IPCC in 1990 over de temperatuur in 2010	50
4 Wordt de invloed van de mens op het klimaat overschat?	54
IJstijden	55
Broeikasgassen en opwarming	60
De koolstofkringloop	60
Kan de opwarming worden gecompenseerd door een aanstaande ijstijd?	62
Vulkanen	63
5 Hoe erg is dat, een iets warmere wereld?	64
Wat te verwachten bij 1 tot 2 graden temperatuurstijging?	65
Wat als de temperatuur met 3 tot 4 of nog meer graden stijgt?	68
Kantelpunten: hoe stabiel is het klimaatsysteem?	70
CO ₂ en de verzuring van de oceanen	76
Is CO ₂ een giftige stof?	78
Natuurrampen en klimaatverandering	79
Verzekeraars en schade door natuurrampen	83
Aansprakelijkheid voor klimaatschade	84
6 Kunnen we ons niet simpelweg aanpassen aan klimaatverandering?	86
Emissievermindering of aanpassing? Een economische afweging	87
Waar gaat het om bij aanpassing aan klimaatverandering?	92
Klimaatverandering en natuur	94
Een nieuw Deltaplan	95
Oplossingen voor Nederland bij sterke stijging van de zeespiegel	98

Hoeveel kost het om Nederland klimaatbestendig te maken?	102
7 Is overschakelen op andere energiebronnen niet veel te duur?	104
Ondergrondse opslag van CO ₂ en kernenergie	107
Duurzame energie en efficiëncyverhoging	109
Mobiliteit en vervoer	116
Hoe zit het met de andere broeikasgassen?	117
Minder vlees eten?	118
8 Feiten, fabels, en echte onzekerheden	120
Feiten	120
Fabel 1: de opwarmende werking van CO ₂ is slechts een hypothese	121
Fabel 2: het wordt niet warmer; de metingen van de temperatuur kloppen niet	127
Fabel 3: niet de aanwezigheid van broeikasgassen, maar de zon warmt de aarde op	129
Fabel 4: overschakelen op een klimaatneutrale energievoorziening brengt de economie in gevaar	130
Fabel 5: de zeespiegel kan de komende 30 jaar met vele meters stijgen	130
Fabel 6: de menselijke beschaving wordt ernstig bedreigd door klimaatverandering	131
Onzekerheid 1: hoeveel broeikasgassen komen er in de toekomst vrij?	133
Onzekerheid 2: hoeveel procent van de broeikasgassen zal blijven hangen in de atmosfeer?	133
Onzekerheid 3: hoe gevoelig is het klimaatsysteem voor de extra broeikasgassen?	135
Onzekerheid 4: wat gaan andere landen doen met dit vraagstuk?	139

9 De vooruitzichten	140
Waarom aarzelen de vs over emissiebeperking?	142
Hoe gaat dit verder?	143
Europa en Nederland	144
Nawoord	146
Dankwoord	150
Noten	151

Inleiding

Waarom maken sommige mensen zich zo druk over klimaatverandering en blijven anderen er heel nuchter onder? Is er eigenlijk wel sprake van klimaatverandering: de winters van 2009 en 2010 waren in Nederland toch de koudste sinds jaren? En als het wel zo is, hoe zeker is het dan dat wij mensen daarvoor verantwoordelijk zijn? Veruit de meeste experts zeggen dat het warmer wordt, maar is dat zo erg – er zitten toch ook voordelen aan?

Klimaatverandering: onderscheid tussen feiten en fabels is soms moeilijk te maken. Dit boek gaat in op de vragen die bijna iedereen heeft, maar niet altijd hardop durft te stellen. Zonder de onzekerheden uit de weg te gaan wordt gepoogd een helder inzicht te geven in wat we wel en niet weten over de invloed van mensen op het klimaat, en hoe we daarmee om kunnen gaan. Want de toekomst blijft altijd onzeker, maar meer kennis maakt ons wel sterker.



Klimaatverandering – wie moeten we geloven?

Onderzoekers die waarschuwen voor de gevolgen van klimaatverandering, zoals het afsmelten van ijskappen, krijgen ruime aandacht in de media. Want media houden nu eenmaal van drama. Tegelijkertijd zijn er klimaatsceptici, politici en anderen, die het klimaatprobleem juist ontkennen of sterk relativeren. Zij laten grafieken zien waaruit blijkt dat het aantal ijsberen groeit en de temperatuur de afgelopen tien jaar niet is gestegen. Voor zover er sprake is van opwarming wijten ze die aan een verandering van zonneactiviteit. Het bestaan van deze twee kampen, met hun verschillende uitgangspunten, zorgt al jaren voor een heftige discussie. Maar hoe zit het nu echt? Wie moeten we geloven, en kunnen we wel één bepaalde stellingname ondersteunen?

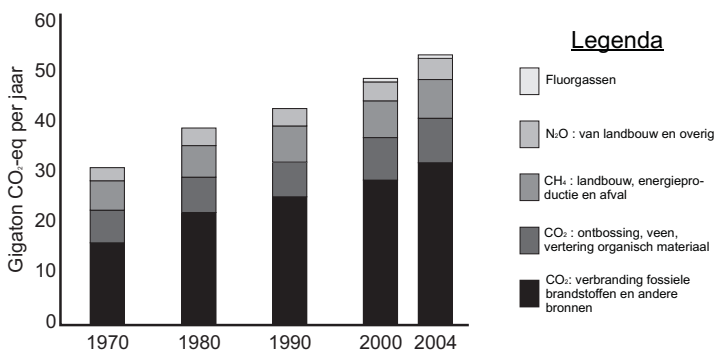
Extra broeikasgassen, waar komen ze vandaan en wat is hun invloed?

Uit de metingen van de lucht rondom de aarde blijkt dat de hoeveelheid broeikasgassen¹ in de atmosfeer de afgelopen tientallen jaren sterk is toegenomen. De oorzaak hangt samen met het gebruik van steenkool, aardolie en aardgas, maar ook met ontbossing en bepaalde praktijken in de landbouw en de voedselvoorziening. Over de invloed van deze gassen op het klimaat is veel te doen.

Die discussie gaat niet over de verandering van de samenstelling van de atmosfeer, want daar laten de metingen geen onduidelijkheid over bestaan. Ook over de herkomst van extra broeikasgassen bestaat weinig verschil van mening. De koolstofatomen van CO_2 , kooldioxide, afkomstig uit fossiele brandstoffen (miljoenen jaren geleden gevormd) zien er bij isotopenonderzoek net iets anders uit dan de koolstofatomen van CO_2 van meer recente datum, zodat duidelijk is dat de hoeveelheid koolstof van fossiele herkomst in de atmosfeer toeneemt. Het echte strijdpunt gaat dan ook over de mate waarin de extra broeikasgassen het klimaat beïnvloeden en de verhouding tussen die invloed en de natuurlijke processen die ook van invloed zijn op het klimaat.

Hierbij krijgt CO_2 dat afkomstig is van fossiele brandstoffen verreweg de meeste aandacht. Dit is niet verbazend, want de bijdrage daarvan aan de groei van broeikasgasen in de atmosfeer is ook de grootste. Maar methaangas (CH_4) is ook een broeikasgas waarvan de concentratie is gestegen. Methaangas komt vrij uit natte rijstvelden, van herkauwende runderen en uit afval. Tevens is de concentratie van lachgas (N_2O), eveneens een

WERELDWIJDE UITSTOOT BROEIKASGASSEN



Figuur 1. Ontwikkeling van de hoeveelheid broeikasgassen die wereldwijd vrijkomen uitgedrukt in CO_2 equivalenten. [Bron: IPCC (2007)²]

gas met broeikaswerking, sterk gestegen. Dit gas komt onder meer vrij bij het gebruik van kunstmest. De broeikaswerking van de moleculen van deze gasen is verschillend, zo blijkt in het laboratorium. Om toch een vergelijking mogelijk te maken wordt de werking ervan meestal uitgedrukt in termen van 'CO₂-equivalent'. De hoeveelheid broeikasgassen die wereldwijd vrijkomt en de groei daarvan over de afgelopen 40 jaar is aangegeven in figuur 1.

De genoemde gasen hebben de naam 'broeikasgassen' gekregen omdat uit laboratoriumonderzoek is gebleken dat ze de energie die meekomt met zichtbaar licht, i.e. straling met korte golflengte zoals zonnestraling, vrijelijk doorlaten. Op de warmtestraling afkomstig van een warm voorwerp (infrarode straling, met een langere golflengte) werken ze echter remmend. Wanneer een voorwerp warmte uitstraalt, wordt die uitstraling meer geremd naarmate er meer broeikasgassen zitten in het gebied tussen dat voorwerp en de ontvanger van de straling. Naar aanleiding van deze uitkomsten van laboratoriumonderzoek is de verwachting dat de aarde warmer zal worden door de toename van de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer. Want met meer broeikasgassen in de atmosfeer kan de aarde haar warmte (ontvangen van de zon) minder goed kwijt richting heelal.

De grote vraag is nu, en daarover gaat steeds de discussie, werken de broeikasgassen voor de aarde op dezelfde manier als in het laboratorium? Het antwoord lijkt simpel: ja, waarom niet? Maar rondom de aarde spelen veel meer processen een rol die ook van invloed zijn op het klimaat, zoals: zonnevariaties, de werking van vulkanen, verandering van de hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer, wisselende oceaanstromingen en luchtverontreiniging. Bovendien bestaat er een interactie tussen deze processen en de effecten van de extra broeikasgassen.³ De vraag kan daarom niet zonder meer positief beantwoord worden.

Het is bovendien onmogelijk om proeven uit te voeren op de schaal van de aarde. Een exacte voorspelling van de mate waarin de extra broeikasgassen de temperatuur van de aarde zullen beïnvloeden is ook daarom moeilijk te geven.⁴ Daarnaast is de vraag hoe belangrijk het is als de aarde enigszins zou opwarmen. In vroeger tijden waren er tenslotte ook warmere en koudere perioden.

Op al deze kwesties heeft de wetenschap zich de laatste 30 jaar vol overgave gestort, en de resultaten uit geologisch onderzoek, modelsimulaties en directe metingen ondersteunen de stelling dat CO₂ en andere broeikasgassen ook op de schaal van de aarde een belangrijke invloed hebben op ons klimaat. Maar hoe groot die invloed precies is, en wat de gevolgen ervan zullen zijn, blijft altijd enigszins onzeker. Want de invloed van de mens op het klimaat en de natuurlijke variatie van het klimaat lopen dwars door elkaar heen.

Om iets te kunnen zeggen over de toekomst ontkomen we er niet aan om bepaalde aannames te doen. Maar met elke aanname kan ook een zekere vooringenomenheid binnensluipen. De vraag die velen zich stellen is dan ook: zou het kunnen dat klimaatonderzoekers overdrijven?

Sinds ongeveer 1980 wordt op grote schaal onderzoek gedaan naar de invloed van broeikasgassen op het wereldklimaat. Eerder waren er wel aanwijzingen over die werking, maar waren er weinig onderzoekers actief in dit veld. In 1990 verscheen het eerste rapport van het wetenschappelijk klimaatpanel van de Verenigde Naties, het IPCC.⁵ Sindsdien heeft dit panel ongeveer iedere vijf jaar opnieuw een rapport uitgebracht. Met toenemende stelligheid komt hierin naar voren dat we te maken hebben met een uiterst belangrijk, maar ook uiterst lastig probleem. Het IPCC-rapport van 2007 liet weinig twijfel meer bestaan over de menselijke invloed op het klimaat en de gevolgen die deze zal kunnen hebben. In dit rapport is aangegeven dat als alles tegenzit, de gemiddelde temperatuur van de aarde in 2100 zou kun-

nen toenemen met ruim 6 graden Celsius; als alles meezit zou de stijging ook beperkt kunnen blijven tot 1 à 2 graden.

Toen het rapport verscheen, werd het panel al ernstig bekritiseerd om de stelligheid waarmee deze conclusie naar voren werd gebracht. En toen begin 2010 bleek dat er een aantal fouten was gevonden, kwam het hele rapport ter discussie te staan. Hoe groot is de invloed van de extra broeikasgassen, vroeg men zich opnieuw af, hoe erg is dat, en is het wel echt de moeite waard om vele miljarden te investeren in een klimaatneutrale energievoorziening om daarmee de klimaatverandering te beperken?

Welnu, als de stijging van de temperatuur aan het aardoppervlak beperkt zou blijven tot slechts één graad, dan kan de natuur en ook de mens zich vrij goed aanpassen. Als niemand het ons zou vertellen, dan zouden we het in ons dagelijks leven zelfs nauwelijks merken. Maar stijgt de temperatuur met 2 à 3 graden of nog meer in de komende honderd jaar, dan hebben we zeer waarschijnlijk een groot internationaal probleem. Het gaat dan om een niet meer te stoppen wereldwijde stijging van de zeespiegel, in combinatie met met ecologische rampen, uitgebreide overstromingen, watertekorten en verspreiding van ziekten onder mensen en planten in gebieden waar deze eerder niet voorkwamen.

Wat is klimaat?

In ons spraakgebruik is 'klimaat' iets wat we verwachten en 'het weer' is wat we krijgen. Maar wat bedoelen we eigenlijk precies met klimaat?

Als we het over klimaat hebben, gaat het over de hoeveelheid neerslag, de temperatuur en de wind die je gemiddeld gezien mag verwachten, inclusief alle variaties en extremen daarin. Meteorologen bepalen dit gemiddelde en de variatie meestal op basis van de waarnemingen en metingen over een periode van dertig jaar; in deze tamelijk lange periode komen de trend en de natuurlijke variaties beter naar voren dan wanneer veel

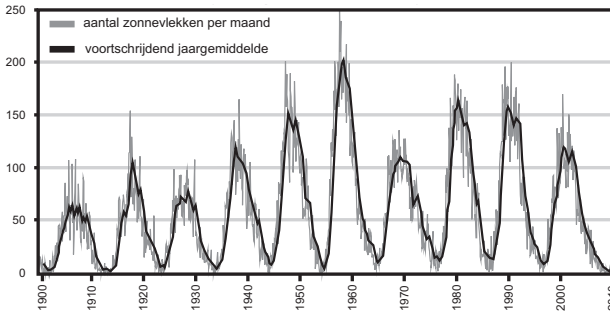
kortere perioden worden beschouwd. Om te bepalen hoe het zit met de frequentie of hevigheid van extreme weersgebeurtenissen wordt naar nog langere perioden gekeken. Om de sterkte van dijken te bepalen kijken we bijvoorbeeld meer dan 150 jaar terug naar de metingen van het gedrag van de rivieren en de Noordzee.

Het klimaat op aarde is niet altijd hetzelfde geweest. In de geologische geschiedenis zien we warmere en koudere perioden. De laatste grote ijstijd bijvoorbeeld liep ongeveer 20.000 jaar geleden ten einde. De volgende zal waarschijnlijk over zo'n 10.000 tot 20.000 jaar beginnen. Bij deze superlangetermijnveranderingen spelen menselijke invloeden tot nu toe geen rol. Binnen de verschillende perioden is het klimaat vrij stabiel, en zijn de variaties relatief klein. Sinds ongeveer 10.000 jaar zitten we op de top van een natuurlijke warme periode.

De zon, vulkanen en El Niño

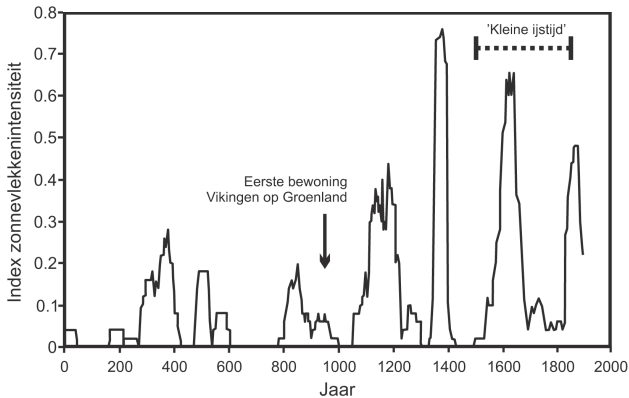
Zoals gezegd wijten sommige klimaatcritici de (in hun ogen eventuele) opwarming van de aarde aan een verandering van zonneactiviteit. Inderdaad, de intensiteit van de zon varieert en kent korte en langere cycli, maar de invloed daarvan op de gemiddelde temperatuur is niet zo duidelijk en het gaat bovendien om cyclische processen: dan weer iets warmer en dan weer iets kouder. Het bekendst zijn de zonnevlekken⁶ met een herhalingsperiode van ongeveer elf jaar (zie figuur 2). Maar er zijn ook langere cycli, van 90 en van 200 à 250 jaar (zie figuur 3). Zo'n langere cyclus is zichtbaar in de geschiedenis van Europa; zo vond ongeveer tussen 1600 en 1800 de 'kleine ijstijd' plaats. En daarvoor, vanaf ongeveer het jaar 900, was er juist een warmere periode, met wijnbouw in Engeland, en het begin van de bewoning van Vikingen (950 na Chr.) op de zuidpunt van Groenland. Langs die kust lag toen weinig ijs (vandaar de naam 'groen' land) en het was er warm genoeg om voedsel te verbouwen.

11-JARIGE ZONNECYCLUS



Figuur 2. De intensiteit van de zon varieert met een periode van ongeveer elf jaar. Dit heeft invloed op de samenstelling van de atmosfeer en op de warmte die de aarde bereikt; in periodes met veel zonnevlekken bereikt meer warmte de aarde. [Bron: SIDC?]

ZONNEACTIVITEIT IN DE AFGELOPEN 2000 JAAR



Figuur 3. Er zijn ook variaties in de zonneactiviteit met een periode van 90 en 200 jaar. [Bron: Vaquero, Advances in Space Research, 2007⁸] Het blijft moeilijk de temperatuur één op één te koppelen aan de zonnevlekkenintensiteit. De schilderijen die de kleine ijstijd zouden moeten illustreren, bijvoorbeeld dat van Avercamp (1608) (zie kleurkatern), dateren uit een periode met grote zonnevlekkenintensiteit.

Ook vulkaanuitbarstingen hebben een meetbare invloed op de gemiddelde weersomstandigheden. De stoffen die daarbij uitgestoten worden, vooral as en zwavelverbindingen, blokkeren tijdelijk gedeeltelijk de straling van de zon. Na een grote uitbarsting is het gewoonlijk gedurende enkele jaren wereldwijd iets kouder, tot al het stof uit de lucht is verdwenen.

Daarnaast veroorzaken ook min of meer toevallige veranderingen in de stromingen van oceanen en in de luchtstromen in de hogere atmosfeer (straalstroom) een behoorlijke variatie van de gemiddelde temperatuur van de aarde, in de orde van een halve graad Celsius. Warme jaren worden afgewisseld met koudere, en de oorzaak hiervan ligt vooral in de oceanen. Oceanen zijn enorme buffers van warmte, en door variatie in windpatronen en de bijbehorende periodieke veranderingen in de uitwisseling met dieper, kouder water, nemen ze in sommige jaren meer warmte op dan in andere. Dit komt bijvoorbeeld tot uiting in het El Niño-verschijnsel.

El Niño (Spaans voor 'het kind') verwijst naar het kerstkind. Het verschijnsel heeft deze naam gekregen omdat het zich meestal voordoet aan het einde van het jaar. In de Stille Oceaan, ter hoogte van de evenaar, in het gebied tussen Peru en Indonesië, warmt het water aan het oppervlak sterk op door de zon. Door de overheersende wind wordt dit warme water gewoonlijk in westelijke richting geblazen, waardoor een warme laag zich opbouwt tegen de kusten van Indonesië en Zuidoost-Azië. Deze warme laag breidt zich vervolgens uit in de richting van Zuid-Amerika, tot aan de kust van Peru. Eens in de twee tot zeven jaar wordt die bovenlaag instabiel en mengt het warme water zich met het diepere, koudere oceaanwater. In de periode vlak voor deze verandering (El Niño), zijn het oceaanwater en de lucht erboven relatief warm.⁹

De wat onregelmatige El Niño-cyclus werkt door in de gemiddelde wereldtemperatuur, en zorgt voor regionale droogte en regenval. Het zeer warme jaar 1998 viel midden in een hele sterke El Niño, net zoals, zij het in mindere mate, het warme

jaar 2005. Ook de zware regenval met overstromingen in Pakistan en elders in de wereld in 2010 werd voorafgegaan door dit El Niño-verschijnsel. In de eerste helft van 2010 was de watertemperatuur aan de oppervlakte van de Indische Oceaan hoger dan ooit eerder gemeten. Hierdoor verdampte er meer water, waardoor de moessonregens zwaarder werden.

De tegenhanger van El Niño is La Niña. Het La Niña-verschijnsel wordt gekarakteriseerd door koeler water voor de kust van Peru en warmer water voor de kust van Indonesië en Australië. In dat laatste gebied valt dan gewoonlijk meer regen en treden er meer orkanen op. In 2010 vond een vrij abrupte overgang plaats van de El Niño-fase naar de La Niña-fase. De heftige regenval in Australië eind 2010 en begin 2011 is een illustratie van de manier waarop de El Niño/La Niña-cyclus doorwerkt in het regionale klimaat.¹⁰

Invloed van de mens

Al vanaf het prille begin van haar bestaan oefent de mens invloed uit op het klimaat. Eerst door het gebruik van vuur en het verbranden van grote lappen bos, later door ontbossing en het gebruik van hout werd het klimaat op regionale schaal beïnvloed. Ook nu is dat het geval door het gebruik van rivierwater voor irrigatie, de aanleg van grote stuwmuren en de wereldwijd toenemende ontginning en bebouwing. Vooral grote steden hebben een flinke invloed op het klimaat van hun omgeving. Binnen de stad is het veel warmer, vooral 's nachts, door de grote hoeveelheid stenen die de warmte vasthouden. Ook regent het boven en rondom de stad vaker dan ver buiten de stad. Dit wordt veroorzaakt door de luchtstromingen die de warme stad genereert en ook door het stof en de luchtverontreiniging. De stofdeeltjes en de luchtverontreiniging reflecteren het zonlicht, nog voordat het de aarde bereikt. Ook stimuleren ze de vorming van wolken. In het algemeen heeft industriële luchtverontreiniging een koelende werking. Maar er zijn ook onderdelen van luchtverontreiniging, zoals roetdeeltjes, die juist een

opwarmende werking hebben. In de jaren 1960 en 1970 was het effect van de luchtverontreiniging groot boven Europa en Noord-Amerika. Sinds die tijd is de lucht daar veel schoner geworden. Nu is het effect vooral sterk boven bepaalde gebieden van China en India.

Beperken van broeikasgassen, dijken verhogen of afwachten?

Willen we de risico's van klimaatverandering beperken dan is vermindering van emissies (uitstoting van gassen) de meest geëigende strategie. Maar vermindering van emissies vraagt om andere manieren van energieproductie, vermindering van ontbossing, en beperking van de emissie van methaangas door koeien – en dat op wereldschaal. Dat is geen gemakkelijke opgave.

Het is ook maar een deel van het verhaal, want tegelijkertijd is het nodig om met tijdige aanpassingen in te spelen op de klimaatverandering. Anno 2011 is de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer bijna 40 procent hoger dan vóór de industriële revolutie. Ook al zou er internationaal sterk worden ingezet op emissievermindering, dan nog zal het effect van de extra broeikasgassen naar verwachting tot voorbij 2100 doorwerken. Moeten wij in Nederland bij beslissingen over waterkeringen, landbouw en natuurbeheer, nu al rekening houden met een veranderend klimaat? Als we dat goed doen, zijn we beter voorbereid. Doen we het verkeerd, dan kost het onnodig geld. Kennis van het toekomstig klimaat, inclusief de onzekerheden daarin, is dus van grote economische betekenis.

Is rustig afwachten dan een alternatief: wachten en kijken hoe het klimaat in de praktijk reageert op de extra broeikasgassen en dan pas beslissen? Daarmee nemen we de gok dat het wel mee zal vallen. Maar als het niet meevalt, kunnen we grote spijt krijgen. Naar de huidige wetenschappelijke inzichten zijn de emissies van nu immers bepalend voor het klimaat en voor de stijging van de zeespiegel over de volgende 30 tot 100 jaar en verder. En over 30 jaar kunnen we weinig meer doen als blijkt dat het verkeerd is uitgepakt.

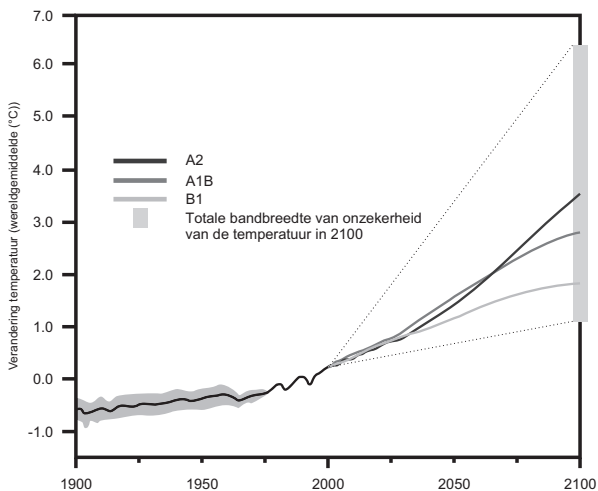
Het gaat bij klimaatverandering over het omgaan met risico's. Risico's worden door iedereen anders beoordeeld. Dat geldt voor mensen en dat geldt voor bedrijven en landen.

Internationale samenwerking


Omdat de klimaatkwestie een wereldwijd vraagstuk is, ligt internationale samenwerking voor de hand. De Verenigde Naties spelen hierin een belangrijke rol, ook al blijkt de besluitvorming op dat niveau erg moeilijk te zijn.

In 1992 werd het eerste internationale klimaatverdrag gesloten op het niveau van de Verenigde Naties; later gevolgd door het Kyoto Protocol in 1997. Niet alle landen deden hieraan mee. Vooral in de vs was men onvoldoende overtuigd van het belang van het nemen van maatregelen. Wat in de vs, maar niet alleen daar, op veel weerstand stuit, is het feit dat een vermin-

TOEKOMSTIGE ONTWIKKELING VAN TEMPERAATUUR



Figuur 4. Projecties van de stijging van de wereldgemiddelde temperatuur ten opzichte van de periode 1980-1999, zoals aangegeven door het IPCC (2007).¹¹ Verschillende toekomst-emissiescenario's zijn weergegeven.



dering van broeikasgassen vraagt om overheidsingrijpen. Bovendien vinden veel mensen het moeilijk te begrijpen dat de fossiele brandstoffen, die ons zoveel welvaart hebben gebracht, nu ineens in het verdomhoekje zitten. Hierbij speelt ook mee dat onderzoekers wijzen op de onzekerheden. Dat hoort bij de aard van hun werk, maar in dit geval hoort het ook bij de aard van het vraagstuk. Het gaat immers om toekomstige effecten van klimaatverandering, en de toekomst is onzeker, in dit geval onder meer omdat we de hoeveelheid broeikasgassen die vrijkomt kunnen beïnvloeden. Daarnaast is zoals ik al zei de wisselwerking tussen natuurlijke klimaatvariatie en de invloed van de extra broeikasgassen nooit echt met zekerheid te voorspellen.

Vanwege dit soort onzekerheden, én de grote belangen rondom de energie- en landbouwindustrie, worden er indringende vragen gesteld over de urgentie en de noodzaak van te nemen maatregelen. Bij die maatregelen staan veel belangen op het spel, zoals die van de leveranciers van steenkool, aardolie en aardgas. Maar ook de belangen van de chemische industrie en die van de landbouw worden geraakt door klimaatbeleid.

Is het klimaatvraagstuk voldoende sterk onderbouwd om miljarden euro's aan investeringen te kunnen legitimeren? Die vraag staat centraal in de volgende hoofdstukken.

Overdrijven de klimaatonderzoekers?

Er wordt veel wetenschappelijk onderzoek gedaan naar de invloed van broeikasgassen op het klimaat. Bij dat onderzoek worden bepaalde aannames gedaan over bevolkingsgroei en de ontwikkeling van de economie en de technologie. Ook moet een inschatting worden gemaakt welk deel van de broeikasgassen jaarlijks wordt opgenomen door de oceanen en de bossen en welk deel in de atmosfeer blijft hangen. Al die aannames zijn van invloed op de uitkomsten van het onderzoek. Vaak wordt daarom in de berekeningen een serie verschillende veronderstellingen toegepast, om hiermee het brede veld van onzekerheden zo goed mogelijk te dekken. Door verschillende combinaties van veronderstellingen te maken ontstaan dan bepaalde scenario's.

De veronderstellingen die onder deze scenario's liggen zijn gemotiveerde keuzes, maar ze zijn daarmee nog niet objectief. Mensen die werken voor een energiebedrijf hebben meestal een andere kijk op de toekomst dan iemand die werkt voor Rijkswaterstaat. Een ecoloog en een meteoroloog kijken er ongetwijfeld wéér anders tegenaan. De opleiding, de ervaring en de achtergrond van de mensen die de scenario's maken, spelen een rol in de aannames of veronderstellingen die ze doen.

Modellen en scenario's

In hun onderzoek maken de wetenschappers gebruik van modellen. De modellen die worden gebruikt voor het 'uitrekenen' van het effect van de broeikasgassen op het klimaat bestaan uit een set van formules, in combinatie met slimme rekenmethoden. Het doel van zo'n model is het gedrag van een systeem, zoals het klimaatsysteem, zo goed mogelijk na te bootsen. Meestal is het systeem te complex om alle variabelen daarin mee te nemen; dan beperkt het model zich tot nabootsing van de, voor de vraagstelling, meest relevante eigenschappen. Hierbij is natuurlijk wel van belang dat álle relevante zaken en eigenschappen worden meegenomen, en dat er niets over het hoofd wordt gezien wat een significante invloed heeft op de uitkomst.

De genoemde modellen worden ontwikkeld in een wetenschappelijke omgeving. Hierbij gaat het om meten, om het toetsen van ideeën door experimenten en om het ontdekken en formuleren van wetmatigheden. Onder deskundigen wordt over het algemeen goed begrepen wat de kracht is en wat juist de beperkingen zijn van een bepaald model. Maar buiten deze kring worden de uitkomsten van de modellen vaak heel anders beoordeeld. Het gebeurt regelmatig dat de resultaten van dit soort modelberekeningen direct worden gebruikt in een politieke omgeving, zonder voorbehoud ten aanzien van de aannames die eraan ten grondslag liggen. Het wetenschappelijke debat gaat over toetsbare feiten; in de politiek gaat het erom andere mensen te overtuigen en mee te krijgen in een bepaalde richting. Feitelijke en emotionele argumenten zijn daarbij beide essentieel. Als onderzoeksresultaten zonder uitleg van de vooronderstellingen en de beperkingen naar buiten worden gebracht, kan dit gemakkelijk tot misverstanden leiden.

De geschiedenis laat zien dat deze twee werelden, die van wetenschap en van politiek, hard met elkaar in botsing kunnen komen. In vele gevallen komt dat door een gebrek aan begrip voor elkaars werkwijze. Maar botsingen treden ook op wanneer nieuwe wetenschappelijke inzichten niet aansluiten bij de

ideeën en ambities van belangrijke partijen in de samenleving.

Ook de media spelen daarbij een belangrijke rol. Het is voor onderzoekers niet gemakkelijk deze te interesseren voor een genuanceerd verhaal, want de media houden over het algemeen niet erg van nuanceren; ze willen aandachttrekkende koppen in de krant en oneliners op radio en televisie. De achtergronden en de vooronderstellingen die ten grondslag liggen aan de modellen zijn daarvoor meestal niet interessant genoeg. Zo worden resultaten vaak samengevat in enkele trefwoorden, die de lading nooit helemaal dekken.

Toch gaat het in discussies over klimaatverandering vaak over de betrouwbaarheid of de onbetrouwbaarheid van wereldmodellen. Hierbij wordt dan bijvoorbeeld verwezen naar de ervaring met de berichten van de Club van Rome in de jaren zeventig. Er was en is veel kritiek op het doemscenario van de Club, dat niet uitgekomen lijkt te zijn.



Figuur 5. Enkele krantenkoppen over de Club van Rome.

Een ander voorbeeld is de discussie in de jaren 1980-1990 over zure regen. Ook hier werd de toekomst veel grauwer voorgesteld dan uiteindelijk bewaarheid werd. Een derde voorbeeld is de ozonlaag: een probleem dat eind jaren tachtig speelde. Wat

kunnen we van deze drie fenomenen leren over de uitkomsten van dit soort modellen en over de rol van onderzoekers? En wat betekent het voor het vertrouwen dat we kunnen hebben in de milieu- en klimaatwetenschap?

Hieronder ga ik in op elk van de drie voorbeelden. De vraag of er sprake is geweest van overdrijving door de onderzoekers staat hierbij centraal.

De Club van Rome

De Club van Rome is een internationale groep van invloedrijke mensen, waarvan onder anderen de Nederlander Wouter van Dieren lid is. De club maakte zich zorgen over de milieueffecten van de snelle industrialisatie in de jaren zestig en de leden kwamen regelmatig bij elkaar. In 1972 publiceerde de groep het boek *Grenzen aan de groei*, dat in Nederland onmiddellijk een bestseller werd. In het rapport werd gewaarschuwd voor de gevolgen van een ongeremde economische groei, zoals die toen gaande was in de vs en Europa. Voortzetting en wereldwijde uitbreiding van die trend zou leiden tot grote tekorten aan grondstoffen en voedsel, aldus het rapport. Het toekomstperspectief dat gepresenteerd werd in *Grenzen aan de groei* was gebaseerd op uitkomsten van onderzoek op basis van modellen die door de Amerikaanse hoogleraar Dennis Meadows van het MIT (Massachusetts Institute of Technology) in Boston ontworpen waren. Hij had modelberekeningen gemaakt van het gebruik van grondstoffen en milieuvorraden in de toekomst. Zijn berekeningen waren gebaseerd op bepaalde aannames over de ontwikkeling van de economie, waarbij hij uitging van de technologieën zoals die rond 1960 in het algemeen werden toegepast.

Bij het doortrekken van de trends in economische groei en bevolkingsgroei zouden er volgens Meadows' berekeningen vanaf het jaar 2000 steeds meer knelpunten ontstaan. Vanaf het jaar 2030 zou de economie zelfs gaan krimpen door overexploitatie van de natuur en toenemende problemen met vervuiling. Ener-

gie zou steeds schaarser en duurder worden en de opbrengst van de landbouw zou achteruitgaan door een tekort aan stikstof en een teveel aan pesticiden. Hierdoor zouden voedseltekorten ontstaan. Kortom, de groeieconomie zou in haar eigen staart bijten.

Naar aanleiding van dit rapport werden felle debatten gevoerd. Aan de ene kant stonden de aanhangers van de Club van Rome, die al snel de *no growth community* werden genoemd. Aan de andere kant stonden de mensen die zeer bezorgd waren over afremmen van de economische groei met milieuwetten en regels. Zij vertrouwden erop dat een onbelemmerde economische groei, zonder milieuregels, uiteindelijk wel een oplossing zou bieden, ook voor de milieuproblemen. Nu, na bijna 40 jaar, kunnen we terugkijken. Hoe betrouwbaar waren die modellen uit 1972?¹²

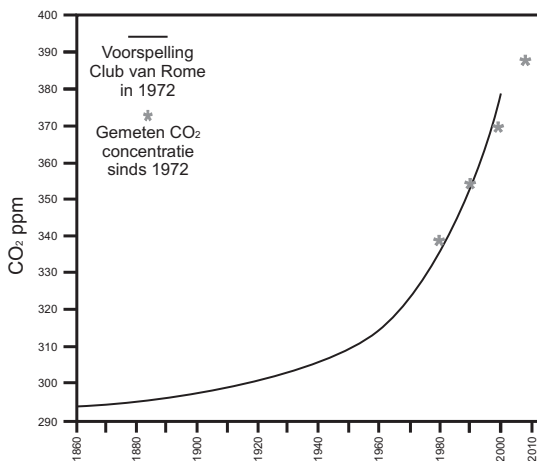
Mensen die vinden dat de klimaatonderzoekers overdrijven, verwijzen vaak naar de voorspellingen van de Club van Rome. Want nu, 40 jaar later, lijkt de werkelijkheid zich minder dramatisch te ontwikkelen dan destijds werd voorspeld. Die indruk is tot op zekere hoogte waar: de vervuiling en de uitputting van veel van de grondstoffen lijken in 2010 minder ernstig te zijn dan destijds werd voorspeld. Toch is een dergelijke conclusie iets te simplistisch.

Als we terugkijken naar de modellen die toen zijn gebruikt en de situatie zoals die nu is in de wereld, dan moeten we de conclusie trekken dat in die modellen te weinig rekening is gehouden met de mogelijkheid van technologische vernieuwing. Want wat is er gebeurd? Mede naar aanleiding van de bevindingen van de Club van Rome en andere rapporten uit die periode is een uitgebreid milieubeleid ontstaan. In nagenoeg alle landen van de wereld zijn in de jaren zeventig ministeries voor milieubeheer opgericht. Door milieuregels en wetten en de daarmee samenhangende ontwikkeling van schone technologie is in de westerse landen een ‘groenere’ groei op gang ge-

komen, een groei waarbij de economie sneller groeit dan de milieubelasting. Of die groei voldoende groen is om de problemen op te lossen en of dit fenomeen bovendien wereldwijd doorzet is niet zeker, want een deel van de groene groei in het rijke westen is het gevolg van verplaatsing van vervuilende activiteiten naar Zuidoost-Azië.

Daarnaast is de verbetering van het milieu niet op alle terreinen op gang gekomen. Zo wordt bijvoorbeeld in het rapport van de Club van Rome van 1972 ook gewaarschuwd voor de risico's van klimaatverandering. Juist op dit gebied heeft de Club van Rome interessante berekeningen uitgevoerd en data gepresenteerd die 40 jaar later wél vrij nauwkeurig blijken te kloppen. Het gaat hierbij vooral om de geprojecteerde groei van de uitstoot van CO₂. Op pagina 70 van het rapport uit 1972 staat een grafiek die hieronder opnieuw is afgebeeld. Ter illustratie is het werkelijke verloop vanaf 1972 tot heden aangegeven.

CO₂-CONCENTRATIE: VOORSPELLING CLUB VAN ROME EN GEMETEN WAARDE



Figuur 6. De voorspelling in 1972 van het verloop van de concentratie van broeikasgassen door de Club van Rome en het werkelijk opgetreden verloop tot 2010.¹³

Dat juist deze voorspelling zo goed uitkomt, is overigens niet geheel toevallig. Op veel punten is het rapport van de Club van Rome serieus genomen. De chemische vervuiling van water en het gebruik van pesticiden in de landbouw zijn stevig aangepakt. De efficiency van het gebruik van grondstoffen is in het algemeen behoorlijk toegenomen. Maar dat geldt veel minder voor het gebruik van fossiele brandstoffen. Auto's reden tot voor kort, net als in 1972, met een efficiëntie van ongeveer 1 liter op 10 kilometer; pas de laatste paar jaar komt hierin snel verandering. Kolencentrales hebben wereldwijd een efficiëntie die niet veel beter is dan in 1972 en verlichting was, tot de recente introductie van de spaar- en ledlamp, net zo efficiënt als in 1972. Er is in Europa wel een zekere ontkoppeling ontstaan tussen economische groei en energiegebruik, dat wil zeggen dat het energiegebruik langzamer groeit dan de economie, maar dat komt voor een belangrijk deel omdat de energie-intensieve productie is verplaatst naar andere delen van de wereld. Dat betekent in feite alleen een verplaatsing van de vervuiling, niet een vermindering.

Met andere woorden: in het rapport van de Club van Rome worden klimaatverandering en het effect van CO₂ al duidelijk genoemd, maar in de praktijk van het milieubeleid is daarmee, tot ruim tien jaar geleden, niet veel gedaan. Niet door de politiek, maar ook niet door de milieubeweging. Pas met het Kyoto Protocol in 1997 is een begin gemaakt met maatregelen om het vrijkomen van CO₂ te beperken.

Het idee dat alle berichten van de Club van Rome veel te pessimistisch waren, verdient dus nuancering. Juist omdat dit rapport aanleiding is geweest om in te grijpen, zullen de voorspellingen voor het jaar 2030 op die gebieden waarschijnlijk niet uitkomen. Dit effect is te vergelijken met het ruim van te voren aankondigen van een zware file: als iedereen het bericht serieus neemt, zal er van een file geen sprake zijn. Is dan de filewaarschuwing onjuist geweest, of heeft zij juist haar nut bewezen?

Er is nog een les te leren uit de geschiedenis van de Club van Rome. Mede naar aanleiding van het rapport ontstond in de jaren 1970 een sterke maatschappelijke beweging die pleitte voor het beperken van de economische groei en de persoonlijke consumptie. Deze beweging werd nog eens versterkt door de twee (politieke) oliecrises. Gordijnen dicht, een trui aan en reizen met openbaar vervoer: dat was de boodschap. Volgens de spraakmakers van deze beweging was een versobering van de levensstijl en een bewuste vermindering van de economische productie de enige manier om de wereld leefbaar te houden voor volgende generaties.

Achteraf gezien hadden de leiders van deze beweging te weinig oog voor twee zaken: de haalbaarheid van een collectief overstappen op een sobere levensstijl werd fors overschat en de mogelijkheden van technologische vernieuwing werden sterk onderschat.

In de discussie over de aanpak van het broeikaseffect zien we deze elementen duidelijk terug. Zelfs de meest milieubewuste mensen willen zo nu dan, om wat voor reden dan ook, een verre reis maken. Een aanzienlijke vermindering van mobiliteit, en dus minder uitstoot van CO₂ door auto's, vliegtuigen en andere vervoersmiddelen, lijkt dan ook niet haalbaar te zijn zonder een zeer sterke prijsverhoging. En daarvoor is weinig politiek draagvlak te vinden. Het is daarom niet toevallig dat er grote inspanningen gepleegd worden om het vervoer, ook de vliegtuigen, minder vervuilend te maken. Voor vliegtuigen wordt gewerkt aan de productie van biobrandstoffen op basis van algenteelt. En er komen elektrische auto's op de markt waarvan de milieubelasting veel lager is dan van 'gewone' auto's. Het gebruik hiervan zal vermoedelijk op enige termijn zelfs goedkoper en milieuvriendelijker worden dan reizen met zware spoorwagens.

Wat we hiervan kunnen leren is dat de creativiteit van mensen in het omgaan met milieu-uitdagingen vaak veel groter is dan wordt verondersteld. Voorts blijkt uit de ervaringen sinds 1970 dat milieumaatregelen van zeer grote invloed kunnen zijn

op technologische vernieuwing en economische bedrijvigheid. Veel maatregelen blijken zo veel geld op te leveren dat de investeringskosten in korte tijd zijn terugverdiend.

Bedrijven die worden geconfronteerd met de milieueffecten van hun productie zetten meestal eerst de hakken in het zand. Hierbij worden argumenten gebruikt als: wij doen al zo veel voor het milieu, er is geen alternatief, de alternatieven zijn veel te duur, het schaadt onze concurrentiepositie et cetera. Pas na aanhoudende druk en regelgeving blijkt dat er technisch en economisch veel meer mogelijk is dan aanvankelijk werd verondersteld.

Zure regen

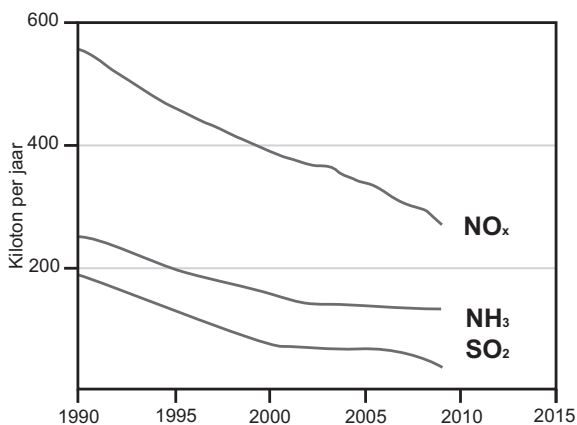
Vanaf het begin van de industriële ontwikkeling tot in de jaren vijftig werd luchtverontreiniging alleen gezien als een lokaal probleem (bijvoorbeeld de beruchte Londense smog), dat speelde in de directe omgeving van de fabrieken en elektriciteitscentrales met hun rookpluimen. De rook uit de fabrieken en centrales blakerde de huizen en gebouwen zwart, leidde tot ademhalingsproblemen bij mensen in de omgeving en je kon de witte was er niet meer door buiten hangen. Door de verhoging van schoorstenen en door het afvangen van de grootste roetdeeltjes werd dit probleem in de loop van de tijd grotendeels opgelost. Dacht men.

Eind jaren zeventig kwam uit wetenschappelijk onderzoek vrij onverwacht naar voren dat het gebruik van fossiele brandstoffen via luchtverontreiniging zelfs op grote afstand tot zure regen leidt: hoog door de lucht meegevoerde, onzichtbare maar wel meetbare rookgassen (zwaveldioxide, SO_2 , en stikstofoxide, NO_x) werden aangewezen als de oorzaak van de verzuring van de bodem en het water. Uit Duitsland kwamen verontrustende berichten over ‘stervende bossen’; door de stoffen die vrijkomen bij het gebruik van fossiele brandstoffen (vooral kolen, door de rijkdom aan zwavel) zou de vitaliteit van bossen worden aangetast. Vanuit Zweden kwam het verhaal dat het

biologisch leven uit de binnenmeren leek te verdwijnen. En in Nederland werd de snelle verwerking van de kalksteen van monumenten, zoals bij de kathedraal in Den Bosch, in verband gebracht met de hoge zuurgraad van de lucht en de neerslag. Op lokale schaal speelde ook het vrijkomen van ammoniak (NH_3) uit de landbouw een rol. Via de regen en de zwaartekracht kwamen deze stoffen in relatief hoge concentraties neer in natuurgebieden, die daar gevoelig voor bleken te zijn. Vooral de zwaveldeeltjes en tot op zekere hoogte ook de stikstofdeeltjes en de ammoniak werden aangemerkt als oorzaak van de zure neerslag. Sommige ecologen vreesden dat, door het stapelende effect van deze stoffen in de bodem, uiteindelijk alle bossen het loodje zouden leggen.

De maatschappelijke reactie op dit nieuws was sterk, vooral in Duitsland, waar de bossen onderdeel zijn van de nationale identiteit. Er werden daar grote programma's opgezet om stapsgewijs, door toevoeging van filters in fabrieken en centrales, de verzurende deeltjes af te vangen voor ze open lucht be-

AFNAME VAN DE UITSTOOT VAN VERZURENDE STOFFEN



Figuur 7. De vermindering van de uitstoot van de verzurende stoffen sinds 1990. [Bron: emissieregistratie¹⁴]

reikten. Nederland en Engeland volgden. Ook de invoering van de katalysator op de uitlaat van auto's hoort nog bij dit pakket. Door investering van vele miljarden euro's werd de uitstoot van schadelijke gassen uiteindelijk sterk teruggebracht. Dit heeft niet alleen de zure regen sterk verminderd; ook de negatieve effecten van de genoemde stoffen op de gezondheid zijn sterk omlaag gebracht. In Nederland droeg de veehouderij bij tot de verzuring, door de uitstoot van ammoniak. Inmiddels zijn ook in deze sector forse investeringen gedaan om het probleem te beperken. De uitstoot van verzurende stoffen is alles bij elkaar sinds 1990 meer dan gehalveerd (zie figuur 7). Dit is veel, maar toch minder dan de 90 procent reductie waar de onderzoekers aanvankelijk op aandrongen.

De verzuring gaat nog wel langzaam door, maar de effecten zijn veel minder dramatisch dan aanvankelijk gepresenteerd. Er zijn twee redenen waarom we niet meer zoveel horen over 'stervende bossen'. Ten eerste is het probleem van luchtverontreiniging in Europa zoals gezegd voor een groot deel opgelost door de genoemde technische maatregelen. Daarnaast heeft voortschrijdend wetenschappelijk inzicht laten zien dat de effecten per hoeveelheid verzurende stoffen minder groot zijn dan aanvankelijk werd gedacht. Sinds 1990 kwam uit verdere experimenten en veldonderzoek naar voren dat de bodem en ook de biologische activiteit in het water meer weerstand hebben tegen verzuring dan tevoren werd verondersteld. Aanvankelijk was het oordeel van de onderzoekers dat de uitstoot met 90 procent zou moeten worden verminderd om de verzuring binnen aanvaardbare grenzen te houden; naderhand werd geconcludeerd dat met een vermindering van 70 à 80 procent de vitaliteit van bomen reeds gewaarborgd zou zijn.

Over de kwestie 'zure regen' kan men achteraf dus concluderen dat het probleem in het begin inderdaad zwaarder werd aangezet dan achteraf juist blijkt te zijn. Binnen enkele jaren na de erkenning van het probleem werden de eerste stappen

genomen om de emissie te verminderen. Al tijdens die eerste stappen werden de nieuwe inzichten duidelijk; dat was zo snel, dat er geen onnodige kosten zijn gemaakt. De bossen zijn vitaal gebleven en de lucht is schoner en gezonder geworden, dankzij de toegepaste filters en katalysatoren. Wel worden tot op de dag van vandaag de ecosystemen beïnvloed. De bodem is veel rijker aan stikstof dan voorheen. Als gevolg hiervan is de biodiversiteit op vele plaatsen, vooral in duin- en heidegebieden, lager dan voorheen. Ook is het probleem van zure regen nog steeds niet overal verdwenen (zie figuur 20 in het kleurkatern).

De ozonlaag

Eind jaren 1980 kwam uit metingen en wetenschappelijk onderzoek naar voren dat de ozonlaag (O_3) in de atmosfeer werd aangetast door gassen zoals CFK's (chloorfluorkoolwaterstofverbindingen). De ozonlaag bevindt zich op een hoogte van zo'n 12 tot 40 kilometer rondom de aarde en fungeert als een filter voor de kankerverwekkende ultraviolette (uv-)straling die wordt uitgezonden door de zon. Zonder de filterende werking van de ozonlaag zou het leven op aarde er heel anders uitzien. Mensen, bepaalde dieren en veel planten zijn uitermate gevoelig voor een verandering in de dosis van deze straling.

De CFK's kwamen en komen onder andere vrij bij het gebruik van spuitbussen, koelkasten en airconditioners. Eenmaal vrijgekomen stijgen ze op tot grote hoogte en verspreiden zich rondom de aarde. De eigenschappen van deze zeer lichte stoffen brengen met zich mee dat ze ook in kleine concentraties hun ozonvernietigende werking effectief en langdurig kunnen uitoefenen. Mensen die veel buiten zijn, worden hierbij blootgesteld aan meer straling en zouden als gevolg daarvan eerder huidkanker krijgen.

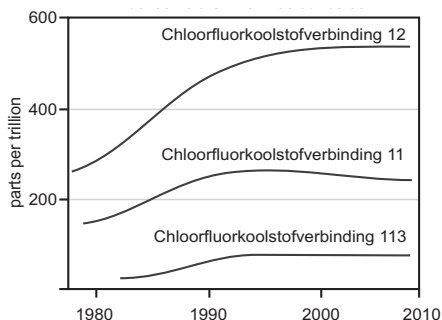
Berichten over ieder jaar groter wordende gaten in de ozonlaag, eerst boven Antarctica en later ook boven de Noordpool, tuimelden eind jaren tachtig over elkaar heen. Ook boven Ne-

derland en België bleek de ozonlaag soms dunner te zijn dan voorheen. Tegelijkertijd kwamen er berichten over een sterk toenemend aantal mensen met huidkanker. Toen deze twee zaken, terecht of onterecht, met elkaar in verband werden gebracht, ontstond er een groot maatschappelijk draagvlak voor maatregelen om de afbraak van de ozonlaag tegen te gaan. Met behulp van modelberekeningen werd aangetoond dat zelfs een zeer kleine hoeveelheid CFK's tot grote en blijvende schade zou leiden. Complete uitbanning was daarom het advies vanuit de wetenschap.

Aanvankelijk stuitte dit op grote weerstand, vooral vanuit de industrie die deze stoffen maakte en die de positieve eigenschappen ervan bleef benadrukken. De industrie stelde aanvankelijk dat er geen alternatieve stoffen beschikbaar waren. Ondertussen werd in de laboratoria echter wel meteen gezocht naar alternatieven, en die bleken er te zijn. Binnen enkele jaren werd mede daarom op internationaal niveau besloten tot het uitbannen van deze voor de ozonlaag schadelijke stoffen (het Montreal Protocol, 1989). Twintig jaar geleden zijn CFK's op de lijst van verboden stoffen gezet.

Er zijn grote investeringen gedaan om over te schakelen op stoffen die geen invloed hebben op de ozonlaag. Grote financieringsprogramma's via onder meer de Wereldbank hebben ertoe bijgedragen dat ook de ontwikkelingslanden en de Oost-Europese landen ondanks hun beperkte financiële mogelijkheden zijn overgestapt op alternatieven. Deze programma's en ook de omschakeling naar de alternatieve stoffen in de rijke landen hebben tientallen miljarden euro's gekost, maar het effect van de maatregelen is inmiddels zichtbaar geworden (zie ook figuur 2.1 in het kleurkatern). De uitstoot van de CFK's is de afgelopen tien jaar zeer sterk afgenomen, tot nagenoeg nul. Daardoor neemt de concentratie niet meer toe, zoals blijkt uit de metingen weergegeven in figuur 8. De metingen van 2010 laten bovendien een licht herstel van de ozonlaag zien. Of dat laatste doorzet moet de komende jaren blijken, en het zal in elk ge-

HOEEVELHEID CFK'S IN DE ATMOSFEER



Figuur 8. Jaarlijkse gemiddelde concentratie van CFK's in de atmosfeer boven Cape Grim, Australië. De groei van de concentratie is gestopt. Het getal achter de CFK geeft de verhouding chloor-, fluor-, koolstof- en waterstofatomen aan. [Bron: Tasmanian Planning Commission, State of the Environment Report 2009¹⁵]

val nog tientallen jaren duren voordat de ozonlaag terug is op het oude niveau. Toch ziet het ernaar uit dat het uitbannen van CFK's succes heeft gehad.

In de publicaties en boeken die later zijn verschenen over dit probleem, wordt het tijdig stoppen van de vernietiging van de ozonlaag genoemd als een van de grootste successen op internationaal milieugebied ooit. Volgens de van oorsprong Nederlandse Nobelprijswinnaar Paul Crutzen zijn we door het oog van de naald gekropen, door net op tijd te stoppen met het gebruik van de gewraakte stoffen. Wat betekent dit voor het vertrouwen in de wetenschappelijke kennis van de atmosfeer en straling?

Op het moment dat de problemen rond de ozonlaag speelden, was het moeilijk om een sluitend bewijs te geven van de precieze schadelijke werking van de genoemde stoffen. Er kon alleen op basis van een gedeeld risicobesef en met behulp van internationale samenwerking een effectieve oplossing worden gevonden.

den. Dit lijkt veel op de situatie die we nu meemaken met klimaatverandering: ook nu zijn de bewijzen niet sluitend, en ook nu is er sprake van een risicocalculatie en van een voornemen tot internationale samenwerking.

Bij dat laatste treden echter wel wat haken en ogen aan het licht. Toen aan het einde van de jaren tachtig klimaatverandering als probleem werd gesignaleerd, gingen vele wetenschappers en politici (vooral in Europa) ervan uit dat dit vraagstuk op dezelfde internationale manier zou kunnen worden opgelost: een via internationale afspraken en met de hulp van fondsen stapsgewijze vermindering van de emissies van broeikasgassen. De praktijk bleek ingewikkelder. Bij CFC's ging het om een handvol fabrieken en een beperkt aantal firma's. Bij CO₂ gaat het om veel meer: om heel veel olie en om grote internationale economische en politieke belangen. Deze belangen zijn zo groot dat er veel kritischer werd gereageerd op de resultaten van wetenschappelijk onderzoek. Wel heeft de ervaring met de ozonlaag laten zien dat de internationale gemeenschap in principe in staat is tot samenwerking om dit soort problemen op te lossen – ook wanneer er geen volledige zekerheid bestaat.

De communicatie tussen wetenschap en politiek

Wetenschap heeft als leidend principe de zoektocht naar waarheid. Wanneer een onderzoeker meent een stukje daarvan te hebben gevonden dan wordt dat, na 'peer review' (controle door collega's van andere onderzoekinstellingen), gepubliceerd in een wetenschappelijk tijdschrift. De volgende onderzoeker denkt het beter te weten en probeert de bevindingen onderuit te halen. Als dat lukt, dan klopte er iets niet in het eerdere verhaal. Als het niet lukt, dan neemt de kans toe dat de eerste onderzoeker gelijk heeft. Zo groeien, via pogingen elkaar 'onderuit te halen' (falsificeren), de kennis van en het inzicht in verschijnselen die zich voordoen in de wereld om ons heen.

Dit is het ideaalbeeld van de zichzelf corrigerende wetenschap.

Maar voldoet dit ideaalbeeld of overdrijven de klimaatonderzoekers, bewust of onbewust, in hun pogingen ‘de politiek’ te overtuigen? Dat is natuurlijk de vraag die speelt – maar het is een vraag die alles te maken heeft met de wijze van communicatie tussen de verschillende partijen in het geheel.

Het voorbeeld van de Club van Rome laat zien dat de voorspellingen voor het jaar 2030 wellicht te pessimistisch zijn geweest, maar dat dit vooral komt doordat de boodschap destijds meteen serieus is genomen. De analyse in *Grenzen aan de groei* is waarschijnlijk wel juist, maar het model schiet tekort omdat technologische vernieuwing onvoldoende is meegenomen. Bij de kwestie van de zure regen is duidelijk geworden dat er in het begin onder de wetenschappers sprake was van een te groot pessimisme. Maar de alarmerende berichten werden snel bijgesteld toen uit vervolgonderzoek bleek dat de maatregelen minder ver hoefden te worden doorgezet dan aanvankelijk gedacht. In het geval van de aantasting van de ozonlaag hebben onderzoekers laten zien dat hun modellen en prognoses een goede weergave waren van de processen in de atmosfeer. De concentratie van CFK's neemt niet meer toe, de afbraak van de ozonlaag is gestopt en de eerste tekenen van een voorzichtig herstel worden inmiddels zichtbaar.

Bij de presentatie van het rapport van de Club van Rome en ook bij de eerste berichten over zure regen was de communicatie tussen onderzoekers en overheden niet helder georganiseerd. Het ging toen om kleine groepjes onderzoekers, van enkele universiteiten en instituten. De media speelden bovendien een (te) grote rol in de wijze waarop de eerste wetenschappelijke signalen werden opgepakt door de politiek. Tijdens en na de kwestie van de zure regen werd daar structuur in aangebracht. Er werd structuur gebracht in de manier waarop internationale wetenschappers samenwerkten, door de onderzoekers zelf. Ook werden spelregels gecreëerd, in samenwerking met de overheden, voor de toetsing en internationale presentatie van wetenschappelijke resultaten. Tijdens het onderzoek naar zure regen ont-

wikkelden de onderzoekers uit diverse Europese landen samen het RAINS-model. Dit model beschrijft de route van de uitstoot van zwaveldioxide, stikstofdioxide en ammoniak en geeft helderheid over de effecten daarvan in de verschillende landen. De beleidsmakers uit de verschillende landen beschikten daarmee allen over dezelfde informatie, wat ertoe bijdroeg dat de landen de schuld ervan niet op elkaar gingen afschuiven. Tegelijkertijd konden de verschillende overheden, door de gestructureerde rapportages, adequaat reageren op de resultaten van voortschrijdend wetenschappelijk inzicht.

Bij het probleem met de ozonlaag werd de werkwijze van wetenschappers verder geprofessionaliseerd. Ten behoeve van de dialoog met de bedrijven en de politiek werd een internationaal panel opgezet. Dit panel bracht de wetenschappelijke literatuur bijeen en maakte daarvan een samenvatting. Hierbij werd gewerkt volgens bepaalde, vooraf vastgestelde spelregels. Ook vertegenwoordigers van de industrie werden betrokken bij die panels. Deze poging tot vergroting van het draagvlak heeft een positieve invloed gehad op de internationale besluitvorming over de bescherming van de ozonlaag en de uitbanning van CFK's.

Deze voorbeelden laten zien dat er niet zozeer sprake is van overdrijven door wetenschappers, maar vooral dat de communicatie tussen wetenschap en maatschappij en politiek voor verbetering vatbaar was en is. Uit de voorbeelden blijkt ook dat dit als probleem is erkend; vanaf 1972 is er steeds meer structuur ontstaan in de organisatie en presentatie van de wetenschappelijke kennis. Belanghebbende bedrijven en overheden worden steeds nauwer betrokken in de analyse van onderzoekresultaten en de presentatie van de samenvattingen aangaande de stand van de wetenschap. Dat dit nog steeds niet zonder problemen verloopt, blijkt uit de recente ervaringen van het klimaatpanel van de VN, het eerder genoemde IPCC. De opzet van het IPCC en de vijfjaarlijkse internationale rapportages zijn dui-

delijke geïnspireerd door de ervaringen met zure regen en met de ozonlaag.

De vraag die speelt in de media en in de politiek is of de internationaal georganiseerde wijze waarop het IPCC in 2007 heeft gerapporteerd over de stand van klimaatwetenschap een getrouwe weergave is van de internationaal beschikbare kennis. Is de stelligheid over de effecten van CO₂ en andere broeikasgasen die hieruit naar voren komt juist, of zijn de opstellers van de rapporten slachtoffer geworden van een zekere tunnelvisie, zoals de klimaatsceptici naar voren brengen? Daarover gaan de volgende hoofdstukken.

Hoe reëel is de opwarming zolang het IJsselmeer nog dichtvriest?

In de aanloop naar de grote internationale politieke klimaatconferentie in Kopenhagen in 2009 kreeg het fenomeen klimaatverandering veel aandacht, en niet altijd op een positieve manier. In de maand november, vlak voor de conferentie, werd bijvoorbeeld de e-mailcorrespondentie van een internationaal bekende klimaatonderzoeker, Phil Jones van de universiteit van East Anglia, gehackt en op internet gezet. Het ging om tien jaar correspondentie en discussie met collega's. In deze correspondentie kwam een aantal passages voor waaruit je zou kunnen opmaken dat deze onderzoeker selectief is omgegaan met temperatuurgegevens uit het verleden. Hiermee zou hij de huidige opwarming als ernstiger hebben voorgesteld dan gerechtvaardigd. Ook zou uit de correspondentie blijken dat er sprake is van een beperkte gesloten wereld van klimaatwetenschappers, die kritische onderzoekers buiten de deur willen houden. Deze beschuldigingen zijn later onderzocht en onterecht bevonden door allerlei onderzoekcommissies, maar toch, de toon was gezet.

Op de conferentie kreeg dit ene incident nog niet zo veel aandacht. Daar in Kopenhagen, in december 2009, bereikten de staatshoofden van ruim 190 landen overeenstemming over een gezamenlijke doelstelling: de emissies van broeikasgassen zo-

danig verminderen dat de temperatuurstijging beperkt blijft tot maximaal 2 graden Celsius. Dat is een verre gaande doelstelling, die vraagt om zeer grote ombuigingen in de energievoorziening. Maar wat dit voor de verschillende landen betekende, werd niet duidelijk, aangezien overeenstemming over wat ieder land afzonderlijk zou moeten bijdragen uitbleef. Velen waren hierover teleurgesteld. Maar er waren ook mensen die blij waren met het gebrek aan besluiten over daadwerkelijke actie. Zij vonden de wetenschappelijke basis voor de opwarming van de aarde niet sterk genoeg om tot internationale afspraken te komen. Deze critici werden gesterkt in hun mening door de eerder genoemde e-mailcorrespondentie én door het nieuws dat er ondertussen enkele fouten waren gevonden in de rapporten van het eerder genoemde IPCC: klimaatonderzoekers zouden de effecten van klimaatverandering ook hierin hebben overdreven.

Nu was het hek echt van de dam. In Nederland werden de klimaatonderzoekers via de televisie door de toenmalige milieuminister Jacqueline Cramer toegesproken en ter verantwoording geroepen. Men wilde op het ministerie van VROM (Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer) geen enkele fout meer accepteren in de rapporten van het IPCC.

De Telegraaf

wo 27 jan 2010

Cramer tilt zwaar aan fout in klimaatrapport

DEN HAAG - Minister Cramer (Milieu) tilt zwaar aan een fout in het jongste rapport van het IPCC, het klimaatpanel van de Verenigde Naties dat in 2007 de Nobelprijs voor de Vrede won. Cramer laat de Tweede Kamer woensdag weten dat ze precies uitgezocht wil zien hoe de fout in het rapport terecht heeft kunnen komen.

Figuur 9. In januari 2010 bleek dat er fouten zaten in het laatste rapport van het IPCC. Dit is een citaat van een artikel in De Telegraaf (januari 2010) waarin de toenmalige minister van VROM de klimaatonderzoekers ter verantwoording roept.¹⁶

Op verzoek van diverse regeringen werd vervolgens nader onderzoek gedaan naar de werkwijze van het IPCC. In Nederland werden de IPCC-rapporten onderzocht op fouten door het Planbureau van de Leefomgeving (PBL). Internationaal werd het onderzoek naar de werkwijze van het IPCC geleid door een onafhankelijke commissie, ingesteld door de Internationale Raad van Academies van Wetenschappen van de verschillende landen. Robbert Dijkgraaf, de president van de Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen (KNAW), was in deze periode de voorzitter van die Raad.

Het rapport van de commissie verscheen in oktober 2010. De conclusie luidde dat de werkwijze van het IPCC voor verbetering vatbaar is, maar tegelijkertijd werd erop gewezen dat de hoofdconclusies van het IPCC over de opwarming van de aarde recht overeind bleven. Ook de studie van het Nederlandse PBL naar additionele fouten leverde niets op wat afbreuk zou kunnen doen aan deze conclusies: een ongeremde uitstoot van broeikasgassen zal naar verwachting leiden tot een forse verandering van het wereldklimaat, en de opwarming van de afgelopen dertig jaar is met grote waarschijnlijkheid voor een groot deel te wijten aan de toename van broeikasgassen.

Ook de verschillende Engelse onderzoeken naar het gedrag van de Engelse klimaatonderzoeker van wie de e-mailcorrespondentie was gehackt leverden niets op wat zou kunnen wijzen op kwade wil of op aanwijzingen dat de aarde minder opwarmt dan eerder aangegeven.

Maar hiermee waren de critici nog steeds niet helemaal tevreden; een beperkt aantal mensen bleef doorgaan met het in diskrediet brengen van de bevindingen van het IPCC. Zij werden hierbij in de publieke opinie geholpen door de nogal koude winters van 2009 en 2010 in Noord-Amerika en West-Europa (zie figuur 22 in het kleurkatern). Dat het tegelijkertijd in de omgeving van Groenland soms 10 tot 15 graden Celsius warmer was en dat de ijsskap van Groenland sneller afsmolt dan ooit tevoren kreeg hierbij veel minder aandacht.

Waarom was de maatschappelijke reactie op de onvolkomenheden in het IPCC-rapport ook in Nederland zo groot? In de jaren hieraan voorafgaand was het klimaatverhaal voor burgers en bedrijven steeds dichterbij gekomen. In energiecampagnes werden de mensen direct aangesproken op hun eigen verantwoordelijkheid voor de opwarming van de aarde. Op veel plaatsen in Nederland werden straatfeesten gehouden met buurtinitiatieven waarbij burgers werden aangemoedigd actief mee te werken aan het ‘stoppen’ van de klimaatverandering. In de politiek werd gesproken over kilometerheffingen en over het verplicht isoleren van woningen. De milieubeweging stelde intussen voor een belasting te heffen op het kopen van vlees, omdat ook de veeteelt een grote bijdrage levert aan klimaatverandering. Al deze voorstellen wakkerden de maatschappelijke weerstand aan.

Toen viel in 2010 het kabinet Balkenende IV over de kwestie Uruzgan. Er werden nieuwe verkiezingen georganiseerd en de politieke besluitvorming rond het klimaatbeleid stond stil. Plannen om flink te investeren in duurzame energie werden in de ijskast gezet, net als de voornemens om ons land beter te beschermen tegen overstromingen. In oktober 2010 trad een nieuwe regering aan en leken de klimaatsceptici het pleit nog verder te hebben gewonnen: in de regeringsverklaring van het nieuwe kabinet komt het woord klimaatverandering niet meer voor.

Samenvattend kun je zeggen dat in Nederland in het jaar 2010 op nationaal politiek niveau een enorme draai is gemaakt. Terwijl de resultaten van klimaatonderzoekers en instanties als het KNMI twintig jaar lang serieus zijn genomen door Nederlandse politici, is het nieuwe kabinet ineens zeer kritisch op alles wat met klimaat te maken heeft.

Wordt het wel warmer?

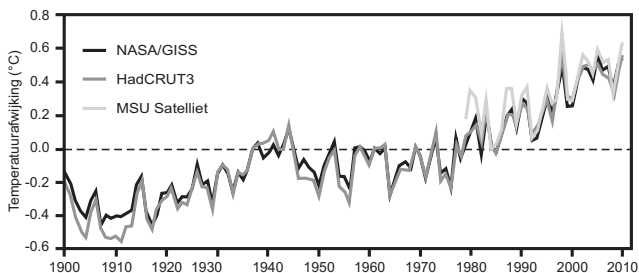
Begin 2010 presenteerden klimaatsceptici de meetresultaten van meetstations in de Verenigde Staten, die lieten zien dat de

gemiddelde jaartemperatuur daar sinds 1998 niet is gestegen, maar juist is gedaald. Dit zou er volgens hen op duiden dat er een einde is gekomen aan de opwarming van de aarde. De opwarming tot nu toe zou zijn veroorzaakt door cyclisch gedrag van de zon; met het ingaan van een volgende fase zou de aarde vanaf 1998 weer kouder aan het worden zijn, zo luidde hun stelling.

Bij deze stellingen zijn belangrijke kanttekeningen te plaatsen. Het klopt dat de gemiddelde temperatuur van de aarde in het jaar 1998 een record bereikte, en dat de gemiddelde jaartemperatuur sindsdien geen hogere waarden heeft bereikt. Maar wanneer we alle jaren afzonderlijk beschouwen en de jaren 1990-2000 vergelijken met de jaren 2000-2010 ontstaat een heel ander beeld.

De gemiddelde temperatuur zoals die van jaar tot jaar is gemeten is aangegeven in figuur 10. Wanneer we kijken naar de jaren vanaf 1998 tot 2009 en de jaren daarvoor weglaten, dan lijkt het inderdaad alsof de opwarming stagneert. Maar deze wijze van redeneren is als het lopen langs de zee vlak na hoog water, en dan concluderen dat de zeespiegel daalt.

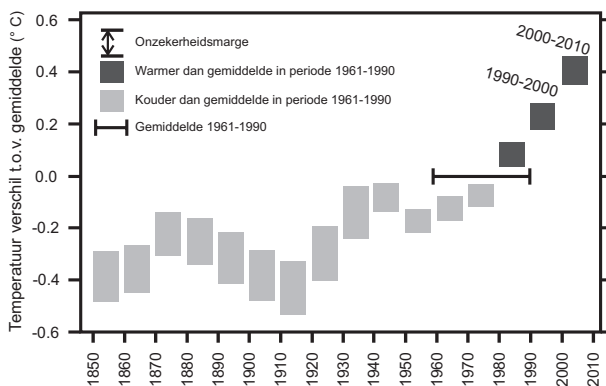
MONDIAAL TEMPERAATUURVERLOOP 1900-2010



Figuur 10. Wereldgemiddelde temperatuurafwijking ten opzichte van het gemiddelde van 1961-1990, op verschillende manieren gemeten. De resultaten zijn van de Amerikaanse NASA, het Hadley Centre van het Verenigd Koninkrijk, en de MSU-satelliet [Bron: KNMI¹⁷]

De genoemde critici namen een te korte periode in beschouwing. Het begin van de periode is bovendien nogal selectief gekozen, door te beginnen met het warmste jaar ooit gemeten. Een meer representatief beeld geeft de ontwikkeling van de gemiddelde temperatuur per periode van tien jaar. Dat komt ook iets dichterbij de definitie van klimaat, waarbij het immers gaat om metingen over een periode van dertig jaar. Deze gemiddelde temperatuur over een periode van tien jaar, inclusief de onzekerheid daarin, is weergegeven in figuur 11. Het zijn dezelfde gegevens als die van figuur 10, maar dan gemiddeld per tien jaar. De meetresultaten laten dan wel degelijk een gestage opwarming zien van 0,15 à 0,20 graad per tien jaar.


GEMIDDELTE TEMPERATUUR PER DECENNIUM



Figuur 11. De blokjes laten de wereldgemiddelde temperatuur zien per tien jaar, vergeleken met de gemiddelde temperatuur van 1961-1990. De hoogte van het blokje laat de onzekerheidsmarge zien. [Bron: NOAA 2010¹⁸]

De rol van de zon

Toch blijft een klein aantal onderzoekers volhouden dat de zon de belangrijkste oorzaak is van de recente opwarming. Zij verwijzen hierbij naar natuurlijke cycli in de intensiteit van zonnevlekken. De activiteit van de zon kent een (ongeveer) elfjarige



cyclus. Deze cyclus is in zekere mate terug te vinden in de historische gegevens over warme en minder warme jaren. Missoogsten en daarop volgende revoluties in de achttiende en negentiende eeuw in Europa worden door historici vaak in verband gebracht met zonnevlekken.

Onderzoek naar de relatie tussen zonneactiviteit en klimaat wijst ook op het bestaan van natuurlijke cycli in zonneactiviteit, met langere herhalingsperiodes van 90 en van 200-250 jaar (zie figuur 3). Deze cycli zijn moeilijker te herkennen vanwege hun onregelmatigheid. Wel zijn er duidelijke aanwijzingen voor aanzienlijke veranderingen in de gemiddelde temperatuur in bepaalde delen van de wereld.

De langjarige cyclus wordt onder meer verantwoordelijk gehouden voor de warme periode rondom het jaar 950, waarin de Vikingen zich vestigden op Groenland. Ook de koudere periode die wij de kleine ijstijd noemen (zie het schilderij van Avercamp, figuur 23 in het kleurenkatern) wordt in verband gebracht met deze cyclus. De lange cyclus en het effect daarvan op de gemiddelde temperatuur is niet eenduidig en wordt daarom niet door iedereen als zodanig erkend.

Tot slot zijn er ook geologische onderzoekers die aanknopingspunten hebben gevonden voor het bestaan van een cyclus van vijftienhonderd jaar en een cyclus van ongeveer drie- tot vijfduizend jaar. Ook deze cycli worden gerelateerd aan variatie in zonneactiviteit.

De laatste tientallen jaren zijn de technieken waarmee het geologische verleden kan worden gereconstrueerd enorm verbeterd. Er wordt gebruikgemaakt van isotopenanalyse van slibmonsters van de bodem van meren en oceanen, van de hoogteligging van koraalgebieden, de ontwikkeling van stalactieten in grotten en van de analyse van de samenstelling van lucht die gevonden is via diepe boringen in de ijskappen. Door de veel nauwkeurigere metingen van tegenwoordig is het mogelijk geworden vrij precieze reconstructies te maken van het verloop

van de temperatuur, de samenstelling van de lucht, de herkomst en de leeftijd van bodemmaterialen en de stand van de zeespiegel. Door deze geologische reconstructies en door het combineren van gegevens uit verschillende bronnen hebben klimaatonderzoekers een steeds beter inzicht gekregen in de processen die spelen ten aanzien van klimaat en klimaatverandering, inclusief de doorwerking van variaties in zonneactiviteit.

Ook in de rapporten van het IPCC wordt uitvoerig ingegaan op de activiteiten van de zon. Niet alleen daarin, maar ook in andere wetenschappelijke publicaties wordt aangegeven dat de variaties in de zonneactiviteit (ook de langjarige cycli van tweehonderd jaar en meer) weliswaar van invloed zijn op de wereldwijd gemiddelde temperatuur, maar dat die invloed over periodes van tientallen tot honderden jaren beperkt blijft tot 0,2, maximaal 0,4, graden Celsius. In bepaalde delen van de aarde kan die invloed wel groter zijn geweest, zoals in Noordwest-Europa, maar voor de aarde als geheel komen de onderzoekers niet verder dan een maximale invloed van 0,4 graden Celsius.

Een variatie van de wereldwijd gemiddelde temperatuur van 0,2 tot maximaal 0,4 graden Celsius over tientallen jaren door zonnevariatie is niet gering, als we die vergelijken met de opwarming van de aarde gedurende de afgelopen honderd jaar: ongeveer 0,8 graden. Maar wanneer we deze maximale invloed van zonnevariatie vergelijken met de invloed van de toename van broeikasgassen met indicaties van 2 tot 6 graden temperatuurstijging in de komende honderd jaar, dan is het effect van variatie van zonneactiviteit naar verhouding erg klein. Met andere woorden: ook al zou de activiteit van zon over een zekere periode leiden tot een bepaalde afkoeling, dan is die veel te gering om het effect van de broeikasgassen te compenseren. Overigens zal het cyclisch gedrag van de zon op zeker moment ook leiden tot een versterking van de opwarming.

De 'vingerafdruk' van de zon en van broeikasgassen

In 1990 heeft het IPCC voor de eerste maal berekeningen ge-

publiceerd over de te verwachten stijging van de temperatuur door uitstoot van extra broeikasgassen. Sinds die tijd is de aarde met 0,3 à 0,4 graden warmer geworden, net zo veel als door het IPCC in 1990 werd berekend – zie figuur 12. Dat kan natuurlijk toeval zijn, maar de kans daarop is niet zo groot. En het zou ook wel erg toevallig zijn dat precies de opwarming die in 1990 was berekend als het effect van broeikasgassen, in plaats daarvan door de zon zou zijn veroorzaakt.

Er is nog een ander gegeven dat er sterk op wijst dat de zon niet verantwoordelijk is. Dat gegeven ligt verscholen in het patroon van de opwarming die wordt gemeten rondom de aarde. De aarde wordt opgewarmd door de straling van de zon. De manier waarop een verhoogde instraling doorwerkt op de temperatuur van de verschillende luchtlagen rondom de aarde en de oceaan heeft een eigen patroon. Bij vulkanen en de invloed daarvan op de temperatuur is dat patroon duidelijk anders. Bij industriële luchtverontreiniging is dat patroon weer anders. Elk van deze verschijnselen heeft als het ware een eigen vingerafdruk. Dat geldt ook voor de extra broeikasgassen.

Opwarming van de aarde door extra broeikasgassen treedt op omdat deze gassen remmend werken op de warmtestraling (infrarood) naar het heelal. Vanaf de aarde naar omhoog ontmoet deze straling door de aanwezigheid van extra broeikasgassen een weerstand die groter is dan voorheen. De onderste luchtlagen warmen daardoor op. Maar vanwege de remming ontvangen de hogere luchtlagen juist minder warmte. Zij blijven echter wel uitstralen naar het heelal. Het netto effect hiervan is dat de bovenste luchtlagen kouder worden. Dit patroon onderscheidt zich van de andere invloeden op de temperatuur. Door dit onderscheid, het verschil in vingerafdruk, kunnen we de invloed van broeikasgassen onderscheiden van de andere invloeden zoals variatie van zonneactiviteit, vulkanen en luchtverontreiniging.

De ontwikkeling van de temperatuursverandering van de luchtlagen zoals gemeten over de afgelopen honderd jaar is

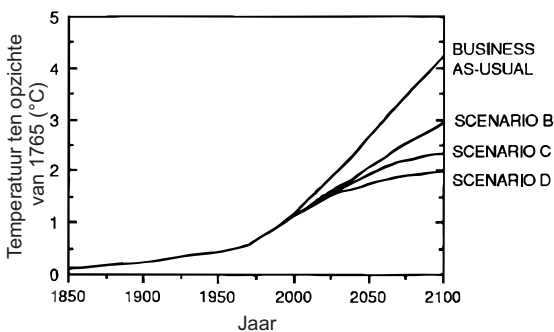
weergegeven in figuur 24 in het kleurkatern. Hierin wordt zichtbaar dat vooral gedurende de afgelopen 30 jaar de lagere luchtlagen warmer zijn geworden, terwijl de hogere luchtlagen zijn afgekoeld. Dit patroon wijst op de dominante invloed van broeikasgassen op de stijging van de gemiddelde temperatuur.

Maar hoe overtuigend de temperatuurstijging ook wordt gemeten en hoe helder en herkenbaar het patroon ook is, er blijft discussie over de interpretatie ervan. De aanhangers van de theorie dat de zon de belangrijkste oorzaak is van de opwarming van de afgelopen tientallen jaren, wijzen er bijvoorbeeld op dat niet alle onderdelen van het patroon dezelfde kant op wijzen en dat je nooit helemaal kunt uitsluiten dat de invloed van zon-
nevariatie anders doorwerkt dan tot nu toe is gedacht.

Het IPCC in 1990 over de temperatuur in 2010

Het is zoals gezegd al meer dan twintig jaar geleden dat de eerste berekeningen van de invloed van broeikasgassen door het IPCC werden gepubliceerd: er werd aangegeven dat de temperatuur in de daarop volgende jaren met 0,15 à 0,2 graad per

DE IPCC-VOORSPELLING 1990

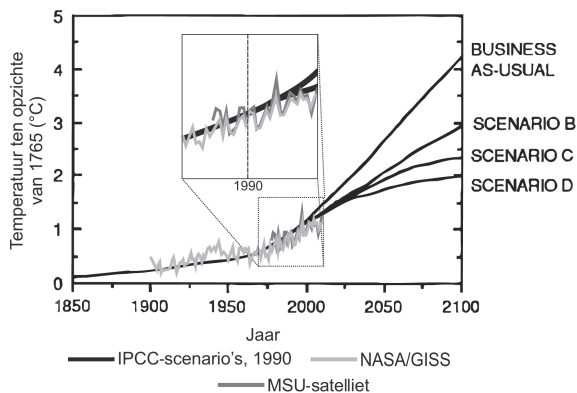


Figuur 12. Resultaten van de berekening van de stijging van de gemiddelde temperatuur over de periode 1990 tot 2100 voor verschillende emissiescenario's, zoals weergegeven in het rapport van het IPCC van 1990.¹⁹

ten jaar zou gaan stijgen. In figuur 12 zijn de toekomstprojecties aangegeven zoals ze stonden in het IPCC-rapport uit 1990. Nu, in 2011, is het mogelijk de temperatuurprojecties van toen te vergelijken met de sindsdien optreden verandering in de gemiddelde temperatuur van de aarde.

In figuur 13 zijn de werkelijke metingen weergegeven. We zien dat de stijging van de gemiddelde temperatuur over de periode van 1990 tot 2010 met 0,3 a 0,4 graden inderdaad goed overeenkomt met de projecties van 1990. Het is belangrijk hierbij op te merken dat er een naijleffect bestaat tussen de stijging van de concentraties en de stijging van de gemiddelde temperatuur, net als in een kamer waarin de thermostaat hoger wordt gezet. De radiatoren stralen meteen meer warmte uit, maar het kost tijd om de ruimte en de voorwerpen op te warmen. Zo duurt het ook 30 tot 50 jaar voordat de gemiddelde temperatuur van

DE IPCC-VOORSPELLING 1990 EN DE WERKELIJKE TEMPERAATUURVERANDERING



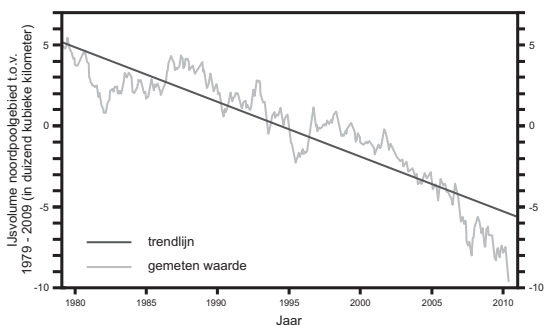
Figuur 13. De onderliggende, zwarte figuur is de projectie van temperatuurverandering van het IPCC uit 1990, met daaroverheen (in grijs) de metingen van temperatuur vanaf 1860 tot nu. In het kader is duidelijk te zien hoe de gemeten temperatuur met nagenoeg dezelfde snelheid stijgt als aangegeven in het IPCC-rapport van 1990. [Bronnen: IPCC en KNMI²⁰]

de aarde zich heeft aangepast aan de hogere concentratie van broeikasgassen. Dit betekent dat de gemiddelde temperatuur van nu vooral het gevolg is van de emissies en veranderingen van de concentratie van de afgelopen 30 tot 50 jaar. Het betekent ook dat de temperatuur nog geruime tijd blijft stijgen, ook als de concentratie niet verder toeneemt.

Op basis van de goede kwaliteit van de projecties van het IPCC gingen de klimaatonderzoekers ervan uit dat het vertrouwen in hun werk zou toenemen. Tot hun verrassing stak er in 2010 zo- als gezegd echter een storm van kritiek op. Het ironische hierbij is dat naarmate de metingen een steviger fundament leggen onder de berekeningen van de klimaatonderzoekers, de kritiek op hun werk luider lijkt te worden.

De discussie over (veranderingen van) de temperatuur toont aan dat de weersomstandigheden in eigen land sterk doorwerken in het publieke debat over de opwarming van de aarde als geheel. Een ruimere blik laat echter zien dat de temperatuur in het gebied rondom de Noordpool sterk stijgt. Dit blijkt ook uit

VERANDERING IJSVOLUME NOORDPOOLGEBIED



Figuur 14. De afname van het volume van zee-ijs in het noordpoolgebied in duizenden kubieke kilometer ten opzichte van het gemiddelde van 1979 tot 2009. De rechte lijn geeft een gemiddeld verlies aan van 3400 kubieke kilometer zee-ijs per tien jaar. [Bron: NSIDC 2010²²]

de metingen van de veranderingen in de ijsbedekking van de Noordpoolzee en de recente gegevens over het afsmelten van de ijskap van Groenland. De ontwikkeling van het volume aan ijs op de Noordpoolzee en de ontwikkeling van het oppervlakte van de ijsbedekking aan het einde van de zomer (september) worden aangegeven in figuur 14 en figuur 25 in het kleurenkatern. De trends rondom de Zuidpool zijn minder duidelijk.²¹ De verandering van de gemiddelde temperatuur over de afgelopen 30 jaar van de aarde als geheel is aangegeven in figuur 27 in het kleurenkatern.

Wordt de invloed van de mens op het klimaat overschat?

In verschillende vakdisciplines wordt onderzoek naar klimaatverandering gedaan. Een van die disciplines is de geologie. Er zijn geologen die het effect van menselijk gedrag op het klimaat sterk relativeren. Ze zijn het weliswaar eens met de conclusies van het IPCC over de toename van broeikasgassen en over de herkomst ervan, maar ook zij geloven niet dat die extra broeikasgassen zoveel invloed kunnen hebben op het klimaat. Zij verwijzen daarbij naar het verre verleden, toen er ook veranderingen in het klimaat waren, terwijl er nog nauwelijks mensen waren. De gemiddelde temperatuur van de aarde kent een eigen dynamiek, zo argumenteren zij: **zonnevariatie, grote oceaanstromingen, vulkanen en ijstijden ontstaan door schommelingen van de aardas spelen elk hun eigen rol**. De invloed van mensen kan daar volgens hen niet tegenop.

De meeste geologen die zelf onderzoek doen naar klimaatvariaties van het verleden maken zich echter juist grote zorgen over het effect van de extra broeikasgassen. Dit onderzoek, met behulp van zeer nauwkeurige isotopenanalyse, laat zien dat broeikasgassen zoals CO₂ en CH₄ (methaangas) een grote rol hebben gespeeld in de klimaatvariaties van het verleden. Daarover straks meer in de beschouwing over ijstijden. Maar eerst een korte relativering.

Waar álle geologen zich aan ergeren is de arrogantie van de slogan ‘Stop de klimaatverandering’. Deze slogan, die vaak wordt gebruikt door de milieubeweging, getuigt van een zekere overmoed. Met onze activiteiten hebben wij immers wel invloed op de hoeveelheid extra broeikasgassen, maar de invloed op het klimaat is daarvan slechts een afgeleide. Als het klimaat eenmaal verandert, blijven de sporen daarvan bovendien lang doorwerken. Het is dan ook zeer de vraag of door vermindering van emissies het ‘oude’ klimaat terug zal keren. Het VN-klimaatverdrag gaat daarom niet zozeer over de stabilisatie van het klimaat, maar over de stabilisatie van de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer door het terugdringen van de emissies die samenhangen met menselijke activiteiten. We kunnen wel de invloed van onze activiteiten op het klimaat (bij)sturen. Maar daarmee sturen we niet één op één het klimaat, omdat er allerlei wisselwerkingen kunnen optreden met natuurlijke klimaatvariatie. Belangrijke vragen zijn dus ook: tot hoever kunnen we bijsturen? Hoe effectief zal dat bijsturen kunnen zijn en zijn er ook grenzen aan te geven waarbinnen bijsturen wel en niet meer mogelijk is? Wat kunnen we leren van de dynamiek van het klimaat in het verleden? Dat zijn kwesties waarmee de wetenschap zich bezighoudt.

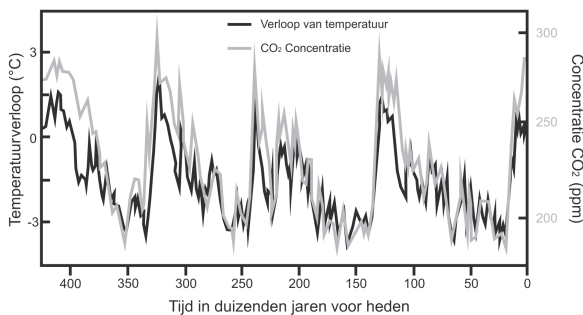
IJstijden

Sinds ongeveer drie miljoen jaar wordt het klimaat van de aarde gekenmerkt door met regelmaat terugkerende ijstijden. Het ritme van die ijstijden en de relatie met de schommeling van de aardas is in 1941 voor het eerst beschreven door Milutin Milankovitch, een Servische ingenieur en geofysicus; sindsdien heten de variabelen die dit ritme veroorzaken de Milankovitch-cycli. Interessant voor de huidige situatie is dat er tijdens deze cycli een sterke parallel bestaat tussen de verandering van de temperatuur en de verandering van de concentratie van broeikasgassen. De ijstijden en de bijbehorende veranderingen in de concentratie van broeikasgassen staan geheel los van de in-

vloed van mensen; die waren er toen ook nauwelijks. We zitten nu in een warme tijd. En volgens het ritme van Milankovitch staan we over 10.000 tot 20.000 jaar aan het begin van de volgende ijstijd.

Ijstijden ontstaan als volgt: het begint met een kleine verandering in de stand van de as waar de aarde om draait. Hierdoor krijgt het noordelijk halfrond van de aarde iets minder warmte van de zon. Dit gebied koelt af en sneeuw en ijs kunnen zich over een groter gebied handhaven. Door de toenemende witheid wordt een groter deel van het zonlicht teruggekaatst; hierdoor koelt dit gebied nog verder af. Dit zichzelf versterkende proces leidt ertoe dat de ijskap steeds verder groeit, uiteindelijk tot in onze streken. Als op een zeker moment de aardas weer in de oude stand terugkeert, krijgt het poolgebied weer meer zonlicht en begint het ijs te smelten. De zee en het land worden weer donker en absorberen daarbij meer zonlicht. Hierdoor stijgt de temperatuur nog verder, tot de sneeuwbedekking en de ijskappen een omvang hebben zoals we die ook nu kennen.

TEMPERATUUR EN CO₂-CONCENTRATIE OP GEOLOGISCHE TIJDSCHAAL




*Figuur 15. Veranderingen van temperatuur en concentratie van broeikasgasen in de afgelopen 450.000 jaar. Tussen ijstijden en warme tijden heeft de temperatuur met ongeveer 6 graden Celsius heen en weer geschommeld. De CO₂-concentratie varieerde tussen pakweg 180 en 280 parts per million (ppm). [Bron: Hansen e.a., *The Open Atmospheric Science Journal* (2008)²³]*

Dit is een vrij simpele uitleg van een complex proces, waarbij ook andere (geologische) processen een rol spelen, zoals de veranderingen in de concentratie van broeikasgassen (verderop volgt daarover meer) en het effect van de veranderingen in het gewicht van de ijskappen en de samendrukking van de bodem onder dat gewicht.


Het verloop van de ijstijden en de veranderingen van de temperatuur en van de concentratie van broeikasgassen kunnen steeds beter worden gereconstrueerd aan de hand van veranderingen in de samenstelling van lucht die is opgesloten in oude ijskappen en de verandering in de isotopenverhouding van zuurstof dat wordt vastgehouden in het slib van de bodem van de oceanen. De reconstructie is weergegeven in figuur 15.

De tijd-nauwkeurigheid van de reconstructie uit het zo verre verleden is beperkt. Daarom is moeilijk te zien wat op een bepaald moment leidend is geweest: de toename van de temperatuur of de toename van de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer. Gedurende vele jaren is in de wetenschappelijke wereld fors gediscussieerd over deze kip-of-ei-kwestie. Door verbetering van de analysemethoden in de laboratoria is inmiddels het inzicht sterk gegroeid. Het gaat vermoedelijk als volgt: de opwarming na een koude periode begint met een kleine verandering in de stand van de as van de aarde. Hierdoor neemt de hoeveelheid energie toe die de aarde ontvangt van de zon. Hierdoor smelt een bepaalde hoeveelheid sneeuw en ijs. Het land warmt daardoor nog verder op en laat meer broeikasgassen ontsnappen naar de atmosfeer. Als gevolg hiervan neemt de opwarming nog verder toe. Dit proces gaat door tot de stand van de aardas terugkeert naar de oude situatie. Het wordt dan weer kouder, de hoeveelheid sneeuw en ijs neemt toe en ook worden er weer meer broeikasgassen opgeslagen in de bodem.


Het gaat dus om zelfversterkende processen: een warmere aarde produceert meer CO₂ en meer CO₂ leidt weer tot meer opwar-



ming. De vraag is dan natuurlijk: waarom hebben we dan geen kokende aarde? Het antwoord is dat dit soort zelfversterkende processen alleen maar werkt binnen zekere grenzen. Als het 'te veel' wordt, ontstaat er een nieuwe fase in het proces. Of – zoals bij de ijstijden – het zelfversterkend proces stopt omdat het doorbroken wordt door andere geologische processen, zoals de regelmatig terugkerende verandering van de stand van de aardas. Onze kennis van dit soort zelfversterkende processen en de grenzen waarbinnen zo'n zelfversterking kan optreden binnen het systeem aarde is nog altijd beperkt. De interactie tussen de geologie en de biologie van de aarde is dermate complex, dat voorspellen minder waarde heeft naarmate we verder buiten het bekende domein komen.



Volgens een aantal klimaatonderzoekers is het proces van zelfversterking in beide richtingen de meest aannemelijke verklaring voor de grote temperatuurverschillen tussen een ijstijd en een warme tijd. Het begint met kleine verandering in de stand van de as van de aarde, maar wordt versterkt door wat we in jargon 'terugkoppelingen' noemen. Positieve terugkoppelingen zijn processen die een initiële verandering versterken; negatieve terugkoppelingen zijn processen die die verandering afremmen. Bij het ontstaan van ijstijden wordt een initiële afkoeling op twee manieren versterkt. Door een kleine daling van de temperatuur neemt de sneeuwbedekking toe. Tegelijkertijd neemt, in de koudere wereld, de stroom van broeikasgassen naar de atmosfeer af, waardoor de concentratie in de atmosfeer ervan daalt. Als gevolg daarvan daalt de temperatuur nog verder. De twee versterkingsprocessen, verandering van reflectie en verandering van broeikasgasemissie, zijn ervoor verantwoordelijk dat de temperatuurverandering tussen een warme en een koude tijd veel groter is dan wordt berekend uit de variatie in de hoeveelheid zonne-energie die de aarde bereikt door de slingering van de aardas alleen. Wanneer we het effect van deze laatste variatie berekenen en uitdrukken in een temperatuurverande-



ring van de aarde, dan is dat veel minder dan 0,1 graad, terwijl de werkelijke temperatuurverandering gedurende een volle ijs-tijdcyclus ongeveer 6 graden Celsius is. Deze twee versterkende processen zijn samen nagenoeg volledig verantwoordelijk voor de 6 graden verschil in temperatuur. De slingering in de aardas is kortom blijkbaar alleen de periodieke trigger; andere processen doen het echte werk.

Naar schatting wordt de helft van de 6 graden temperatuurverschil veroorzaakt door de verandering van de reflectie van de aarde, het zogenaamde ijs-albedo-effect. De andere helft wordt in verband gebracht met de verandering van de concentratie van broeikasgassen tijdens het komen en gaan van de ijstijden. De CO₂-concentratie in de atmosfeer in een warme tijd en een ijstijd varieert tussen de 180 en 280 ppm (*parts per million*, delen CO₂ per miljoen delen lucht) zie figuur 15. Het verschil van honderd ppm staat in dit geval voor een temperatuurverschil van ongeveer 3 graden Celsius. Deze theorie is door de Amerikaanse klimaatonderzoeker van de NASA James Hansen in 2008 in wetenschappelijke termen beschreven.

De relatie tussen de concentratie van broeikasgassen en de temperatuur is overigens niet lineair, maar logaritmisch. Dat wil zeggen dat er steeds een verdubbeling van de concentratie van broeikasgassen nodig is om de temperatuur met een bepaalde hoeveelheid graden te laten stijgen. Wanneer we dit gegeven in acht nemen, kunnen we een berekening maken van het effect van de toename van broeikasgassen op de temperatuurstijging in het jaar 2100. Dit leidt tot de conclusie dat bij een voortgaande groei van de emissies de gemiddelde temperatuur van de aarde met meer dan 4 graden Celsius zal stijgen. Niet alle geologen zijn het overigens met de reconstructie van Hansen eens. Zij wijzen erop dat ook andere effecten een rol kunnen spelen, zoals verandering van de invloed van stormen die fijn zand doen opwaaien en daarmee de instraling van de zon beïnvloeden.

Broeikasgassen en opwarming

Hansen heeft niet alleen naar ijstijden gekeken. Hij heeft daarnaast al het werk geanalyseerd van geologen die reconstructies hebben gemaakt van het gedrag van ijskappen, van klimaat en van de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer, en het verloop van deze grootheden over de afgelopen 110 miljoen jaar zo goed mogelijk in beeld gebracht. Daarbij ontdekte hij een duidelijke samenhang tussen deze variabelen.

Hansens conclusie is dat het smelten van de ijskappen van Groenland en Antarctica in het geologische verleden steeds is begonnen zodra de concentratie van broeikasgassen steeg boven het niveau van ongeveer 350 ppm. Ter vergelijking: de huidige concentratie van CO₂ in de atmosfeer bedraagt 390 ppm; met de andere broeikasgassen erbij is de concentratie in termen van CO₂-equivalent inmiddels gestegen tot 460 ppm. De door Hansen genoemde kritische grens van 350 ppm is dus al geruime tijd overschreden. Het is volgens hem daarom ook niet toevallig dat juist in de afgelopen tien jaar de randen van de ijskappen veel sterker afsmelten dan in de honderden jaren hiervoor.

Ook Hansen geeft aan dat dit soort processen slechts langzaam op gang komen, maar dat, wanneer ze eenmaal begonnen zijn, ze ook een hele lange remweg hebben. Hij stelt dat alleen een zeer drastische wereldwijde reductie van de emissies van broeikasgassen het smeltproces nog kan stoppen.

De koolstofkringloop

Dankzij de van nature aanwezige broeikasgassen in de atmosfeer is de gemiddelde temperatuur van de aarde ongeveer 15 graden Celsius. Zonder deze broeikasgassen zou de aarde 33 graden kouder zijn. De van nature aanwezige concentratie van broeikasgassen is in de geologische geschiedenis echter niet constant; er zijn perioden geweest met een veel hogere concentratie, tientallen miljoenen jaren geleden. De gemiddelde temperatuur op aarde was toen (30 tot 60 miljoen jaar geleden) ook

veel hoger dan nu. In de afgelopen miljoenen jaren is de concentratie van CO_2 betrekkelijk constant, zij het dat de ijstijden een ritmiek laten zien waarbij de concentratie varieert van 180 ppm in de meest koude periode tot 280 ppm in de warme perioden; zie ook figuur 15. Sinds de industriële revolutie en het bijbehorende gebruik van fossiele brandstoffen neemt de concentratie van CO_2 toe (zie ook figuur 44). Wanneer CO_2 eenmaal in de lucht zit, heeft het een gemiddelde verblijftijd van honderd jaar. Dat wil zeggen dat een molecuul CO_2 , eenmaal vrijgekomen, gemiddeld honderd jaar in de atmosfeer blijft hangen als broeikasgas. Dit betekent dat de extra gassen nog honderden jaren effect zullen hebben op het klimaat.

In figuur 26 in het kleurkatern is de koolstofkringloop in beeld gebracht. Hierin is koolstof de c van CO_2 . In de figuur zijn de voorraden koolstof aangegeven en de stromen tussen de oceanen, de bodem en de atmosfeer. De getallen in de figuur laten zien dat het bij de jaarlijkse natuurlijke stroming gaat om de uitwisseling van 120 gigaton koolstof tussen de atmosfeer en het bodem- en het plantendek van de aarde. Er gaat iets meer naar beneden dan er omhoog gaat, omdat de concentratie in de atmosfeer hoger is dan voorheen, als gevolg van de extra broeikasgassen die afkomstig zijn van de verbranding van de fossiele plantenresten/brandstoffen. Daarnaast gaat het om 90 gigaton aan jaarlijkse uitwisseling tussen de oceanen en de atmosfeer. Ook voor de oceaan geldt dat er jaarlijks meer in gaat dan eruit komt, vanwege die toegenomen concentratie in de atmosfeer. De figuur geeft aan dat ongeveer de helft van de hoeveelheid koolstof die als gevolg van de menselijke activiteiten jaarlijks vrijkomt wordt opgenomen door de bodem, het plantendek en de oceanen. De andere helft kan niet zo snel wordt geabsorbeerd en blijft daarom 'hangen' in de atmosfeer.

De figuur laat ook zien dat de jaarlijkse stromen van koolstof (ofwel CO_2) tussen de aarde en de atmosfeer veel groter zijn dan de jaarlijkse stroom die voortvloeit uit menselijke activitei-

ten. Bij dit laatste gaat het om circa 9 gigaton per jaar, waarvan circa 7 door gebruik van fossiele brandstoffen. Je zou op basis hiervan kunnen concluderen dat de invloed van mensen betrekkelijk klein is. Immers, een kleine verandering in de natuurlijke stromen lijkt net zoveel invloed te hebben als alle menselijke activiteiten tezamen.

Die redenering klopt echter niet. De natuurlijke stromen zijn namelijk in evenwicht met elkaar, terwijl de stroom door menselijke activiteiten neerkomt op een jaarlijkse netto toevoeging van broeikasgassen aan het systeem. Door deze netto toevoeging is de concentratie in de atmosfeer in de afgelopen honderd jaar met ongeveer 40 procent toegenomen, zo blijkt uit de metingen: van 280 ppm tot 390 ppm.

Kan de opwarming worden gecompenseerd door een aanstaande ijstijd?

Een belangrijke vraag, die regelmatig wordt gesteld, is of de huidige opwarming zou kunnen worden gecompenseerd door een toekomstige ijstijd. Dit is een interessante gedachte. De opwarming die nu wordt berekend kan, als alles tegenzit, zoals gezegd in 2100 oplopen tot een stijging van 6 graden Celsius. In de koudste fase van de ijstijden lag de gemiddelde temperatuur van de aarde ongeveer 6 graden Celsius lager. Maar hoewel de temperatuurverschillen gelijk zijn, kunnen die twee niet tegen elkaar worden weggestreept, omdat ze zich in totaal verschillende perioden afspelen.

Het komen en gaan van een ijstijd speelt zich af over een periode van ruim 100.000 jaar. De volgende ijstijd zal naar verwachting pas over ongeveer 10.000 tot 20.000 jaar beginnen en dan nog duurt het tienduizenden jaren voordat de aarde 6 graden kouder wordt. Bij de opwarming door de extra broeikasgassen die nu plaatsvindt, gaat het om een periode van tientallen tot honderden jaren. Het is daarom weinig realistisch om te rekenen op een volgende ijstijd als compensatie van de opwarming van de komende honderd jaar.

Vulkanen

In de opbouw van de atmosfeer hebben vulkanen destijds een belangrijke rol gespeeld. Door hun werking is in het verre geologische verleden zeer veel CO_2 de lucht in gebracht. In de huidige tijd spelen vulkanen ook een rol, maar hun invloed op het klimaat is van meer tijdelijke aard. De uitbarsting van de Krakatau nabij Java op 17 augustus 1883 is daarvan een voorbeeld. Na die uitbarsting was het enkele jaren aanzienlijk kouder en wereldwijd waren er misoogsten en hongersnood.

Bij de huidige invloed van vulkanen gaat het niet om CO_2 , maar om stof, waaronder zwavelverbindingen, dat opstijgt tot een hoogte van meer dan tien kilometer. Op dat niveau kunnen ze de instraling van de zon tijdelijk en gedeeltelijk blokkeren. Na een aantal jaren is de invloed van zo'n uitbarsting weer uitgewerkt. De stoffen die de atmosfeer in zijn geslingerd, zakken in de loop der jaren weer naar beneden en worden door de regen uitgewassen.

Een recent voorbeeld is de uitbarsting van de Pinatubo op de Filippijnen in juni 1991. De gemiddelde temperatuur van de aarde in het jaar daarop was ongeveer 0,2 graden lager. Enkele jaren later was het effect verdwenen. De invloed van één enkele vulkaanuitbarsting kan dus net zo groot zijn als de temperatuurstijging door extra broeikasgassen in een periode van tien jaar, maar het effect van tien jaar CO_2 -uitstoot blijft veel langer doorwerken, ongeveer honderd jaar of langer.

*Hoe erg is dat,
een iets warmere wereld?*

De gevolgen van klimaatverandering worden vaak zwaar aanzet, maar er zijn beslist ook voordelen aan verbonden. In het vroege voorjaar op een terras zitten wordt door vrijwel iedereen gewaardeerd. Of, serieuzer, het langere groeiseizoen kan leiden tot hogere opbrengsten in de landbouw en de stookkosten worden lager in de milde winters. Als het erg koud is, klinkt dan ook meer dan eens de verzuchting: waar blijft die voorspelde opwarming?

De vraag is begrijpelijk, maar daarbij wordt voorbijgegaan aan de traagheid van het klimaatsysteem. Verandering in klimaat komt zoals eerder gezegd moeilijk op gang, maar eenmaal op gang gekomen is zij moeilijk te stoppen. Opwarming kost tijd, zeker wanneer het gaat om de enorme watermassa's van de oceanen. Eenmaal op gang gekomen, gaat het proces van opwarming en zeespiegelstijging nog eeuwenlang door.

De belangrijkste vraag is eigenlijk: hoe verhouden de normale maatschappelijke dynamiek en de eigen dynamiek van de natuur zich tot de snelheid van klimaatverandering? Kunnen we ons tijdig en voldoende aanpassen, of worden we keer op keer verrast? Het antwoord hangt vooral af van de snelheid waarmee het klimaat verandert. Gaat het wereldwijd gemiddeld om 1 graad temperatuurstijging in het jaar 2100, of om 6 graden?

Er zijn bovendien gebieden waar de temperatuur sterker zal stijgen dan het wereldgemiddelde, en gebieden waar het juist langzamer zal gaan. Dat hangt onder andere af van de verhouding tussen land- en zeeoppervlak en van de dominante stromingspatronen in de oceaan. Ook verandering van windpatronen maakt dat er wereldwijd grote verschillen zullen optreden in de mate van opwarming. In sommige gebieden zal die worden versterkt omdat de bodem door het smelten van sneeuw donkerder wordt. Elders zal de aanvoer van koude lucht kunnen toenemen of zal de bewolgingsgraad stijgen, met juist minder opwarming als gevolg. In figuur 27 in het kleurkatern is aangegeven hoe de verschillen in opwarming tot nu toe zijn geweest, en hoe groot de verschillen kunnen zijn bij opwarming volgens IPCC-scenario's met lage en hoge temperatuurstijging.

Het antwoord op de vraag hoe ernstig klimaatverandering is, hangt af van drie zaken. Ten eerste gaat het om de snelheid en de omvang van de verandering. Daarnaast zijn de capaciteit van natuur en mens om zich aan te passen van belang. Ten derde is er het gevoel van rechtvaardigheid: in hoeverre zullen landen en volken accepteren dat de klimaatverandering die zij ondervinden wordt veroorzaakt door mensen elders in de wereld? Dit laatste vraagstuk ligt gevoelig in de internationale politiek, omdat het tot nu toe vooral de rijkere landen zijn die de extra broeikasgassen in de lucht hebben gebracht, terwijl de arme landen vermoedelijk de meeste schade lijden of zullen lijden, omdat daar weinig geld beschikbaar is voor tijdige aanpassingen.

Hieronder wordt beschreven wat het voor de wereld betekent wanneer de gemiddelde wereldtemperatuur met 1 of meer graden Celsius stijgt in de periode tot 2100.

Wat te verwachten bij 1 tot 2 graden temperatuurstijging?

Als het gaat om één graad stijging van de gemiddelde temperatuur in 2100, dan kunnen wij mensen ons daar redelijk goed

bij aanpassen, en de natuur ook. Het klimaat verandert dan zoals wij dat nu eigenlijk al meemaken; de gemiddelde wereldtemperatuur is anno 2011 ongeveer 0,8 graad hoger dan ruim honderd jaar geleden. Het voorjaar begint enkele weken eerder en de winters zijn gemiddeld zachter. De gemiddelde neerslag neemt toe, met vooral zomers heftiger buien, en we krijgen vaker te maken met langdurige droogte.

Dit verhaal geldt in grote lijnen voor de hele wereld. De meteorologische vuistregel luidt dat de plaatsen met veel neerslag met nog meer neerslag te maken krijgen, en dat droge gebieden nog droger worden. Bovendien zal de zeespiegel sneller stijgen dan voorheen. Het noordelijk halfrond zal sneller opwarmen dan het zuidelijk halfrond, omdat daar naar verhouding meer land is.

Bepaalde gebieden zullen voordelen hebben bij de opwarming, zoals Canada, Noordwest-Europa en de noordelijke gebieden van Rusland. De opbrengst van de landbouw zal in die streken toenemen door een verlenging van het groeiseizoen en het mildere worden van de winters. Ook zal er zomers waarschijnlijk scheepvaartverkeer mogelijk zijn van Europa naar Azië over de Noord: een route waar onze voorouders als Willem Barentsz lang naar gezocht hebben, maar hun expedities liepen altijd stuk op de bevroren Noordpoolzee. Tegelijkertijd krijgen de zeer noordelijke gebieden te maken met het gedeeltelijk smelten van permafrostgebieden. Wegen, oliepijpleidingen, woningen en gebouwen zullen daardoor in elkaar storten of opnieuw gefundeerd moeten worden.

Andere gebieden, zoals Zuid-Europa, Noord-Afrika en de gebieden in overeenkomende klimaatzones in Azië en Amerika, zullen problemen krijgen door vermindering van regenval en grotere hitte in de zomer. Ook zal het historische patroon van regenval veranderen, met als gevolg dat er vaker misoogsten zullen optreden.

In Nederland zijn we minder geld kwijt aan stookkosten. Vakantie in eigen land wordt aantrekkelijker. We zullen wel vaker

een hittegolf hebben, en minder vaak een Elfstedentocht.

In ons land is de gemiddelde temperatuur tot nu toe iets sneller gestegen dan het wereldgemiddelde. De broeikasgassen hebben namelijk niet alleen een directe invloed op de temperatuur in ons land, maar ook indirect, omdat de overheersende windrichting wordt beïnvloed door de opwarming van aarde als geheel. Vermoedelijk zal de temperatuur in Nederland ook in de toekomst iets sneller blijven stijgen dan het wereldgemiddelde, maar helemaal zeker is dat niet. Door de ligging zo dicht bij de zee kunnen kleine veranderingen in de overheersende windrichting een groot verschil maken.

Bij een temperatuurstijging van 2 graden zijn de effecten nog steeds in zekere mate te voorspellen. Wel zal wereldwijd belangrijke schade optreden en de noodzakelijke aanpassingen zullen grote investeringen vragen. Hierbij zullen de voor- en nadelen zeer ongelijkmatig neerslaan in de wereld. Grote ecosystemen zullen zwaar beproefd worden op hun vermogen zich aan te passen. Dat zal waarschijnlijk niet overal goed gaan. Hier en daar zal in de natuur massale sterfte optreden, ook zal een aantal dier- en plantensoorten het loodje leggen.

Temperatuurgevoelige systemen, zoals de grote ijskappen en koraalriffen, zullen het op veel plaatsen moeilijk krijgen. Regenval en droogtes zullen heftiger worden en van plaats veranderen. Hierdoor zullen vaker misoogsten optreden. De gevolgen zoals hierboven genoemd bij één graad stijging, zullen sterker optreden. Zeespiegelstijging wordt levensbedreigend voor de eilanden die maar net boven zeeniveau liggen, zoals de Malediven en Tuvalu. Ook laaggelegen (delta)gebieden krijgen het moeilijk, zeker wanneer ze liggen in gebieden die regelmatig getroffen worden door orkanen. Het verspreidingsgebied van ziektes die nu alleen in warmere streken voorkomen, zal groter worden. En de internationale verschillen in de lasten en de lasten van klimaatverandering zullen een belangrijk politiek thema worden.

Het is moeilijk precies aan te geven waar voor grote complexe ecosystemen, zoals koraalriffen en tropische bossen, de kritieke grens ligt in hun vermogen tot aanpassing. Als een ecosysteem verdwijnt, omdat het bijvoorbeeld te warm of te droog wordt, komt er ongetwijfeld een nieuw ecosysteem voor in de plaats. Zo'n overgang zal waarschijnlijk gepaard gaan met snelle veranderingen, gedeeltelijk veroorzaakt door ziekten, plagen en branden.

Op basis van de inzichten in de gevolgen van klimaatverandering, zoals omschreven in het IPCC-rapport van 2007, hebben de regeringsleiders van de 192 VN-landen, tijdens de klimaatconferentie in december 2009 in Kopenhagen besloten om gezamenlijk te streven naar een beperking van emissies, zodanig dat de temperatuur met niet meer dan 2 graden gaat stijgen. Goede afspraken over wat ieder land doet om dit doel te halen zijn daarbij niet gemaakt. De 2-graden-doelstelling van Kopenhagen is bevestigd op de daaropvolgende internationale bijeenkomst in Cancun in 2011. En er is één element toegevoegd, namelijk de afspraak om te onderzoeken of het nodig is de 2-graden-doelstelling te verscherpen naar 1,5 graden, omdat wetenschappelijk onderzoek heeft laten zien dat de schade bij 2 graden groter zou kunnen zijn dan eerder verondersteld.

Wat als de temperatuur met 3 tot 4 of nog meer graden stijgt?

Bij een stijging van 3 graden in het jaar 2100 zullen belangrijke ecosystemen uiteenvallen, omdat de ene soort zich nu eenmaal minder gemakkelijk kan aanpassen dan de andere. Een vogel kan naar een nieuw leefgebied vliegen, maar de zaden van de boomsoort die zijn voedsel levert, doen er misschien wel een paar honderd jaar over om eenzelfde afstand te overbruggen.

Het tropisch regenwoud van de Amazone zal door verdroging worden bedreigd. De landbouw zal het in de subtropische en droge gebieden veel moeilijker krijgen. Door de hitte en de droogte zullen de leefomstandigheden in die gebieden verslech-

teren. Het smelten van de ijskappen op Groenland en Antarctica zal waarschijnlijk niet meer stoppen. Dit geldt vooral voor de ijskap van Groenland. Die ijskap is een overblijfsel uit de laatste ijstijd, die zichzelf door haar hoogte kan handhaven. Wanneer deze ijskap smelt, komt de bovenkant lager te liggen. De neerslag die eerder viel als sneeuw, en daarmee de ijskap op niveau hield, zal vaker vallen in de vorm van regen. Het afsmelten neemt hierdoor toe en de ijskap verliest nog meer hoogte. Hiermee heeft dit systeem een kantelpunt bereikt; voorbij dit punt versterkt het proces zichzelf. Dat betekent dat ook een verdere stijging van de zeespiegel met vele meters daarna niet meer te stoppen zal zijn.

Bij een klimaatverandering met een temperatuurstijging van 4 graden of meer zou de warme golfstroom stil kunnen vallen, zo werd in de jaren negentig naar voren gebracht. Hierdoor zou West-Europa afkoelen, in plaats van warmer te worden. Nader onderzoek heeft laten zien dat deze stroming niet abrupt zal stagneren, maar hooguit geleidelijk. En mocht de warme golfstroom stagneren, dan nog wordt verwacht dat de opwarming het zal winnen. Noordwest-Europa en dus ook Nederland zullen dus ook in dat geval blijven opwarmen, zij het wat langzamer.

Bij een temperatuursverhoging van 3 graden of meer zal de spanning in de wereld in toenemende mate moeilijk te beheersen zijn, vanwege de als onrechtvaardig beschouwde verdeling van de lusten en lasten van klimaatverandering. Zolang de verandering van het klimaat zich geleidelijk ontwikkelt, kunnen de effecten door intensieve en constructieve internationale samenwerking mogelijk nog worden beheerst. Maar bij een dergelijke hoge stijging zullen droogtes en bosbranden enerzijds en overstromingen anderzijds voor grote maatschappelijke ontwrichting kunnen zorgen, met bovendien grote vluchtelingstromen als gevolg.

Kantelpunten: hoe stabiel is het klimaatstelsel?

Het grootste gevaar van opwarming zit hem niet in de geleidelijke veranderingen. Het ernstigste gevaar voor mensen en veel ecosystemen schuilt in het bereiken van kantelpunten.

In de film *An Inconvenient Truth* waarschuwde Al Gore voor kritische drempels die hij *tipping points* noemt: een soort no-go area. In het Nederlands gebruiken we daarvoor het woord kantelpunt. Je kunt achterover wippen met een stoel, als je loslaat kantel je weer terug naar voren. Dat lukt echter maar tot een zeker punt; als je daaraan voorbij gaat val je achterover, onverbiddelijk. Die positie noemen we het kantelpunt: een punt of moment in een beweging of tendens dat vooraf moeilijk precies is aan te wijzen, maar waarvoor geldt dat het onomkeerbaar misgaat als het wordt gepasseerd. In de klimaatkwestie zijn twee vragen hierbij actueel. Ten eerste: bestaat dit soort kantelpunten echt, of is het een soort bangmakerij? Ten tweede: ligt er voorbij die grenzen louter ellende, of alleen maar een iets andere wereld, waarin nog steeds goed te leven valt?

Welnu, dat kantelpunten bestaan in het klimaatstelsel is vrij zeker. De geologische geschiedenis laat allerlei abrupte veranderingen zien; geleidelijke veranderingen zijn eerder uitzondering dan regel. Klimaatonderzoekers zijn de laatste jaren druk op zoek naar dit soort kantelpunten in het klimaatstelsel, onder andere door de reconstructie van klimaatveranderingen in het geologisch verleden.

Figuur 15 laat het verloop zien van de temperatuur over een periode van ruim 400.000 jaar. Volgens de theorie van de eerder genoemde Milankovitch zouden de overgangen van warm naar koud geleidelijk moeten verlopen. De meetgegevens laten echter zien dat het in werkelijkheid met aanzienlijke schokken is gegaan. Die schokken zijn geen meetfouten; ze komen synchroon terug in de meetreeksen op zeer verschillende plaatsen in het systeem van de aarde: de oceaانبodems, de zeespiegel en de ijskappen. De schokken in de temperatuurlijn geven aan dat klimaatverandering van nature geen geleidelijk proces is, maar

gepaard gaat met snelle en heftige veranderingen. Kantelpunten op kleinere en grotere schaal spelen daarbij een belangrijke rol. Maar hoe en wanneer de kritische grenzen worden bereikt en er een abrupte verandering intreedt, is nogal onzeker. Voor zover nu bekend moeten we vanaf een temperatuurstijging van 2 graden rekening houden met het bereiken van kantelpunten in het klimaatsysteem. Er zijn onderzoekers die aangeven dat die grens nog lager ligt, bij 1,5 graden.

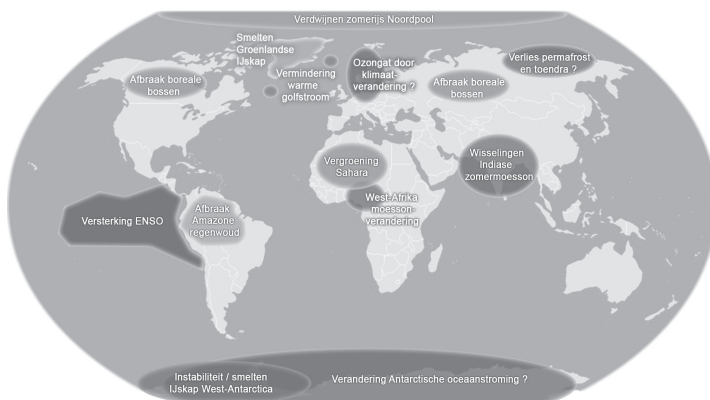
Hoe ziet een kantelpunt eruit? Laten we een voorbeeld nemen dat veel mensen kennen, dat van groene algen in een voorheen helder meertje. Wanneer in stapjes steeds meer fosfaat en stikstof (dat wil zeggen mest of kunstmest) wordt toegevoegd aan het water van een meer, verandert er lange tijd niet veel, tot de situatie ineens omslaat: van een helder meer verandert het binnen korte tijd in een meer vol met groene algen, die andere biologische soorten snel verdringen. In zo'n algrijk watersysteem ontwikkelt zich weliswaar een nieuwe ecologische dynamiek, maar die heeft een lagere soortenrijkdom. Wanneer die toestand is ingetreden, is het bijna onmogelijk de oude ecologische rijkdom te herstellen.

Voor verschillende situaties en gebieden is door klimaatonderzoekers in kaart gebracht waar welk type kantelpunt een rol kan spelen. Een van die gebieden is het regenwoud van Zuid-Amerika. Dit woud in het Amazonegebied wordt in stand gehouden door een regionale kringloop, waarbij per dag gemiddeld ruim 4 millimeter regen valt. Deze neerslag stroomt voor een deel via de rivieren naar de oceaan. Voor een ander deel verdamppt het water ter plaatse en blijft hangen in de lucht boven het gebied. Dit regionaal verdamppte water, aangevuld met het water dat vanaf de oceaan via de lucht wordt aangevoerd, valt als neerslag opnieuw in dit gebied. Deze twee stromen tezamen voeden dit grootste regenwoud ter wereld. Door de mondiale opwarming verandert echter de regionale verdamping, net als het patroon van luchtstromen waarmee het water van de oceaan wordt aangevoerd. Computersimulaties van klimaatveran-

dering in dit gebied laten zien dat hierbij een punt bereikt kan worden waarbij het regenwoud uitdroogt en er vaker bosbranden optreden. Hierdoor wordt het bos dunner en neemt de verdamping nog verder toe, met nog meer bosbranden als gevolg. Via dit proces kan het regenwoud binnen enkele tientallen jaren veranderen in een droog en schraal gebied.

Uit de genoemde simulaties en berekeningen komt naar voren dat bij een neerslag van minder dan gemiddeld 3 milimeter per dag dit verdrogingsproces op gang komt en een eigen leven gaat leiden. Iets soortgelijks is gebeurd met de Sahara, ongeveer

MOGELIJKE KANTELPUNTEN IN HET KLIMAATSYSTEEM



Figuur 16. Mogelijke kantelpunten in het klimaatstelsel die nader worden onderzocht. Bron: Lenton e.a., PNAS (2008).²⁵

8000 jaar geleden. Volgens archeologisch en geologisch onderzoek was dit gebied voor die tijd rijk aan water en groen. 8000 jaar geleden, aan het einde van de laatste ijstijd en het begin van de huidige warme tijd, is het gebied in zeer korte tijd veranderd in een enorme woestijn.

Een ander voorbeeld van een kantelpunt is het eerst langzaam, maar vervolgens versneld smelten van de ijskappen van Groen-

land en Antarctica. Dit voorbeeld is zeer actueel, omdat de metingen laten zien dat er sinds 2003 een versnelling is opgetreden in het afsmelten van deze ijsmassa's. In de wetenschappelijke literatuur vindt momenteel dan ook een uitvoerige discussie plaats of de recente versnelling een tijdelijk verschijnsel is, vooral veroorzaakt door natuurlijke klimaatvariatie, of dat dit het begin is van een permanent, zichzelf versnellend proces.

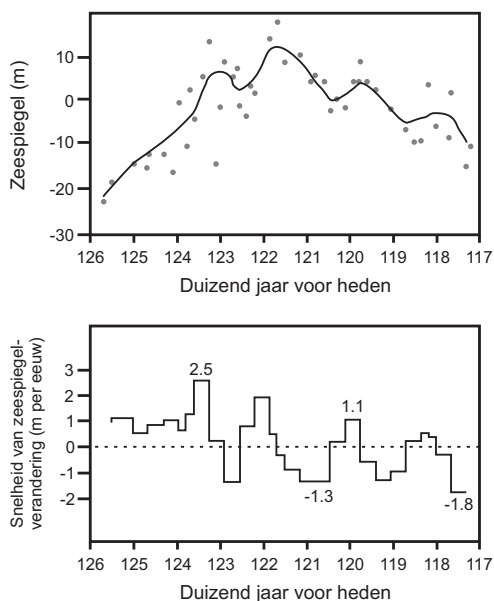
Wanneer de ijskap op Groenland eenmaal is gesmolten, komt deze niet zonder meer terug – in elk geval niet onder de huidige klimaatomstandigheden. Het zou dan eerst weer net zo koud moeten worden als in de ijstijd waarin deze ijskap is ontstaan. Op kaarten is duidelijk te zien dat de witte ijskap van Groenland ver naar het zuiden uitsteekt, veel verder dan de ijskappen op de continenten van Noord-Amerika en Azië. In de hele ijskap van Groenland is zo veel water opgeslagen dat bij totaal afsmelten ervan het gemiddelde niveau van de zeespiegel wereldwijd met ongeveer zes meter zal stijgen. Per gebied op aarde zullen er echter verschillen optreden in deze stijging. Dit komt omdat de massa van de ijskap in de huidige situatie het oceaanaanwater rondom Groenland iets naar zich toe trekt (massa's trekken elkaar aan). Als de ijsmassa afsmelt, zal het water in de directe omgeving van Groenland minder sterk worden aangetrokken en zal daar het niveau van het water zelfs enigszins kunnen dalen. De effecten van die verminderde aantrekkingskracht strekken zich uit tot aan de Noordzee. Dit houdt in dat de zeespiegel in Nederland, bij volledig afsmelten van de ijskap van Groenland, met minder dan zes meter zou stijgen. Verder weg, buiten het bereik van de aantrekkingskracht van de huidige ijskap, zal de zeespiegel juist wat meer stijgen.

Bij de ijskap van Antarctica speelt hetzelfde verschijnsel, maar dan met voor Nederland het omgekeerde effect; de Noordzee ligt namelijk ver buiten het bereik van de aantrekking door de ijskap van Antarctica. De totale hoeveelheid water opgeslagen in de ijskap van Antarctica is meer dan tien keer zo groot als in die van Groenland. Indien de ijskap van Antarctica totaal zou


smelten, zou de zeespiegel wereldwijd met ongeveer 70 meter stijgen, en in onze regio zelfs nog wat meer. Maar dat probleem is gelukkig nog niet aan de orde: het proces van smelten van dergelijke grote ijsmassa's zoals op Antarctica is naar de huidige inzichten een kwestie van vele duizenden jaren. Wel zijn er sinds tien jaar tekenen dat de ijskap van West-Antarctica begint met smelten en daarmee nu al bijdraagt aan een versnelling van de stijging van de zeespiegel.

Dat het zeeniveau wereldwijd veel sneller kan stijgen dan wij nu gewend zijn, wordt duidelijk uit de studie van oude kust-


ZEESPIEGELSTIJGING LAATSTE WARME TIJD




Figuur 17. Tijdens de vorige warme periode (zie figuur 15, de voorlaatste piek), 120.000 tot 125.000 jaar geleden, in een situatie met ijskappen die een omvang hebben zoals nu, steeg de zeespiegel in schokken met snelheden tot 2,5 meter per eeuw. [Bron: Rohling e.a., Nature Geoscience (2008)²⁶]



landschappen en uit de analyse van sedimentmonsters van de bodem van de oceanen. Het blijkt dat tijdens de vorige warme periode op aarde, ongeveer 125.000 jaar geleden, met ijskappen van ongeveer dezelfde omvang als nu en een temperatuur die 1 à 2 graden hoger lag, de zeespiegel zo nu en dan steeg met een snelheid van 1 tot 2,5 meter per eeuw (zie figuur 18). Die hoge snelheid is alleen te begrijpen wanneer we abrupte veranderingen en/of zelfversterkende processen meenemen in de reconstructie. Recent onderzoek van de Nederlander Eelco Rohling op dit gebied laat zien dat de zeespiegel in de overgang van warme naar koude tijden en andersom grote variaties kent, en dat die variaties niet geleidelijk optreden, maar in schokken, van stilstand tot meerdere meters per eeuw.



Een kantelpunt van geheel andere aard kan ontstaan bij het vrijkomen van grote hoeveelheden broeikasgassen. Door de opwarming van het oceaanwater kan het methaangas dat is opgeslagen op de bodem van de zeeën gemakkelijker ontsnappen. Dat geldt ook voor het methaangas dat is opgeslagen in de bevroren moerassen (permafrost) rondom het noordpoolgebied. De gasen kunnen in snel tempo vrijkomen wanneer het ijs smelt en de bodem zacht wordt.



Bij dit alles rijst natuurlijk de vraag of er ook kantelpunten zijn waarvoor geldt dat bij het passeren ervan het opwarmingsproces wordt afgeremd. Waarschijnlijk bestaan dat soort punten wel. Een voorbeeld ervan is het ontstaan van bossen in voorheen droge gebieden. Wanneer in een woestijn meer regen valt, zal de begroeiing toenemen. Onder bepaalde condities zal door die begroeiing in de lokale kringloop meer water worden vastgehouden. Zo kan een droog gebied betrekkelijk snel groen worden; een proces waarbij grote hoeveelheden CO₂ worden onttrokken aan de atmosfeer.



Het bovenstaande laat zien dat het bestaan van kantelpunten belangrijk is voor ons begrip van klimaatverandering en de invloed van extra broeikasgassen. De kans dat bepaalde kantelpunten zich zullen manifesteren, is echter moeilijk van tevoren aan te geven. James Hansen van de NASA geeft zoals gezegd aan dat die kans sterk toeneemt boven het concentratieniveau van 350 ppm, waar we nu al ruim boven zitten. Zijn persoonlijke pleidooi om de emissies zodanig snel te verminderen dat we weer terugkomen op het niveau van 350 ppm is nog scherper dan de 2-graden-doelstelling.

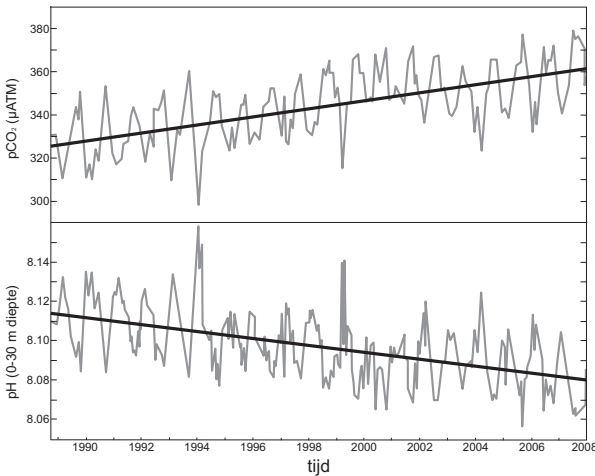
CO₂ en de verzuring van de oceanen

Al jaren onderzoekt men de effecten van een verhoogde concentratie van CO₂ op de groei van planten en bomen. Er zijn enorm grote plantenkassen gebouwd, waarin de concentratie van CO₂ kan worden opgevoerd om na te gaan hoeveel planten ervan kunnen opnemen. Als die hoeveelheid groot genoeg is, hoeven we ons immers minder zorgen te maken om de extra CO₂, zo was de achterliggende gedachte bij dit onderzoek. Inmiddels zijn de inzichten op dit gebied vergroot. De vegetatie en de bossen kunnen inderdaad vrij veel CO₂ opslaan, zo is gebleken, maar niet de grote hoeveelheid die nu jaarlijks vrijkomt. Bij voortgaand gebruik van fossiele brandstoffen op de manier die wij nu kennen, zal de concentratie in de atmosfeer dan ook blijven toenemen.

De afgelopen tien jaar zijn onderzoekers beter gaan kijken naar het effect van de toename van CO₂ op het leven in de oceanen. Al zo'n 30 jaar is bekend dat de oceanen een fors deel van de CO₂ opnemen die vrijkomt bij het gebruik van fossiele brandstoffen (zie ook figuur 26 in het kleurkatern). Het effect daarvan op de biologische systemen begint nu ook duidelijk te worden, en vooral bij zeebiologen leidt dit tot grote ongerustheid. Door de opname van CO₂ neemt namelijk de zuurgraad van de oceaan toe. Het gevolg daarvan is dat zeedieren met kalkskeletten, zoals schelpdieren en koralen, het moeilijk gaan

krijgen; kalk lost namelijk op in zuur. Dit proces van verzuring gaat vrij langzaam, maar de gevolgen op de lange termijn kunnen van grote invloed zijn op het biologische leven van de oceanen zoals wij dat nu kennen. Het verloop van de zuurgraad in de oceanen wordt daarom intensief gevolgd en de metingen worden vergeleken met die van tientallen jaren geleden. De toename van de zuurgraad is evident. De grote vraag is hoe dit verder gaat. De toename van CO_2 heeft in elk geval niet alleen invloed op het klimaat, maar ook op de kwaliteit van het biologische leven in de oceanen.

CO₂ EN DE ZUURTEGRAAD VAN DE OCEAAN



Figuur 18. In de bovenste grafiek is te zien hoe de CO_2 -concentratie van de oceaan toeneemt. In de onderste grafiek is het resultaat daarvan te zien: de pH neemt af, waardoor de oceaan zuurder wordt. (hoe lager de pH, des te hoger de zuurgraad en des te zuurder de oceaan). Bron: meetreeks van station ALOHA op Hawaï.²⁷

Is CO₂ een giftige stof?

In de jaren negentig is CO₂ door de Nederlandse overheid wettelijk gerangschikt onder de milieugevaarlijke stoffen. In 2009 heeft de Environment Protection Agency van de Verenigde Staten hetzelfde gedaan. Hiermee ontstond de mogelijkheid om eisen te stellen aan de industrie ten aanzien van de uitstoot ervan.

Deze rangschikking is echter omstreden. De meeste stoffen die in deze registers voorkomen, hebben een direct effect op de gezondheid van mens en natuur. Voor zover dit bij CO₂ al het geval is, is die relatie veel minder direct. In gewone concentraties is CO₂ zelfs essentieel voor de gezondheid van mens en natuur. De verhoging van de concentratie van CO₂ in de atmosfeer is van dien aard dat die verhoging op zichzelf geen enkel effect heeft op de gezondheid van mensen. Voor planten geldt zelfs dat ze beter groeien in een met CO₂ verrijkte omgeving. Veel tuinders vertienvoudigen bijvoorbeeld de concentratie ervan in hun kassen, om de groei te bevorderen. De CO₂ die zij hierbij gebruiken komt in vele gevallen direct beschikbaar bij het verwarmen van de kassen op aardgas.

Niet alleen de planten in de kassen profiteren van een CO₂-bemestingseffect. Ook de gewassen op het veld groeien beter door de toename van CO₂ in de atmosfeer. Bovendien gebruiken ze per kilo gegroeid gewicht minder water. Door de toename van de concentratie van CO₂ in de lucht sluiten de huidmondjes van de planten zich enigszins, doordat ze gemakkelijker voldoende CO₂ kunnen opnemen, hierdoor neemt de 'verdamping' af.

Hoe gunstig het effect van CO₂ op dat gebied ook is, voor het klimaat betekent de verhoging van de hoeveelheid CO₂ echter voor velen wel degelijk een ongewenste verstoring. Het idee om CO₂ aan te merken als milieugevaarlijke stof is gezien de taak van de overheid daarom toch wel begrijpelijk. Om de vermindering van emissie te regelen, zijn wettelijke instrumenten nodig. Dit lijkt op eerdere kwesties rond zure regen en de daarvoor verantwoordelijke stoffen NO_x (stikstofoxiden) en SO₂ (zwaveldioxide), waarbij deze wijze van reguleren met succes is

toegepast. Het voordeel bij de stoffen NO_x en SO_2 was echter dat ze konden worden weggevangen door filters te plaatsen in uitlaten en schoorstenen. Bij CO_2 ligt de zaak anders. De volumes die moeten worden afgevangen zijn net zo groot als de volumes van de brandstoffen die je gebruikt. Dat betekent dat er veel meer afvalstoffen verwerkt moeten worden dan bij NO_x en SO_2 .

Inmiddels wordt op verschillende plaatsen in de wereld geëxperimenteerd met ondergrondse berging van de CO_2 die wordt afgevangen uit de verbrandingsgassen. Het gaat daarbij zoals gezegd om enorm grote hoeveelheden. Bij het uitvoeren van deze experimenten wordt door de overheid uitgelegd dat de opslag van CO_2 in de ondergrond geen reëel gevaar oplevert voor de gezondheid. Die uitleg wordt alleen niet door iedereen geaccepteerd, omdat CO_2 , als het in grote hoeveelheden vrijkomt, op lokale schaal de zuurstof die wij nodig hebben kan verdringen. Dit verschijnsel is wel eens voorgekomen in de directe omgeving van een diep meer in Afrika. Op de bodem van dit meer had zich, als gevolg van biologische en geologische processen, een grote luchtbel met CO_2 gevormd. Als gevolg van een plotselinge instabiliteit kwam de luchtbel los en kon de CO_2 zich boven water verspreiden. Aangezien CO_2 zwaarder is dan gewone lucht werd de lucht, inclusief de zuurstof daarin, verdrongen door CO_2 . Zo kon de plotselinge sterfte van ruim duizend mensen die rondom het meer woonden achteraf worden verklaard.

Er zijn andere wettelijke mogelijkheden om de hoeveelheid CO_2 die vrijkomt te beperken dan deze op de lijst met gevaarlijke stoffen te plaatsen, bijvoorbeeld door de introductie van een belasting op energie naar rato van de hoeveelheid CO_2 die bij verbranden vrijkomt. Het toekennen van rechten voor de uitstoot van CO_2 aan bedrijven en het verhandelen daarvan, zoals is gebeurd op EU-niveau, is een tweede voorbeeld.

Natuurrampen en klimaatverandering

Natuurrampen worden regelmatig in verband gebracht met de opwarming van de aarde. Dat is niet verbazend. Gemiddeld ge-

zien zullen er namelijk meer weerrecords worden gebroken in een wereld die warmer wordt, dan in een wereld met een stabiel klimaat. Naarmate de aarde warmer wordt, neemt de verdamping en daarmee ook de neerslag toe. Wanneer deze gemiddelde waarden toenemen, neemt ook de kans op extremen toe. De kans op rampen is daarmee groter.

Omgekeerd geldt echter niet dat een toename van rampen noodzakelijkerwijze duidt op klimaatverandering. Zo'n toename kan ook worden veroorzaakt door een groeiende bevolking, slecht onderhoud van dijken en andere infrastructuur en door het bouwen en wonen op plaatsen die daarvoor minder geschikt zijn.

Of het heeft te maken met andere geologische verschijnselen. Zo heeft de overstromingsramp in Japan niets te maken met klimaatverandering. Het ging daar om een aardbeving, of beter gezegd een zeebeving, waardoor een vloedgolf (tsunami) werd opgewekt. Wel was bekend, ook in Japan, dat het betreffende kustgebied bijzonder gevoelig is voor tsunami's. Er waren al veel eerder sporen gevonden van zeeslib, hoog op het land, daar gebracht door vroegere tsunami's. De dijken waren gewoon niet hoog genoeg om de recente extreme tsunami tegen te houden.

Het gaat dus vooral om de vraag of wegerelateerde rampen te maken hebben met klimaatverandering. Het gaat dan bijvoorbeeld om New Orleans en de overstromingsramp die de orkaan Katrina daar in 2005 heeft veroorzaakt, met een schade van ongeveer honderd miljard euro. Andere voorbeelden zijn de bosbranden in Rusland en de overstromingsramp in Pakistan in 2010 en de overstroming in Queensland (Australië) van 2011. De vraag of deze rampen het gevolg zijn van klimaatverandering is onmogelijk met een eenduidig ja of nee te beantwoorden. Dit soort rampen komt ook voor in een wereld zonder klimaatverandering. Het gemakkelijkste antwoord is daarom: 'Dat weten we niet.' Maar dat is ook niet helemaal waar. De concentratie van broeikasgassen is immers inmiddels

40 procent hoger dan voorheen en de gemiddelde temperatuur van de aarde is 0,8 graden hoger. Dit laatste heeft zonder meer invloed op de statistiek van het weer en de uitersten daarin. Het antwoord van de klimaatonderzoeker op de vraag over het verband tussen broeikasgassen en natuurrampen zal daarom waarschijnlijk ongeveer als volgt luiden: ‘De toenemende regenval en de toenemende bosbranden passen bij wat we verwachten van klimaatverandering, maar of deze specifieke overstroming het gevolg is van de extra broeikasgassen, dat kunnen we niet zeggen, want het zou ook gebeurd kunnen zijn in een wereld zonder opwarming.’

Pas wanneer het op een bepaalde plaats herhaaldelijk zwaarder regent dan eerst kun je spreken van een nieuwe trend. En pas nadat blijkt dat die nieuwe trend overeenstemt met de vooraf gemaakte berekeningen van klimaatverandering, kun je met enige zekerheid spreken over een oorzakelijk verband tussen klimaatverandering en extra zware regenval. Een statistische analyse van weersgegevens over een langere periode en goed gedocumenteerde berekeningen van klimaatverandering zijn altijd nodig om iets te kunnen zeggen over het verband tussen klimaatverandering en rampen.

Het is dus een kwestie van statistiek, maar juist met behulp van die statistiek kan ook worden bepaald in hoeverre de kans op een extreme weersgebeurtenis verandert wanneer de gemiddelde temperatuur verandert. Zo heeft een internationale groep onderzoekers recentelijk aannemelijk gemaakt dat door klimaatverandering de kans op een overstroming, zoals onlangs in Engeland, nagenoeg twee keer zo groot is als hiervóór, in de eerste helft van de twintigste eeuw.²⁸ Op eenzelfde manier heeft het KNMI uitgerekend hoe de kans toeneemt op een warme dag met temperaturen boven de 20 graden. Het gaat daarbij om 44 warme dagen per jaar in het oude klimaat, met volgens scenario W⁺ een toename naar 144 warme dagen per jaar in 2100. De kans op een warme dag neemt daarbij toe met een factor van ruim drie. Je zou hierbij kunnen zeggen dat volgens

KNMI scenario's voor 2100	Gemiddelde over de jaren 1976-2005	G scenario	W+ scenario
Wereldwijde temp. stijging (°C) in 2100		+2	+4
Voor Nederland 2100:			
Gemiddelde zomertemp. (°C)	16,1	18,0	22,0
Warme dagen (max. temp. ≥ 20 °C)	44	76	144
Zomerse dagen (max. temp. ≥ 25 °C)	8	16	56
Tropische dagen (max. temp. ≥ 30 °C)	1	2	15
Gemiddelde zomerneerslag (mm)	186	197	114
Aantal natte dagen in de zomer		-3%	-38%
Gemiddelde wintertemp. (°C)	3,6	5,4	8,2
Vorst dagen (min. temp. < 0 °C)	41	22	6
IJsdagen (max. temp. < 0 °C)	9	4	0
Gemiddelde winterneerslag (mm)	195	209	251
Aantal natte dagen in de winter		0%	+4%
Gemiddelde jaartemp. (°C)	9,8	11,7	15,1
Gemiddelde jaarlijkse neerslag (mm)	796	849	757
KNMI scenario's voor 2050			
Wereldwijde temp. stijging (°C) in 2050		+1	+2
Voor Nederland:			
Gemiddelde zomertemp. (°C)	16,1	17,1	19,1
Warme dagen (max. temp. ≥ 20 °C)	44	58	96
Zomerse dagen (max. temp. ≥ 25 °C)	8	11	25
Tropische dagen (max. temp. ≥ 30 °C)	1	1	5
Gemiddelde zomerneerslag (mm)	186	192	149
Aantal natte dagen in de zomer		+2%	-19%
Gemiddelde wintertemp. (°C)	3,6	4,5	5,9
Vorst dagen (min. temp. < 0 °C)	41	30	17
IJsdagen (max. temp. < 0 °C)	9	6	2
Gemiddelde winterneerslag (mm)	195	202	223
Aantal natte dagen in de winter		0%	+2%
Gemiddelde jaartemp. (°C)	9,8	10,8	12,5
Gemiddelde jaarlijkse neerslag (mm)	796	823	776

Figuur 19. De linkerkolom geeft gemiddelde waarden voor de periode 1976-2005. De middelste kolom geeft de verandering aan onder het gematigde 'G'-scenario van het KNMI. De rechterkolom geeft de veranderingen weer voor een verdergaand scenario van het KNMI.

Een natte dag heeft meer dan 0,1 mm neerslag. De zomer is juni, juli en augustus. De winter is december, januari en februari. Het symbool \geq betekent 'is gelijk aan, of meer dan'. [Bron: KNMI 2008²⁴]

dit scenario in 2100 twee van de drie warme dagen op het conto komen van de extra broeikasgassen. Zie figuur 19 voor meer veranderingen in ons land.

Verzekeraars en schade door natuurrampen

Het risico van schade door extreem weer wordt door particulieren en bedrijven ondergebracht bij verzekeringsmaatschappijen. Deze verzekeringsmaatschappijen werken meestal nationaal, waardoor in het geval van een grote ramp op nationale schaal deze verzekeringsmaatschappijen te weinig geld hebben om de schade uit te keren. Daarom brengen zij een aanzienlijk deel van het risico onder bij internationaal opererende herverzekeraars. Deze grote bedrijven, zoals Munich Re en Swiss Re, doen uitgebreid onderzoek naar de schade door natuurrampen. Zij houden de ontwikkelingen van jaar tot jaar nauwkeurig bij. Daarbij kijken ze niet alleen naar de schade die wereldwijd is verzekerd, maar ook naar de schade die níét is verzekerd. Zij constateren de laatste 30 jaar een sterke toename van schade door natuurrampen. Maar het is nog niet duidelijk of die toename wordt veroorzaakt door heftiger weer, of door een toename van de waarde van de goederen die blootstaan aan de uitersten van het weer.

De verzekeringsmaatschappijen hebben onderzoek gedaan om uit te zoeken welk deel van de toename van de schade het gevolg zou kunnen zijn van klimaatverandering. Dit hebben ze gedaan door de groei in schadeclaims als gevolg van weersgerelateerde catastrofes te vergelijken met de groei in schadeclaims als gevolg van aardbevingen. De veronderstelling daarbij is dat groei van schade als gevolg van de economische ontwikkeling in beide gevallen even sterk doorwerkt. Ervan uitgaande dat de kans op aardbevingen de laatste 30 jaar niet is veranderd, zou het verschil in groei toegeschreven kunnen worden aan klimaatverandering.

Er werd zoals zij verwachtten een flink verschil gevonden: de schade door weersgerelateerde natuurrampen is sterker ge-

stegen dan de schade door aardbevingen. Toch heeft deze ‘bewijsvoering’ in wetenschappelijke kringen additionele vragen opgeleverd. Het kan namelijk ook zo zijn dat de economische ontwikkeling en bevolkingsgroei in gebieden die gevoelig zijn voor overstromingen sneller is gegaan dan de economische ontwikkeling in gebieden die gevoelig zijn voor aardbevingen. Dit blijkt bij nadere analyse ook het geval te zijn. Logischerwijs mag je verwachten dat, wanneer verder alle andere factoren hetzelfde blijven klimaatverandering leidt tot een toename van schade door natuurrampen. Maar die factoren blijven natuurlijk niet hetzelfde. Het zal daarom ook in de toekomst moeilijk blijven de verandering van schade als gevolg van klimaatverandering volledig te scheiden van de verandering van schade als gevolg van voortgaande economische ontwikkeling, en de verandering van de gemiddelde kwetsbaarheid.

Aansprakelijkheid voor klimaatschade

De mate van zekerheid die wordt gevraagd bij beslissingen over klimaatbeheersing wordt groter naarmate er meer op het spel staat. Voor een bedrijf dat floreert door het gebruik van fossiele brandstoffen, of voor een boer met koeien die methaan produceren, staat er veel op het spel. Zij zullen een grote mate van zekerheid willen hebben over de effectiviteit van de maatregelen die worden voorgesteld. Pas als het onvermijdelijk is, en wanneer het duidelijk is dat de voorgestelde maatregelen ook echt helpen, zullen ze bereid zijn in actie te komen.

Voor mensen die beneden zeeniveau wonen staat er evenzeer veel op het spel: een kleine verandering in de kracht van orkanen en stormvloeden kan desastreuze gevolgen voor hen hebben. Ook het risico van een niet meer te stuiten stijging van de zeespiegel is voor lagergelegen landen aanleiding om te pleiten voor een preventieve aanpak. Zij zullen bij voorkeur willen handelen op basis van het voorzorgsprincipe. Dit principe houdt in dat wanneer er een kans is op grote, onomkeerbare effecten als gevolg van menselijk handelen, dit handelen moet

stoppen, ook als er nog geen volledige zekerheid bestaat over de effecten daarvan.

De landen die de beginselen van het internationale recht respecteren, zullen de gevolgen van de emissies van broeikasgasen moeten toetsen aan de beginselen van dit recht.²⁹ Het is bij internationaal verdrag namelijk niet toegestaan activiteiten te ondernemen waarvan duidelijk is dat ze schade toebrengen aan andere landen. De vraag bij klimaatverandering is natuurlijk: wat wordt verstaan onder 'duidelijk'. Op dit moment is het effect van klimaatverandering nog vrij klein, in vergelijking met de natuurlijke variatie. Maar naarmate de tijd voortschrijdt, zal het effect van bepaalde verschijnselen groter worden en duidelijker te bepalen zijn.

Zo heeft het eerdergenoemde eilandstaatje Tuvalu overwogen om Australië en de Verenigde Staten aan te klagen bij het Internationaal Gerechtshof in Den Haag. Volgens Tuvalu brengen deze landen met hun gebruik van fossiele brandstoffen schade toe aan het eiland door de versnelde stijging van de zeespiegel. Tuvalu beroept zich op de IPCC-rapporten waarin dat verband wordt aangegeven. Een dergelijke rechtszaak heeft nu nog weinig kans van slagen; de veranderingen zijn nog te klein en de aansprakelijkheid is moeilijk te adresseren. De historische reeks van veranderingen in de jaarlijks gemiddelde waterstand rondom het eiland vertoont een grotere uitslag dan de tot nu toe gemeten stijging door klimaatverandering. In termen van statistiek: het signaal is nog niet zichtbaar, omdat de ruis groter is dan het signaal. Maar of dat zo blijft? In studies van de Wereldbank wordt de schade die als gevolg van klimaatverandering zou kunnen optreden in de huidige ontwikkelingslanden in een wereld die 2 graden warmer wordt,³⁰ geschat op een bedrag in de orde van grootte van 70 tot 100 miljard dollar per jaar tot 2050.

Kunnen we ons niet simpelweg aanpassen aan klimaatverandering?

Mensen hebben een enorm vermogen tot aanpassing. Ze leven van de polen tot in het oerwoud, en van de woestijn tot in de natte delta's van de grote rivieren. Indianenstammen in het Amazonegebied zijn waarschijnlijk vanuit het droge, hete oostelijk Afrika via de bijna Arctische Beringstraat naar het tropische regenwoud gemigreerd. Nederland is door onze voorouders bewoonbaar gemaakt door het aanleggen van dijken en voortdurend wegpompen van het water.

Ondanks de discussies over de onzekerheden houden grote bedrijven en instanties, zoals Rijkswaterstaat en in de Verenigde Staten het US Army Corps of Engineers, nu alvast rekening met klimaatverandering, zeker bij de aanleg van grote waterbouwkundige werken. Het is niet nodig meteen alle bestaande werken aan te passen. Daarvoor is nog tijd: als de zeespiegel de komende honderd jaar met één meter zou stijgen, dan is dat niet meer dan één cm per jaar. Dit is weliswaar vijf keer zoveel als voorheen, maar wanneer we de voortgang jaarlijks goed meten en de waterwerken tijdig aanpassen, kunnen we in ons land nog een hele tijd vooruit.

Hierbij komt ook de vraag naar voren of een land als het onze zich niet beter volledig zou kunnen richten op aanpassing aan klimaatverandering, en minder op emissiebeperking.

Er zijn drie redenen waarom zo'n strategie ons land toch in moeilijkheden zou kunnen brengen. Ten eerste moeten we rekening houden met de schade die elders in de wereld optreedt. Als de rekening daarvan op termijn verdeeld wordt op basis van historische emissies dan hebben wij, met onze energie-intensieve economie en de daarbij vrijkomende broeikasgassen, een probleem. De tweede reden is dat op lange termijn de schade juist voor ons eigen land heel groot kan worden. De kans dat de zeespiegel uiteindelijk met een aantal meters gaat stijgen, is niet denkbeeldig. Onze lage ligging maakt ons dan kwetsbaarder dan veel andere landen, en hoogwaterbescherming zal bij ons veel meer geld gaan kosten. Dat geldt ook voor de aanpassing van onze havens en voor de afvoer van water als de buien heftiger worden. Tot slot: indien klimaatverandering uiteindelijk leidt tot veel meer misoogsten en overstromingen elders in de wereld, dan zullen de effecten daarvan in termen van politieke conflicten en mogelijke vluchtelingenstromen ook aan ons land niet voorbijgaan.

Emissievermindering of aanpassing? Een economische afweging

De afgelopen dertig jaar hebben verschillende economen onderzocht wat we het beste kunnen doen: emissie verminderen of ons aanpassen aan klimaatverandering. Vooral macro-economen zetten hierbij de toon. Zij beschouwen de zaak op de schaal van de wereld als geheel en vergelijken de kosten van de investeringen nu, bijvoorbeeld in andere energiebronnen, met de baten van later, in de vorm van minder schade door klimaatverandering. Nadruk op emissievermindering heeft volgens deze economen de voorkeur wanneer de baten hiervan, in termen van minder klimaatschade en minder klimaatslachtoffers, opwegen tegen de kosten. De kosten bestaan dan uit het bedrag van de investeringen die je nu moet doen, plus de rente die je over deze financiële middelen zou hebben kunnen krijgen.

Bij deze berekeningen blijken twee factoren erg belangrijk voor de uitkomst ervan te zijn. Dat is allereerst de disconto-

voet, de rente, die wordt ingevoerd in de berekeningen, en daarnaast de inschatting van de omvang van de toekomstige klimaatschade.

De rentevoet zegt iets over de waarde die wij nu toekennen aan iets wat volgende generaties krijgen, in dit geval minder klimaatschade. Als je in de berekeningen kiest voor een hoge rentevoet, bijvoorbeeld 5 procent, dan ga je ervan uit dat de economie blijft groeien. Daarmee neem je in feite aan dat de generaties na ons, ook in bijvoorbeeld Bangladesh, welvarend en geavanceerd genoeg zijn om preventieve maatregelen te nemen om daarmee de klimaatschade te beperken. De keuze voor een lage rentevoet, bijvoorbeeld 2 procent, betekent dat het wij het belangrijk vinden dat de basisvoorwaarden voor het bestaan, zoals een betrekkelijk stabiel klimaat, zonder grote risico's worden overgedragen aan volgende generaties. De keuze voor de lage rentevoet betekent zoiets als die voor goed rent-meesterschap; de economen die uitgaan van een hoge rentevoet gaan er impliciet van uit dat volgende generaties rijker zijn en dat geld alle toekomstige (klimaat)problemen kan oplossen.

Ook het inschatten van de schade die in de toekomst kan optreden kent diverse subjectieve elementen. Deze schade is afhankelijk van de ruimtelijke ordening en de beslissingen op dat gebied die de komende tientallen jaren worden genomen, bijvoorbeeld over de uitbreiding van steden in laaggelegen gebieden, of het ontwikkelen van skigebieden. Om toch een analyse te kunnen maken worden door de wetenschappers verschillende scenario's doorgerekend.

De eerste economen die dit soort berekeningen maakten, waren de Amerikaan Bill Nordhaus en de later in zijn voetsporen tredende Nederlander Richard Tol. In hun berekeningen hanteerden zij een vrij hoge langetermijnrente, zoals gebruikelijk is in het normale maatschappelijke financiële verkeer; zij gingen uit van een waarde van rond de 5 procent. In hun aannames over klimaatschade namen ze een geleidelijke verandering van

het klimaat als uitgangspunt. Abrupte veranderingen werden niet meegenomen, ook omdat het niet goed mogelijk is die in te schatten en in kosten te vertalen. Ook werd alleen de materiële schade in de berekeningen meegenomen, en werden de eventuele culturele en ecologische schade buiten beschouwing gelaten.

In hun berekeningen kwamen Nordhaus en Tol in de jaren negentig tot de conclusie dat de klimaatschade de komende 50 tot honderd jaar minder groot is dan de kosten van investeringen plus rente om de emissie te verminderen. Dit betekende volgens hen dat we het beste zouden kunnen afwachten, en dat het niet de moeite waard was te investeren in een beperking van de emissies nu.

Erg bepalend voor deze uitkomst is de grote tijdspanne tussen de emissies nu, en klimaatschade later, over 30 tot honderd jaar. Eventuele klimaatschade die optreedt over vijftig of meer jaren, telt in deze berekeningen nauwelijks mee vanwege de toegepaste rentevoet. Vijf procent rente over vijftig jaar levert immers zo'n groot bedrag op, daar kan meer klimaatschade van worden betaald dan iemand zich überbaupt kan voorstellen.

Maar Nordhaus en Tol waren niet de enigen die zich bezighielden met de kwestie. Economen die zich hierna gingen verdiepen in deze materie, zoals Nicolas Stern in 2006, schatten de klimaatschade aanzienlijk hoger in dan Nordhaus en Tol. Tegelijkertijd kozen zij voor een lagere rentevoet. Zij deden dat op basis van het argument dat de waarde van een betrekkelijk stabiel klimaat voor volgende generaties niet direct mag worden vergeleken met kortetermijninvesteringen in de noden van nu. De berekeningen van Stern leidden tot de conclusie dat een forse inzet op emissiebeperking economisch het meest aantrekkelijke scenario is.

De Nederlandse econoom Jeroen van den Bergh keek in 2008 nog ruimer dan zijn voorgangers naar de kosten en baten van een transitie van de fossiele brandstoffen naar duurzame energie. Hij nam de maatschappelijke kosten van de huidige energievoorziening ook mee in zijn beschouwing; het gaat dan bij-

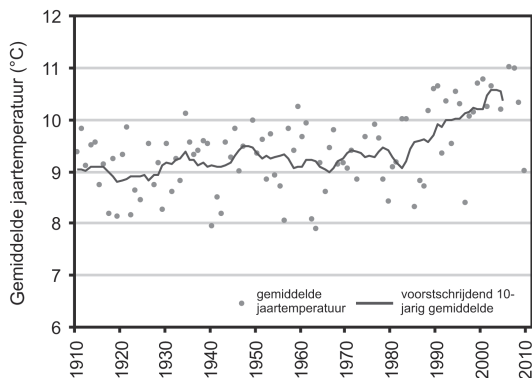
voorbeeld om de gezondheidskosten van luchtverontreiniging. Bovendien ging hij evenals Stern uit van een lage rentevoet. Zijn conclusie was dat het type model van Nordhaus en Tol tekortschiet voor het vraagstuk waarop zij het toepassen. Van den Berghs benadering leidt tot de conclusie dat emissiebeperking door overschakeling op andere energiebronnen economisch gezien nog meer rendement geeft dan werd aangegeven door Stern, en daarom nog sterker als prioriteit naar voren komt.

Geen van de bovengenoemde economen heeft de mogelijkheid van kantelpunten, abrupte onomkeerbare klimaatverandering meegenomen in de berekeningen. Dat is ook zeer moeilijk, want de inzichten in wanneer dit fenomeen op kan treden en wat er daarna zal gebeuren zijn onvoldoende om deze zaken te betrekken in de economische berekeningen. Aangezien het gaat om emissies van nu en om moeilijk te kwantificeren schade over 30 tot honderd jaar, bestaan er eigenlijk geen perfecte economische modellen die kunnen helpen om te komen tot een realistische afweging tussen enerzijds emissiebeperking en anderzijds aanpassen aan klimaatverandering.

De keuze die hierin wordt gemaakt, wordt bovendien niet alleen bepaald door een afweging van de kosten en de baten. Er spelen ook ethische en morele overwegingen mee. Hierbij gaat het om de vraag in hoeverre het geoorloofd is om zonder enige terughoudendheid door te gaan met het gebruik van fossiele brandstoffen wanneer bekend is dat de effecten ervan een aanzienlijke schade kunnen toebrengen aan andere landen en volgende generaties.

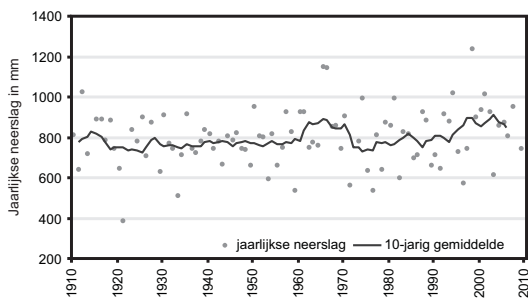
Daarnaast: de mate waarin uiteindelijk wordt ingezet op emissiebeperking is voor een belangrijk deel bepalend voor de aanpassingen die nodig zijn. Tegelijk is ook aanpassing aan klimaatverandering nodig, want klimaatverandering is nu eenmaal gaande en er zitten nog heel wat broeikasgassen in de pijplijn.

GEMIDDELDE JAARTEMPERATUUR AFGELOPEN 100 JAAR



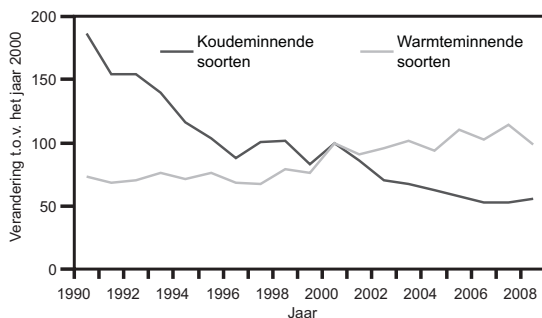
Figuur 33. Gemiddelde temperatuur in Nederland tussen 1910 en 2010, zoals gemeten door het KNMI. De stippen geven een jaargemiddelde aan; de dikke lijn is een voortschrijdend tienjarig gemiddelde. [Bron: KNMI⁴⁰]

NEERSLAG WEERSTATION DE BILT AFGELOPEN 100 JAAR



Figuur 34. Neerslag op meetstation De Bilt in Nederland tussen 1910 en 2010. De dikke lijn is een voortschrijdend tienjarig gemiddelde. [Bron: KNMI⁴¹]

VERANDERING VOORKOMEN WARMTE- EN KOUDEMINNENDE SOORTEN



Figuur 35. Sinds 1990 dalen de koudeminnende soorten (bijvoorbeeld de grutto, velduil, veenbesblauwtje) in aantal in Nederland, terwijl het aantal dieren van warmteminnende soorten (bijvoorbeeld de scholekster, spreeuw, boomkikker en landkaartje) toeneemt [bron: Compendium voor de Leefomgeving].⁴²

Waar gaat het om bij aanpassing aan klimaatverandering?

De afgelopen twintig jaar zijn de eerste effecten van klimaatverandering zoals gezegd duidelijker zichtbaar geworden. De gemiddelde temperatuur van de aarde⁴ is ongeveer 0,8 graden hoger dan honderd jaar geleden; het grootste deel van deze stijging is opgetreden in de afgelopen veertig jaar. Ook in Nederland meten we een stijging van de gemiddelde jaartemperatuur en een – weliswaar beperkte – toename van de totale regenval per jaar; zie figuur 33 en figuur 34.

Het groeiseizoen is langer geworden. De steden worden warmer. Ook worden er steeds meer planten en vogels gesignaleerd die we vroeger alleen in meer zuidelijke landen konden vinden, terwijl steeds meer koudeminnende soorten in aantal afnemen – zie figuur 35.

De laatste jaren wordt in Nederland veel onderzoek gedaan naar de vraag hoe we ons het beste kunnen voorbereiden op

klimaatverandering. Veel van de plannen voor investeringen op het gebied van de ruimtelijke ordening worden tegenwoordig getoetst op klimaatbestendigheid. Wanneer bij een bepaald plan of bouwwerk wordt gevonden dat de schade bij verdergaande klimaatverandering te groot is, dan wordt nagegaan hoe dit plan kan worden aangepast. Het criterium hierbij is dat de extra investeringen moeten opwegen tegen de baten van minder klimaatschade later. Zoals we al eerder zagen, zijn de resultaten van deze berekeningen sterk afhankelijk van de gehanteerde rentevoet. Omdat de toekomst altijd onzeker is, worden ook andere redeneringen toegepast. Een daarvan noemen we de *no regrets strategy* (geenspijtstrategie). Bij een no-regrets-strategie gaat het om de volgende redenering: als een zekere aanpassing enig voordeel oplevert, ook als het klimaat niet verder verandert, dan is het verstandig die aanpassing nu te doen. Het rendement is misschien niet optimaal, maar je zult in elk geval geen spijt krijgen van de investering. Het aanleggen van een iets sterkere dijk dan nodig is volgens de huidige veiligheidsnorm kan bijvoorbeeld worden beschouwd als een no regrets-maatregel, omdat deze maatregel ook nu al extra veiligheid biedt en dus ook een zeker economisch rendement heeft. Ook het planten van meer bomen in en om de grote stad om te zorgen voor koelte in hete zomers is een no-regrets-maatregel; je hebt er immers ook plezier van als het niet heter wordt.

Daarnaast kennen we de voorzorgsstrategie. Die strategie komt vooral aan de orde wanneer er veel op het spel staat. De kans op schade is ook in dit geval nog niet zo duidelijk, maar de mogelijke omvang ervan is zo groot dat je die schade koste wat het kost wilt voorkomen. Het sluiten van een verzekering tegen brand is exemplarisch voor zo'n voorzorgsmaatregel.

Een voorbeeld ontleend aan klimaatverandering is de kleine extra investering die is gedaan bij de aanleg van de Tweede Maasvlakte: de leidingen op en langs de kaden zijn zodanig aangelegd dat er geen kostbare aanpassingswerken nodig zijn indien de zeespiegel sneller gaat stijgen dan nu. Ook het op een

iets hoger niveau aanleggen van de stormvloedkering voor Rotterdam, de Maeslandtkering, is een voorzorgsmaatregel: latere aanpassing zou immers zeer kostbaar worden. Indien de zeespiegel niet stijgt, dan leveren dit soort voorzorgsmaatregelen geen economisch rendement op, in tegenstelling tot de no-regrets-maatregelen. Dit type vraagstukken speelt ook bij nieuwe gebouwen. Het kost vaak weinig extra geld om bij ontwerp en aanleg van de koelinstallatie rekening te houden met warmere zomers. Als zo'n systeem na een of twee hittegolven over tien jaar aangelegd moet worden, is het veel duurder. Door de opwarming zullen we volgens de KNMI-scenario's ook vaker te maken krijgen met heftige regenval. Bij vervanging van rioolbuizen kan daarom beter worden gekozen voor een wat ruimere maat; dat kan later veel wateroverlast en kosten voorkomen. Veel van dergelijke voorzorgsmaatregelen worden in Nederland nu al genomen.

Klimaatverandering en natuur

De baten van investeringen in onze gebouwde omgeving zijn nog redelijk goed te bepalen, maar voor de effecten van klimaatverandering op de natuur geldt dit veel minder. Door de opwarming zullen zeker nieuwe ziektes en plagen een kans krijgen. Enkele voorbeelden doen zich nu al voor, zoals de eikenprocessierups die van zuid naar noord is opgerukt. Ander voorbeeld hiervan zijn de insecten (knutjes) die blauwtong veroorzaken bij schapen en koeien. Door de warmere winters kunnen deze soorten zich beter dan voorheen in ons land handhaven en verspreiden.

De enige manier om in natuurbeheer rekening te houden met klimaatverandering is te zorgen voor flexibiliteit én voor verbindingen. De bestaande soorten zullen proberen zich ter plaatse aan te passen door natuurlijke selectie, dat wil zeggen dat de exemplaren die door hun aanleg iets beter bestand zijn tegen de verandering zich succesvoller zullen gaan voortplanten. Daarnaast is meebewegen met de klimaatzones een alternatief.

Dit laatste kan door ons worden bevorderd door natuurgebieden met elkaar te verbinden. Dat klinkt simpel, maar de praktijk is weerbarstig. De bestaande natuurgebieden in Nederland worden vaak omringd met voor planten en dieren onneembare barrières van wegen, bebouwingen en in vele gevallen intensieve landbouw. Natuurbeheer in Nederland komt daarom voor lastige keuzes te staan. Wat deze keuzen bovendien extra lastig maakt, is dat er ook een keerzijde zit aan die verbindingen. De verspreiding van ziektes en plagen wordt door open verbindingen namelijk ook gemakkelijker.

Uiteindelijk zullen door klimaatverandering onherroepelijk bepaalde soorten planten en dieren uit ons land verdwijnen, terwijl andere soorten een kans krijgen. Maar bij de klimaatverandering zoals die nu wordt voorzien, gaat dit proces met horten en stoten. Wanneer een bepaalde soort het niet redt, zijn lagere soorten zoals onkruiden meestal als eerste van de partij om de open plaatsen op te vullen. Vanwege de moeilijk voorspelbare, maar potentieel ingrijpende invloed van klimaatverandering op de natuur pleiten ecologen in het algemeen voor een strengere beperking van broeikasgassen dan meteorologen, ingenieurs en economen.

Een nieuw Deltaplan

Op zichzelf is het mogelijk om in het geval van een relatief snelle stijging van de zeespiegel de dijken en duinen iedere twintig tot veertig jaar te versterken. Maar redden we het met die maatregelen op de lange termijn? Het land komt immers steeds verder beneden de zeespiegel te liggen en de dijken wordt steeds hoger. Als dan een dijk doorbreekt, komt er meteen een muur van water binnen. Is het dus wel verstandig om in het westen van Nederland te blijven wonen en werken? Of kunnen we beter met onze nieuwe investeringen opschuiven naar hogere gronden? Om dit soort vragen te beantwoorden werd eind 2007 de Tweede Deltacommissie ingesteld, onder voorzitterschap van oud-minister van Landbouw Cees Veerman. Het ging hierbij

niet alleen om klimaatverandering. Er moest ook een antwoord komen op de vraag hoe het mogelijk is dat er zo veel achterstalig werk is ontstaan bij de bescherming van ons land: in 2006 was uit de inspectie van de waterkeringen naar voren gekomen dat een kwart van de primaire waterkeringen niet meer voldoet aan de veiligheidsnorm die was gesteld door de Eerste Deltacommissie, die was ingesteld direct na de watersnoodramp in Zeeland in 1953. Bij een ander deel van de keringen was de mate van veiligheid onduidelijk.

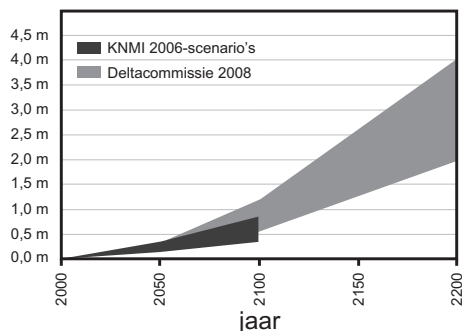
Aan deze Tweede Deltacommissie werd gevraagd advies uit te brengen over hoe Nederland het beste kan worden ingericht om op de lange termijn klimaatbestendig te zijn. Dat wil zeggen: veilig tegen overstromingen, en tegelijkertijd een aantrekkelijke plaats om te leven, te wonen, te werken, te recreëren en te investeren.

De commissie wilde zich in haar werk breder oriënteren dan alleen op de bestaande middenscenario's van het KNMI, die representatief waren voor de meest waarschijnlijke ontwikkeling van het klimaat en de zeespiegel. De commissie wilde ook weten wat het voor Nederland zou betekenen wanneer we aan de bovenkant uitkomen van de door het IPCC ontwikkelde scenario's, dat wil zeggen wanneer de opwarming van de aarde zou uitkomen tussen de 4 en de 6 graden Celsius in 2100. Nederland was overigens niet het enige laaggelegen gebied met belangstelling voor deze bovengrenzen. Ook in Californië voor het gebied van Silicon Valley, in Engeland voor de stormvloedkering van de Theems en voor de stormvloedkering van Venetië (in aanbouw) worden dit soort bovengrenzen meegenomen in de planning.

Het verkennen van de bovengrenzen van zeespiegelstijging bleek niet eenvoudig, vooral door het sinds 2002 onverwacht snelle afsmelten van gletsjers aan de randen van ijskappen in Groenland en Antarctica. Hiermee werd duidelijk dat eerder ontwikkelde rekenmodellen voor zeespiegelstijging niet bleken te kloppen.

Op verzoek van de Deltacommissie werden de meest ervaren

SCENARIO'S VOOR ZEEPIEGELSTIJGING



Figuur 36. Scenario's voor de bovengrenzen van zeespiegelstijging in 2100 en 2200. KNMI-(midden)scenario's tot 2100 en de bovengrensscenario's van de Tweede Deltacommissie, tot 2200. [Bron: Deltacommissie (2008)⁴³]

internationale onderzoekers op dit gebied naar Nederland gehaald, om de situatie zo goed mogelijk te analyseren en te adviseren over de bovengrenzen voor zeespiegelstijging in 2100 en 2200*. De resultaten van de berekeningen en de scenariostudies zijn weergegeven in figuur 36, tezamen met de eerdere scenario's van het KNMI. Het internationale team kwam tot een bovengrens voor zeespiegelstijging van 0,6 tot 1,2 meter in 2100 en van 2 tot 4 meter in 2200. In september 2008 bracht de Tweede Deltacommissie haar advies uit. Het voorwoord is karakteristiek voor de toon van het advies over het omgaan met klimaatverandering:

'...de dreiging is niet acuut, maar de opgave wel urgent. Er is geen reden voor paniek, maar we moeten ons wel zorgen ma-

* Deze bovengrensscenario's voor de stijging van de zeespiegel en voor rivierafvoer zijn op verzoek van de Deltacommissie gemaakt door een internationaal team van deskundigen onder leiding van de auteur van dit boek. De resultaten zijn gepubliceerd door het KNMI en later door het internationale wetenschappelijke tijdschrift *Climatic Change* (zie ook noot 43). De auteur is meermalen geraadpleegd door, maar maakte geen deel uit van de Tweede Deltacommissie.

ken over de toekomst [...]. Wezenlijk is daarbij dat de uitdagingen waar Nederland de komende eeuwen voor staat niet in de eerste plaats het karakter hebben van een bedreiging, maar juist ook nieuwe perspectieven bieden. Het aanpassen van de inrichting van ons land aan de gevolgen van klimaatverandering scheidt nieuwe mogelijkheden en het werken met water biedt uitgelezen kansen [...].'

De conclusie was dat we met adequate investeringen en tijdige aanpassingen van de waterkeringen en het waterbeheer goed in dit land kunnen blijven wonen, zelfs als de zeespiegel de komende tweehonderd jaar met 2 à 4 meter zou stijgen.

De nieuwe scenario's van de commissie werden kritisch ontvangen door de media en de politiek, omdat ze hoger uitkwamen dan de scenario's van het IPCC en ook hoger dan die van het KNMI. Hierbij werd echter over het hoofd gezien dat de scenario's betrekking hebben op de bovengrenzen: op wat kan er gebeuren als alles tegenzit. Voor de planning van de Nederlandse kustbescherming is het van belang dit soort bovengrensscenario's mee te nemen in de uiteindelijke afwegingen aangaande ruimtelijke planning en hoogwaterbescherming, vooral omdat het daarbij gaat om grote investeringen met een – beoogde – lange levensduur. Ook andere landen hebben nadien dit soort studies uitgevoerd. Daarbij blijkt overigens dat een land als Engeland uitgaat van een nog grotere 'worst case'-zeespiegelstijging, namelijk 2,0 meter al in 2100.

Oplossingen voor Nederland bij sterke stijging van de zeespiegel

Nederland kan op drie manieren reageren op een sterke stijging van de zeespiegel. Ten eerste door middel van de vlucht naar voren: een grote dijk leggen in de Noordzee, zodanig dat een stormvloed op de Noordzee onze huidige kust niet meer kan bereiken. Er ontstaat dan een randmeer, dat het water bij hoge rivierafvoer kan opvangen en later kan lozen op de Noordzee

– zie figuur 37. Deze oplossing is technisch niet onmogelijk, maar brengt wel een aantal belangrijke risico's met zich mee: het zoetwaterbinnenmeer is ecologisch kwetsbaar, de zeehavens van Nederland zijn niet meer direct bereikbaar en de initiële kosten zijn erg hoog. Het zal daarom niet eenvoudig zijn de handen op elkaar te krijgen en de financiën te vinden voor zo'n ingrijpende aanpak.

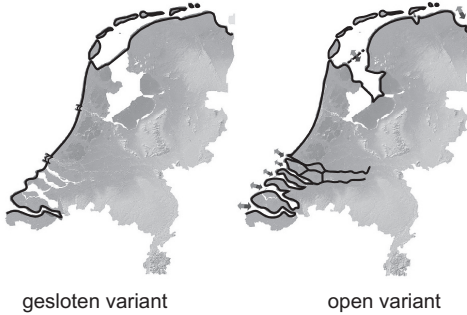
DE VLUCHT NAAR VOREN: EEN DIJK IN DE NOORDZEE



Figuur 37. De vlucht naar voren: bij deze optie komt er tot 30 kilometer uit de kust een dijk die Nederland moet beschermen tegen overstromingen uit zee. [Bron: Vellinga (2008)⁴²]

De tweede oplossing is ons terugtrekken naar het oosten. Nieuwe investeringen gaan dan primair naar hoger gelegen gebieden, waar dan het zwaartepunt van bewoning en bebouwing komt te liggen. Bij een grote zeespiegelstijging kan het westen van Nederland zelfs op termijn worden opgegeven. De kosten van terugtrekken uit het lage land blijken echter heel

GESLOTEN OF OPEN KUSTLIJN



Figuur 38. Beschermen binnen bestaande contouren, met gesloten kustlijn (links) of een open kustlijn (rechts). Zeeland en het IJsselmeer krijgen in deze laatste variant een (semi)open verbinding met de zee. [Bron: Vellinga (2008)⁴⁵]

erg hoog te zijn, zelfs als dit speelt over een periode van meer dan honderd jaar. Blijven wonen en werken in het lage deel van Nederland levert zo veel geld op dat er nog veel hogere en sterkere dijken gebouwd zouden kunnen worden.

Na een vergelijking van de verschillende opties heeft de Delta-commissie uiteindelijk geadviseerd alle inspanningen te richten op het beschermen van Nederland binnen de bestaande contouren. Ook deze tactiek vraagt om investeringen, maar de oplossing is veel minder kostbaar dan de twee voorgaande. Bij het openhouden van de riviermonden, een ‘open’ kust, is deze oplossing bovendien ook aantrekkelijk vanuit een ecologisch oogpunt.

Er zijn, zoals we zien in figuur 38, twee opties mogelijk: een gesloten kust of een open kust. Het voordeel van de oplossing met een gesloten kust is de korte kustlijn, waarbij het water van de Noordzee toch volledig buiten de deur wordt gehouden. Het nadeel is dat de rivieren niet meer vrij kunnen uitstromen. Zo blijft de Noordzee dan wel buiten, maar het lage land blijft

kwetsbaar voor een situatie met hoge rivierafvoer als dat water niet weg kan tijdens een stormvloed met hoge waterstand op de Noordzee. Die kans is weliswaar niet zo groot, maar naarmate de zeespiegel verder stijgt en de maximum rivierafvoer toeneemt, wordt de kans op een treffen groter. Een tweede nadeel van een gesloten kustlijn is de scheiding van zout en zoet water. Ervaring bij het IJsselmeer en bij de riviermondingen in Zeeland heeft geleerd dat een strakke scheiding van zout en zoet water grote negatieve ecologische gevolgen heeft, zodanig dat het water dat afgesloten is en dus zoet is geworden, door algengroei niet meer geschikt is voor recreatie en mosselteelt. Een deel van de Zeeuwse Deltawateren, die zoet werden in het kader van het Deltaplan, worden om die reden nu weer geopend en verbonden met het zoute water.

Bij de openkustoplossing (de rechterfiguur) komt de Noordzee verder het land binnen. Daarbij is het nodig de dijken te versterken. De lengte waarover die versterking moet plaatsvinden is afhankelijk van de keuze die wordt gemaakt: blijven de mondingen bij stormvloed open, zoals in de Westerschelde en de Eems, of gaan ze bij stormvloed dicht zoals in de Oosterschelde en bij de Nieuwe Waterweg in Rotterdam?

De Tweede Deltacommissie heeft in haar advies gekozen voor de variant waarbij de mondingen van de rivieren zo veel mogelijk open blijven. Hierbij zal de stijging van de zeespiegel op termijn ook stroomopwaarts doorwerken. Dat is pas over vijftig tot honderd jaar of nog later aan de orde. Er is daarom nog voldoende tijd om de landbouw en de drinkwatervoorziening aan te passen aan zo'n situatie. Deze variant vraagt wel om sterkere dijken langs de zeearmen en langs de rivieren, over een grote lengte. Moeten de dijken steeds verder omhoog, of kan het ook anders?

Een oplossing die steeds meer aandacht krijgt, is die van brede, doorbraakvrije dijken. Dit zijn dijken die niet doorbreken, zelfs niet als het water hoger komt dan de kruin. In het geval van superhoogwater zal dit type dijk hooguit overstromen ge-


durende de uren dat de stormvloed op de Noordzee woedt of de dagen dat de rivier een extreem hoge afvoer heeft. Zo'n tijdelijke overstroming brengt dan in ieder geval veel minder water naar binnen dan een dijkdoorbraak. Bij een smalle dijk die doorbreekt, stijgt het water al snel tot voorbij de dakgoot; bij een brede ondoorbreekbare dijk gaat het om een stijging niet verder dan de vensterbank. Er is dan wel schade, maar veel minder dan bij een dijkdoorbraak. En niemand zal verdrinken. Een overstroming heeft dan hetzelfde effect als een extreem zware regenbui, wel overlast, maar geen ramp.

Een doorbraakvrije dijk zal, uitgaande van een traditioneel ontwerp met natuurlijke materialen en flauwe hellingen aan beide zijden, ongeveer twee maal zo breed moeten zijn als een traditionele dijk. Maar op zo'n brede dijk kan dan ook worden gebouwd. Een recreatiebestemming is ook mogelijk, bijvoorbeeld in de vorm van fietspaden. Op de huidige smalle dijken langs onze rivieren is autoverkeer in het algemeen toegestaan, maar voor fietsers en wandelaars is weinig ruimte.

Hoeveel kost het om Nederland klimaatbestendig te maken?



Eerder in dit boek is al aangegeven dat de kosten van aanpassing aan klimaatverandering in ontwikkelingslanden in studies van de Wereldbank zijn geschat op een bedrag in de orde van 70 tot honderd miljard dollar per jaar. Voor Nederland worden de kosten vanaf 2020 geschat op 1 à 2 miljard euro per jaar, afhankelijk van de snelheid van de klimaatverandering en afhankelijk van de timing van de investeringen. Tijdige maatregelen zullen de aanpassing aan klimaatverandering goedkoper maken, omdat die aanpassingen dan kunnen worden meegenomen in de normale cyclus van groot onderhoud en vernieuwing en de kosten ervan gedragen kunnen worden door de traditionele functies, zoals waterbeheer, kustverdediging, stedelijke ontwikkeling en woningbouw, recreatie en natuurontwikkeling.

Uit onderzoek van de stichting Kennis voor Klimaat komt naar voren dat er in Nederland in 2010 al meer dan honderd



investeringen zijn aan te wijzen op het gebied van ruimtelijke ordening of woningbouw waarbij rekening is gehouden met klimaatverandering.⁴⁶ Meenemen van klimaatverandering komt erop neer dat een grotere tijd- en ruimtewhorizon in beschouwing wordt genomen. Dit vraagt om grote creativiteit en betrokkenheid van belanghebbenden. Uit het onderzoek blijkt dat dit in de meeste gevallen tot innovatieve oplossingen heeft geleid, en tot projecten die niet of nauwelijks duurder waren en konden rekenen op veel waardering en steun van betrokkenen. In figuur 30 in het kleurkatern is een aantal voorbeelden van zulke projecten in Rotterdam weergegeven.

Ja, tot op zekere hoogte kunnen we ons dus aanpassen – ook in Nederland. Maar we kunnen er niet omheen dat we ook de oorzaak moeten aanpakken: de broeikasgassen die vooral veroorzaakt worden door het gebruik van fossiele brandstoffen, maar ook door onze wijze van landbouw en voedselvoorziening.



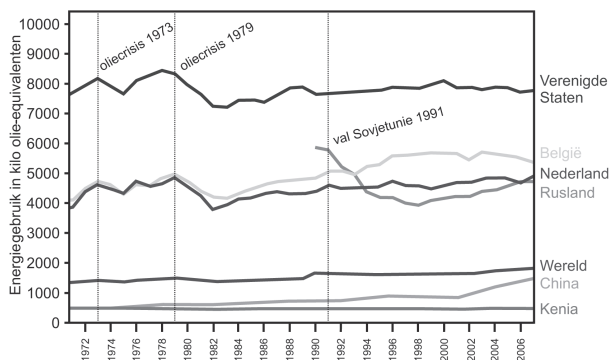
Is overschakelen op andere energiebronnen niet veel te duur?

De voorraden van fossiele brandstoffen zijn eindig. Daarom wordt deze energiebron zolang de wereldeconomie blijft groeien steeds duurder. Maar door die prijsstijging lukt het ook steeds weer om nieuwe voorraden bloot te leggen; hoe duurder de brandstof, des te meer de winning ervan mag kosten. De komende paar honderd jaar zal er daarom geen absolute schaarste zijn aan fossiele brandstoffen. Door inzet van nieuwe wintechnieken kan wereldwijd nog voor honderden jaren aardgas worden gewonnen uit de poriën van leisteen en rijnssteen. Ook in Nederland zijn recent grote voorraden gevonden onder de Noordoostpolder, in Limburg en in Noord-Brabant. De ontginningskosten liggen hoger dan voor de aardgasbel van Slochteren, maar het gas kan wel commercieel worden gewonnen. Aardolie lijkt schaarser te zijn geworden, maar bij hogere prijzen wordt het aantrekkelijk CO₂ in de oude velden te persen, waardoor nog 30 procent extra olie kan worden gewonnen. Bovendien zijn er enorme voorraden van teerhoudende zanden waaruit olie kan worden gemaakt, zij het met ingrijpende ecologische consequenties voor het landschap en de lokale milieukwaliteit. Met de bestaande voorraden steenkool kunnen we nog honderden jaren vooruit. Fossiele brandstofvoorraden zijn er dus genoeg, maar de winning ervan wordt duurder.

Het gebruik van fossiele energiebronnen is diep verankerd in onze samenleving. Dat geldt niet alleen voor Nederland, maar voor de hele wereld. Wel zijn er grote verschillen in energieverbruik, zoals we zien in figuur 39. Er zijn miljarden mensen op de wereld die onze energierijke levensstijl graag zo snel mogelijk zouden willen overnemen.

Fossiele brandstoffen zijn in wezen te beschouwen als een compacte vorm van zonne-energie, opgeslagen in planten die onder druk zijn samengeperst tot steenkool, olie en gas. Deze vorm van energie is daarom bijna niet te overtreffen wat betreft compactheid, en in die zin ideaal om te vervoeren, om op te slaan en te gebruiken in het transport over de weg en door de lucht.

JAARLIJKS ENERGIEGEBRUIK PER PERSOON



Figuur 39. Jaarlijks energieverbruik per persoon voor verschillende landen en het gemiddelde van de wereld. Een ton olie-equivalent is een energie-eenheid die staat voor de hoeveelheid energie die zou vrijkomen bij de verbranding van ruwe olie. [Bron: Wereldbank (2010)⁴⁷]

Maar er zijn ook nadelen aan deze vorm van energiegebruik. De energieproducerende landen kunnen ons in de houdgreep nemen door onze afhankelijkheid. We proberen dat zo veel mogelijk te voorkomen door het sluiten van internationale ver-

dragen. En als dat niet lukt, dan sturen we militairen. Dat kost geld en brengt ook risico's met zich mee. Een ander nadeel is dat het gebruik van fossiele brandstoffen gepaard gaat met luchtverontreiniging. Vooral de verontreiniging door het autoverkeer in de grote steden richt veel gezondheidsschade aan en veroorzaakt, ondanks allerlei filters, wereldwijd nog altijd een omvangrijke vroegtijdige sterfte.

Maar is een welvarende economie zonder deze luchtverontreiniging en zonder CO₂-uitstoot haalbaar? Vaak blijkt dat de mening die iemand heeft over klimaatverandering sterk samenhangt met zijn/haar antwoord op die vraag. Aanvankelijk leken alternatieve vormen van energievoorziening erg duur te zijn. Maar die inzichten over de kosten van een overschakeling op andere energiebronnen veranderen snel. In de afgelopen jaren zijn vele technische en economische studies uitgevoerd naar de mogelijkheden en de kosten van het overschakelen op een klimaatneutrale(re) energievoorziening. Het gaat dan om energiebesparing, om diverse vormen van duurzame energie, om kernenergie en om de mogelijkheden het CO₂-gas dat vrijkomt in elektriciteitscentrales onder de grond op te slaan. De studies laten zien dat er vele technologieën beschikbaar zijn die ervoor kunnen zorgen dat de wereld op enige termijn ook verder kan zonder fossiele energiebronnen. Maar zo'n overschakeling kost wel veel tijd: het gaat al gauw om een periode van dertig tot vijftig jaar. Bovendien zijn er grote investeringen voor nodig. De kosten van een omschakeling naar een klimaatneutrale economie in 2050 zullen een prijsverhoging van de energie van naar schatting 10 tot 30 procent veroorzaken, afhankelijk van de mate waarin internationaal effectief kan worden samengewerkt.

Zo'n kostprijsverhoging is niet gering, maar wel aanzienlijk kleiner dan de veranderingen in prijzen van energie van de afgelopen twintig jaar. Diverse studies, ook van toonaangevende instanties zoals het Internationale Energie Agentschap in Parijs,

grote energiemaatschappijen zoals het Duitse RWE en van grote consultancybedrijven zoals McKinsey, concluderen dan ook dat een omschakeling binnen 40 jaar kan plaatsvinden zonder noemenswaardige effecten op de algemene economie. Een zeer uitgebreide studie van McKinsey, uitgebracht in 2010, laat zien dat het voor Europa zou gaan om een verhoging van de kosten van energie van ongeveer vijftien procent. In de eerste jaren zijn de kosten weliswaar hoger dan de baten door de benodigde investeringen, maar wanneer alle maatschappelijke kosten en baten worden meegenomen zijn deze baten al snel hoger. Het gaat dan om baten op vier fronten: vermindering van de afhankelijkheid van het buitenland wat betreft de energievoorziening, schonere lucht en een betere gezondheid in de grote steden, minder klimaatverandering en de positieve economische effecten van het investeren in de eigen economie.

Ondergrondse opslag van CO₂ en kernenergie

Een mogelijkheid om uitstoot van onwelkome stoffen enigszins bij te sturen is door middel van opslag van CO₂. Het is goed mogelijk om CO₂ op te slaan in oude gasvelden of in de poriën van ondergrondse formaties. Op diverse plaatsen in de wereld gebeurt dat al. Zo wordt CO₂ al jaren gebruikt om de druk in oude olie- en gasvelden op te voeren om op deze wijze ook de laatste 30 procent te kunnen winnen. Hierbij blijft het CO₂-gas achter in de diepe ondergrond, waardoor er minder in de atmosfeer terecht komt. Wel kost het energie om de CO₂ af te vangen, te comprimeren en via buisleidingen op de juiste plaats te krijgen. Ook vraagt een dergelijke oplossing flinke investeringen in de bijbehorende infrastructuur. Wanneer deze technologie wordt toegepast bij kolencentrales leidt dit tot een verhoging van de kosten van opwekking van elektriciteit van 30 tot 40 procent.

Dit betekent dat energie-intensieve bedrijven bij deze techniek ongeveer 40 procent meer kwijt zijn aan de kosten van energie. Voor minder energie-intensieve bedrijven en voor particulieren gaat het om een verhoging van de prijs van 10 tot 20 procent,

omdat bij deze kleinere afnemers transport en bestaande belastingen nu al meer dan de helft van de kosten bepalen.

Toch: de kosten van opslag van CO₂ onder de grond zijn niet onaanzienlijk, maar ook niet onoverkomelijk. Voor de energie-intensieve bedrijven die internationaal moeten concurreren is het alleen wel van belang dat ook de concurrenten in andere landen soortgelijke kosten moeten betalen voor CO₂, om oneerlijke concurrentie te voorkomen.

De opslag van CO₂ biedt dus perspectief. Maar niet elke plek leent zich er even goed voor. Zoals al eerder aangegeven kan het massaal vrijkomen van CO₂ uit een van de opslagputten door een ongeluk voor mensen in de directe omgeving levensbedreigend zijn. Ook al is de kans op een dergelijk ongeluk zeer klein, het leidt ertoe dat in dichtbewoonde gebieden veel maatschappelijke weerstand bestaat tegen deze vorm van CO₂-beheer. Het risico van het vrijkomen van CO₂ wordt verder verkleind door opslag onder de zeebodem; een eventuele ontsnapping vormt daar geen directe bedreiging voor mensen. Bij centrales die biomassa als energiebron gebruiken (met biomassa wordt bedoeld zowel dierlijke als plantaardige materialen, zoals palmolie, raapzaadolie, hout, afvalhout, bermgras, landbouwresiduen, mest, algen, slachtafval enzovoort) werkt opslag van CO₂ zelfs positief. In dat geval gaat energieproductie samen met het onttrekken van CO₂ aan de atmosfeer. Dit werkt als volgt: bomen en planten halen, door te groeien, CO₂ uit de lucht. Vervolgens worden deze bomen verbrand in een elektriciteitscentrale. Dat levert energie, en de CO₂ die door de bomen werd opgenomen wordt vervolgens ondergronds opgeborgen. Op deze wijze werkt zo'n centrale als een CO₂-vreter. Met deze kanttekening dat dit alleen werkt wanneer op de plaats van de bomen en planten die hiertoe zijn verwijderd meteen weer nieuwe bomen en planten worden geplant, die op hun beurt hetzelfde traject afleggen. Op deze manier is de energieopwekking niet klimaatneutraal, maar zelfs klimaatpositief.

Toepassing van kernenergie is een andere mogelijkheid in de

overschakeling naar een klimaatneutralere energievoorziening. De kosten van deze vorm van energiewinning vormen weliswaar een voortdurende bron van discussie, maar kernenergie is waarschijnlijk goedkoper dan elektriciteitsopwekking in combinatie met ondergrondse opslag van CO₂. Echter, net als bij ondergrondse berging van CO₂ bestaat er maatschappelijke weerstand tegen deze vorm van energieopwekking. Het gaat daarbij om drie risico's: de kans op ongelukken in de centrale zoals bij Tsjernobyl en recent in Japan, de kans op gebruik van splijtstof voor militaire doelen en de kans dat het opgeslagen afval toch weer vrijkomt in het milieu. Het recente ongeluk in Japan (maart 2011) laat zien dat de veiligheidsrisico's groter zijn dan tot nu toe gedacht. Het aantal mensen dat daadwerkelijk ziek wordt, is waarschijnlijk niet zo groot. Maar het idee dat gevaarlijk radioactieve straling zich verspreidt in de omgeving en in de voedselketen terecht kan komen, brengt grote onrust teweeg. Om de kans op dit soort ongelukken te voorkomen zullen extra voorzieningen moeten worden getroffen, met als gevolg dat kernenergie duurder wordt. Daarnaast blijft de verspreiding van de technologie met kans op gebruik voor militaire doeleinden een lastig probleem. Het is niet toevallig dat Iran zich sterk maakt voor de bouw van kerncentrales. Tot slot: terwijl kernenergie duurder wordt (ook door extra veiligheidsmaatregelen na het ongeluk in Japan), wordt duurzame energie goedkoper. Daarom zal kernenergie, ook als wereldwijd zwaarder wordt ingezet op CO₂-vermindering, vermoedelijk maar een bescheiden deel invullen van een klimaatneutrale energievoorziening.

Duurzame energie en efficiencyverhoging

Ook duurzame energiebronnen zijn onderwerp van maatschappelijke discussie. Gebruik van deze bronnen kost ruimte, ze maken lawaai of concurreren met voedselbronnen of natuur. Maar het feit dat deze bronnen nagenoeg oneindig zijn en weinig of geen broeikasgassen produceren, maakt ze toch inte-

ressant. Het gaat dan om zon, waterkracht, wind, biomassa en ook aardwarmte (geothermie).

De laatste jaren is er veel onderzoek uitgevoerd naar de haalbaarheid van duurzame energiebronnen als vervanger van fossiele brandstoffen. De resultaten laten zien dat er veel meer mogelijk is dan kort geleden werd verwacht. Een uitgebreide studie waaraan ook de grote energiebedrijven van Europa hebben meegewerkt, laat zien dat het voor de economie van Europa niet veel uitmaakt of we ons voornamelijk richten op a) een traditionele energievoorziening met veel CO₂, op b) een energiesysteem met veel kernenergie en CO₂-berging of op c) een volledige overschakeling op duurzame energiebronnen. De kosten van een klimaatneutrale energievoorziening in Europa worden voornamelijk bepaald door de timing van investeringen en door de mate van samenwerking tussen de EU-landen.⁴⁸ Een substantiële verhoging van de efficiëntie van het gebruik van energie maakt een aanzienlijk deel uit van al dit soort scenario's.

Verhoging van de efficiëntie van energiegebruik

Steeds opnieuw blijkt dat energiebesparing, ofwel verhoging van de efficiëntie van het gebruik van energie, zowel technisch als economisch de meest aantrekkelijke manier is om de emissie van broeikasgassen te verminderen. Maar ook blijkt dat er op dit gebied veel kansen blijven liggen. Uit de vergelijking tussen landen blijkt dat hoge energieprijzen (of hoge prijzen van CO₂-uitstootrechten of een hoge belasting op CO₂) de belangrijkste drijfveer zijn om te investeren in energiebesparing; dit geldt evengoed voor bedrijven als voor particulieren. Het stellen van eisen vanuit de overheid blijkt in de politieke praktijk echter erg moeilijk te zijn. Zo is voor bestaande woningen en gebouwen steeds aangestuurd op vrijwillige maatregelen, maar dit heeft tot nu toe nauwelijks iets opgeleverd. Dat is ook niet zo gek: ook al is het volgens de berekeningen kosteneffectief, het is voor bewoners altijd de vraag of ze de kosten terugverdienen voordat ze bijvoorbeeld gaan verhuizen.

Voor producten zoals auto's, wasmachines, koelkasten en computers is het gemakkelijker eisen te stellen. Dat gebeurt in de praktijk dan ook, meestal op het niveau van de Europese Unie. Het duidelijkste voorbeeld zijn de eisen die worden gesteld aan de uitstoot van CO₂ door personenauto's. In reactie op die eisen worden door alle autofabrikanten ineens veel zuiniger auto's op de markt gebracht.

Windenergie

Moderne windenergie heeft de afgelopen tien jaar een sterke ontwikkeling doorgemaakt. Windturbines op het land kunnen nu elektriciteit produceren voor een prijs die concurreert met elektriciteit uit fossiele bronnen. De winning van windenergie op zee is duurder, maar door meer en grotere windmolens te bouwen, wordt de stroom per kilowatt ook daar steeds goedkoper. Als de huidige trend doorzet, zal wind op zee in 2025 kunnen concurreren met fossiele stroom.

Het nadeel van windenergie is dat er altijd een back-up energiebron beschikbaar moet zijn voor als het niet waait. Gasgestookte centrales zijn hiervoor het meest geschikt, omdat die snel aan- en uitgezet kunnen worden. Kerncentrales en kolencentrales hebben een veel langere opstarttijd en gaan daarom in de praktijk niet goed samen met een uitbreiding van wind- en zonne-energie. Veel van de voorstanders van duurzame energie in Nederland zijn daarom tegen kern- en kolencentrales en voor gasgestookte centrales.

Windenergie is voor Nederland de meest interessante bron van duurzame energie, vooral vanwege de Noordzee. Het Nederlandse deel van de Noordzee is ondiep en rijk aan wind; er is genoeg wind en ruimte op de Noordzee om de gehele stroomvoorziening van Nederland te dekken. Wel moeten er dan goede verbindingen liggen met andere energieparks in Europa, om tijden met weinig wind te kunnen overbruggen. Het gaat dan om waterkracht uit Noorwegen, zonnestroom uit Spanje en (bio)gas uit eigen land. Tot slot levert windenergie veel ba-

nen op in Nederland, meer dan bijvoorbeeld kernenergie. De internationaal sterke waterbouwsector van Nederland kan wereldwijd een interessante rol spelen in de bouw en het onderhoud van windparken op zee.

Zonne-energie

Zonne-energie wordt snel goedkoper. De kosten ervan zullen ook de komende dertig jaar sterk blijven dalen. Wel is er veel ruimte nodig om de energie van de zon direct te vangen. In zonnrijke gebieden zoals Californië, Spanje en Noord-Afrika kan zonne-energie nu al concurreren met fossiele energiebronnen. Wanneer in Nederland zonne-energie op eigen dak voor eigen gebruik wordt ingezet (decentraal) kan het binnen enkele jaren ook concurreren met de prijs van stroom via het net. De ruimte, het dak, is meestal gratis, er worden geen transportkosten in rekening gebracht en er wordt geen belasting op geheven. In 2011 is het in Nederland mogelijk als particulier, zonder subsidie, zonnepanelen aan te schaffen en te installeren, waarbij deze voorziening in een periode van ongeveer vijftien jaar wordt terugverdiend.

Toepassing op grote schaal, bijvoorbeeld in de industrie, is in onze streken vooralsnog aanzienlijk duurder dan windenergie en energie uit biomassa. Het zal daarom, ook in de toekomst, aantrekkelijk zijn te investeren in meer zonnrijke landen en de stroom te transporteren naar ons land.

Naast zonne-energie opgewekt met zonnepanelen met fotovoltaïsche cellen (zon-pv), wordt een andere vorm van zonne-energie aantrekkelijk. Het gaat om Concentrated Solar Power (CSP), waarbij zonnewarmte wordt geconcentreerd met behulp van spiegels. De hitte die hierbij ontstaat wordt gebruikt om een stoomturbine aan te drijven die vervolgens elektriciteit opwekt. Een aantal grote bedrijven in Europa heeft gevorderde plannen om in Noord-Afrika grote CSP-centrales neer te zetten, die voornamelijk stroom zullen leveren voor Europa. Het gaat daarbij om investeringen van enkele honderden miljarden euro's.

Biobased economy

Met 'biobased economy' wordt bedoeld dat de producten die vroeger gemaakt werden van aardolie in de toekomst worden gemaakt van groene grondstoffen, zoals de biomassa van planten, bomen en algen. Deze omschakeling is al begonnen bij het creëren van afbreekbare verpakkingen en van 'groen gas' uit mest en maïs.

Er zijn twee manieren waarop de biobased economy een bijdrage levert aan de vermindering van broeikasgassen. Ten eerste wordt door de groei van algen, planten en bomen CO₂ uit de lucht gehaald, waarbij de koolstof wordt vastgelegd in materialen. Ten tweede kost het maken van producten uit biomassa (in ieder geval in theorie) veel minder energie dan het maken van producten uit aardolie. Om deze winst te incasseren is er nog wel vrij veel onderzoek nodig om de meest effectieve processen te ontwerpen.

Voor Nederland is de biobased economy een interessante ontwikkeling. Onze economie is daar beter voor uitgerust dan die van de meeste andere landen, omdat wij een sterke chemische sector en een sterke landbouwsector kennen; de samenwerking van deze twee sectoren vormt de basis van de biobased economy. Daarnaast hebben wij grote havens om de relatief grote stromen biomassa die nodig zijn in te voeren en verder te verschepen. Biomassa kan dus een belangrijke rol gaan spelen in de Nederlandse energievoorziening. Het bezwaar is alleen dat de teelt ervan veel ruimte vraagt en ruimte is duur, zeker in ons land. Een aanzienlijk deel van de biomassa zal daarom geïmporteerd moeten worden. Dit legt beslag op ruimte elders in de wereld.

In deze ruimte zit het meest gehoorde tegenargument van de biobased economy: waarom zou je landbouwgrond gebruiken voor het produceren van energie, als je er ook voedsel op kunt verbouwen en er bijna een miljard mensen met honger leven op deze planeet? Op zich zou er genoeg ruimte op de wereld zijn wanneer de landbouwgrond en de opbrengsten ervan efficiënt worden ingezet. Maar dat laatste is niet vanzelfsprekend. Het

zal een enorme uitdaging zijn om de spanning die er ongetwijfeld zal ontstaan tussen voedsel, energie- en CO₂-beleid enigszins te beheersen.

Geothermie

Er zijn drie manieren waarop warmte uit de ondergrond gebruikt kan worden in onze energievoorziening. Ten eerste voor verwarming en koeling van onze huizen en gebouwen. Dit noemen we warmtekuoedopslag. Hierbij wordt de ondergrond, tot maximaal honderd meter diepte gebruikt als buffer van warmte en koude. Via een warmtepomp (een soort omgekeerde koelkast) wordt warmte en koude in de juiste hoeveelheid en temperatuur in onze huizen en gebouwen gebracht. Het kost wel elektriciteit om de warmtepomp te laten draaien, maar het is veel energie-efficiënter dan de traditionele verwarming met aardgas.

Een tweede manier is het gebruik van aardwarmte voor de verwarming van tuinbouwkassen en grote gebouwen. Het gaat hierbij om het aftappen van warmte uit diepere lagen van de aarde, tot ongeveer drie kilometer diepte, waar een temperatuur heerst van ongeveer 60 à 70 graden Celsius. Door water door deze warme aardlagen en vervolgens door de kassen en gebouwen te leiden, worden deze direct vanuit de ondergrond verwarmd. Vooral tuinders zijn enthousiast over deze energiebron.

De derde vorm van energie uit de bodem kennen we uit IJsland: als gevolg van spleten en scheuren in de aardkorst bevinden de hete aardlagen zich hier vlak bij het aardoppervlak. De stoomgeisers van IJsland laten zien hoeveel energie daarin zit. Door de technologische ontwikkeling blijkt het mogelijk ook in Nederland deze hete aardlagen aan te boren. Ze zitten bij ons op ruim zes kilometer diepte; daar is de temperatuur tussen de 120 en 160 graden Celsius. Door water te leiden door die aardlagen, komt het kokend aan de oppervlakte. Daarmee is stoom te maken waarmee een turbine kan worden aangedreven.

Wereldwijd groeit de belangstelling voor geothermie sterk. Op

die plaatsen waar de hete aardlagen dichtbij het aardoppervlak zitten is de ontwikkeling het verst gevorderd, zoals op de Filipijnen, in Indonesië en Turkije. Maar ook in Nederland is geothermie een optie die economisch steeds interessanter wordt.

Getijden- en golfenergie, waterkracht en blue energy

Getijden- en golfenergie spreken tot de verbeelding omdat de zee zoveel kracht heeft en de wind er zoveel energie in blaast. Die energie er weer uithalen blijkt echter lastig te zijn. Er is in de afgelopen tientallen jaren internationaal veel geëxperimenteerd met de winning van energie uit golven en stroming, maar telkens vallen de kosten tegen. Alleen wanneer er een groot getijverschil bestaat, van vijf meter of meer, of wanneer er bijna voortdurend hoge golven zijn is het economisch interessant. Dit is in Nederland niet het geval. Ook de opwekking van waterkracht met turbines in de rivier is in Nederland niet lucratief: de waterstandsverschillen zijn gewoon te klein.

Het probleem van energiewinning uit de rivier of uit zee is dat er grote investeringen vereist zijn voor het bouwen van de constructies die nodig zijn om de krachten van (stromend) water en/of golven op te vangen. Daarnaast zijn de installaties duur in onderhoud, vanwege het watermilieu. Aangroei en gevoeligheid voor corrosie zijn hier de kritieke factoren.

‘Blue energy’ is de naam die is gegeven aan een nieuwe vorm van energiewinning uit water, dat wil zeggen: uit elkaar passerende stromen van zout en zoet water, gescheiden door een zeer dunne wand. Door de verschillen in de concentratie van zout hebben elektronen de neiging over te springen. Door die elektronen te vangen in de dunne wand wordt stroom opgewekt. Deze vorm van energiewinning lijkt interessant te zijn in de monding van grote rivieren, waar veel zoet water in contact komt met zout water. Die hebben we in Nederland. Maar een aantal belangrijke vragen moet nog wel worden opgelost. De gebieden waar deze vorm van energievorming kan plaatsvinden zijn meestal rijk aan slib en biologisch leven. De ecologische ef-

fecten van de filtering van het water zijn nog niet duidelijk. Experimenten met kleine proefinstallaties zijn wel al gaande.

Mobiliteit en vervoer

Een belangrijke hoeveelheid energie op aarde wordt gebruikt voor het vervoer van personen en goederen. Er is veel discussie gaande over hoe we ons zullen verplaatsen over bijvoorbeeld 30 jaar. Hebben we dan nog steeds een eigen auto met een (zuinige) verbrandingsmotor, of is ons hele vervoer sterk geautomatiseerd en doen we dat elektrisch? Wordt er over 30 jaar nog steeds met veel goederen geslept over de wereld, of worden de producten die we nodig hebben lokaal gemaakt en wordt alleen de kennis die daarvoor nodig is internationaal (elektronisch) getransporteerd? Reizen we meer per vliegtuig, of neemt communicatie en recreatie via cyberspace een belangrijkere plaats in?

Op de kortere termijn is een belangrijke vraag of elektrische auto's en bussen over tien jaar een leidende positie zullen hebben in het personenvervoer. Elektrisch rijden is tweemaal zo zuinig als het rijden op benzine of diesel. De elektrische auto is daarom veelbelovend, ook los van het klimaatargument.

Tegelijkertijd laat de verbrandingsmotor zich niet zomaar verdringen. De autofabrikanten en oliemaatschappijen doen sinds een aantal jaren hun uiterste best om zuiniger auto's te maken. Een groot deel van de omzet van de grote internationale oliemaatschappijen is gebaseerd op de productie en verkoop van benzine en diesel. Het wordt een interessante wedstrijd welk concept uiteindelijk zal winnen.

Voor vrachtauto's en schepen zal elektrisch vervoer met accu's vrijwel zeker niet de oplossing zijn. Vloeibare energie en (samengeperst) gas hebben per gewicht een hogere energiewaarde dan accu's en kunnen onderweg sneller worden aangevuld. Biobrandstoffen en groen gas lijken voor dit type vervoer de meest interessante brandstoffen in de overschakeling naar een klimaatneutrale economie.

Een van de interessantste vragen is hoe de luchtvaart klimaat-

neutraal zal kunnen worden. Sinds ongeveer tien jaar zien we een groeiend aantal mogelijkheden voor de passagier om de uitstoot per reis te compenseren met credits waarmee vervolgens bomen worden geplant, of elders de uitstoot van CO_2 wordt beperkt. De laatste jaren beginnen vliegmaatschappijen en motorfabrikanten ook te experimenteren met alternatieve brandstoffen. De aandacht gaat hierbij vooral uit naar biobrandstoffen: hiervan kan vrij gemakkelijk kerosine worden gemaakt. Er wordt veel geïnvesteerd in onderzoek. Het kweken van algen voor de bereiding van kerosine is een van de onderzoekslijnen. Het zal nog wel enkele tientallen jaren duren voordat het vliegvervoer klimaatneutraal kan zijn. Het gaat daarbij niet alleen om CO_2 maar ook om het effect van waterdamp en andere uitlaatgassen op de stralingshuishouding.

Hoe zit het met de andere broeikasgassen?

In de discussie over klimaatverandering staat de CO_2 centraal. Dit is niet verbazend gezien de grote bijdrage aan de toename van broeikasgassen. Maar ook CH_4 , methaangas, is een broeikasgas waarvan de concentratie in de atmosfeer is gestegen. Methaangas komt vrij uit natte rijstvelden, herkauwende runderen en uit afval. De invloed van de verschillende gassen op het klimaat wordt meestal uitgedrukt in een CO_2 -equivalent. De invloed van bijvoorbeeld methaangas op warmtestraling is veel groter dan die van CO_2 . Die van lachgas (N_2O), dat vrijkomt uit onder meer kunstmest, is nog weer groter.

De gegevens over de herkomst van de extra broeikasgassen zijn eerder zichtbaar gemaakt in figuur 1. Deze figuur laat zien dat het gebruik van fossiele brandstoffen de grootste bijdrage levert. Vooral de landbouw en de voedselvoorziening dragen in aanzienlijke mate bij aan de emissie van broeikasgassen. Wanneer veengebieden, zoals in Nederland maar ook in Indonesië, worden ingezet voor de landbouw en de veeteelt worden deze beter begaanbaar gemaakt door bemaling. Hierdoor komt de bovenkant van het veen droog te staan en treedt er oxidatie

op (verbranding zonder vuur). Net als bij de verbranding van turf komt hierbij CO₂ vrij. Tegelijkertijd daalt het maaiveld, als gevolg van dit verdroging- en oxidatieproces. Hierdoor wordt het weer natter en moeilijker begaanbaar. Als reactie laten de landbouwers de grondwaterstand verder zakken, waardoor het proces van oxidatie verder voortschrijdt. In sommige gebieden (ook in Nederland) is de bodem door deze werkwijze met vele meters gedaald, waarbij tegelijkertijd een flinke hoeveelheid veen, in de vorm van CO₂, de lucht in is gegaan. De afgelopen jaren worden wereldwijd steeds meer veengebieden in (landbouw)productie genomen. In Indonesië bijvoorbeeld draagt de verlaging van de grondwaterstand in veengebieden in belangrijke mate bij aan de nationale CO₂-uitstoot.

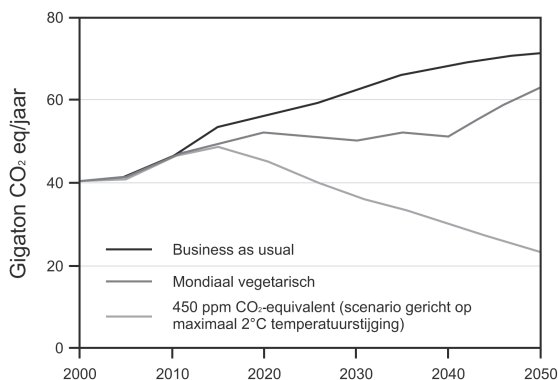
De wijze waarop het wereldwijde landgebruik en de voedselvoorziening zich zullen ontwikkelen is een belangrijke factor in de stroom van broeikasgassen. Het gaat dan zowel om het vrijkomen van broeikasgassen als om het absorberen van broeikasgassen. Het verminderen van de emissie en het vergroten van de opname van broeikasgassen door de bodem en vegetatie zal niet gemakkelijk zijn. Ook de veeteelt draagt sterk bij aan de emissie van methaangas, via de herkauwers en via de mest. Door toename van de vleesconsumptie stijgt deze bijdrage relatief snel.

Minder vlees eten?

Uit onderzoek blijkt dat een traditioneel vleesdieet vier tot zes keer zo veel broeikasgassenemissie met zich meebrengt als een vegetarisch dieet. Een berekening van de theoretische situatie dat alle mensen wereldwijd zouden overschakelen op een vegetarisch dieet laat zien dat hiermee de totale uitstoot van broeikasgassen met ruim 20 procent zou worden verminderd; zie figuur 40.

In de rijke landen zoals Nederland zien we dat een toenemend aantal mensen om allerlei verschillende redenen het eten van vlees enigszins beperkt. De vermindering van de hoeveelheid broeikasgassen blijkt hierbij één van de argumenten te zijn. Te-

DE INVLOED VAN VLEESCONSUMPTIE OP TOEKOMSTIGE CO₂-UITSTOOT



Figuur 40. Deze figuur laat het effect zien op de mondiale uitstoot van broeikasgassen wanneer iedereen in de wereld zou overgaan op een vegetarisch dieet. De kloof naar de 2 graden doelstelling zou hiermee met ongeveer 25 procent worden gedicht. [Bron: Stehfest e.a., Climatic Change (2009)⁴⁹]

gelijkertijd wordt in de landen die zich sterk ontwikkelen, zoals China, per persoon juist steeds meer vlees gegeten. De aantallen waar het hier om gaat zijn veel groter dan het aantal vleesminderaars in de rijke landen. Organisaties op het gebied van voedsel en landbouw, zoals de FAO in Rome en de ministeries die zich hiermee bezighouden, beginnen zich langzaam bewust te worden van dit vraagstuk. Er zijn wel oplossingen, maar die vragen, waarschijnlijk nog sterker dan op energiegebied, om een grote mentale en culturele omslag.

Feiten, fabels en echte onzekerheden

In brede kring wordt intensief nagedacht over klimaatverandering: iedereen heeft er een mening over. In de discussie over deze ingewikkelde materie lopen ideeën, opinies en wetenschappelijk gefundeerde inzichten vaak dwars door elkaar heen. In dit laatste hoofdstuk wordt een aantal controversiële inzichten en meningen tegen het licht gehouden. Eerst zal ik een klein aantal feiten op een rijtje zetten, wetenschappelijk getoetste inzichten die ook de critici ten aanzien van klimaatverandering in het algemeen als feiten beschouwen. Daarna volgt de fabeltoets. Hierbij wordt een aantal gangbare ideeën, redeneringen en meningen op de wetenschappelijke pijnbank gelegd. Tot slot gaat het over de echte onzekerheden in de discussie, waar de klimaatonderzoekers van tegenwoordig zich primair op richten.

Feiten

Wetenschappelijke inzichten zijn over het algemeen via diverse methoden, experimenteel en theoretisch, getoetst. Als zo'n toetsing bij veelvuldige herhaling steeds positief uitvalt, dan beschouwen we deze inzichten algauw als feiten. Het woord 'feit' kan op zichzelf tot verwarring leiden, doordat sommige mensen ervan uitgaan dat feiten slechts subjectieve constructies zijn

van de werkelijkheid. Dat maakt een discussie natuurlijk lastig. Met feiten in het hierna volgende worden bedoeld de uitkomsten van experimenten (of metingen) waarvoor geldt dat bij veelvuldige herhaling van het experiment of de meting ook door anderen steeds dezelfde uitkomst wordt gevonden.

Het eerste feit is dat de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer sterk is gestegen sinds de jaren dat de metingen daarvan zijn begonnen in 1958. Het tweede feit is dat deze gassen bij proeven in het laboratorium de eigenschap vertonen dat ze de warmte die meekomt met zonlicht (korte golflengte) vrijelijk doorlaten, en tegelijkertijd remmend werken op de warmtestraling afkomstig van een warm voorwerp (infrarode straling, met een langere golflengte). Het derde feit is dat de moleculaire eigenschappen van een groot deel van de extra broeikasgassen die worden aangetroffen in de atmosfeer (met name CO_2) direct wijzen op fossiele brandstoffen als bron van deze extra broeikasgassen.

Deze drie feiten kunnen elke dag worden gecontroleerd door experimenten en metingen. De uitkomsten ervan zullen de feiten steeds opnieuw bevestigen.

Over naar de fabeltoets.

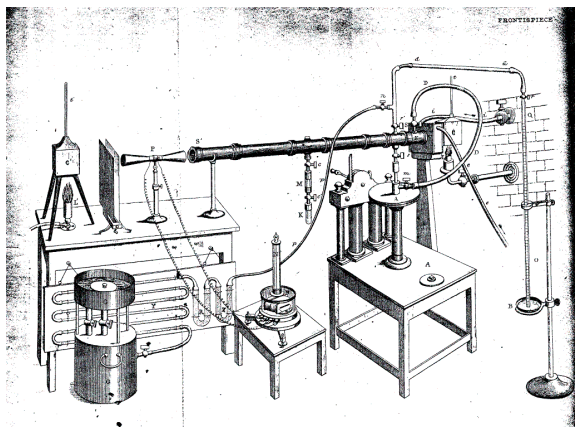
Fabel 1: de opwarmende werking van CO_2 is slechts een hypothese

In de media en ook in de politiek wordt de werking van broeikasgassen meer dan eens gepresenteerd als ‘slechts een hypothese’; een veronderstelling die je kunt aanhangen als er weinig bekend is en waarvoor geldt dat die evenveel waard is als iedere andere veronderstelling.

Meting van de eigenschappen van de gassen in het laboratorium laat echter zien dat de opwarmende werking van deze gassen veel meer is dan een hypothese. Al in 1860 werd in het laboratorium gedemonstreerd dat CO_2 en bepaalde andere gassen een remmende werking hebben op warmtestraling. John Tyndall heeft in Engeland die werking ervan voor het eerst beschreven in 1872 in het boek *Contributions to Molecular Physics in*

the Domain of Radiant Heat. Zijn waarnemingen bevestigen de wetten van de natuurkundige stralingstheorie.

In het laboratorium bleek dat bepaalde gassen, broeikasgas-
sen genoemd, de energie die meekomt met het zonlicht vrij
doorlaten, terwijl diezelfde gassen remmend werken op de
niet-zichtbare warmtestraling: infrarode straling. Een warm
voorwerp raakt haar warmte met andere woorden minder snel
kwijt als het wordt omringd door meer broeikasgassen. Infra-
rode straling is de warmtestraling die wij voelen als we vlak bij
een hete verwarmingsradiator staan. De laboratoriumproeven
en de stralingstheorie laten zien hoe de remmende werking van
de broeikasgassen toeneemt bij een toename van de concentra-
tie ervan.



Figuur 41. De proefopstelling waarmee John Tyndall in de jaren 1850 het broeikaseffect aantoonde. Deze figuur komt uit zijn boek Contributions to Molecular Physics in the Domain of Radiant Heat uit 1872.⁵⁰

De grote vraag is nu of de werking van broeikasgassen op la-
boratoriumschaal ook opgaat op de schaal van de aarde. Dat
is niet vanzelfsprekend: ook andere gassen spelen een rol in de
stralingshuishouding van de aarde. Bovendien zijn er geologi-
sche en meteorologische processen die het effect van de broei-

kasgassen kunnen versterken en processen die dat kunnen dempen.

Het is moeilijk proeven uit te voeren op de schaal van de aarde. Een direct bewijs van de remmende werking van broeikasgassen op de schaal van de aarde is daarom niet te leveren. Wel zijn er in de afgelopen 30 jaar vier verschillende, onderling onafhankelijke waarnemingen uit onderzoek naar voren gekomen die de stelling ondersteunen dat CO_2 ook op de schaal van de aarde een remmende werking heeft, en dat een toename van de concentratie van CO_2 en andere broeikasgassen leidt tot toename van de gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak. Deze waarnemingen worden hieronder kort toegelicht onder de nummers 1 tot en met 4.

1. CO_2 op andere planeten

De werking van broeikasgassen op andere planeten is tientallen jaren geleden, in het begin van de reizen naar de Maan en de verkenningen van de planeet Mars, uitvoerig gemeten en wetenschappelijk beschreven. Met astrofysische berekeningen kan tamelijk nauwkeurig worden berekend wat de temperatuur van de aarde en van andere planeten zou moeten zijn op basis van hun afstand tot de zon. De werkelijke temperatuur wijkt daarvan af vanwege de atmosfeer rondom de planeten. De samenstelling van deze atmosfeer is inmiddels goed bekend. Zo blijkt dat de hoeveelheid broeikasgassen rondom de planeet Venus veel groter is dan die rondom de planeet Mars; onze aarde zit ertussenin. Wanneer nu de stralingstheorie die is ontwikkeld op basis van de bevindingen in het laboratorium wordt toegepast op deze twee planeten en op de aarde, dan blijken de berekende temperaturen zeer nauwkeurig overeen te komen met de werkelijke metingen. Recentelijk heeft Rob van Dorland van het KNMI dit nog eens uitgelegd in het blad *Zenith*.⁵⁴ Deze overeenstemming is een belangrijke ondersteuning van de stelling dat CO_2 op planetaire schaal hetzelfde effect heeft als in het laboratorium.

2. CO₂ en temperatuur in het geologische verleden van de aarde

Een tweede ondersteuning van de stelling komt van de aarde zelf. In het geologische verleden zijn er perioden geweest met een hogere concentratie van CO₂ dan tegenwoordig. Het was toen ook warmer. Temperatuurveranderingen in het verre verleden kunnen met grote precisie worden bepaald uit de isotopenverhouding⁵² van de zuurstof die aanwezig is in slibmonsters van de bodem van de oceaan. Ook het verloop van de concentratie van CO₂ in de atmosfeer kan goed worden gereconstrueerd, onder meer uit luchtbellens opgeslagen in ijsformaties uit het verre verleden. De metingen van het verloop van de CO₂-concentratie in het geologische verleden van de aarde laten duidelijk zien dat er op de aarde een samenhang bestaat tussen concentratie van CO₂ en de temperatuur. Zo weten we via verschillende wegen dat het in de periode dat er dinosaurussen rondliepen op de aarde veel warmer was dan nu, en dat ook de concentratie van CO₂ toen veel hoger was. Verder laten metingen van de samenstelling van luchtmonsters uit de ijskappen en zuurstof uit de sliblagen van de oceanbodembodem zien dat bij de overgang van ijstijden naar warmere tijden en andersom het verloop van de temperatuur en de concentratie van broeikasgassen in de pas lopen. Dat wil nog niets zeggen over de oorzaakgevolgrelatie, waarover ik het al uitvoerig had in hoofdstuk 4. Het is dus geen direct bewijs, maar wel een ondersteuning van de redenering dat de werking van broeikasgassen in het laboratorium ook geldt op de schaal van de aarde: hogere concentraties leiden normaal gesproken tot hogere temperaturen. Indien een toename van CO₂ geen effect zou hebben op de temperatuur zouden er ook perioden kunnen voorkomen waarbij stijgende concentraties samengaan met dalende temperaturen. Die zijn niet gevonden op de voor klimaatverandering relevante tijdschalen: tientallen tot honderden jaren.

3. Satellietmetingen van de werking van broeikasgassen in de atmosfeer

Ook satellietwaarnemingen in de huidige tijd ondersteunen de stelling dat CO₂ een opwarmend effect heeft in de atmosfeer. Onderzoekers hebben met behulp van satellieten gemeten dat de broeikasgassen in de atmosfeer van de aarde inderdaad zo werken als verondersteld op basis van de uitkomsten van laboratoriumexperimenten. Uit de satellietmetingen blijkt dat de concentratie van deze gassen is toegenomen en dat het effect op het doorgeven van infrarode straling klopt met de berekeningen van de verdere opwarming in de toekomst.

4. Metingen van opwarming van de aarde sinds 1990

De opwarming van de aarde in de afgelopen tientallen jaren klopt binnen de marges met de berekeningen die op basis van de broeikastheorie vooraf hierover zijn gemaakt. Deze berekeningen zijn gepubliceerd in het eerste rapport van het IPCC in 1990, en kwamen toen zoals gezegd uit op een stijging van 0,15 à 0,2 graden Celsius per tien jaar. We zijn nu twintig jaar verder; de aarde zou dus 0,3 à 0,4 graden Celsius warmer moeten zijn. Dat hoeft niet precies te kloppen, want er zijn ook natuurlijke variaties in de temperatuur die een rol spelen. Dat de sindsdien in werkelijkheid gemeten gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak ook met 0,3 à 0,4 graden is gestegen is echter een sterke ondersteuning van de berekeningsmethode aangaande het temperatuureffect van extra broeikasgassen.

Alternatieve verklaringen houden geen stand

Een van de alternatieve theorieën die naar voren is gebracht over de werking van broeikasgassen, is dat de opwarming door die gassen sterk wordt gedempt of zelfs volledig wordt gecompenseerd door afkoeling als gevolg van de verdamping van water. Deze theorie is al verschillende malen weerlegd, maar wordt zo nu en dan opnieuw naar voren gebracht. In 2011 heb-

ben de Nederlandse klimaatonderzoekers van het KNMI, van de Universiteit Utrecht en van een aantal andere kennisinstellingen deze en andere theorieën over de opwarming van de aarde systematisch geanalyseerd en vergeleken met metingen. De resultaten hiervan zijn samengevat in een rapport met de titel *De Staat van het Klimaat 2010*.⁵³ De resultaten laten zien dat geen van de alternatieve theorieën houdbaar is. In *De Staat van het Klimaat 2010* wordt onder meer het werk van Ferenc Miskolczi besproken. Op basis van een door hemzelf ontwikkelde stralingstheorie komt deze onderzoeker tot de stelling dat de aanwezigheid van broeikasgassen niet leidt tot opwarming van de aarde.⁵⁴ Maar vergelijking van zijn theorieën met metingen en met beproefde natuurkundige principes leidt bij de meteorologen en natuurkundigen van het KNMI tot de conclusie dat er fundamentele fouten zitten in de door Miskolczi ontwikkelde stralingstheorie – zie ook de website van PCCC (Platform on Communication about Climate Change) en de website www.realclimate.org.

Een ander verhaal waarin vraagtekens worden geplaatst bij de berekeningen van het IPCC, wordt geleverd door de wetenschapsjournalist Marcel Crok. In 2010 publiceerde hij een boek dat hij dezelfde titel meegaf als de sinds 2006 verschijnende publicatie over klimaat van de Nederlandse wetenschappelijke instellingen: *De staat van het klimaat*. Op basis van een nogal persoonlijke interpretatie van de wetenschappelijke literatuur zet hij vraagtekens bij de opwarming van de aarde. Hij wijst hierbij op de gebreken van de temperatuurmetingen in het verleden en op de onderschatte invloed van de zon en van de luchtverontreiniging. Wel erkent hij de kwaliteit van de meer recente satellietmetingen sinds 1978, en de opwarming van 0,5 graden Celsius die sindsdien is gemeten. Een belangrijke omissie in Croks verhaal is dat hij de naijlende werking van de broeikasgassen buiten beschouwing laat, door ervan uit te gaan dat de huidige temperatuur volledig in evenwicht is met de huidige concentraties van broeikasgassen. Croks conclusie is dat het

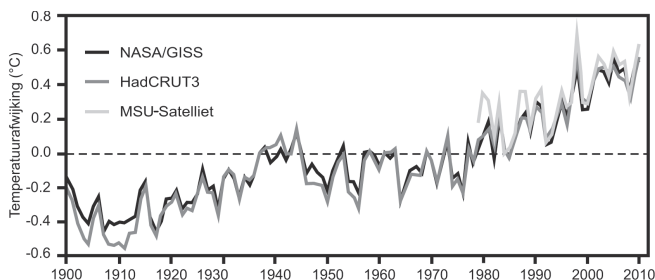
uiteindelijk gaat om niet meer dan 1 graad Celsius temperatuurstijging in 2100. Hieraan voegt hij toe dat dit zo weinig is dat er geen enkele reden is om nu te investeren in klimaatneutrale energie. Deze conclusies zijn nogal discutabel. Vooral omdat volgens de best beschikbare metingen de temperatuur nu al 0,8 graden Celsius hoger is dan voorheen. De kans is dan ook zeer klein dat de uiteindelijke stijging beperkt zal blijven tot 1 graad. Positief gezegd is Crok een grote optimist en een wishful thinker. Meer objectief gesteld heeft hij selectief zitten shoppen in de beschikbare wetenschappelijke literatuur en de keuzes die je daarin kunt maken.

Fabel 2: het wordt niet warmer; de metingen van de temperatuur kloppen niet

Er is lange tijd discussie geweest over de kwaliteit van de temperatuurmetingen. De stelling van een aantal onderzoekers was dat de tot nu toe gemeten opwarming van de afgelopen honderd jaar vooral het gevolg is van verstedelijking rondom de stations waar de thermometers staan opgesteld. Inderdaad blijkt de verstedelijking invloed te hebben op diverse temperatuurstations. In de loop van de afgelopen 30 jaar is er echter steeds beter gecorrigeerd voor dit verschijnsel. Ook na die correcties blijkt dat er geen twijfel mogelijk is over de stijging van de gemiddelde temperatuur, vooral sinds 1970.

Verschillende onderzoeksgroepen in de wereld bepalen ieder jaar opnieuw de gemiddelde jaartemperatuur. Zij doen dat niet op identieke wijze, daarom zijn er verschillen in wat ze vinden. Die verschillen zijn echter klein, en de algemene trend komt wel degelijk overeen. Sinds 1978 wordt er ook met satellieten gemeten. Hiermee wordt een volledig, aarde-omvattend signaal verkregen van de temperatuur. Deze satellietwaarnemingen worden sindsdien vergeleken met de traditionele metingen met geavanceerde thermometers. Uit de vergelijking blijkt dat de resultaten goed met elkaar in overeenstemming zijn. In figuur 42 worden de resultaten van de verschillende metingen vergele-

MONDIAAL TEMPERAATUURVERLOOP 1900-2100



Figuur 42. De wereldgemiddelde temperatuurafwijking ten opzichte van het gemiddelde van 1961-1990, op verschillende manieren gemeten. NASA/GISS en HadCRUT3 geven een combinatie van data van meetstations wereldwijd (zeewatertemperatuur en luchttemperatuur op 2 meter hoogte boven land). Verschillende satellieten met een MSU-instrument meten een gemiddelde temperatuur over de onderste 8 km van de atmosfeer. [Bron: KNMI¹⁷]

ken. Op basis van deze verschillende meetreeksen is het moeilijk de feitelijke opwarming van de aarde te ontkennen. Ook de meeste klimaatsceptici accepteren de metingen sinds 1978 zoals die zijn weergegeven in figuur 42. Uit deze metingen blijkt dat de gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak sindsdien met ruim 0,5 graden Celsius is gestegen. De opwarming wordt bevestigd door de kleiner wordende gletsjers op alle continenten. Ook de ontthooiende permafrostgebieden en de warmer wordende oceanen bevestigen de opwarming. Het idee dat de aarde niet opwarmt, moet daarom worden beschouwd als een fabel.

Wel bestaat er in de discussie zo nu en dan verwarring over het gebied dat in de beschouwing wordt meegenomen. Het gaat bij temperatuurstijging door extra broeikasgassen altijd om de wereldwijd gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak. Niet alle delen van de aarde warmen gelijkmatig op; sommige gaan sneller, andere langzamer. In Nederland en ook in de Verenigde Staten was het in het jaar 2010 relatief koud, terwijl

wereldwijd gemiddeld het jaar 2010 een van de warmste jaren was sinds er wordt gemeten.

Fabel 3: niet de aanwezigheid van broeikasgassen, maar de zon warmt de aarde op

De suggestie dat de zon de oorzaak is van de opwarming van de aarde komt iedere paar jaar opnieuw naar voren. Hierbij staat meestal niet de opwarming zelf ter discussie, maar de oorzaak ervan, waarbij de rol van de extra broeikasgassen gerelativeerd of geheel ontkend wordt. Ter ondersteuning van deze stelling worden de gegevens van zonnevlekken in het verleden steeds weer opnieuw geïnterpreteerd zodanig dat de zon 'tot voor kort een opwarmende rol heeft gespeeld en dat die in de toekomst een koelende rol zal spelen'. Deze conclusie wordt al vijftien jaar lang iedere paar jaar opnieuw getrokken. Toch is de fase van afkoeling nog steeds niet zichtbaar in de metingen. Dat maakt deze stelling steeds minder geloofwaardig.

Er zijn zoals gezegd inderdaad aanwijzingen dat variaties in zonne-intensiteit een bijdrage hebben geleverd aan het verloop van de gemiddelde temperatuur, maar dan wel een kleine. Ook in de toekomst zal de zon een bijdrage blijven leveren aan het temperatuurverloop. Maar alles wijst er zoals eerder gezegd op dat deze bijdrage niet opweegt tegen de werking van de extra broeikasgassen. In wezen is er tot nu toe, met steeds wisselende argumenten en verschillende statistische technieken, gespeculeerd over de werking van de zon zonder een heldere wetenschappelijke basis. Wat in ieder geval wel duidelijk is, is dat het patroon van opwarming rondom de aardbol en in de luchtlagen rondom de aarde zoals dat zich de afgelopen honderd jaar heeft ontwikkeld veel beter past bij de werking van broeikasgassen dan bij de werking van de zon – zie figuur 24 in het kleurkatern.

Fabel 4: overschakelen op een klimaatneutrale energievoorziening brengt de economie in gevaar

‘Duurzame energie is duur’: er zit een kern van waarheid in, maar voor de economie als geheel ziet het plaatje er toch anders uit. Investerings in niet-duurzame vormen van energie-opwekking zijn immers óók duur. Het gaat om een beschouwing van kosten en baten; in hoofdstuk 7 heb ik dit al nader toegelicht.

Er zijn de laatste tien jaar veel studies uitgevoerd naar de kosten en baten van een overschakeling naar een klimaatneutrale energievoorziening. Hieruit komt naar voren dat die inderdaad grote investeringen vraagt. Maar uit de studies blijkt ook keer op keer dat het effect van deze investeringen op de economische groei erg klein is; minder dan 0,1 procent per jaar. Berekeningen van bijvoorbeeld het Internationale Energie Agentschap in Parijs, de eerder genoemde studie van McKinsey, en het onderzoek van het Nederlandse Regieorgaan Energietransitie,⁵⁵ waarin het bedrijfsleven samenwerkt met de kennisinstellingen, laten zien dat de overschakeling naar een klimaatneutrale energievoorziening de economie beslist niet in gevaar brengt. Integendeel, het schept kansen voor vernieuwing en revitalisering van de energie-economie.

Fabel 5: de zeespiegel kan de komende 30 jaar met vele meters stijgen

Het verhaal dat de zeespiegel op een termijn van 30 tot 50 jaar met meerdere meters zou kunnen stijgen, berust op een misverstand. Dit bericht is meer dan eens verschenen in de media, maar hier worden twee dingen door elkaar gehaald. Het ene is dat de zeespiegel op de lange termijn (honderden jaren) door de opwarming van de aarde inderdaad met vele meters kan stijgen; het andere dat de broeikasgassen die de komende 30 tot 50 jaar vrijkomen bepalend kunnen zijn voor die langetermijnstijging. Het gaat daarbij om de mogelijkheid dat we binnen die periode een kantelpunt passeren, waarna er geen weg meer te

rug is wat het afsmelten van de ijskappen betreft. De komende 30 tot 50 jaar kunnen daarom bepalend zijn voor wat er in de veel verdere toekomst staat te gebeuren.

De stijging van de zeespiegel is een proces dat langzaam op gang komt. Maar eenmaal op gang gekomen is het moeilijk te stoppen. Omdat het systeem relatief traag is, zal de stijging de komende 30 tot 50 jaar vermoedelijk niet meer bedragen dan 15 tot 35 centimeter. Door die traagheid zal de verandering ook veel langer doorgaan. Na het jaar 2050 zou de snelheid van stijgen kunnen toenemen, op termijn zelfs tot meerdere meters per honderd jaar. Dat dit niet onmogelijk is, blijkt uit stijgingen van de zeespiegel in het verleden, zo'n 120.000 jaar geleden, in de laatste warme tijd toen de wereldgemiddelde temperatuur 1 à 2 graden hoger was dan nu. Toen had die stijging een natuurlijke oorzaak. Nu gaat het om het effect van de extra broeikasgassen.

Fabel 6: de menselijke beschaving wordt ernstig bedreigd door klimaatverandering

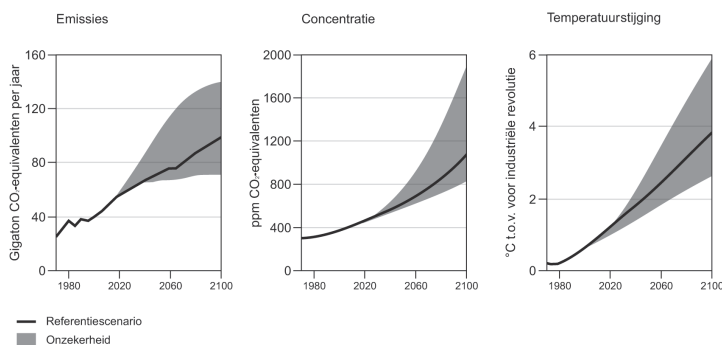
Dat het voortbestaan van het leven op aarde ernstig wordt bedreigd door klimaatverandering als gevolg van de extra broeikasgassen, gaat er in bepaalde kringen goed in. Toch is er weinig grond voor deze uitspraak. Op een iets warmere aarde zal er namelijk ook uitbundig leven mogelijk zijn. Kijk maar naar vroegere warme tijden, toen de dinosauriërs dominant waren. Klimaatverandering heeft vooral gevolgen voor de wijze waarop wij mensen leven, wonen en werken. Ik noemde het al eerder: grote steden in laaggelegen gebieden krijgen bij klimaatverandering veel vaker te maken met overstromingen. Bewoners van kleine eilandstaten zullen wellicht hun land op moeten geven. In de landbouw en voedselvoorziening zal door watertekorten grote schade kunnen optreden. Bosbranden zullen door aanhoudende droogte en hogere temperaturen vaker en uitgebreider voorkomen. Klimaatverandering is ook een bedreiging voor de biodiversiteit zoals die wij nu kennen. Er zal schade

zijn, waarschijnlijk grote schade zelfs, maar de aarde en ook de natuur zullen zich – na forse veranderingen – wel herstellen.

De echte onzekerheden

Als het gaat over de inschatting van de mate van opwarming van de aarde in 2100, zijn er vier punten waarover met recht relatief grote onzekerheid bestaat:

- Hoeveel broeikasgassen zullen er de komende vijftig tot honderd jaar vrijkomen?
- Hoeveel van die gassen zullen in de atmosfeer blijven hangen?
- Wat is de invloed van deze extra broeikasgassen in de atmosfeer op de ontwikkeling van de gemiddelde temperatuur van de aarde?
- Hoe zullen burgers, consumenten, bedrijven en de nationale en internationale politiek de komende tijd reageren op klimaatverandering en de verdere vooruitzichten daaromtrent?



Figuur 43. Onzekerheden in de opwarming van de aarde in drie categorieën: a) hoeveel broeikasgassen komen er vrij, b) hoeveel daarvan blijven hangen in de atmosfeer, en c) wat is het effect van die extra broeikasgassen die in de atmosfeer blijven hangen op de gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak. [Bron: PBL (2009)⁵⁶]

De waaier van mogelijkheden voor de eerste drie punten is weergegeven in figuur 43. Hoe de maatschappelijke systemen zullen reageren op klimaatverandering is nog onduidelijk; daarover kunnen we alleen maar speculeren.

Onzekerheid 1: hoeveel broeikasgassen komen er in de toekomst vrij?

Broeikasgassen komen niet alleen vrij bij het gebruik van fossiele brandstoffen voor energie. Ook bij het bewerken van land, bij de veeteelt en het afvalbeheer komen de gassen vrij; zie figuur 1. Daarnaast spelen natuurlijke processen een rol. Hoeveel broeikasgassen zullen er bijvoorbeeld vrijkomen als de Russische toendra's smelten? Daar kan niemand een precies antwoord op geven. In 2004 was het gebruik van fossiele brandstoffen voor 60 procent verantwoordelijk voor de (effektieve) bijdrage aan de concentratie in de atmosfeer. Daarnaast leveren ontbossing, waterstandverlaging en oxidatie van veengebieden, veeteelt en afvalbeheer ook een behoorlijke bijdrage. Hoe deze activiteiten en de daarbij toegepaste technologieën en praktijken zich in de toekomst ontwikkelen, hangt sterk af van de keuzes die in de nabije toekomst op dit gebied worden gemaakt. Daarom is de onzekerheidsmarge van de toekomstige emissie vrij breed. Zie figuur 43 (links): de bovenkant van het margegebied geeft de situatie aan bij het doortrekken van de trends in de economische ontwikkeling en in het gebruik van de traditionele brandstoffen en traditionele methoden van landgebruik. De ondergrens van de marge geeft de situatie aan in geval van kenteringen in de economische ontwikkeling en/of overstap op andere brandstoffen.

De onzekerheden die hier spelen zijn dus groot, en nader onderzoek zal ze niet of nauwelijks kleiner kunnen maken.

Onzekerheid 2: hoeveel procent van de vrijkomende broeikasgassen zal blijven hangen in de atmosfeer?

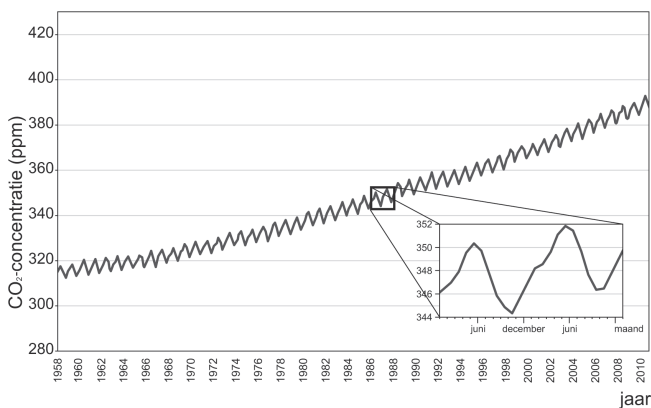
Netto gezien wordt tot nu toe de helft van de jaarlijks vrijkomende broeikasgassen in hetzelfde jaar weer opgenomen door

oceanen en door de vegetatie. De vraag is of dat in de toekomst zo door blijft gaan.

In figuur 44 zien we de groei van de concentratie van CO_2 in de atmosfeer sinds 1958. De jaarlijkse variatie laat de wisseling van de seizoenen zien. In de zomer nemen de bossen en vegetatie veel CO_2 op; in de winter, wanneer de bladeren van de bomen vallen, wordt een groot deel daarvan weer teruggebracht in de atmosfeer. Omdat het noordelijk halfrond meer land heeft, en dus meer bossen en vegetatie, komt de zomer van het noordelijk halfrond het sterkste terug in de metingen. En omdat CO_2 zich snel verspreidt over de gehele aarde wordt de dominantie van de seizoenen van het noordelijk halfrond ook zichtbaar in de CO_2 -concentratie op het zuidelijk halfrond.

De natuurlijke CO_2 -stromen van de aarde naar de atmosfeer en terug zijn veel groter dan wat door mensen netto per jaar wordt toegevoegd. De oceanen nemen ieder jaar ongeveer 92 gigaton koolstof op en geven jaarlijks ongeveer 90 gigaton terug

TOENAME VAN CO_2 -CONCENTRATIE IN DE ATMOSFEER



Figuur 44. De gemeten stijging van de gemiddelde maandelijkse concentratie van CO_2 in de atmosfeer in Mauna Loa (Hawaii). In de uitvergroting is duidelijk de invloed van de seizoenen te zien.⁵⁷

aan de atmosfeer. De bossen en andere begroeiing ademen, met het wisselen der seizoenen, ruim 120 gigaton in en iets minder weer uit. Door onze activiteiten komt er jaarlijks ruim 8 gigaton koolstof vrij in de vorm van CO_2 en CH_4 . Ongeveer de helft hiervan blijft hangen in de atmosfeer; zie figuur 26 in het kleurkatern.

Het antwoord op de vraag of ook in de toekomst ongeveer de helft van de CO_2 die vrijkomt bij menselijke activiteit opgenomen zal worden door de natuur, is afhankelijk van de respons van planten, van de bodem en van de oceanen. En die respons is waarschijnlijk weer afhankelijk van de temperatuur van de aarde en van het gehalte van CO_2 in de atmosfeer. In de meeste modellen wordt ervan uitgegaan dat de aarde ook in de toekomst, ongeveer de helft zal blijven opnemen. Er zijn echter onderzoekers die aannemelijk maken dat er in een warmere wereld minder CO_2 wordt opgenomen.⁵⁸

De mate waarin de broeikasgassen in een warmer wordende wereld worden opgenomen door vegetatie, door de bodem en door oceanen is een van de belangrijke onderzoeksvragen van deze tijd. Het antwoord is van grote invloed op de uiteindelijke stijging van de gemiddelde temperatuur.

Onzekerheid 3: hoe gevoelig is het klimaatsysteem voor de extra broeikasgassen?

De vraag hoe gevoelig de gemiddelde temperatuur van de aarde is voor een verandering van de concentratie van broeikasgassen is de belangrijkste wetenschappelijke onzekerheid van nu.

In de geologische geschiedenis van de aarde zijn er perioden geweest met meer CO_2 in de atmosfeer dan heden ten dage. En inderdaad: in die perioden was het in het algemeen warmer op aarde. Maar het is niet helemaal duidelijk wat de oorzaak was van de toename van CO_2 en hoe die toename zich verhoudt tot een stijging van de gemiddelde temperatuur.

Bij de berekening van de gevoeligheid van het klimaatsysteem voor extra broeikasgassen speelt waterdamp een belangrijke

rol. CO_2 is maatschappelijk gezien het belangrijkste broeikasgas, maar in werkelijkheid levert waterdamp (H_2O) uiteindelijk een grotere bijdrage aan de opwarming. Dat gaat zo: volgens de natuurkundige wetten kan warmere lucht meer waterdamp bevatten dan koudere lucht. Er is water genoeg op aarde, de gemiddelde concentratie van waterdamp in de atmosfeer zal zich daarom aanpassen aan de gemiddelde luchttemperatuur. Door de toename van CO_2 gaat de temperatuur van de aarde en de lucht daaromheen enigszins stijgen. Als gevolg daarvan stijgt ook de gemiddelde concentratie van waterdamp. Hierdoor gaat de temperatuur nog wat verder omhoog. CO_2 is daarbij dus leidend, waterdamp is volgend en loopt mee met de stijging van de temperatuur.

Waterdamp speelt daarnaast niet alleen een rol als broeikasgas, maar heeft ook een belangrijke rol bij de vorming van wolken, die op hun beurt de hoeveelheid zonne-instraling, en daarmee ook de temperatuur beïnvloeden. Waterdamp heeft daarom een veelzijdige invloed op de gemiddelde temperatuur. Het effect dat meer waterdamp de opwarming versterkt is het grootst, maar de andere meer dempende effecten (via wolken) maken het moeilijk een precieze schatting te maken van het netto-effect. Dit netto-effect hangt vooral af van de plaats waar die extra waterdamp gaat zitten. Meer waterdamp op het niveau van de wolken zal de versterking beperken; wolken veroorzaken 's nachts weliswaar een verhoging van de temperatuur, maar overdag geven ze koeling. Meer waterdamp in de hogere luchtlagen werkt juist temperatuurverhogend. Daar vormen zich geen wolken, maar neemt waterdamp de vorm aan van een lichte nevel, waarbij de directe broeikaswerking dominant is. Een groot deel van de spreiding in de voorspellingen van de temperatuurstijging in 2100 hangt samen met deze onzekerheid: hoeveel waterdamp komt erbij en vooral: waar gaat het zitten?

Het gaat bij opwarming echter niet alleen om dit soort natuurlijke processen, die in principe de natuurkundige wetten

volgen. De chemie van de atmosfeer en het effect van luchtverontreiniging op de stralingsbalans (en dus de temperatuur) spelen ook een grote rol. De stofdeeltjes die – naast CO₂ – vrijkomen bij verbrandingsprocessen hebben deels een koelende en deels een opwarmende werking. De netto-werking is zeer waarschijnlijk koelend; dat houdt in dat een deel van de huidige opwarming door broeikasgassen wordt gemaskeerd door de koelende werking van luchtverontreiniging. Als de lucht schoner wordt, zal de gemiddelde temperatuur gaan stijgen. Dit soort processen maken het geheel wetenschappelijk, maar ook maatschappelijk erg gecompliceerd. Toch is het mogelijk goed onderzoek te doen en langs die weg een beter inzicht te krijgen. Zo vinden onderzoekers het wetenschappelijk interessant wanneer het vliegverkeer op een continent enige dagen platligt, zoals in 2001 enkele dagen na de aanslagen op de Twin Towers. Dat geeft een schat van informatie, door de satellieten die voortdurend gegevens blijven inwinnen.

Ten slotte bestaat er onzekerheid over de zogenaamde kantelpunten in het klimaatsysteem. Hoe meer de temperatuur verandert ten opzichte van de situatie van de afgelopen 10.000 jaar, des te lastiger is het de respons te berekenen. Er zijn waarschijnlijk diverse niet-lineaire reacties in het spel, en de manier waarop die op elkaar inwerken maakt de uiteindelijke mate van opwarming moeilijk precies te berekenen.

Door de opwarming verliest de aarde sneeuw- en ijsoppervlak, waardoor het al eerder genoemde albedo-effect afneemt. Door het verdwijnen van sneeuw en ijs wordt de aarde gemiddeld donkerder en absorbeert daardoor meer warmte van de zon. Tegelijkertijd zijn er andere invloeden, zoals ontbossing en overbegrazing, waardoor de aarde lichter wordt en meer zonlicht terugkaatst. Over de netto doorwerking van dit effect bestaat onzekerheid. Onderzoek kan het inzicht in deze processen vergroten.

Daarnaast is de manier waarop de oceanen de warmte opnemen en verdelen waarschijnlijk de belangrijkste bron van onze

kerheid over de snelheid waarmee de aarde opwarmt. Door de versterking van het broeikas effect zullen de oceanen aan de bovenkant meer opwarmen. Het gaat in eerste instantie vooral om de bovenste laag, die goed gemengd is door de werking van golven en door windgedreven stroming. Deze laag is ruim honderd meter dik. Maar deze laag mengt ook langzaam met diepere lagen, door horizontaal en verticaal meanderende stromingen die de hele aarde omvatten. Deze 'rivieren' en 'watervallen' binnen de oceanen zorgen voor een langzame maar continue vermenigving van water. Het gaat daarbij om lange perioden, van honderd jaar en langer. De grote vragen waar vele oceanografen zich mee bezighouden zijn: hoeveel warmte blijft hangen in de bovenste lagen van de oceaan, hoeveel warmte vermengt zich met de diepere oceanlagen en hoe snel gaat dat?

De vier genoemde factoren – de rol van waterdamp, het effect van luchtverontreiniging, de verandering van de reflectie van de aarde en de menging van warmte in de oceanen – zijn gezamenlijk verantwoordelijk voor een groot deel van de onzekerheid omtrent de mate en de snelheid van klimaatverandering. De emissie van broeikasgassen kan worden beïnvloed, de luchtverontreiniging ook, maar de andere factoren veel minder.

Met een radicaal wereldwijd ingrijpen in de emissie van broeikasgassen kan de invloed van menselijke activiteiten op het klimaatsysteem sterk worden teruggebracht. Wanneer het lukt om de emissie van broeikasgassen wereldwijd met 80 procent terug te brengen voor 2050, is er volgens de huidige stand van de wetenschap een redelijke kans dat de stijging van de gemiddelde temperatuur tot 2100 beperkt zal blijven tot 2 graden Celsius. Blijft de emissie voortgaan, dan varieert de schatting tussen de 3 en de 6 graden stijging in 2100, waarbij die ruime marge voor het grootste deel is terug te voeren op onzekerheden in onze kennis over de vier processen die hierboven zijn beschreven.

Onzekerheid 4: wat gaan andere landen doen met dit vraagstuk?

Wat andere landen om ons heen gaan doen is, politiek gezien, de meest cruciale vraag. De bijdrage van Nederland aan de toename van broeikasgassen is ongeveer 1 procent. Zelfs voor Europa geldt dat de bijdrage minder is dan twintig procent. Uiteindelijk zullen de emissies van de zeer grote en volkrijke landen als China en India de doorslag geven, terwijl die landen nu per hoofd van de bevolking veel lager zitten dan de Verenigde Staten en Europa. Bij de internationale onderhandelingen stellen de ontwikkelingslanden zeer duidelijk dat de reeds geïndustrialiseerde landen eerst iets moeten doen aan hun relatief grote emissies; zo houden met name de Verenigde Staten en China elkaar in de houdgreep. Vragen die hiermee verband houden hebben natuurlijk te maken met hoe snel de ontwikkeling van nieuwe technologieën kan gaan, hoeveel de beperking van emissies gaat kosten en hoeveel de verschillende landen ervoor over hebben. Tot op heden hebben landen die het voortouw hebben genomen op het gebied van milieumaatregelen daar altijd economisch voordeel bij gehad. Nu het gaat om klimaatverandering is die ervaring blijkbaar niet voor alle landen even overtuigend.

De vooruitzichten

Stap voor stap dringen de resultaten van wetenschappelijk onderzoek door tot de maatschappij, in Nederland en elders in de wereld. Al vroeg was daarbij duidelijk dat er winnaars en verliezers zijn als het gaat om klimaatverandering. De noordelijke landen zullen in eerste instantie profiteren als de aarde als geheel warmer wordt. De zuidelijke landen, inclusief Zuid-Europa, zullen het moeilijker krijgen. Olie- en steenkoolproducerende landen zullen nadeel ondervinden van een beleid om de CO₂-uitstoot te verminderen. Dit kan de ontwikkeling van een internationaal gedeeld beleid in de weg staan. Toch is een gezamenlijke visie van belang voor de benadering van dit mondiale probleem, waar alle landen mee te maken hebben.

Met die overwegingen in het achterhoofd werd in 1988 het Intergovernmental Panel on Climate Change opgericht, met als doel door inbreng van wetenschappers uit diverse landen tot een gedeeld inzicht komen over de stand van de wetenschap. Dit inzicht, inclusief onzekerheden, zal periodiek worden voorgelegd aan alle regeringen. In 1990 gebeurde dit voor het eerst. Twee jaar later, in 1992, werd in Rio de Janeiro de eerste grote politieke conferentie gehouden over duurzame ontwikkeling, hierbij was klimaatverandering een van de belangrijkste onderwerpen. In Rio kwam ook het eerste internationale klimaatver-

drag tot stand. Dit verdrag vormt de basis voor het latere Kyoto Protocol, waartoe werd besloten in 1997. In dit protocol werden relatief harde afspraken vastgelegd door de geïndustrialiseerde landen om de uitstoot van CO₂ en andere broeikasgassen met in totaal 5 procent te reduceren in het jaar 2010 ten opzichte van 1990. Dit lijkt niet zoveel, maar omdat de uitstoot in de meeste landen juist zou gaan groeien, ging het om een aanzienlijke ombuiging. De Europese landen en ook Rusland hebben dit doel gehaald. In Amerika, dat het Kyoto Protocol nooit heeft willen tekenen, steeg de uitstoot van broeikasgassen in deze periode met ongeveer 20 procent.

Het Kyoto Protocol loopt van 1998 tot 2012. Voor de periode daarna zullen nieuwe afspraken gemaakt moeten worden. In 2009 werd hiertoe een conferentie georganiseerd in Kopenhagen, waarbij nagenoeg alle regeringsleiders van de wereld aanwezig waren. Hier werd de algemene doelstelling geformuleerd dat de invloed van menselijke activiteiten op het wereldklimaat niet meer mag zijn dan maximaal 2 graden stijging van de gemiddelde temperatuur. Afspraken over wie welke bijdrage hieraan levert zijn echter niet gemaakt, terwijl dat wel de bedoeling was.

Op de bijeenkomst van 2010 in Cancun, in Mexico, werd in deze richting verder gewerkt. De intenties van Kopenhagen werden bevestigd en wat steviger vastgelegd, maar afspraken over de verdeling van de 'beschikbare' ruimte voor emissies werden ook hier niet gemaakt.

De volgende bijeenkomst zal plaatsvinden in december 2011 in Durban, Zuid-Afrika. Dan zal er meer duidelijkheid moeten komen over de wijze waarop het Kyoto Protocol een vervolg krijgt. Het is echter zeer de vraag of het deze keer wél zal lukken om bindende afspraken te maken over de bijdrage van ieder van de landen aan de beperking van broeikasgassen. De verschillen in benadering blijven groot en de grote spelers lijken op elkaar te wachten bij het maken van internationaal bindende afspraken over hun eigen bijdrage aan de beperking van emissies.

Waarom aarzelen de vs over emissiebeperking?

In de vs bestaat al vanaf het begin van de ontwikkeling van een internationale klimaatpolitiek, eind jaren tachtig van de vorige eeuw, een behoorlijk grote weerstand tegen de Europese politiek, die vanaf het begin gericht is geweest op een sterke beperking van emissies. Ondanks de argumenten van eigen wetenschappers en de rapporten van hun nationaal en internationaal gerenommeerde kennisinstituten over het belang van emissiebeperking, blijven de grote bedrijven en de nationale overheid in Washington kritisch ten aanzien van concrete maatregelen. Het belang van het gebruik van goedkope fossiele brandstoffen wordt door de internationale bedrijven en de nationale politiek nog altijd hoger aangeslagen dan de risico's van klimaatverandering.

Daarnaast bestaat er in de vs grote angst ten aanzien van het ingrijpen in de energievoorziening door de overheid, nationaal en internationaal. Deze angst, of beter gezegd wantrouwen ten aanzien van de overheid is een belangrijke voedingsbodem voor de relativiserende benadering van het broeikaseffect. Deze houding, maar nog meer de koestering van deze angst door belangrijke opinieleiders en belanghebbende organisaties, is uitvoerig beschreven door de Amerikaanse auteurs Naomi Oreskes en Erik Conway in *Merchants of Doubt* (2010).⁵⁹ In dat boek laten ze zien hoe belangrijke opinieleiders in de vs, 'handelaren in twijfel' worden ze genoemd, grote nadruk leggen op de onzekerheden in de klimaatwetenschap, waarbij het beeld wordt gecreëerd dat het middel (een sturende overheid) erger is dan de kwaal (bedreiging van het klimaat).

De Amerikaanse terughoudendheid is in de kern terug te brengen tot die twee elementen: het belang van het blijvend gebruiken van goedkope fossiele brandstoffen en de bezorgdheid over het ingrijpen in de energievoorziening door de overheid. Aanvankelijk werd daarbij vooral de klimaatwetenschap ter discussie gesteld. Later ging het ook om de concurrentiepositie van de Verenigde Staten. De vs eisen dat de grote ontwikkelings-

landen zoals China en India van meet af aan meedoen met bindende afspraken over emissiebeperking. De grote bedrijven in de vs zijn bang dat CO₂-maatregelen in Amerika te veel voordeel zouden opleveren voor hun concurrenten in Azië. Maar China en ook India willen zich niet binden zolang de vs, met hun veel hogere emissies per hoofd van de bevolking, niet een eerste stap zetten.

Hoe gaat dit verder?

Tijdens de grote internationale conferentie in Kopenhagen in december 2009 is zoals gezegd internationale overeenstemming bereikt over het gezamenlijk na te streven doel: de emissies van broeikasgassen wereldwijd zodanig te beperken dat de stijging van de gemiddelde wereldtemperatuur beperkt blijft tot maximaal 2 graden Celsius. Daarnaast is afgesproken dat de rijke landen, die veel broeikasgassen produceren, geld beschikbaar stellen aan de armere landen voor drie doelen: de ontwikkeling van koolstofarme energietechnologie, de instandhouding van bossen als CO₂-reservoir en investeringen in de aanpassing aan klimaatverandering. Op de vervolgconferentie in Cancun in 2010 zijn deze afspraken bevestigd. Ook is een begin gemaakt met het opzetten van de organisatie die nodig is om deze afspraken uit te voeren. Maar erg veel vaart zit er niet in.

Ondertussen blijft de concentratie van broeikasgassen stijgen en gaat de opwarming van de aarde gewoon door. Het jaar 2010 was een van de warmste jaren sinds het begin van de metingen. Tegelijkertijd wordt er wereldwijd meer dan ooit geïnvesteerd in duurzame energiebronnen. Zonder dat daarover afspraken zijn gemaakt, neemt China hierin het voortouw. Hierdoor neemt de stijging van de emissie van broeikasgassen minder snel toe, maar de eerder genoemde doelen zullen hiermee niet worden bereikt. Daarvoor is ondersteunende en aanvullende regelgeving zeker nodig.

Ook de wetenschappelijke discussie gaat door. Het IPCC heeft hierin een leidende rol en verscherpt de procedures om toekomst

stige fouten te voorkomen. De organisatie bereidt zich voor op de volgende rapportage in 2013/2014.

De waarnemingen van de verandering van temperatuur, van regenval en droogte, van ijskappen en zeespiegelstijging zullen er waarschijnlijk voor zorgen dat klimaatverandering regelmatig aandacht blijft krijgen in de media en in de politiek. Maar vermoedelijk is dit niet genoeg om doorbraken te creëren op internationaal niveau. Het internationale overleg zal wel voortgaan, maar het gaat er dan veel meer om enige harmonisatie te brengen in de nationale en particuliere initiatieven. Het ziet er naar uit dat de bal de komende jaren vooral ligt op nationaal terrein. Voor Nederland gaat het hierbij om nationaal én Europees niveau. Daarna, over vijf à tien jaar, zal er bij voortschrijdende klimaatverandering ongetwijfeld behoefte ontstaan aan internationale sturing, omdat ook de grote internationale bedrijven uiteindelijk behoefte hebben aan een zekere harmonisatie van regels.

Europa en Nederland

De voortgang op het niveau van de internationale onderhandelingen is dus traag, maar veel landen en bedrijven wachten daar niet op; vele van hen investeren alvast in nieuwe technologie. Op termijn zullen deze investeringen zich terugverdienen. Investeerders gaan er daarbij van uit dat fossiele brandstoffen duur zullen blijven en dat het probleem van klimaatverandering zichzelf niet oplost.

De uitdaging voor onderzoekers en voor ondernemers is hierbij oplossingen te vinden die verschillende doelen dienen; oplossingen waarvan de kosten zo laag mogelijk zijn en de baten in termen van klimaat en andere functies zo hoog mogelijk. Klimaatverandering wordt hiermee een spel van kansen.

Op Europees niveau en ook op nationaal niveau zal de voortgang worden bepaald door het succes van het verbinden van klimaatbeleid met andere thema's. Het gaat daarbij om energiezekerheid, inclusief prijszekerheid, om vermindering van de



luchtverontreiniging en de verbetering van de kwaliteit van de omgeving. Tot slot gaat het om innovatie en economische vernieuwing.

Of er voldoende tijd is om de trein van klimaatverandering te stoppen, weten we niet. Maar doorgaan op hetzelfde pad, nu we weten wat er aan de hand is, lijkt niet verantwoord.

Nawoord

In dit boek heb ik op systematische wijze geprobeerd te onderzoeken of de critici die vinden dat we ons veel te druk maken over klimaatverandering gelijk hebben. Zou het kunnen dat de klimaatonderzoekers de zaak overdrijven? Op basis van onze herinneringen over zure regen en de Club van Rome kun je zo'n constatering niet bij voorbaat uitsluiten. Maar na meer dan 30 jaar onderzoek en na ruim twintig jaar van opwarming zien we een patroon van opwarming dat direct aansluit bij de berekeningen van meer dan twintig jaar geleden. Er is eigenlijk geen speld tussen te krijgen. Wel bestaat er onzekerheid over hoe die opwarming verder zal gaan: zal het 2 graden of 6 graden warmer zijn in 2100? Met de huidige stand van de kennis lijken beide uitersten evenveel kans te hebben.

Ook ben ik ingegaan op de vraag of het wel echt zo is dat de gemiddelde temperatuur van de aarde de laatste jaren blijft stijgen. Daarover worden veel vragen gesteld na de koude winters van 2009-2010 en 2010-2011. Uit meteorologisch onderzoek blijkt echter dat de kou in die jaren bij ons ruimschoots werd gecompenseerd door hogere temperaturen elders in de wereld. De Indische Oceaan was bijvoorbeeld warmer dan ooit, en het gebied rondom Groenland was zo warm dat meer ijs is gesmolten dan ooit sinds er gemeten wordt. Er is door critici gewezen

op het mogelijke gebrek aan kwaliteit van de temperatuurmetingen. Maar deze discussie is achterhaald door satellietmetingen en door de duidelijke opwarmingsverschijnselen die overal in de wereld worden geregistreerd.

Ook de vraag of de zon misschien verantwoordelijk is voor de opwarming van de afgelopen 40 jaar heb ik uitvoerig beschouwd. Die kans blijkt wel erg klein te zijn. Uit alle gegevens blijkt dat het patroon van de mondiale opwarming veel beter aansluit bij de werking van broeikasgassen dan bij extra zonneactiviteit.

Vervolgens ben ik ingegaan op de ijstijden: zijn die extreme periodes niet veel belangrijker voor het klimaat dan de extra broeikasgassen? De gegevens van vroegere ijstijden en de inzichten in het ritme dat daarbij hoort laten zien dat er over 20.000 jaar vermoedelijk inderdaad een nieuwe ijstijd begint. Maar die ijstijd kan helaas geen compensatie bieden voor de temperatuurstijging van de komende paar honderd jaar; daarvoor liggen de tijdschalen waarop een en ander speelt te ver uit elkaar. Daarnaast blijkt uit de metingen van de laatste 50 jaar dat het effect van het gebruik van fossiele brandstoffen op de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer nu al groter is dan het effect van ijstijden.

Actueel blijft de vraag hoe erg het eigenlijk is als de aarde enkele graden warmer zou worden, er zijn toch ook voordelen? Ja, die zijn er, maar de nadelen zijn vele malen groter, zeker bij een opwarming van 2 graden of meer. Het probleem voor de planeet aarde is niet zozeer die iets hogere temperatuur; in het verre geologische verleden is de temperatuur zelfs ruim 10 graden hoger geweest. Het probleem is dat er nu overal mensen wonen, en dat zich ecosystemen hebben ontwikkeld die passen bij het klimaat dat er nu is. De meest kansrijke schatting nu is dat de (wereldgemiddelde) temperatuurstijging in 2100, bij voortgang van de emissies ergens uitkomt tussen de 3 à 4 graden Celsius in 2100. Het kan wat meer zijn, het kan wat minder zijn.

Deze 3 à 4 graden stijging van de gemiddelde temperatuur is in ieder geval veel meer dan de maatschappij en de natuur kunnen verwerken zonder grote schade en zonder internationale politieke confrontaties.

Dat lijkt dramatisch, en dat is het ook. Het betekent dat naast emissiebeperking ook aanpassing aan klimaatverandering onze aandacht zal vragen. Het gaat in dat geval om processen die relatief langzaam gaan. Er is daardoor tijd om alvast rekening te houden met de effecten die onvermijdelijk zijn.

In Nederland heeft de Tweede Deltacommissie in 2008 een indringend advies gegeven over de veiligheid van ons land onder scenario's van zeespiegelstijging en verandering van rivierafvoer. Het ziet ernaar uit dat we nog vrij lange tijd in Nederland kunnen blijven wonen, mits we tijdig maatregelen nemen. Wonen en werken in ons laaggelegen land wordt daardoor wel wat duurder, maar dat is op te brengen.

De vraag is hoeveel we tegelijkertijd moeten investeren in de beperking van emissies. Dit zou als een kostenbatenvraagstuk kunnen worden benaderd: hoeveel investeringen zijn er nu nodig om klimaatschade later te voorkomen? Maar het antwoord op die vraag is lastig, omdat we de schade niet goed kunnen bepalen. Bovendien zijn de mensen die schade ondervinden anderen dan die nu de vruchten plukken van het doorgaan met fossiele brandstoffen. Een kostenbatenbenadering is daarom maar een deel van het verhaal. De vraag hoeveel we nu moeten investeren in emissiebeperking is evenzeer een morele vraag: is het te rechtvaardigen een bepaalde energiebron te blijven gebruiken wanneer we weten dat gebruik ervan kan leiden tot grote schade voor volgende generaties en voor mensen elders in de wereld?

De politieke leiders hebben hierin, toen ze bijeenkwamen in Kopenhagen, duidelijk stelling genomen op basis van de meest actuele wetenschappelijk inzichten. Zij willen de emissie zodanig beperken dat de stijging van temperatuur beperkt blijft tot maximaal 2 graden Celsius. In Cancun in 2011 hebben ze daar-

aan toegevoegd dat ook de mogelijkheid van maximaal 1,5 graden nader bekeken moet worden. Dit soort doelstellingen kan alleen worden bereikt met een drastische reductie van emissies, in de orde van 80 procent binnen 40 jaar.

Ten slotte heb ik aandacht gevraagd voor de uitstoot van broeikasgassen die te maken heeft met ons landgebruik en onze voedselvoorziening, maar waarvoor veel minder ophef wordt gemaakt dan over die uit energiegebruik. Het volume broeikasgassen uit die hoek is ongeveer 25 procent van het totaal. Het zou uiteindelijk wel eens veel moeilijker kunnen zijn deze emissies te beperken dan die rondom energiegebruik. Bij landgebruik gaat het niet alleen om ontbossing, maar ook om drainage van laaggelegen gebieden en om het ploegen van de grond. In de voedselvoorziening gaat het om methaangassen die vrijkomen bij vooral herkauwers, maar ook uit mest. En het gaat om het gebruik van kunstmest. Dit zijn vraagstukken die vermoedelijk steeds pregnanter op de agenda zullen gaan komen. Vooral het eten van vlees blijkt van grote invloed te zijn op de emissie van broeikasgassen; veel meer dan een vegetarisch dieet.

Het zal uit dit boekje duidelijk zijn geworden dat klimaatverandering ons nationaal en internationaal nog lange tijd indringend zal bezighouden. Een dankbaar gespreksonderwerp, net als het weer, maar minder vrijblijvend. Het klimaatvraagstuk kan grotendeels door innovatie en technologische vernieuwing worden opgelost. Daar moeten we dan wel in investeren en er ook ons gedrag op aanpassen. Tegelijkertijd is het spannend om te zien hoe andere mensen en landen hiermee om gaan. Voor ieder die het wil zien: er is nog veel werk te doen.

Pier Vellinga

Dankwoord

Gaarne wil ik ieder die heeft meegeholpen dit boekje te schrijven bedanken. Ten eerste de collega-onderzoekers en vrienden die commentaar hebben gegeven op eerdere versies. Voor het opmaken van de figuren, de voetnoten en hun inhoudelijke suggesties bedank ik Pieter Pauw en Jurre Tanja.

Noten

- 1 Broeikasgassen zijn gasmoleculen die eigenschappen hebben om warmte te absorberen. Omdat zij als een deken rond de aarde liggen (in de atmosfeer), houden zij warmte van de aarde vast. Voorbeelden van broeikasgassen zijn CO₂ (koolstofdioxide), H₂O (water), N₂O (lachgas), NO_x (stikstofoxide), O₃ (ozon), CH₄ (methaangas) en verschillende CFK's.
- 2 Langs de Y-as staan CO₂-equivalenten: CH₄, N₂O en fluorgassen hebben een ander aardopwarmingsvermogen (global warming potential). Bron: IPCC, AR4 synthesis report. www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/spms2.html.
- 3 Met 'extra broeikasgassen' worden in dit boek bedoeld de broeikasgassen die door menselijke activiteiten zijn vrijgekomen en blijven hangen in de atmosfeer, waardoor de concentratie sinds het begin van de industriële revolutie met bijna 40 procent is toegenomen.
- 4 Met 'de (gemiddelde) temperatuur van de aarde' wordt in dit boek steeds bedoeld: de (gemiddelde) temperatuur aan het aardoppervlak.
- 5 Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is opgericht in 1988 door de World Meteorological Organization (WMO) en het United Nations Environment Programme (UNEP) om periodieke analyses te maken van de wetenschappelijke basis voor het begrijpen van de risico's van de door mens veroorzaakte klimaatverandering, de impact daarvan, en de opties voor mitigatie en adaptatie. Onafhankelijke experts beoordelen daarbij bestaande wetenschappelijke en technische kennis, en vatten deze samen

- voor beleidsmakers. Nationale overheden (leden van de WMO en UNEP) komen tot overeenstemming over de focus en de indeling van de periodieke rapporten, nomineren auteurs, bespreken de resultaten, en stemmen in met de ‘summary for policymakers’. Omdat het om een breed onderwerp gaat, en er altijd meer dan duizend wetenschappers van over de hele wereld (op vrijwillige basis) aan meewerken, is het opstellen van de rapporten een ontzettend ingewikkeld proces. Bron: Inter Academy Council (2010), *Climate Change Assessments. Review of the Processes and Procedures of the IPCC. IAC Committee to Review the IPCC*, oktober 2010.
- 6 Een donkere vlek op de fotosfeer van de zon, contrasterend met de omgeving. Ze zijn donker omdat ze koeler zijn dan de omliggende gebieden. Toch worden zonnevlekken geassocieerd met een toename van zonneactiviteit omdat de gebieden om de zonnevlek heen wel heter worden (zie ook www.swpc.noaa.gov/info/glossary.html en www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/wg1/244.htm).
 - 7 Maandgemiddelde aantal zonnevlekken van 1900 tot en met september 2010. Geëgaliseerd op basis van een voortschrijdend twaalf maanden-gemiddelde. Bron: Solar Influences Data Analysis Centre (België). Zie sidc.oma.be/sunspot-data/.
 - 8 Vijftigjarig gemiddelde van het aantal zonnevlekken dat waargenomen is met het blote oog, onder andere in Europa, China, Korea, Japan, India, het Midden-Oosten en door de Maya's. De waarde van de observaties is niet altijd even duidelijk, en ook zijn er natuurlijk zonnevlekken niet gezien in het verleden, die er wel waren. Het feit dat deze Y-as iets anders aangeeft dan de Y-as van figuur 1 (de 11-jarige cyclus) heeft te maken met de manier van de berekening die gebruikt is om het aantal vast te stellen. In die zin zijn de grafieken niet geheel vergelijkbaar, maar het gaat om de verhoudingen binnen de losse grafieken. Bron: Vaquero (2007), ‘Historical Sunspot Observations: a Review’. *Advances in Space Research*. Vol. 40 (2007), pp. 929-941.
 - 9 De officiële definitie van El Niño is een temperatuurafwijking van het wateroppervlak in gebied Niño 3.4. Dit gebied ligt midden in de Grote Oceaan tussen Australië en Mexico. Wanneer de voortschrijdende driemaanden-gemiddelde temperatuur een halve graad hoger is spreekt men van El Niño. Wanneer deze een halve graad lager is dan spreekt men van La Niña. Bron: www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/ en [152](http://www.climate-</div><div data-bbox=)

- watch.noaa.gov/2009/articles/climate-variability-oceanic-nino-index.
- 10 Ongeveer 75 procent van de La Niña-gevallen leidt tot bovengemiddelde neerslag in Noord- en West-Australië. In dit geval heeft deze neerslag geleid tot overstromingen die normaal gesproken maar eens per honderd jaar voorkomen. De websites van de NASA en NOAA hebben zeer veel informatie beschikbaar hierover. Zie onder meer www.climatewatch.noaa.gov/2010/articles/2010-la-nia-continuing-in-the-new-year/2, www.nasa.gov/topics/earth/features/strong-la-nina.html en www.nasa.gov/topics/earth/features/patzert-qa.html.
 - 11 Verandering van temperatuur ten opzichte van het gemiddelde van 1980-1999. De grijze band laat de 'best estimate' zien: in dit geval vanaf de laagst te verwachten temperatuurstijging onder het B1-scenario, tot de hoogst te verwachten temperatuurstijging onder het A2-scenario. Bron: IPCC AR4, WG1. Zie: www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/figure-spm-5.html.
 - 12 De Club van Rome bestaat overigens nog steeds, en is nog altijd actief op de beschreven thema's. Zie: www.clubofrome.org/eng/home/.
 - 13 De projectie van CO₂-concentratie in de atmosfeer komt uit het rapport van de Club van Rome; zie figuur 15 op pagina 56. Bron: Meadows, D., D. Meadows, J. Randers, W. Behrens (1972), *De grenzen aan de groei*. Uitgeverij Het Spectrum N.V. Utrecht/Antwerpen. De werkelijk waargenomen waarden zijn jaargemiddelden van metingen van NOAA op Mauna Loa (Hawaiï). Zie: www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/.
 - 14 De jaarlijkse uitstoot van de verzurende stoffen stikstofoxiden (NO_x), ammoniak (NH₃) en zwaveldioxide (SO₂), in kiloton (10⁶ kilo) per jaar. Bron: emissieregistratie, www.compendiumvoordeleefomgeving.nl.
 - 15 Hoeveelheid Chlorofluorocarbons 11 (CFC-11; CCl₃F), Chlorofluorocarbons 12 (CFC-12; CCl₂F₂) en Chlorofluorocarbons 113 (CFC-113; CCl₂FC-ClF₂) in de atmosfeer, in deeltjes per triljoen. Bron: meetdata van Cape Grim in Australië, Tasmanian Planning Commission, State of the Environment Report 2009 (soer.justice.tas.gov.au/2009/indicator/43/index.php).
 - 16 Bron: *De Telegraaf*: www.telegraaf.nl/binnenland/5887815/_Cramer_Fout_klimaatrapport_kwalijk_.html.
 - 17 Het wereldgemiddelde verloop van de temperatuur ten opzichte van 1961-1990, op drie verschillende manieren gemeten. NASA/GISS en HadCRUT3 geven een combinatie van temperatuur van oppervlaktewater van zee en

- luchttemperatuur op twee meter hoogte boven land. Verschillende satellieten met een MSU-instrument meten een gemiddelde temperatuur over de onderste acht kilometer van de atmosfeer. De waarde van het jaar 2010 is gebaseerd op de laatste metingen die bekend zijn gemaakt tijdens het schrijven van dit boek (medio januari 2011). Bron: KNMI (www.knmi.nl/cms/viewimage.jsp?number=77836 en climexp.knmi.nl).
- 18 Gemiddelde temperatuur per decennium, vergeleken met de gemiddelde temperatuur van 1961-1990. Hoe langer het blokje, des te groter de onzekerheid. Bron: Arndt, D. S., M. O. Baringer, and M. R. Johnson, Eds., '2010: State of the Climate in 2009'. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91 (7), S1-S224. (www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/cmb/bams-sotc/climate-assessment-2009-lo-rez.pdf).
- 19 Zie figuur 9 op pagina XXIII van het IPCC-rapport van werkgroep 1: Houghton, J.T., Jenkins, G.J. & Ephraum, J.J. (1990). *Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 1990.
- 20 De IPCC-scenario's en de temperatuurreeks 'IPCC-rapport, 1990' komen uit het *IPCC First Assessment Report* van: Houghton, J.T., Jenkins, G.J. & Ephraum, J.J. (1990), *Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 1990. (www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm). De meetreeksen NASA/GISS en MSU-satelliet komen van het KNMI (www.knmi.nl/cms/viewimage.jsp?number=77836 en climexp.knmi.nl).
- 21 Zie bijvoorbeeld: Velicogna, I. (2009). 'Increasing Rates of Ice Mass Loss from the Greenland and Antarctic Ice Sheets Revealed by GRACE'. *Geophysical Research Letters*. Vol. 36, L19503, 4 pp.
- 22 De laatste meetdatum is 30 mei 2010. Dat is meer dan drie maanden voor de maand september, waarin normaal gesproken Het minimum van het jaar bereikt wordt. Er is een neerwaartse trend te zien van een verlies van 3400 kubieke kilometer ijs per tien jaar. De achteruitgang van het oppervlak van het noordpoolijs laat een soortgelijke trend zien. Tussen 1979 en 2010 ging het met 2,4 procent per tien jaar achteruit. Bron: National Snow and Ice Data Center, University of Colorado at Boulder (zie: <http://nsidc.org/arcticseaicenews/2010/060810.html>).
- 23 Bron: Hansen, J., S. Makiko, P. Kharecha, D. Beerling, R. Berner, V. Mas-

- son-Delmotte, M. Pagani, M. Raymo, D.L. Rover & J.C. Zachos (2008). Target Atmospheric CO₂: 'Where Should Humanity Aim?' *The Open Atmospheric Science Journal*. Vol 2, no. 15 pp. 217-231.
- 24 Voorspellingen volgens de KNMI G- en W-scenario's voor 2050 en 2100. Het G-scenario gaat uit van een gereduceerde uitstoot van CO₂ en een minimale reactie van het klimaat hierop. W+ gaat uit van grotere uitstoot en een sterkere reactie van het klimaatsysteem. Bron: KNMI, 2008 (www.knmi.nl/klimaatscenarios/knmio6/gegevens/).
- 25 Bron: Lenton, T.M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J.W., Lucht, W., Rahmstorf, S. & Schnellhuber, H.J. (2008). 'Tipping elements in the Earth's climate system'. *PNAS*, vol. 105, no. 6, pp. 1786-1793
- 26 De meetdata zijn verkregen aan de hand van de analyse van sedimenten uit de Rode Zee en koralen. Het figuur is gebaseerd op figuur 2c in: Rohling, E.J., Grant, K., Hemleben, Ch., Siddall, M., Hoogakker, B.A.A., Bolshaw, M. & Kucera, M. (2008). 'High rates of sea-level rise during the last interglacial period'. *Nature Geoscience*, vol 1, pp. 38-42.
- 27 pCO₂ is de partiële druk van het gas CO₂. Het meten van de partiële druk geldt als een goede graadmeter voor het meten van de hoeveelheid van een bepaald gas in een mengsel van gassen (concentratie). De pH-meting komt van oppervlaktewater (0-30 m diepte). Bron: meetreeks van station ALOHA. In: Dore, J.J., R. Lukas, D.W. Sadler, M.J. Church & D.M. Karl (2009). 'Physical and biochemical modulation of ocean acidification in the central north Pacific'. *PNAS*, vol. 106, no. 30, pp. 12235-12240.
- 28 De wetenschappers maken aannemelijk dat de kans op een overstroming door hevige neerslag de afgelopen vier decennia in Engeland en Wales significant is toegenomen, wat zij op hun beurt relateren aan klimaatverandering. Zie Pall, P., Aina, T., Stone, D.A., Scott, P.A., Nozawa, T., Hilberts, A.G.J., Lohmann, D. & Allen, M.R. (2011). 'Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000'. *Nature* 470, 382-385 (17 february 2011). www.nature.com/nature/journal/v470/n7334/full/nature09762.html
- 29 Zie: Van den Biesen, P. (2011). *Will Civil Society Take Climate Changers to Court? A Perspective from Dutch Law*. Nog te verschijnen, Universiteit van Maastricht.
- 30 Zie: The World Bank (2010). *Economics of Adaptation to Climate Chan-*

- ge. *Synthesis Report. The World Bank, Washington D.C.* climatechange.worldbank.org/sites/default/files/documents/EACCSynthesisReport.pdf.
- 31 Het gat in de ozonlaag in de typische meetmaand september in 1979, 1988, 2000 en 2010. De meeteenheid (Dobson Unit) geeft de hoeveelheid ozon aan wanneer je per locatie in een rechte kolom alle ozon vanaf de aarde tot in de ruimte bij elkaar op zou tellen bij een temperatuur van 0 graden Celsius en onder een druk van 1013,25 millibar. Bron: NASA (ozonewatch.gsfc.nasa.gov/).
- 32 Vanaf ongeveer 1890 is zichtbaar dat de mondiale, jaarlijkse gemiddelde temperatuur tot 15 kilometer hoogte aan het stijgen is, terwijl de temperatuur daarboven (tot 30 kilometer hoogte) juist afneemt. In de met hokjes gearceerde stukken overtreft de temperatuurverandering twee standaarddeviaties van de jaarlijkse gemiddelde temperatuur van de jaren 1001-2000 in een wereld zonder menselijke uitstoot van broeikasgassen. Daar kan de temperatuurverandering dus eigenlijk niet aan natuurlijke oorzaken worden toegeschreven. Bron: Schwarzkopf, M.D. & V. Ramaswamy (2007), 'Evolution of Stratospheric Temperature in the 20th Century'. *Geophysical Research Letters*, Vol 34.
- 33 De mediaan is het midden van alle meetgegevens (dus niet hetzelfde als het gemiddelde). De kaarten zijn gemaakt aan de hand van de 'Sea Ice Index' van het National Snow and Ice Data Center van de Universiteit van Colorado in Boulder, dat al sinds 1979 satellietopnamen bijhoudt van het poolijs (zie: nsidc.org/data/g02135.html en nsidc.org/data/seaice_index/archives/image_select.html).
- 34 In deze figuur zijn kleinere stromen (zoals bosbranden en sedimentatie van organisch materiaal op oceaانبodems) en kleinere reservoirs (zoals marine-organismen en sediment op oceaانبodems) bewust niet opgenomen om het figuur overzichtelijk te houden. De cijfers gelden voor een CO₂-concentratie van +/- 380 ppm en zijn ontleend aan: IPCC (2007), Climate Change 2007: Working Group 1: The Physical Science Basis zie figuur 7.3 (www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/figure-7-3.html) en tabel 7.1 (www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch7s7-3-1-3.html#table-7-1).
- 35 Bron bovenste figuur: NASA (zie: earthobservatory.nasa.gov/Features/WorldOfChange/). Bron onderste twee figuren: IPCC. In het originele figuur staan ook veranderingen voor 2020 en 2050 aangegeven, alsmede projec-

- ties volgens scenario A1B. Bron: Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver & Z.-C. Zhao: 2007: Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 36 Zie: www.telegraph.co.uk/travel/travelnews/7941029/Russian-wildfires-provoke-Foreign-Office-warning.html.
- 37 Zie: www.news.bbc.co.uk/2/hi/in_pictures/6253114.stm.
- 38 De drie *artist impressions* van de waterplaza zijn gemaakt door DE URBANISTEN; de foto van het groene dak is gemaakt door Rotterdam Climate Proof.
- 39 Deze figuur stond in 'Hoogtij in de Delta', de inaugurele rede van Pier Veltinga aan de Wageningen Universiteit (16 oktober 2008). Zie voor de tekst en film van de presentatie de links onder noot 44.
- 40 Gemiddelde temperatuur in Nederland, gebaseerd op de meetstations De Bilt, Winterswijk, Oudenbosch, Gemert, en na 1950 ook Gemel en Eindhoven. Bron: KNMI, climexp.knmi.nl.
- 41 Jaarlijkse neerslag bij meetstation De Bilt. Bron: KNMI, climexp.knmi.nl.
- 42 De grafiek is geïndexeerd. In het jaar 2000 is het aantal dieren van koude- en warmteminnende soorten gelijk gesteld aan 100 procent, en gebaseerd op dat nummer zijn het aantal soorten in de overige jaren weergegeven. Voor de originele grafiek, zie het Compendium voor de Leefomgeving (www.compendiumvoordeleefomgeving.nl/dossiers/nl0065-effecten-van-klimaatverandering-op-de-natuur.html?i=9-55). Voor meer informatie over welke soorten koude- of warmteminnend zijn, zie: www.cbs.nl/nl-NL/menu/themas/natuur-milieu/publicaties/artikelen/archief/2007/2007-2289-wm.htm).
- 43 Scenario's voor de bovengrenzen van zeespiegelstijging in 2100. De lengte van de kolom laat de onzekerheid zien. Bron: Deltacommissie (2008), *Samen werken met water. Een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst. Bevingingen van de Deltacommissie 2008* (www.deltacommissie.nl).
- 44 Deze figuur stond in 'Hoogtij in de Delta', de inaugurele rede van Pier Vel-

- linga aan de Wageningen Universiteit (16 oktober 2008). Zie ook: wurtv.wur.nl/wurtv/viewer.html?path=aulatv/2008/10/16/1/ voor de film van de inaugurele rede, en kennisvoorklimaat.klimaatonderzoeknederland.nl/nl/25222685-kvk_Nieuws.html?location=23641140359265,10026100,true,true voor de tekst.
- 45 De kustverdediging (rode lijnen) liggen op een hoogtekaart van Nederland. Dit figuur stond in 'Hoogtij in de Delta', de inaugurele rede van Pier Vellinga aan de Wageningen Universiteit (16 oktober 2008). Zie voor de tekst en film van de presentatie de links onder noot 44.
- 46 Bron: Pijnappels, M.H.J. & Sedee, A.G.J. (2010). Klimaat als kans. Adaptatie aan klimaatverandering in de ruimtelijke ordening. Stichting, Kennis voor Klimaat, Utrecht. kennisvoorklimaat.klimaatonderzoeknederland.nl/nl/25223033-Klimaat_als_Kans.html.
- 47 Bron: World Bank (2010). data.worldbank.org/indicator/EG.USE.PCAP.KG.OE en www.google.com/publicdata?ds=wb-wdi&met=eg_use_pcap_kg_oe&tdim=true&dl=en&hl=en&q=world+energy+use.
- 48 McKinsey deed voor de European Climate Foundation een onderzoek, waaruit bleek dat de EU haar uitstoot van CO₂ met 80 procent kan verminderen, op basis van nu al bestaande technieken. De energietoevoer blijft daarbij betrouwbaar, en de operatiekosten worden lager dan die van de huidige energievoorziening. Mensen hoeven hun stijl van leven niet grondig te veranderen. Zie: ECF (2010). Roadmap 2050: a practical guide to a prosperous, low carbon Europe www.roadmap2050.eu/attachments/files/Volume1_fullreport_PressPack.pdf.
- 49 Het originele figuur is bewerkt: het is omgezet van gigaton C per jaar naar gigaton CO₂ per jaar. Bron: Stehfest, E., L. Bouwman, D.P. van Vuuren, M.G.J. den Elzen, B. Eickhout & P. Kabat (2009), 'Climate benefits of changing diet'. *Climatic Change*, 95:83-102.
- 50 Bron: tyndall1861.geologist-1011.mobi/Tyndall(1861-Frontispiece).png.
- 51 Bron: Van Dorland, R. (2010), 'Het broeikaseffect op aarde en haar buurplaneten', *Zenith*, themanummer planeetatmosferen. Pp. 408-414, september 2010.
- 52 Verschillende isotopen van een chemisch element hebben een verschillend gewicht. Ze hebben hetzelfde aantal protonen, maar een verschillend aantal neutronen. In het geval van zuurstof kan de verhouding tussen ¹⁶O (meer

- dan 99 procent van alle zuurstof) en ^{18}O ons iets vertellen over verdamping en neerslag in het verleden, en daardoor over de temperatuurstijgingen.
- 53 De zesde jaargang van dit boek is uitgegeven in april 2011. Zie: Van Dorland, R., Dubelaar-Versluis, W. & Jansen, B. (2011), *De Staat van het Klimaat 2010*, uitgave PCCC, De Bilt/Wageningen.
- 54 Zie: Miskolczi, F.M. (2010), 'The stable stationary value of the Earth's global average atmospheric Planck-weighted greenhouse-gas optical thickness', *Energy & Environment*, vol. 21, no. 4, pp. 243-262.
- 55 Bron: Koopmans, C., B. Tieben, M. van den Berg & D. Willebrands. (2010). *Investeren in een schone toekomst. De kosten en baten van een duurzame energiehuishouding in Nederland*. SEO Economisch Onderzoek, Amsterdam, juli 2010.
- 56 Bron: Van Vuuren, D.P., Hof, A.F. & den Elzen, M.G.J. (2009), *Meeting the 2°C Target. From Climate Objective to Emission Reduction Measures*. Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), Bilthoven, publ. nr. 500114012. (zie www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/500114012.pdf)
- 57 De concentratie is verhoogd van ongeveer 315 naar 390 parts per million sinds 1958. De jaarlijkse fluctuatie (zie uitvergroting) komt door het verschil in landmassa tussen het noorden en het zuiden van de wereld. Het noorden is vele malen groter, dus als daar de zomer aanbreekt neemt de vegetatie veel CO_2 op, die het aan het einde van de herfst weer begint uit te stoten wanneer het blad van de bomen valt. Bron: meetdata van Mauna Loa (Hawaii), NOAA (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/).
- 58 Tussen 1958 en 2008 is de het percentage CO_2 dat jaarlijks in de atmosfeer achterblijft met 0,3 % per jaar gestegen. Bron: Le Quere, C., Raupach, M.R., Canadell, J.G., Marland, G., Bopp, L., Ciais, P., Conway, T.J., Doney, S.C., Feely, R.A., Foster, P., Friedlingstein, P., Gurney, K., Houghton, R.A., House, J.I., Huntingford, C., Levy, P.E., Lomas, M.R., Majkut, J., Metzl, N., Ometto, J.P., Peters, G.P., Prentice, I.C., Randerson, J.T., Running, S.W., Sarmiento, J.L., Schuster, U., Sitch, S., Takahashi, T., Viovy, N., van der Werf, G.R. & Woodward, F.I. (2009), 'Trends in the Sources and Sinks of Carbon Dioxide', *Nature Geoscience* 2, pp. 831-836.
- 59 Referentie naar het boek: Oreskes, N. & Conway, E.M. (2010), *Merchants of Doubt. How a Handful of Scientists Obscured the Truth on Issues from Tobacco Smoke to Global Warming*. Bloomsbury Press, New York, p. 355.

