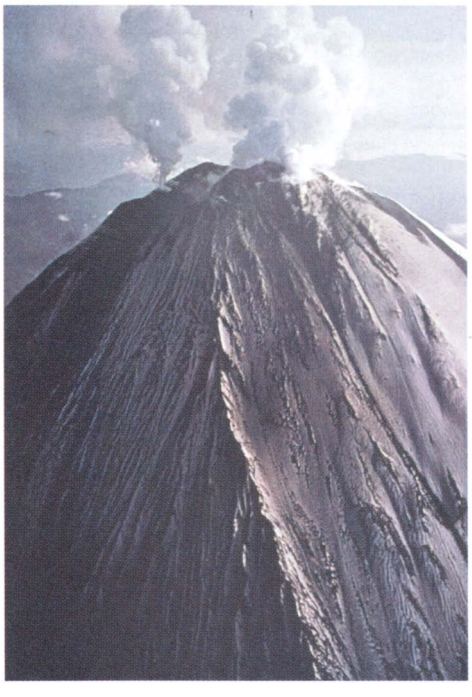
Kooldioxide en Klimaat in geologisch perspectief

Voordracht tijdens het symposium *Geologie en Milieu: Zin en Onzin*, ter gelegenheid van de viering van het zesde lustrum van de Stichting GEA op 11 maart 2000 te Leusden

door Harry N.A. Priem
Hoogleraar planetaire geologie Universiteit Utrecht en curator Artis Geologisch Museum

Kooldioxide, CO_2, is een natuurlijk en voor het leven onmisbaar bestanddeel van de dampkring. Evenals een aantal andere gassen die van nature in de dampkring aanwezig zijn – waterdamp, methaan (CH_4), lachgas (N_2O) en ozon (O_3) – heeft het de eigenschap dat het de zonnestraling van korte golflengte ongehinderd doorlaat, maar de langgolvige warmtestraling van het aardoppervlak absorbeert. De aangeslagen moleculen stralen op hun beurt langgolvige warmtestraling in alle richtingen uit, dus gedeeltelijk ook terug naar het aardoppervlak. We noemen dit effect het **broeikaseffect** en de betreffende gassen **broeikasgassen**. Zij fungeren als een soort deken, waardoor het aan het aardoppervlak warmer is dan het zonder dit effect zou zijn.

Ruim 100 jaar geleden wees de chemicus en Nobelprijswinnaar Svante Arrhenius erop dat de stijging van de hoeveelheid kooldioxide in de dampkring door de grootschalige verbranding van fossiele brandstoffen (toen voornamelijk steenkool) het natuurlijke broeikaseffect versterkt. De aarde zou daardoor warmer worden. Hij berekende dat een verdubbeling van de hoeveelheid kooldioxide de temperatuur met 5 à 6 °C doet toenemen.
Deze hypothese ligt ten grondslag aan het huidige apocalyptische rampscenario van de *global warming*, dat volgens de milieubeweging en in hun kielzog vele politici de mensheid bedreigt.
Dat wil echter niet zeggen dat hierover wetenschappelijke consensus bestaat, zoals soms wordt gesuggereerd. Integendeel.



Afb. 1. Sangay vulkaan (5.319 meter hoog) in de Andes van Ecuador. De rij vulkanen langs de Pacifische kust ligt boven de subductiezone van de oceanische platen onder het Amerikaanse continent. De kooldioxide die bij vulkanische processen wordt uitgestoten is op grote diepte vrijgekomen bij het (partieel) smelten van mantelgesteenten en sedimentgesteenten. In het laatste geval gaat het om gerecycled kooldioxide, dat vroeger door biologische en chemische processen aan de dampkring is onttrokken.

Warmtebudget

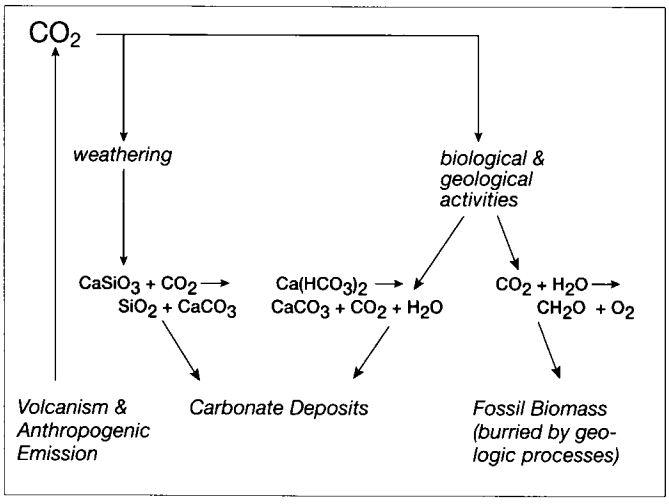
De warmtehuishouding in de dampkring wordt voor 99,7% bepaald door de inkomende stralingsenergie van de Zon. De rest is radiogene warmte door het verval van radioactieve stoffen, wrijvingswarmte als gevolg van getijdebewegingen door de aantrekkende krachten van zon en maan, en antropogene warmte door de verbranding van fossiele brandstoffen (fossiele zonne-energie). De aarde is in stralingsevenwicht – zij straalt evenveel warmte uit als zij van de zon ontvangt. Ongeveer 30% van de inkomende stralingsenergie wordt direct door wolken, ijs en aardoppervlak gereflecteerd. De rest wordt via allerlei complexe en onderling vaak samenhangende processen in dampkring, hydrosfeer en biosfeer als infrarode straling naar de ruimte gezonden.

Als de temperatuur aan het oppervlak uitsluitend door het stralingsevenwicht zou worden bepaald, zoals het geval is op de maan, zou het veel kouder zijn: -18°C in plaats van de werkelijke gemiddelde temperatuur van +15°C, een verschil van 33°C.
Dat het zo veel warmer is, komt omdat de aarde géén kale gesteentebol is, maar gehuld is in een dampkring met een hydrosfeer en een biosfeer. Hierin voltrekken zich allerlei processen die de warmtehuishouding mede bepalen. Eén daarvan is het broeikaseffect, waarbij het belangrijkste broeikasgas niet kooldioxide is, maar waterdamp: de watermoleculen in de dampkring nemen 60 à 70% van de 'broeikas-opwarming' voor hun rekening. Andere fysische processen dan het broeikaseffect dragen echter veel meer bij aan de opwarming met 33°C.
Zoals de mondiale 'warmtepomp', die functioneert door de verdamping van water aan het oppervlak en condensatie in hogere luchtlagen.

Kooldioxide

Het van nature in de dampkring aanwezige kooldioxide vindt zijn oorsprong in de ontgassing van de aarde (in hoofdzaak via vulkanen en mid-oceanische ruggen) en in komeetinslagen — zowel vulkanische gassen als de ijscomponent van komeetkernen bestaan voor ruwweg 80% uit water en 20% uit kooldioxide. Afb. 1. De laatste eeuw is er ook een aanzienlijke toevoer door menselijke activiteiten. Anderzijds wordt voortdurend kooldioxide aan de dampkring onttrokken door biologische, chemische en geologische processen (afb. 2). Zowel de natuurlijke toevoer als de verwijderingsprocessen zijn variabel, zodat de concentratie kooldioxide door de geologische tijd fluctueert.

Drie kolossale mondiale 'pompen' zorgen voor de onttrekking van kooldioxide: de biologische vorming van carbonaten in de oceanen, de *biologisch-chemische verwering* op het land, en de *biologisch-geologische vorming van fossiele biomassa*. Dank zij deze 'pompen' ontstonden de enorme afzettingen van kalksteen en fossiele biomassa (steenkool, bruinkool, turf, aardolie, aardgas en dispers organisch materiaal in sedimenten). Als alle kooldioxide dat nu in carbonaatgesteenten en fossiele biomassa ligt opgeslagen in de dampkring zou zijn gebleven, zou de druk van kooldioxide aan het aardoppervlak ongeveer 70 bar bedragen, 200.000 maal de huidige druk. Onze dampkring zou dan veel gelijkenis vertonen met die van Venus.

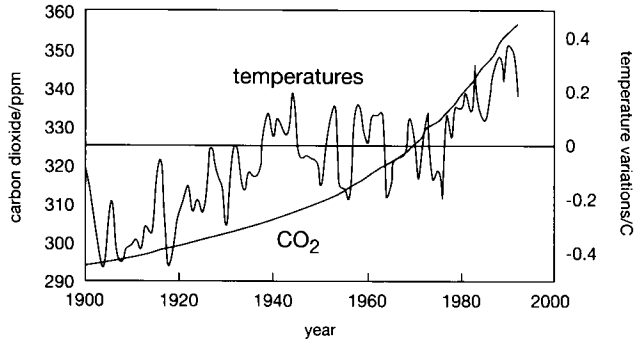


Afb. 2. Schema van het mondiale geologisch-biologische systeem dat de CO_2-concentratie in de dampkring reguleert.

De 'pompen' gaan harder werken als de hoeveelheid kooldioxide stijgt. Zo bevat de dampkring nog slechts de helft van de naar schatting 1.166 gigaton kooldioxide die sinds 1850 door menselijke activiteiten in de dampkring is gebracht. De rest is al weer verwijderd – geologisch bezien uiterst snel.

Antropogene versterking van het broeikaseffect

Sinds 1952, toen met systematische monitoring is begonnen, is de concentratie kooldioxide in de dampkring toegenomen van 312 ppm tot 360 ppm (afb. 3). Op basis van de analyse van ijskernen meent men dat de stijging omstreeks 1850 heeft ingezet, vanaf een pre-industrieel niveau van ongeveer 280 ppm. Een toename dus van 25% in anderhalve eeuw, waarvan het overgrote deel in de 20ste eeuw. Het kan niet anders dan dat menselijke activiteiten, in het bijzonder de verbranding van fossiele brandstoffen, hiervoor grotendeels of geheel verantwoordelijk zijn. Maar leidt de hierdoor veroorzaakte **versterking van het natuurlijke broeikaseffect** tot mondiale opwarming met rampzalige gevolgen voor de mensheid? Dit scenario geldt tegenwoordig als 'politiek correct' en bracht een vorige milieuminister er zelfs toe om CO_2 (waarschijnlijk de enige chemische formule die iedere politicus en milieuactivist vlot kan uitspreken) als 'giftig gas' te bestempelen!

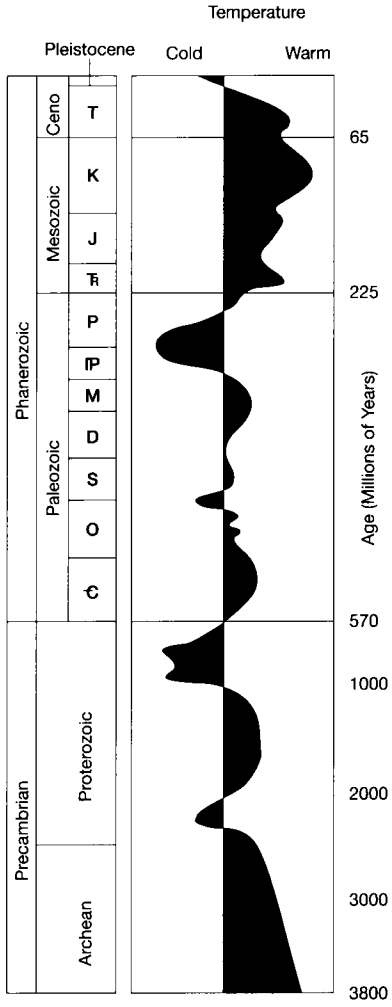


Afb. 3. Verloop van de gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak en de kooldioxide-concentratie in de dampkring sinds 1900.

Er zijn aanwijzingen dat de temperatuur van de onderste luchtlagen in de 20ste eeuw mondiaal gemiddeld met ongeveer een halve graad Celsius is gestegen (hoewel satellietmetingen, die in 1979 zijn begonnen, géén systematische opwarming laten zien). Het is echter niet waarschijnlijk dat deze opwarming op het conto van het versterkte broeikaseffect kan worden geschreven. Immers, de opwarming gaat geenszins gelijk op met de continue stijging van de concentratie kooldioxide (afb. 3). Tot 1942 nam de temperatuur met talrijke kortstondige schommelingen toe, daarna was er tot 1977 een afkoeling, om sindsdien weer te stijgen. Als we de afkoeling van 1942 tot 1977 lineair naar de toekomst doortrekken, zou het in het jaar 2100 zo'n 0,2°C kouder zijn – wat sommige klimatologen in de jaren zeventig de alarmbel deed luiden over een naderende ijstijd.

Klimaatschommelingen

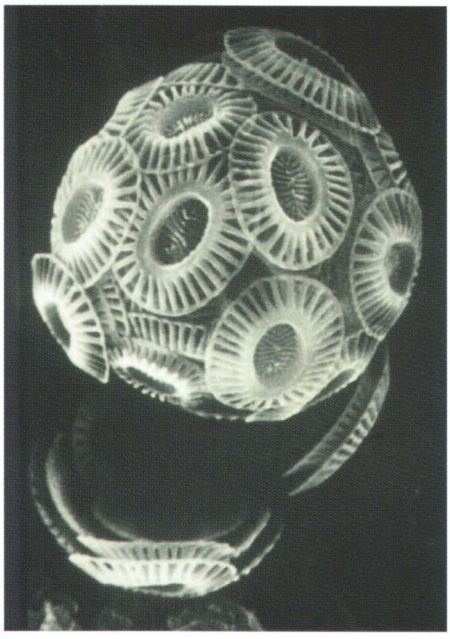
Geologen staan in het algemeen sceptisch tegenover dergelijke *doomsday*-scenario's. Zij zien onze planeet immers als een voortdurend veranderend, dynamisch systeem. Dat geldt ook voor het klimaat, dat wordt bepaald door talloze onderling samenhangende en op elkaar inwerkende geologische, chemische, fysische en biologische processen. Het (versterkte) broeikaseffect is hierbij slechts één factor. Uit het geologisch archief blijkt dat alle klimaatbepalende parameters variabel zijn, op korte en op lange termijn. Bovendien zijn er grote variaties in de activiteit van de zon, waarvan de invloed op het klimaatsysteem pas de laatste jaren wordt onderkend.



Afb. 4. Verloop van de gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak door de geologische tijd. Links: ijstijd-episoden.

In het geologische verleden waren er voortdurend variaties in temperatuur. Het grootste deel van de aardgeschiedenis was het warm, met nauwelijks of geen polaire ijskappen (afb. 4). De doorgaans warme condities zijn vijf keer onderbroken door koude episoden (ijstijden), elk met een duur van miljoenen jaren. De koudste episode was 600-700 miljoen jaar geleden, toen de polaire ijskappen zich tot dicht bij de evenaar uitstrekten *(snowball Earth)*. De jongste ijstijdepisode begon drie miljoen jaar geleden en duurt nog steeds voort. Binnen zo'n koude episode schommelt de temperatuur echter ook voortdurend en zijn er warmere intervallen. De menselijke culturele evolutie en ons bestaan spelen zich af in het warme interval dat 10.000 jaar geleden begon.

De temperatuur van de onderste luchtlagen is al zo'n vier miljard jaar binnen de bandbreedte gebleven waarin vloeibaar water en leven kunnen bestaan, in ieder geval op lagere breedtegraden.



Afb. 5. Cel van Emiliania huxleyi bedekt met coccolieten (ovale schildjes van calciet). De doorsnede van de cel is ongeveer 0,01 mm. Emiliania is een planktonsoort die vrijelijk ronddrijft in het bovenste laagje van de open zee.

Dit ondanks het feit dat de stralingsenergie van de zon in die tijd met 30% toenam. Het Systeem Aarde functioneert als een *cybernetisch systeem*, waarin het samenspel van talloze geologische en biologische processen de temperatuur binnen een beperkte bandbreedte min of meer constant houdt. De biosfeer speelt in dit systeem een hoofdrol. Bijvoorbeeld door verandering van de vegetatie op het land: een dichte begroeiing absorbeert veel zonlicht, waardoor het warmer wordt; bij afnemende vegetatie neemt de reflectie toe, wat resulteert in afkoeling.
Ook kunnen er, als het warmer wordt, 'explosies' van eencellige organismen in het oceaanwater optreden ('algenbloei'), zoals van de coccoliet-producerende planktonsoort *Emiliania huxleyi* (afb. 5). Deze organismen produceren niet alleen prachtige kalkskeletjes, waardoor zij deel uitmaken van de 'carbonaatpomp', maar zij scheiden ook het gas dimethylsulfide ($(CH_3)S_2$) af. Het gas stijgt op en wordt hoog in de dampkring geoxideerd tot zwaveldioxide (SO_2) en druppeltjes zwavelzuur (H_2SO_4). Die vormen een ijle mist en stimuleren wolkenvorming. Zowel zwavelverbindingen als wolken reflecteren zonlicht, waardoor het afkoelt.
Het is door middel van dergelijke processen dat de biosfeer als 'aardse thermostaat' functioneert.

Klimaatmodellen

De voorspelde desastreuze opwarming als gevolg van de toenemende concentratie kooldioxide in de dampkring is gebaseerd op **modelberekeningen**, niet op observaties – de temperatuurschommelingen in de 20ste eeuw correleren te slecht met de stijging van de kooldioxide-concentratie om als bewijs te kunnen worden aangevoerd (afb. 3). In de klimaatmodellen worden met behulp van megacomputers de klimaatbepalende parameters zo goed mogelijk in mathematische vergelijkingen uitgedrukt en hun wisselwerking berekend. De nadruk ligt op de sturende rol van de broeikasgassen, in het bijzonder van kooldioxide, waarvan de fysica goed bekend is. Er is echter een scala van andere klimaatbepalende factoren, die lang niet alle (voldoende) bekend of gekwantificeerd zijn, zoals bijvoorbeeld de rol van de biosfeer en van wolken.

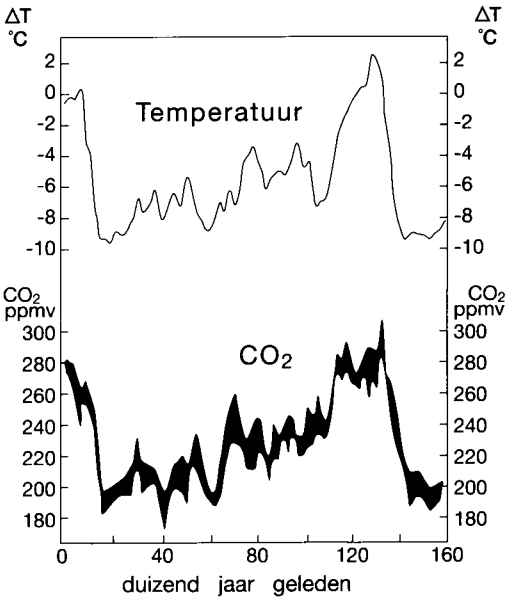
Bovendien kunnen in een chaotisch, niet-lineair systeem als het klimaat minieme veranderingen in één parameter op lange termijn grote, maar onvoorspelbare gevolgen hebben. De computersimulaties zijn daarom op zijn best een sterk vereenvoudigde benadering van de complexe fysische werkelijkheid.
De vroegere KNMI-directeur professor H. Tennekes verwoordde het als volgt:

"De prognoses van de klimaatmodellen zijn mijns inziens boterzacht. Mijn gebrek aan vertrouwen is gebaseerd op ernstige methodologische tekortkomingen in de klimaatmodelbouw. Er bestaan geen deugdelijke schattingen van de voorspelhorizon van klimaatmodellen, er bestaat geen wetenschappelijk onderbouwde theorie van hun architectuur en er bestaan geen deugdelijke verificatie- en falsificatieprocedures. Klimaatmodellen genereren 'virtual reality'."
(Broeikasdebat Stichting Wetenschapsjournalistiek & Voorlichting, Utrecht 19 september 1995).
Het gebrek aan deugdelijke verificatie- en falsificatieprocedures is in feite een vernietigend testimonium voor de klimaatmodellen. In de wetenschap krijgt een hypothese immers pas autoriteit als zij kan worden gefalsificeerd. Zo niet, dan zijn de modellen op zijn best gedachtenexperimenten, waarmee men kan proberen inzicht te krijgen in wat zich in het complexe klimaatsysteem afspeelt.

Bij klimaat gaat het om de gemiddelden over een lange periode (gewoonlijk 30 jaar) van de temperatuur van de lagere luchtlagen en het bovenste oceaanwater, de hoeveelheid neerslag, de windsnelheid, de frequentie en intensiteit van buitengewone meteorologische gebeurtenissen (stormen, droogteperioden, hitte- en koudegolven, laat of vroeg invallende vorst), enzovoort. Achteraf kan pas worden vastgesteld of klimaatverandering is opgetreden. In tegenstelling tot weersverwachting op korte termijn, is een directe toetsing van de juistheid van de klimaatmodellen niet mogelijk. Er is wél de mogelijkheid van een toetsing achteraf met behulp van het geologisch archief: fossiele sedimenten geven soms informatie over de concentratie kooldioxide en de temperatuur tijdens hun afzetting. Voor geologen wegen de zo verkregen gegevens en het inzicht in actuele geologische processen zwaarder dan de 'virtuele realiteit' van de klimaatmodellen.

Data uit het verleden

In het geologische verleden zijn atmosferische kooldioxideconcentratie en klimaat permanent in staat van verandering. Zijn die veranderingen met elkaar gecorreleerd? Dit wordt vaak bevestigend beantwoord op basis van kernboringen in het gletsjerijs van Antarctica en Groenland, die voor de laatste paar honderdduizend jaar een ruwe correlatie tussen temperatuur en



Afb. 6. Verloop van de gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak en de kooldioxide-concentratie in de dampkring gedurende de laatste 160.000 jaar, zoals gereconstrueerd uit ijsboorkernen.

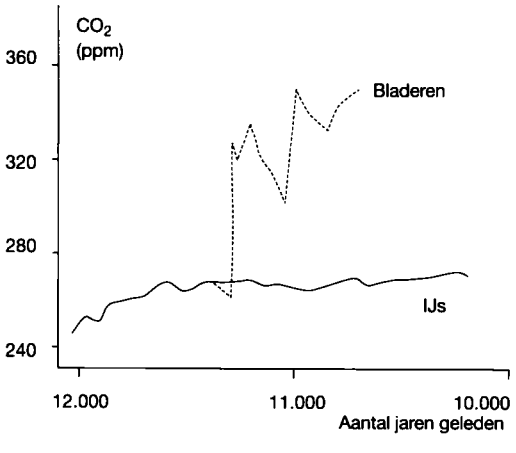
kooldioxide-concentratie laten zien (afb. 6 en 7). Bij nauwkeurige analyse blijkt echter dat kooldioxide de temperatuur volgt, en niet omgekeerd. Dit is eenvoudig te verklaren: als de temperatuur hoger wordt, verdampt kooldioxide dat in oceaanwater is opgelost; bij temperatuurdaling nemen de oceanen kooldioxide op. De temperatuurschommelingen zijn dus niet door veranderingen in de concentratie kooldioxide geïnitieerd, maar kunnen er wél door terugkoppeling (via het versterkte of verzwakte broeikaseffect) door zijn versterkt.



Afb. 7. Kernboring in het ijs van Antarctica.

Ook blijken veranderingen in temperatuur en kooldioxide vaak niet gelijk op te lopen. Zo is volgens de ijskernen de concentratie kooldioxide na het einde van de laatste ijstijd tot het begin van de 19de eeuw nagenoeg constant gebleven, ongeveer 280 ppm. Desondanks was er een afwisseling van warmere en koudere perioden. Aan de hand van historische archieven, groeiringen in bomen en koralen (brede ringen in warme jaren, smalle in koude), en ijskernen is vastgesteld dat er wereldwijd koude perioden waren, met een temperatuur van 0,25°-0,5° C onder het gemiddelde van de laatste 1500 jaar: van 500 tot 800, van 1580 tot 1750 (bekend als de Kleine IJstijd), en van 1800 tot 1890. Daarna begon de stijging in de 20ste eeuw. Daartussen waren er warme perioden, met temperaturen ongeveer 0,3°-0,4°C boven het gemiddelde: van 900 tot 1100 (wat de Noormannen verleidde om Groenland te koloniseren, maar waar hun kolonie tijdens de Kleine IJstijd ten onder ging) en van 1360 tot 1560. Nog verder terug was er een warme periode van 4000 tot 3300 vóór onze jaartelling, en was het langdurig koud rond 4500-4100, 3000 en 1600 vóór onze jaartelling.

De reconstructie van het verloop van temperatuur en concentratie kooldioxide op basis van ijskernen berust op de analyse van de in het ijs ingesloten luchtbelletjes. De isotopensamenstelling van zuurstofgas is een maat voor de temperatuur, terwijl het kooldioxide representatief zou zijn voor de samenstelling van de dampkring ten tijde van de sneeuwval. Wat dit laatste betreft is er echter groeiende twijfel. Zijn de luchtbelletjes na hun insluiting wel gesloten gebleven voor kooldioxide? De gangbare techniek bestaat uit het malen of schaven van de ijsmonsters en de analyse van de daarbij vrijgekomen lucht. Bij verdamping van de ijsmonsters meet men echter andere, hogere kooldioxidewaarden in de vrijgekomen lucht. Ook op andere gronden is gesuggereerd dat in de loop van de tijd kooldioxide uit de luchtbelletjes naar het omringende ijs lekt.



Afb. 8. Verloop van de CO_2-concentratie in de dampkring van 12.000 tot 10.000 jaar geleden volgens de stomata-index van berkenbladeren en volgens luchtbelletjes in ijskernen.

In dit verband zijn ook de resultaten van recent paleobotanisch onderzoek in Utrecht van belang. Daar kijkt men naar de dichtheid van stomata (huidmondjes) in fossiele bladeren van boomsoorten die ook nu nog leven. De dichtheid is afhankelijk van de concentratie kooldioxide in de dampkring tijdens de groei van de bladeren: hoe hoger de concentratie, des te minder stomata, en omgekeerd. Dit verband heeft men experimenteel geverifieerd. De 'stomata-index' van bladeren van bomen, die tussen ongeveer 10.500 en 9.500 jaar geleden leefden, duiden op kooldioxide-concentraties die sterk afwijken van de waarden die luchtbelletjes in ijskernen van dezelfde ouderdom aangeven (afb. 8). Pollen die met de bladeren zijn geassocieerd laten zien dat de temperatuurstijging eerder inzette dan die van de concentratie kooldioxide – dezelfde relatie als in ijskernen.
Toch kan er niet aan worden getwijfeld dat in het door de ijsboringen bestreken tijdvak aanzienlijke schommelingen in kooldioxide-concentratie zijn opgetreden. Gaan we verder terug in de tijd, dan ontmoeten we nog veel grotere variaties. De chemie van fossiele verweringsbodems leert dat bijvoorbeeld de atmosferische kooldioxide-druk in het Laat-Ordovcium, 440 miljoen jaar geleden, zo'n 16 maal hoger was dan thans. Desondanks was het toen géén warme periode. Integendeel, de temperaturen langs de evenaar kwamen overeen met de huidige en op de hogere breedtegraden lagen uitgestrekte ijskappen — het Laat-Ordovicium is één van de vijf ijstijd-episoden in de aardgeschiedenis (afb. 4).
In het Midden-Krijt, 120-100 miljoen jaar geleden, was er 8 à 10 maal meer kooldioxide in de dampkring dan thans. De oorzaak was vermoedelijk de gigantische vulkanische activiteit in het Pacifische gebied, waar een superplume omhoog kwam.
Het zeeniveau was hoger en het landoppervlak kleiner dan in onze tijd. Het Midden-Krijt was een relatief warm tijdvak, maar minder warm dan men op basis van de klimaatmodellen bij zo'n hoge kooldioxide-concentratie zou verwachten. De gemiddelde temperatuur was niet veel hoger dan nu. Door het geringe reliëf van het landoppervlak werd het transport van warme lucht van evenaar naar polen nauwelijks belemmerd, zodat het aan de evenaar kouder en op hogere breedtegraden warmer was.
Het temperatuurverschil tussen tropen en polen bedroeg ongeveer 13°C, minder dan de helft van het huidige verschil.
Het geringe reliëf maakte ook dat er relatief weinig kooldioxide door verwering uit de dampkring werd verwijderd. Daarentegen wijzen de kolossale kalksteenafzettingen uit dit tijdvak er op dat de biologische 'carbonaatpomp' op volle kracht werkte.

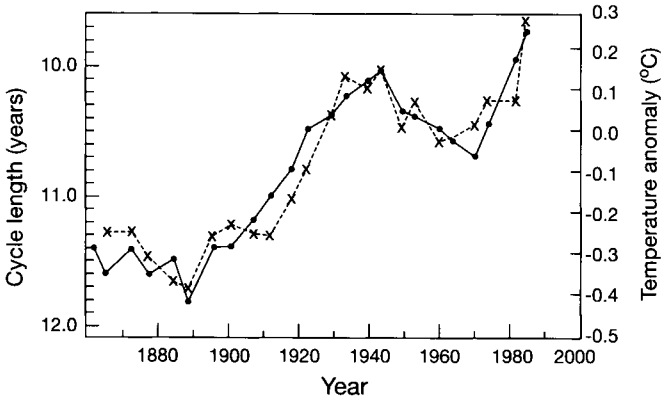
Natuurlijk zag de aarde er in het Laat-Ordovicium en het Midden-Krijt anders uit dan in onze tijd. Dat geldt echter niet voor het zeer warme Midden-Plioceen, 3,5-3,0 miljoen jaar geleden. Toen verschilde het aardoppervlak nauwelijks van het huidige. Op grond van de klimaatmodellen zou men bij het toen heersende klimaat verwachten dat de concentratie kooldioxide ongeveer het dubbele zou zijn van de huidige. De stomata-index van fossiele bladeren geeft echter aan dat zij niet hoger was dan nu.

De data uit het verleden wijzen dus niet op een positieve correlatie tussen temperatuur en de concentratie kooldioxide. Dit ondermijnt natuurlijk niet de fysische realiteit van het versterkte broeikaseffect door kooldioxide-toename, maar relativeert wél de belangrijke rol die er in het klimaatsysteem aan wordt toegekend.

Solair versus Broeikas

Sinds de eerste waarneming van zonnevlekken door Galileo wordt al vermoed dat er een verband is tussen de hoeveelheid zonnevlekken en het klimaat. Zo waren er bijvoorbeeld in de periode van de meest extreme koude in de Kleine IJstijd, tussen 1650 en 1710 (waaraan wij de vele schilderijen van wintertaferelen door Hollandse meesters danken) nauwelijks zonnevlekken. Op grond van historische gegevens en directe waarnemingen is vastgesteld dat er sinds de 18de eeuw een perfecte correlatie bestaat tussen variaties in temperatuur en de duur van de zonnevlekkencycli (de cyclische verandering in de activiteit van de zon zoals die tot uitdrukking komt in de aan- en afwezigheid van grote aantallen zonnevlekken). De correlatie is aanzienlijk beter dan die tussen temperatuur en kooldioxide-concentratie (afb. 9). De lengte van de cyclus varieert rond een gemiddelde van 11 jaar. Korte cycli blijken te correleren met hoge zonnevlekkenactiviteit en warme jaren, lange cycli met lage activiteit en koude jaren. De enige uitzonderingen zijn de incidentele ernstige verstoringen van het mondiale klimaatsysteem door zware vulkaanuitbarstingen of door El Niños (het kortstondige opdringen van warm water tot ver in het oostelijke deel van de Pacifische Oceaan).

Geologen hadden al eerder opgemerkt dat de fijngelaagde sedimentsuccessies in de Maare van de Eifel een ritmische opeenvolging van afzetting onder warmere en koudere condities laten zien (afb. 10). Er zijn in de opeenvolging verschillende cycli te onderscheiden, met perioden van respectievelijk ongeveer 11 jaar (de gemiddelde lengte van de zonnevlekkencyclus), 19-20 jaar en 88 jaar. De eerste twee cycli, die ook in ijsboorkernen zijn



Afb. 9. Verloop van de gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak (kruisjes) en de lengte van de zonnevlekkencyclus (punten) sinds 1860.

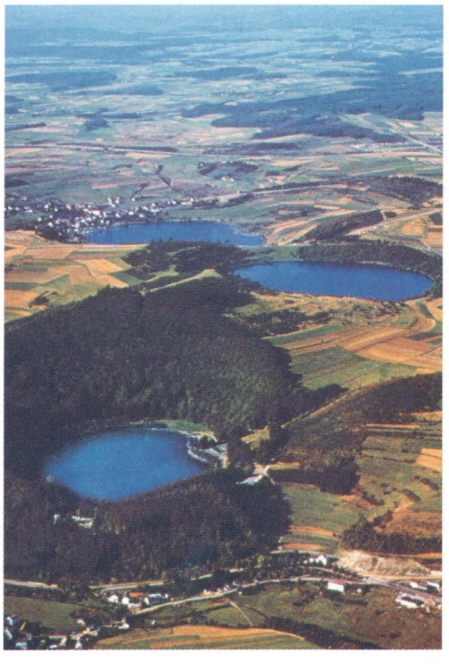
herkend, hebben planetaire tegenhangers: 11,86 jaar is de tijd waarin Jupiter een baan rond de zon beschrijft, en 19,9 jaar is het interval tussen de tijdstippen waarop Jupiter en Saturnus op één lijn staan. Of en hoe dit enige fysische relevantie heeft is een open vraag, maar het suggereert de mogelijkheid dat planetaire invloeden via vooralsnog onbekende mechanismen de activiteit van de zon en daardoor het aardse klimaat beïnvloeden.

Van de fysica van de zon en de zon-aarde-interactie is nog veel niet bekend. Een mogelijke verklaring voor de correlatie tussen klimaat en activiteit van de zon zou de interactie tussen zonnewind en kosmische straling kunnen zijn. De zonnewind (door de zon uitgestoten ionen en electronen) bevat magnetische velden die tezamen met de aardse magnetosfeer de deeltjes van de kosmische straling afbuigen. Bij hoge activiteit van de zon (zonnevlekken-maxima) is de zonnewind krachtiger, wat het magnetische schild van de aarde versterkt. De hoeveelheid hoog-energetische deeltjes van de kosmische straling die de dampkring binnendringt neemt dan af. Daardoor neemt het aantal botsingen met gasmoleculen af, waardoor minder kernreacties optreden en minder ionen worden gevormd. Ionen in de dampkring bevorderen wolkenvorming, zodat toenemende activiteit van de zon leidt tot afname van de bewolking. Er wordt dan minder zonlicht gereflecteerd, zodat het warmer wordt. Waarnemingen met behulp van weersatellieten laten inderdaad een frappant goede correlatie zien tussen intensiteit van de kosmische straling en mondiale bewolkingsgraad.

Boomjaarringen en ijskernen tonen dat de positieve correlatie tussen zonne-activiteit en luchttemperatuur tot enkele duizenden jaren in het verleden kan worden getraceerd. Doordat er bij lage activiteit meer botsingen met deeltjes van de kosmische straling zijn, treden in de dampkring meer kernreacties op. Tot de producten hiervan behoren onder andere radioactief koolstof (^{14}C) en radioactief beryllium (^{10}Be). Uit onderzoek van jaarringen van bomen blijkt dat ringen met meer radiokoolstof onder koude condities zijn gegroeid, en omgekeerd. Evenzo laten ijskernen zien dat sneeuw met meer radioactief beryllium precipiteerde als het kouder was, en omgekeerd.
Alles wijst er dus op dat de activiteit van de zon, en niet de concentratie kooldioxide, de hoofdrol speelt in de klimaatregulering. Dit elimineert uiteraard niet een (beperkte) additionele rol voor een versterkt of verzwakt broeikaseffect. Het relativeert echter de dreiging van een broeikascatastrofe door de antropogene emissie van kooldioxide.

Dat neemt niet weg dat menselijke activiteiten stellig bijdragen tot klimaatverandering. Misschien door de emissie van andere broeikasgassen dan kooldioxide, maar vooral door de verstoring van de interactie tussen landoppervlak, dampkring, hydrosfeer en biosfeer. Zoals de vernietiging van tropisch regenwoud; verwoestijning door overbegrazing, urbanisatie, stedelijke warmteproductie, industriële uitstoot van aerosolen, en aanleg van stuwmeren en andere ingrepen in de waterhuishouding – de onvermijdelijke gevolgen van de explosieve groei van de wereldbevolking, gepaard met toenemende consumptie en mobiliteit. Hieraan wordt door politiek en milieubeweging echter opvallend weinig aandacht besteed.

De relativering van het broeikas-doemdenken laat onverlet dat er genoeg valide redenen zijn om zuinig te zijn met fossiele brandstoffen, door energiebesparing en ontwikkeling van alternatieve, duurzame energiebronnen. De voorraden olie, gas en zelfs steenkool zijn immers niet onuitputtelijk en worden momenteel in veel te hoog tempo verbruikt.



Afb. 10. Gemünder Maar, Weinfelder Maar en Schalkenmehrener Maar in de West-Eifel. De Maare zijn tussen de 11.000 en 10.500 jaar geleden ontstaan door explosies in de ondergrond, toen grondwater in aanraking kwam met een magmahaard. De fijngelaagde sedimentafzettingen in de Maare geven een gedetailleerd verslag van de klimaatschommelingen door de tijd.