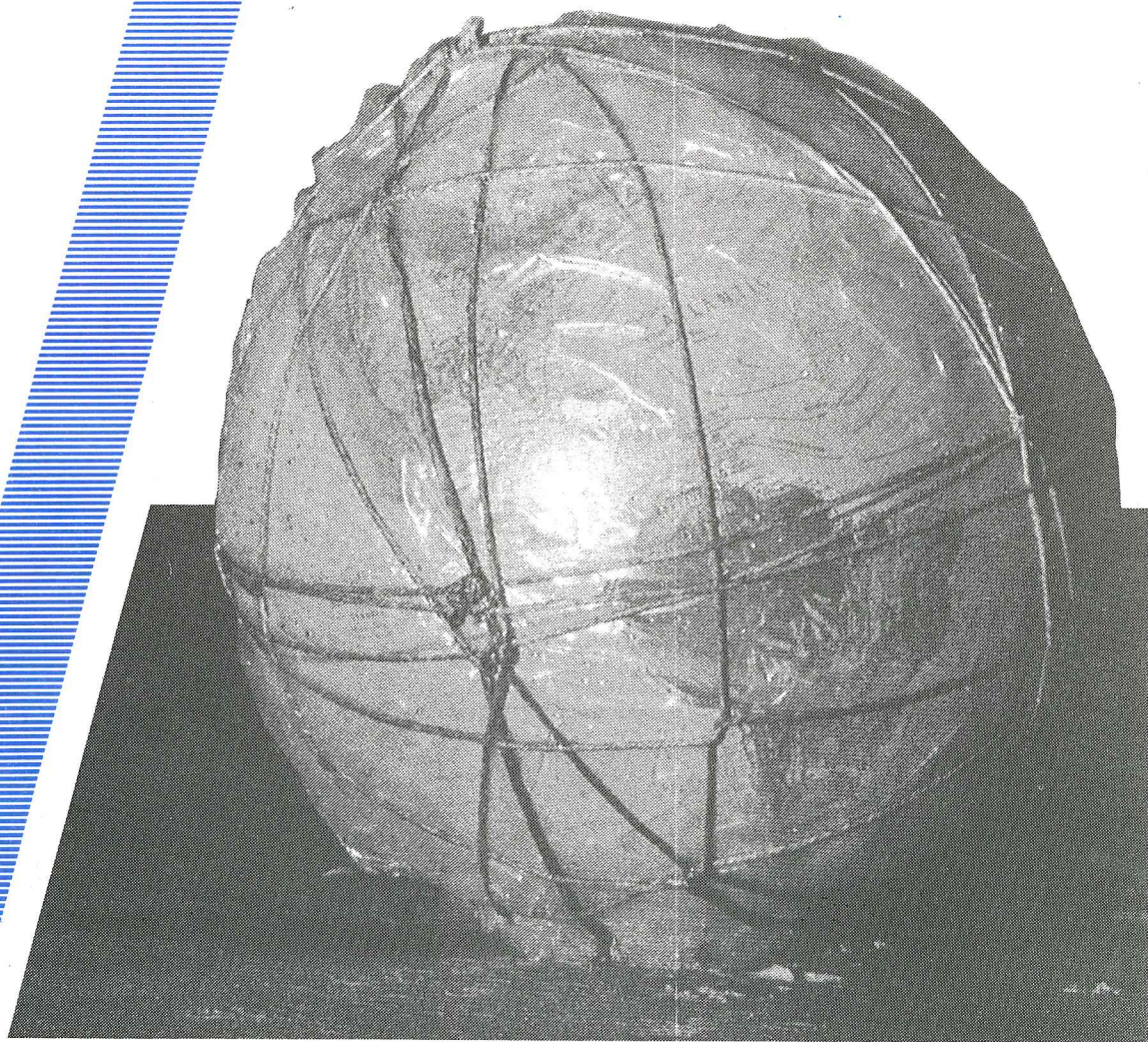


ons klimaat, onze planeet



de bilt 1989 publikatienummer: 174

postbus 201
3730 AE de bilt
wilhelminalaan 10
tel. (030) 206911
telex 47096

U.D.C.: 551.461.2
551.510.534
551.521.32
551.583
551.588

©KNMI, De Bilt. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotocopie, microfilm, of op welke wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het KNMI.

ons klimaat, onze planeet

Inhoud

Voorwoord <i>H.Tennekes</i>	<i>pag.1</i>	5 Maatregelen	<i>pag.63</i>
1 Inleiding <i>C.J.E.Schuurmans</i>	<i>pag.3</i>	Maatregelen in voorbereiding voor minder energiegebruik Staatscourant, nr.214, 3 november 1988 <i>B.C.J.Zoeteman</i>	
2 Algemeen	<i>pag.5</i>	Mogelijke maatregelen tegen aantasting van de ozonlaag In: Aantasting van de ozonlaag, Verslag symposium 15 januari 1988, Ozon-overleg RUU (1988); 24-28 <i>J.Swager</i>	
De atmosfeer: een nieuw terrein voor onderzoek Intermediair, 23, no.19 (1987); 25-29 <i>H.van Dop</i>		Er is weer voor vijf dagen Elsevier, 17 september 1988 <i>H.Tennekes</i>	
Beïnvloeding van het klimaat door de mens Ned.T.v.Nat., no.2 (1986); 49-54 <i>C.J.E.Schuurmans</i>		Ruimtevaart voor de aarde Intermediair,22, no.35 (1986); 41-45 <i>H.Tennekes</i>	
3 Het broeikas effect en zijn gevolgen	<i>pag.24</i>		
De aarde in een broeikas <i>bijlage</i> Brochure Stichting Natuur en Milieu (1987) <i>L.Reijnders</i>			
Het broeikas effect <i>P.Siegmund</i>			
Verandert ons klimaat ? <i>C.J.E.Schuurmans</i>			
Het klimaat op glad ijs Interview met J.Oerlemans <i>W.Schoonen</i> Trouw, 9 november 1988			
Zeespiegelrijzing door klimaatverandering <i>A.Kattenberg</i>			
Komt de droogte in Amerika door het broeikas effect ? Interview met P.Vellinga en C.J.E.Schuurmans <i>Henk Donkers</i> NRC Handelsblad, 12 juli 1988			
4 Ozon	<i>pag.46</i>		
Ozon. Het gat in de ozonlaag en Los Angeles-smog <i>bijlage</i> Brochure Stichting Natuur en Milieu (1987) <i>L.Reijnders</i>			
Ozon in troposfeer en stratosfeer <i>H.Kelder</i>			
Chlorine blamed for growing "ozone hole" ECOS,56, Winter (1988); 3-6 <i>Andrew Bell</i>			
UNEP Meeting: Scientific review of the Depletion of the Ozone Layer KNMI-Memorandum DM-88-23 (1988) <i>C.J.E.Schuurmans</i>			

Voorwoord

Het klimaatprogramma van het KNMI heeft twee doelstellingen: onderzoek en kennisoverdracht. Met behulp van deze bundel opstellen levert de hoofdafdeling Wetenschappelijk Onderzoek een bijdrage aan de kennisoverdracht binnen het KNMI. Alle 570 medewerkers krijgen een exemplaar.

Ook als u zelf al voldoende weet over broeikaseffect, ozongat en zeespiegelrijzing, kan deze bundel van nut zijn, bijvoorbeeld bij het beantwoorden van vragen van kennissen, familieleden en schoolgaande kinderen. Uw kinderen kunnen dit materiaal bijvoorbeeld gebruiken als ze een werkstuk moeten maken voor de natuurkundeles. Stop dit boek dus vooral niet weg in een la op kantoor, maar neem het mee naar huis. En als u om de een of andere reden meer informatie nodig hebt, bel dan dr. C.A. (Dick) Velds (toestel 589); hij kan u doorverwijzen naar een van de vele specialisten in het klimaatprogramma.

Directeur Wetenschappelijk Onderzoek



(Prof. dr. ir. H. Tennekes)

1 Inleiding

In 1988 was de planeet Aarde vaker voorpagina-nieuws dan welke persoon of situatie ook (reden voor het weekblad Time om de Aarde tot Planeet van het Jaar uit te roepen). Dit gegeven toont al aan dat er geen gebrek is aan geschikte teksten over het onderwerp Klimaatveranderingen, Broeikaseffect en Ozongat, ook in het nederlands niet. Voor deze KNMI-bundel hebben we met enkele mensen een selectie gemaakt uit het beschikbare materiaal. Verder hebben we voor de overzichtelijkheid een indeling aangebracht. Hierover kort het volgende:

De rubriek algemeen geeft d.m.v. 2 artikelen een schets van het (nieuwe) werkterrein. Veel milieuproblemen hebben als gemeenschappelijke drager de atmosfeer en als gemeenschappelijk slachtoffer het (leef)klimaat. Lokale activiteiten van de mens hebben vaak lokale gevolgen maar in toenemende mate zijn de gevolgen mondiaal. Het klimaatprogramma van het KNMI houdt dus ook niet bij onze grenzen op.

Het broeikaseffect en de gevolgen daarvan is het belangrijkste mondiale klimaatprobleem. Het gaat om koolzuurgas en andere sporegassen die zich door menselijke activiteiten ophopen in de atmosfeer. Volgens de theorie van het broeikaseffect moet de temperatuur van de lucht bij het aardoppervlak daardoor toenemen: geen weersverwachting, maar een klimaatvoorspelling op lange termijn. We moeten goed kijken of die voorspelling uitkomt, maar tevens oppassen dat we niet iedere temperatuurstijging gaan toeschrijven aan het CO₂-effect. Andere veranderingen kunnen trouwens van veel meer belang zijn, zeker voor Nederland. Zeespiegelrijzing, stormvloed en droge zomers om maar enkele dingen te noemen. Ook deze horen tot het werkterrein van het KNMI, of zijn daar nauw mee verbonden.

Ozon neemt toe op leefhoogte (fotochemische smog in steden), maar wordt afgebroken in de stratosfeer, waardoor meer schadelijk ultraviolet op aarde doordringt. Ozon is geen standaardgegeven in de KNMI-waarnemingen en -voorlichting. Het is echter ook een broeikasgas en heeft als zodanig een relatie met het klimaat. Van meer belang voor het KNMI-werk is echter dat zowel het ozon dicht bij de grond, als in de stratosfeer, onder invloed staat van allerlei transport- en uitwisselingsprocessen. KNMI-onderzoekers en meteorologen zijn met deze processen vertrouwd vanwege hun werk aan verspreiding van luchtverontreiniging en aan de ontwikkeling en verplaatsing van weerssystemen in het algemeen. Voldoende reden dus om ons ook met dit

mondiaal milieuprobleem bezig te houden.

Tenslotte de rubriek Maatregelen. Als KNMI bepalen we zelf geen maatregelen ter voorkoming of bestrijding van klimaat- en atmosfeerproblemen. We dragen kennis en informatie aan waarmee de overheid maatregelen kan voorbereiden en uitvoeren. De nederlandse overheid kijkt in eerste instantie naar mogelijkheden ter voorkoming van verdere aantasting. Dat geldt zowel voor het ozonprobleem als voor het broeikasprobleem. De opgenomen artikelen van Zoeteman en Swager gaan over deze aanpak.

Klimaatveranderingen die niet voorkómen kunnen worden (en die zullen er altijd zijn want het klimaat kent ook haar natuurlijke variaties, los van menselijke invloeden) vragen eveneens om maatregelen. Dat zijn dan maatregelen om ons zo goed mogelijk aan de te verwachten veranderingen aan te kunnen passen (bv. door dijkenbouw). Ook deze vorm van maatregelen vergt ondersteuning van het klimaatonderzoek en de klimaatvoorlichting: een typische KNMI-taak! Of 't überhaupt kan, een klimaatvoorspelling, is de vraag. Zie het artikel van Tennekes. Er zijn trouwens meerdere vragen. Hoe lang moeten overheden wachten met ingrijpende maatregelen als 't met het klimaat en de zeespiegel echt mis blijkt te gaan? De aanwijzingen zijn nu nog zwak: "one year's drought does not make a greenhouse" schreef J. Maddox in juli 1988 in Nature. Het klimaatonderzoek moet zeker in staat worden geacht om de onzekerheden die nu nog bestaan drastisch terug te brengen. In zekere zin is het klimaatonderzoek nog maar pas begonnen. Maar hoeveel tijd krijgt het onderzoek nog? Wie kan de risico's van uitstel van maatregelen afwegen tegen de mogelijkheid dat we straks over veel betrouwbaarder informatie beschikken? Als KNMI kunnen we een bijdrage leveren tot het beschikbaar stellen van meer en betere informatie over klimaat en atmosfeer. Helemaal niet gek om in het jaar van de Planeet Aarde bij het KNMI te werken.

C.J.E. Schuurmans

2 Algemeen

De atmosfeer: een nieuw terrein voor onderzoek

H. van Dop

This most excellent canopy, the air, look you, this brave o'erhanging firmament, this majestic roof fretted with golden fire, why, it appears no other thing to me but a foul and pestilent congregation of vapours.

Hamlet, II. ii. 240

In deze zwaarmoedige verzuchting van de jonge Hamlet is de atmosfeer slechts schijnbaar een opeenhoping van onzuivere en verpeste dampen. In de tijd die Shakespeare hier beschreef, kwam luchtverontreiniging slechts zeer lokaal en sporadisch voor en was de invloed van de mens op de samenstelling van de atmosfeer verwaarloosbaar.

Dit gaat zeker de laatste honderd jaar niet meer op en er is alle reden om aan te nemen dat wat Hamlet slechts toescheen nu barre werkelijkheid is.

De recente explosieve groei van de wereldbevolking, samen met een ongekend verbruik van fossiele brandstoffen, heeft op de atmosfeer effecten die al sinds enige tijd meetbaar zijn. Sommige van die effecten zijn zo onrustbarend dat een nauwkeuriger bestudering van onze dampkring wenselijk wordt. In de pers duiken regelmatig berichten op over zure regen, klimaatwijzigingen, zeespiegelrijzing, aantasting van de ozonlaag en "nucleaire winter". Wat dan vaak niet duidelijk gemaakt wordt, en wat ik hier hoop toe te lichten, is dat de symptomen zeer sterk met elkaar in verband staan. Verder wordt ook duidelijk dat ad hoc onderzoek, dat vaak onder politieke druk wordt gefinitieerd, strandt op een gebrek aan kennis van en inzicht in wat er in feite in de atmosfeer gebeurt.

Dergelijk onderzoek wordt terecht aangeduid als crisisonderzoek. Een meer integrale aanpak lijkt noodzakelijk, maar eerst een kort overzicht.

de chemische samenstelling van de atmosfeer

Ongeveer tweehonderd jaar geleden werd ontdekt dat de atmosfeer voornamelijk uit zuurstof en stikstof bestaat. Verder komen er waterdamp en koolzuur in voor, die samen met de zuurstof en stikstof een belangrijke rol spelen in allerlei, reeds lang bestaande, biologische kringlopen. Eigenlijk vormen deze vier verbindingen één geheel met alle vormen van

* Dit artikel werd bekroond met een derde prijs in het kader van de door Intermediair uitgeschreven essayprijsvraag "De Kristallen Bol".

leven die zich op of nabij het aardoppervlak afspelen. De opname en afgifte van koolzuur door flora en fauna, de fotosynthese en uiteindelijk het afsterven van levend materiaal en de daarbij behorende rottingsprocessen hebben geleid tot enerzijds de opslag in aardkorst en oceaانبodem van steenkool en aardolie, en anderzijds tot de vorming van de atmosfeer met een subtiel evenwicht van verbindingen zoals wij die nu kennen.

In dit evenwicht zijn wij nu aan het ingrijpen door in enkele decennia een aanzienlijk percentage van de aanwezige hoeveelheid fossiele brandstoffen te verbruiken, een voorraad waar de natuur miljoenen jaren voor nodig had om deze te vormen! De verbranding van deze voorraad betekent niets anders dan dat deze voornamelijk uit koolwaterstoffen bestaande verbindingen geoxydeerd worden met de in de atmosfeer aanwezige zuurstof, onder vorming van tientallen andere componenten, die kwantitatief weliswaar te verwaarlozen zijn, maar die toch een essentiële invloed blijken te hebben op ons leefklimaat, zoals uit het nu volgende zal blijken.

de stralingshuishouding van de atmosfeer

De energievoorziening van de aarde wordt verzorgd door de zon. Deze draagt een klein gedeelte van haar energie over naar de aarde door middel van kortgolvlige straling. Van deze straling absorbeert de aarde ca. 70%. Ook hier is sprake van een subtiële balans: alle materie met een temperatuur boven -273 graden Celsius zendt straling uit, en wel meer naarmate de temperatuur hoger is. Zo hebben de aarde en haar atmosfeer vanuit het heelal gezien een temperatuur van ongeveer -10 graden Celsius, waarbij de aarde evenveel stralingsenergie uitzendt als zij ontvangt. Zou de zon meer energie gaan uitstralen dan ontstaat er een nieuw stralingsevenwicht, maar dan wel bij een hogere aardse temperatuur. Gelukkig is er geen reden om aan te nemen dat de door de zon uitgestraalde energie sterk fluctueert.

Omdat de temperatuur van de aarde veel lager is dan die van de zon, ligt de door de aarde uitgezonden straling in het langgolvlige, het infrarode gedeelte van het stralingsspectrum. Een atmosfeer die bestaat uit louter stikstof en zuurstof is redelijk transparant voor zowel de langgolvlige aardse straling, als voor de kortgolvlige zonnestraling. De aanwezigheid, echter, van complexere moleculen zoals koolzuur, methaan, ozon en nog een aantal andere sporegassen maakt dat de transparantie van de

atmosfeer voor voornamelijk langgolvlige straling afneemt: met andere woorden, de atmosfeer absorbeert deze straling en zet deze om in warmte. Dit proces leidt tot een toename van de temperatuur aan het aardoppervlak. Ik kom hier zo nog op terug.

de atmosferische circulatie

De atmosfeer is voortdurend in beweging. De energie voor die beweging is ook van de zon afkomstig: voornamelijk aan het aardoppervlak wordt de zonnestralingsenergie omgezet in warmte. Het oppervlak draagt deze warmte over op de aangrenzende luchtlaag. Deze laag zet daardoor wat uit, zodat haar dichtheid afneemt. In het zwaartekrachtveld van de aarde leidt dit tot verticale luchtbewegingen (thermiek of convectie). Op deze manier wordt de atmosfeer in beweging gebracht, waarbij het draaien van de aarde zorgt voor het ontstaan van wervelende patronen. De ongelijkmatige opwarming en het condenseren en verdampen van water bij verticale luchtbewegingen maken dit proces buitengewoon gecompliceerd. Toch wordt de beweging in de atmosfeer beschreven door reeds lang bekende wetten uit de klassieke natuurkunde. Deze wetten zijn dezelfde als waarmee de bewegingen van de planeten beschreven worden, en die ons in staat stellen posities van aarde en maan tientallen jaren vooruit te berekenen met een indrukwekkende nauwkeurigheid. In schril contrast hiermee is ons onvermogen om de banen van depressies en hogedrukgebieden meer dan een paar dagen vooruit te voorspellen. De oorzaak hiervan is het niet lineaire gedrag van de atmosferische stroming, die gekenmerkt wordt door chaotische turbulente luchtbewegingen. Dit gedrag moet gerekend worden tot een van de weinige onopgeloste problemen uit de klassieke natuurkunde. De ontwikkeling van supercomputers heeft echter aan de bestudering hiervan een nieuwe impuls gegeven.

Het voert ons helaas te ver hier verder op in te gaan. Hier is het van belang te memoreren dat temperatuurverschillen in de atmosfeer tot stromingen leiden, die op hun beurt weer de temperatuurverdeling beïnvloeden.

Gewapend met de kennis samengevat in de drie bovenstaande paragrafen is het mogelijk de samenhang van de genoemde milieuproblemen beter te begrijpen.

zure depositie

Onder zure depositie wordt verstaan de neerslag van zuren, voornamelijk zwavelzuur en salpeterzuur, op bodem en wateroppervlak. Vaak ook aangeduid als "zure regen", een niet geheel correcte benaming, omdat grofweg de helft van de zure depositie plaats vindt in droge omstandigheden. Het is een belangrijk politiek item van de laatste jaren, vooral in West-Europa, waar het o.a. geleid heeft tot het invoeren van ongelode benzine, als eerste stap op weg naar de invoering van de katalysator in motorvoertuigen. Deze zorgt voor een aanzienlijke reductie van de uitworp van verbrandingsprodukten.

In het algemeen is zure depositie het gevolg van de uitworp van stikstof- en zwaveloxyden, produkten die ontstaan bij de verbranding van fossiele brandstoffen. De in de atmosfeer aanwezige oxyderende verbindingen zuurstof, ozon, waterstofperoxyde en hydroxylradicalen reageren met deze oxyden, wat uiteindelijk tot zuurvorming leidt. Hierbij spelen de stikstofoxyden een dubbelrol, want behalve dat deze de grondstof vormen voor salpeterzuur, bevorderen zij tevens dat de hoeveelheid oxyderende verbindingen, het oxyderend vermogen, in de atmosfeer toeneemt. Dit gebeurt in een ingewikkelde keten van chemische reacties, waarbij ook koolwaterstoffen, die eveneens gevormd worden bij de verbranding van fossiele brandstoffen, een rol spelen. Het grootste deel van deze reacties vindt plaats in de atmosferische grenslaag, een laag die zich uitstrekt tot ca. 3 km hoogte.

Modellen die de chemische reacties in de atmosfeer moeten beschrijven, bevatten al snel meer dan 100 reacties. Zij worden in het laboratorium uitgebreid bestudeerd in speciaal ontworpen reactiekamers. Modellen die de vorming van zure verbindingen in de voortdurend in beweging zijnde atmosfeer simuleren, moeten behalve de ingewikkelde chemische reacties ook het transport beschrijven. Het feit dat een deel van deze chemie zich in wolken afspeelt, vormt een extra complicatie en de modellen passen dan ook alleen in de allergrootste computers van dit moment. Het zal nog wel enige tijd duren voordat betrouwbare resultaten ter beschikking zullen komen.

Een ander belangrijk hulpmiddel bij het verkrijgen van inzicht in de chemie van de atmosfeer is het doen van metingen. De belangrijkste componenten worden aan het aardoppervlak continu en op het noordelijk halfrond boven land met een redelijke dichtheid gemeten. Waarnemingen hoger in de

atmosfeer zijn zeldzaam, omdat zij moeilijk uitvoerbaar en kostbaar zijn. Technische hulpmiddelen hierbij (vliegtuigen, ballonnen en "remote sensing" vanaf het aardoppervlak en vanuit satellieten) zijn nog volop in ontwikkeling.

klimaatwijzigingen

Het klimaat is de verzameling van gemiddelden van een aantal meteorologische variabelen typerend voor een bepaalde lokatie op aarde. Hiervan is de temperatuur één van de belangrijkste, maar ook bijv. bewolking, neerslag, gemiddelde windsnelheid en aantal uren zonneshijn behoren hiertoe. Een mogelijke toename van de mondiale gemiddelde temperatuur zou het gevolg kunnen zijn van toenemende concentraties van sporegassen (o.a. koolzuur, methaan, ozon en stikstofoxyden). Hierbij speelt de verbranding van fossiele brandstoffen weer een voorname rol, maar ook de intensieve tropische landbouw (rijstvelden) lijkt een belangrijke factor, met name bij de vorming van methaan. Hierbij wordt steeds duidelijker dat reeds relatief kleine hoeveelheden van deze sporegassen merkbare verstoringen kunnen veroorzaken.

De temperatuurverdeling in de atmosfeer hangt nauw samen met het stromingspatroon, zodat een wijziging in die verdeling ook consequenties heeft voor de circulatie. Zo zouden de gemiddelde baan en intensiteit van depressies op het noordelijk halfrond zich wat kunnen wijzigen waardoor zware stormen wat vaker of minder vaak zouden kunnen voorkomen. De daarmee gepaard gaande verandering in zonneshijnduur en neerslaghoeveelheid zou invloed kunnen hebben op de opbrengst van graanoogsten in de vruchtbare landbouwgebieden in de VS en Europa. Het is niet onvoorstelbaar dat de ligging van droogte- en neerslaggebieden in de tropen zich zou wijzigen, met uiteraard verre gaande gevolgen voor de bevolking.

Met name in Nederland is de stand van de zeespiegel een gevoelig onderwerp. Er wordt geanticipeerd op de mogelijkheid dat de zeespiegel de komende 50 jaar wel eens een meter zou kunnen stijgen. Een warmere atmosfeer zou de gemiddelde temperatuur van het zeewater namelijk doen toenemen, waarna als gevolg van thermische expansie de waterstand zou stijgen. Een ander effect dat zou kunnen bijdragen tot zeespiegelrijzing is het versterkt afsmelten van landijs.

Evenals in de atmosfeer is ook in de oceanen de circulatie van belang, omdat deze mede de gemiddelde horizontale en verticale temperatuurverde-

ling bepaalt. De invloed daarvan op de zeespiegelstand is nog verre van duidelijk.

Uitspraken over mogelijke veranderingen in de zeespiegelstand zijn nog uiterst onzeker, omdat ze een produkt zijn van twee velden van onderzoek die beide nog grote leemtes bevatten:

- onderzoek dat, gegeven een verandering van de temperatuur van de atmosfeer, een uitspraak doet over de (wijziging van de) zeespiegelstand;
- onderzoek dat, gegeven een verandering van de concentratie van een aantal sporegassen, een uitspraak doet over de wijziging van de temperatuur van de atmosfeer.

Hier ligt nog een fascinerend terrein van onderzoek braak. Onderzoek dat met de huidige technologische hulpmiddelen kan worden aangepakt.

aantasting van de ozonlaag

Ozon is een natuurlijk bestanddeel van de atmosfeer. Het wordt gevormd in de stratosfeer, waar de intense ultraviolette zonnestraling zuurstofmoleculen splitst in twee afzonderlijke atomen. Deze recombineren weer met de aanwezige zuurstof tot ozonmoleculen. Dit proces is het meest efficiënt op een hoogte van ongeveer 25 km. Daarboven wordt de dichtheid te klein, zodat de recombinatiekansen verminderen. Op geringere hoogte is de intensiteit van de UV-straling te veel verminderd, zodat de dissociatie van het zuurstofmolecuul afneemt. Op ongeveer 25 km is de ozonconcentratie dan ook maximaal over een vrij dikke laag, de ozonlaag. Dit proces en de sterke absorptie van UV-straling door ozon maakt dat de intensiteit van deze straling op leefniveau veel lager is dan aan de buitenrand van onze atmosfeer. Het leven op aarde is "gewend" aan deze gefilterde zonnestraling en het staat vast dat een toename van UV-straling schadelijke effecten veroorzaakt in alle vormen van leven. Een dergelijke toename zou kunnen plaatsvinden als de hoeveelheid ozon zou afnemen. In 1976 werd voor het eerst de mogelijkheid geopperd dat de voortgaande emissie van gechloreerde fluor-koolwaterstoffen (CFK's) tot een aantasting van de ozonlaag zou kunnen leiden. CFK's worden gebruikt als koelvloeistof in koelkasten, als schoonmaakmiddel en als drijfgas in spuitbussen. Bij kamertemperatuur verdampen deze gassen makkelijk. Op leefniveau zijn de meeste van deze verbindingen betrekkelijk onschadelijk omdat ze tamelijk inert zijn. Maar juist deze eigenschap maakt dat ze een bedreiging vormen voor de ozonlaag.

Door hun inertie is hun verblijftijd in de atmosfeer extreem lang (tientallen jaren). Daardoor kunnen zij geleidelijk aan hogere luchtlagen bereiken, waar ze blootgesteld worden aan een sterkere UV-straling en uiteen vallen in andere verbindingen, waarbij o.a. atomair Chloor vrijkomt. Dit bindt de vrije zuurstofatomen die anders betrokken zouden zijn bij het vormingsproces van ozon. Uiteindelijk leidt dit tot lagere ozon evenwichtsconcentraties. Het gaat hier om tientallen reacties en vele chemische tussenprodukten. De meest recente modellen voorspellen een vermindering van 5-10% bij het huidige CFK-verbruik.

Onlangs hebben recente metingen op Antarctica uitgewezen dat daar een dramatische afname van ozonconcentraties plaatsvindt ("het ozongat boven de Zuidpool"). Betreft het hier een natuurlijke (langjarige) schommeling die we nu voor het eerst waarnemen of is de aanhoudende uitworp van gasvormige afvalprodukten de oorzaak? We tasten nog volledig in het duister. N.B.: Inmiddels weten we echter meer: zie hoofdstuk 4.

nucleaire winter

Een tiental landen beschikt over een arsenaal aan kernwapens dat ruim voldoende is om alle industriële- en bevolkingscentra ruimschoots te vernietigen. Hieraan ontlenen deze wapens dan ook hun betekenis. Pas onlangs is men zich gaan realiseren dat zelfs een zeer beperkte inzet van deze wapens al apocalyptische gevolgen kan hebben: de branden die op grote schaal zullen ontstaan, zullen een enorme rookontwikkeling met zich meebrengen die in eerste instantie slechts lokaal de hemel zal verduisteren. De atmosferische circulatie zal er echter voor zorgen dat deze enorme rookpluimen zich binnen enkele maanden over het noordelijk halfrond zullen uitbreiden (uitgaande van een nucleair treffen op dit halfrond), en enige maanden later ook over het zuidelijk halfrond. De grote hoeveelheid rookdeeltjes in de atmosfeer, die daar slechts langzaam uit zullen verdwijnen, zal ertoe leiden dat een gedeelte van de zonnestraling het aardoppervlak niet meer bereikt. Dat zal daardoor sterk afkoelen. Verder zal de stralingshuishouding van de atmosfeer en dientengevolge van de temperatuurverdeling in de atmosfeer zich wijzigen. Het gevolg is dat de atmosferische circulatie en het klimaat gedurende enige tijd ernstig uit hun evenwicht zullen zijn. Zo'n verstoring hoeft echter maar enige maanden te duren om de vegetatie en de zich daarmee voedende mens en dier blijvend aan te tasten.

Modellen die deze effecten beschrijven worden op dit moment ontwik-

keld omdat ze strategische betekenis hebben. De eerste schattingen van de effecten waren te extreem. Met wat men een understatement van cynisme zou kunnen noemen, spreekt men tegenwoordig dan ook liever over "nucleaire herfst".

Op dit ogenblik zijn nucleaire winter en herfst alleen nog maar macabere visioenen. Duidelijk is echter eens te meer dat de mens in staat is zijn leefklimaat en het klimaat op aarde ingrijpend en voor langere duur te wijzigen.

perspectief

Met bovenstaand overzicht hoop ik te hebben gedemonstreerd dat nader onderzoek van de structuur van onze atmosfeer dringend gewenst is. De economische opleving na de tweede wereldoorlog heeft o.a. in Nederland geleid tot een geweldige vervuiling van de bodem, waarvan de omvang pas jaren later aan het licht kwam. Laten we een dergelijke fout niet nog eens maken. Woonwijken moesten worden ontruimd en de bewoners verplaatst. In een mondiaal verontreinigde atmosfeer helpt verhuizen niet meer.

Er is echter nog een motief voor intensivering van het atmosferisch onderzoek, dat ik hier graag tot slot wil noemen. Het natuurkundig en chemisch onderzoek in de 20e eeuw heeft zich zeer sterk gericht op het analytische en fundamentele: de hoge energiefysica bijvoorbeeld, één van de speerpunten van het natuurkundig onderzoek, richt zich op de onttrafeling van de structuur van elementaire deeltjes. Ten koste van vele honderden miljoenen guldens worden pogingen ondernomen steeds verder in de structuur van de materie door te dringen. Wordt het niet eens tijd om enige tientallen miljoenen te besteden aan het minstens zo boeiende atmosferisch onderzoek? De processen die zich daar afspelen zijn weliswaar in grote lijnen bekend: de problemen schuilen in het samenspel, de integratie van deze processen, die de atmosfeer tot zo'n gecompliceerd geheel maken. De moderne technologie (o.a. satelliet observatiesystemen en supercomputers) stelt ons in staat de natuurkundige verschijnselen in onze dampkring nauwkeurig waar te nemen en met behulp van wiskundige modellen te simuleren. Zij opent daarmee de weg voor een nieuw en fascinerend terrein van onderzoek.

O.a. in de Verenigde Staten worden al onderzoekprogramma's opgestart. Aangezien het hier onderzoek betreft dat financieel nauwelijks door één Europees land kan worden gedragen, zijn wij in Europa aangewezen

op internationale samenwerking. Met instituten als CERN (Centre Européen de Recherche Nucleaire), ESA (European Space Agency) en ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasting) is aangetoond dat met in Europa gebundelde krachten topprestaties geleverd kunnen worden. Ook op gebied van atmosferisch onderzoek is in Europa voldoende kwaliteit aanwezig. Internationale samenwerking zou in de komende jaren moeten worden gestimuleerd. Het is de moeite waard.■

Beïnvloeding van het klimaat door de mens

C.J.E. Schuurmans

Klimaatveranderingen nemen soms de vorm aan van een natuurramp. Denken we b.v. aan de droogte die de Sahel-landen in de jaren zeventig trof, een droogte die op sommige plaatsen nu nog voortduurt. Schaarse gegevens tonen aan dat grote droogten zich in de geschiedenis talloze malen hebben voorgedaan, op vele plaatsen in de wereld. Nieuw en min of meer wereldschokkend zijn de aanwijzingen dat zulke natuurrampen ook door menselijke activiteiten teweeggebracht zouden kunnen worden, zelfs op wereldschaal. Het bekendste voorbeeld in dit verband is de invloed van het toenemende CO₂-gehalte van de atmosfeer, teweeggebracht door de verbranding van fossiele brandstoffen. Met een variant op de bekende song zou men kunnen zeggen: 'The world is waiting for the CO₂-warming'. Al jaren lang tonen theoretici aan dat er echt wat staat te gebeuren. Maar weet het wereldklimaat dan nog helemaal van niets?

Inleiding

Onderzoek naar de beïnvloeding van het klimaat door de mens is iets van de laatste 25 jaar. De eerste samenhangende tekst over dit onderwerp verscheen in boekvorm in 1974^[1]. De tekst handelt voornamelijk over de opzettelijke beïnvloeding van weer en klimaat: regen maken, hagel bestrijden enz., met een enkel uitstapje naar de onopzettelijke beïnvloeding, die als bijproduct van bepaalde menselijke activiteiten zou kunnen ontstaan. Het zwaartepunt van het onderzoek heeft zich de laatste 10 jaar echter duidelijk verlegd naar de onopzettelijke beïnvloeding, deels misschien vanwege gebrek aan succes bij de opzettelijke beïnvloeding, deels ook door de toegenomen zorg (c.q. angst) dat er door allerlei menselijke activiteiten per ongeluk wel eens iets mis zou kunnen gaan met het klimaat. De lijst van potentiële boosdoeners blijft intussen groeien. Een overzicht, samengesteld in 1980^[2], is al weer verouderd en moet worden aangevuld. Natuurlijk is niet alles even belangrijk. Een brand in een olieopslagplaats kan voor zoveel rookontwikkeling zorgen, dat tijdens de brand, benedenwinds aantoonbaar lagere temperaturen optreden. Zo'n effect is echter onmiddellijk daarna weer verdwenen en het beperkt zich tot een heel klein gebied.

Pas als het een behoorlijk groot gebied beslaat en zeer lange tijd blijft bestaan, zullen we het als klimaatinvloed aanmerken. Dit is nogal vaag, maar de meteoroloog hanteert op dit terrein ook geen strakke grenzen. Weer en klimaat variëren op vrijwel alle tijd- en ruimteschalen. Veranderingen van minuten tot weken noemen we meestal *weer*, die op een tijdschaal van maanden en jaren *klimaat*. Voor het klimaat hanteren we als ruimteschalen: lokaal (b.v. een stad), regionaal (deel van een land of stroomgebied van een rivier) en mondiaal. In dit artikel over menselijke invloeden op het klimaat (vaak antropogene klimaatveranderingen genoemd) houd ik me alleen bezig met regionale en mondiale beïnvloeding. De duidelijkste vorm van antropogene klimaatinvloed, het stadsklimaat, kan beter apart worden behandeld.

Regionale beïnvloeding

In de aanhef tot dit artikel is de Sahel-droogte al genoemd. Velen zijn van mening dat deze droogte door menselijke activiteiten (overbeweiding e.d.) werd veroorzaakt of in ieder geval versterkt. Het meteorologische aangrijpingspunt is in dit geval de albedo (= terugkaatsend vermogen voor zonlicht) van het aardoppervlak. Bij voldoende

begroeiing is de albedo ca. 0,15. Bij kale grond in de Sahel-gebieden neemt de albedo echter waarden aan tot ca 0,35; met behulp van satellietmetingen is dit goed vast te stellen. Deze hoge reflectie-coëfficiënt is in het zomerhalfjaar in staat om de stralingsbalans van aarde plus atmosfeer in dit gebied negatief te maken. Door dit netto stralingsverlies koelt de lucht af. De hierdoor ontstane horizontale temperatuurgradiënt brengt dynamische effecten teweeg, die aanleiding geven tot dalende luchtbewegingen. Door deze (extra) dalende bewegingen neemt de relatieve vochtigheid af en de eventueel nog aanwezige bewolking lost op. De hierdoor voortdurende droogte aan het aardoppervlak zal de plantengroei belemmeren, waardoor de albedo nog hoger kan worden. Deze positieve terugkoppeling wordt pas doorbroken als de stralingsbalans in de loop van het jaar verschuift. Dit gebeurt meestal in het najaar, maar ieder voorjaar kan de droogte weer snel de kop opsteken.

Over de preciese gang van zaken rond de Sahel-droogte is het laatste woord nog niet gezegd. De laatste paar jaar richt het onderzoek zich sterk op een

beter begrip van de windstructuur in natte en droge perioden, in samenhang met de luchtcirculatie in de omgeving van Noord-Afrika. Maar vooral nu dit keer de droogte zeer lang voortduurt, zie fig. 1, wordt het steeds waarschijnlijker dat er lokale menselijke invloeden in het geding zijn. (Men zegt wel dat vroeger in droogteperioden de mensen wegtrokken, waarna de natuur zich kon herstellen, terwijl nu de bevolking in de Sahel-landen aanwezig blijft).

De Sahel-droogte is de eerste in een rij van mogelijke regionale menselijke invloeden op het klimaat. Enigszins gerubricerd gaat het om de volgende ingrepen:

1. De verwoesting van sommige gebieden door overbeweiding en andere ondeugdelijke landbouwpraktijken;
2. De ontbossing in de tropen;
3. De aanleg van grote waterreservoirs en stuwmeren;
4. De omlegging van de natuurlijke loop van rivieren;
5. De lozing van grote hoeveelheden afvalwarmte in het oppervlaktewater of in de lucht.

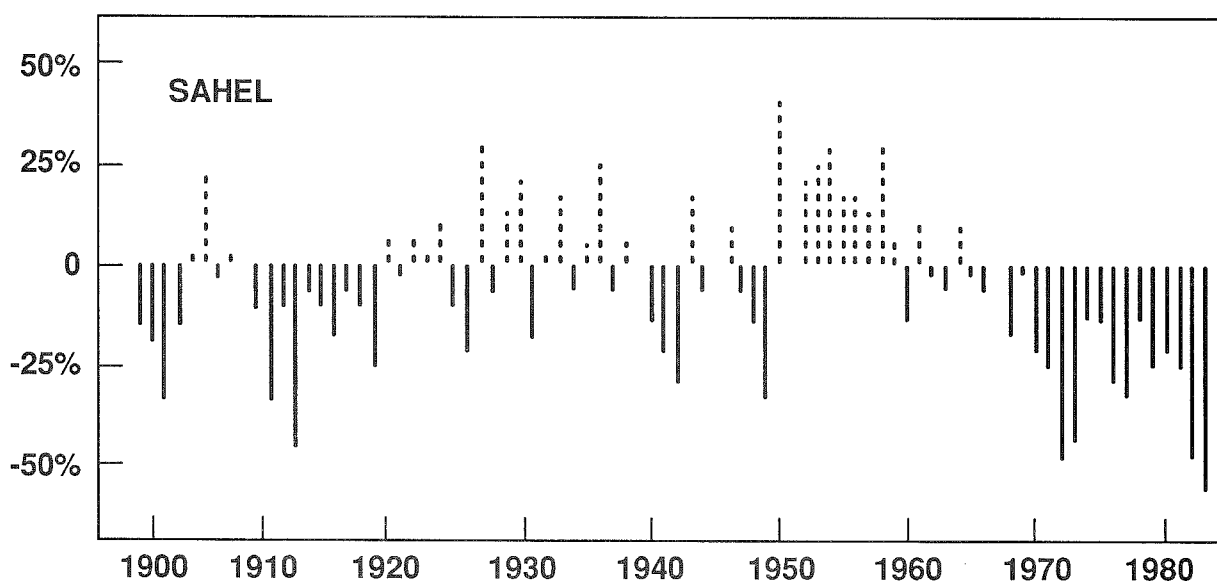


Fig. 1. Procentuele afwijking van de normale hoeveelheid neerslag in de Sahel-zone (ruwweg de breedtegraden tussen 15 en 20°NB in Noord Afrika) voor de jaren vanaf 1900.

Energiebalans

Bovengenoemde ingrepen hebben met elkaar gemeen dat ze de energiebalans van het aardoppervlak ter plaatse beïnvloeden. De preciese gevolgen daarvan zijn nooit rechtstreeks aan te geven. Weliswaar is de energiebalans zelf betrekkelijk simpel, zie *Tabel 1*, maar iedere verandering daarin brengt veranderingen teweeg in de atmosfeer, en die veranderingen koppelen weer terug op het aardoppervlak.

Met één-dimensionale (verticale z-as) energiebalansmodellen van aardoppervlak plus atmosfeer kan de nieuwe evenwichtstemperatuur aan het aardoppervlak worden berekend. Erg betrouwbaar is zo'n resultaat echter niet, doordat voor een aantal meteorologische processen zoals wolkenvorming en neerslag, de één-dimensionale beschrijving te onnauwkeurig is. Bovendien kan geen rekening worden gehouden met een verandering in het netto horizontale warmtetransport. Uitbreiding van het model naar twee of drie dimensies bevat in sommige opzichten een verbetering, maar uiteindelijk moet toch worden vastgesteld dat het probleem niet kan worden opgelost met energiebalansmodellen alleen.

Algemene circulatiemodellen

Modellen die naast de energiehuishouding ook de atmosferische bewegingen beschrijven, worden 'algemene circulatiemodellen' genoemd (GCM's: general circulation models). Ze zijn meestal 3-dimensionaal. In zo'n model kan op een recht-toe-recht-aan-manier een willekeurige verstoring van de energiebalans aan het aardoppervlak worden geïntroduceerd en de gevolgen daarvan worden berekend. Qua aanpak is er dan ook geen probleem meer, alleen zijn de GCM's nog niet goed genoeg om een

definitief antwoord te geven op iedere willekeurige vraag.

Om een indruk te geven in welk stadium het modelonderzoek zich bevindt, moge het volgende voorbeeld dienen. Stel: er is een warmtebron aan het aardoppervlak met een extra verwarming van de atmosfeer van 1 K/dag over een oppervlakte zo groot als Europa. Men zou hierbij kunnen denken aan de thermische pollutie die in sommige dichtbevolkte gebieden in de winter al enkele W/m^2 bedraagt. Dit komt overeen met één of enkele procenten van de hoeveelheid zonnestraling ter plaatse. Experimenten met GCM's laten zien dat het effect van zo'n verwarming zich niet hoeft te beperken tot het gebied waar de verwarming plaatsvindt. Dit is natuurlijk van buitengewoon groot belang. Het bevestigt min of meer de bange gevoelens die milieumensen al zo vaak hebben geuit, nl. dat grootscheepse ingrepen in de natuur, zoals de ontbossing van het Amazone-gebied, wel eens mondiale gevolgen zouden kunnen hebben. *Fig. 2* geeft een indruk van de wijze waarop zo'n verstoring van de atmosfeer zich voortplant. Pal boven de warmtebron is de reactie het grootst, maar vanuit het brongebied vertrekken als het ware twee golfreinen die de reactie elders veroorzaken. In het plaatje loopt een golfreijn over Europa en Noord-Rusland naar Noord-Amerika en een tweede vanuit het brongebied recht naar het oosten. De figuur is ontleend aan onderzoek dat op het KNMI wordt verricht om de invloed van natuurlijke warmtebronnen als b.v. de zeestroming El Niño in de Stille Oceaan, op ons winterklimaat te onderzoeken. Het model is eenvoudiger dan een GCM, maar is voor het hier besproken punt volledig daarmee vergelijkbaar. Opgemerkt zij dat zulke invloeden over grote afstanden (zg. teleconnections) ook statistisch worden onderzocht. De gevonden correlaties bieden echter geen

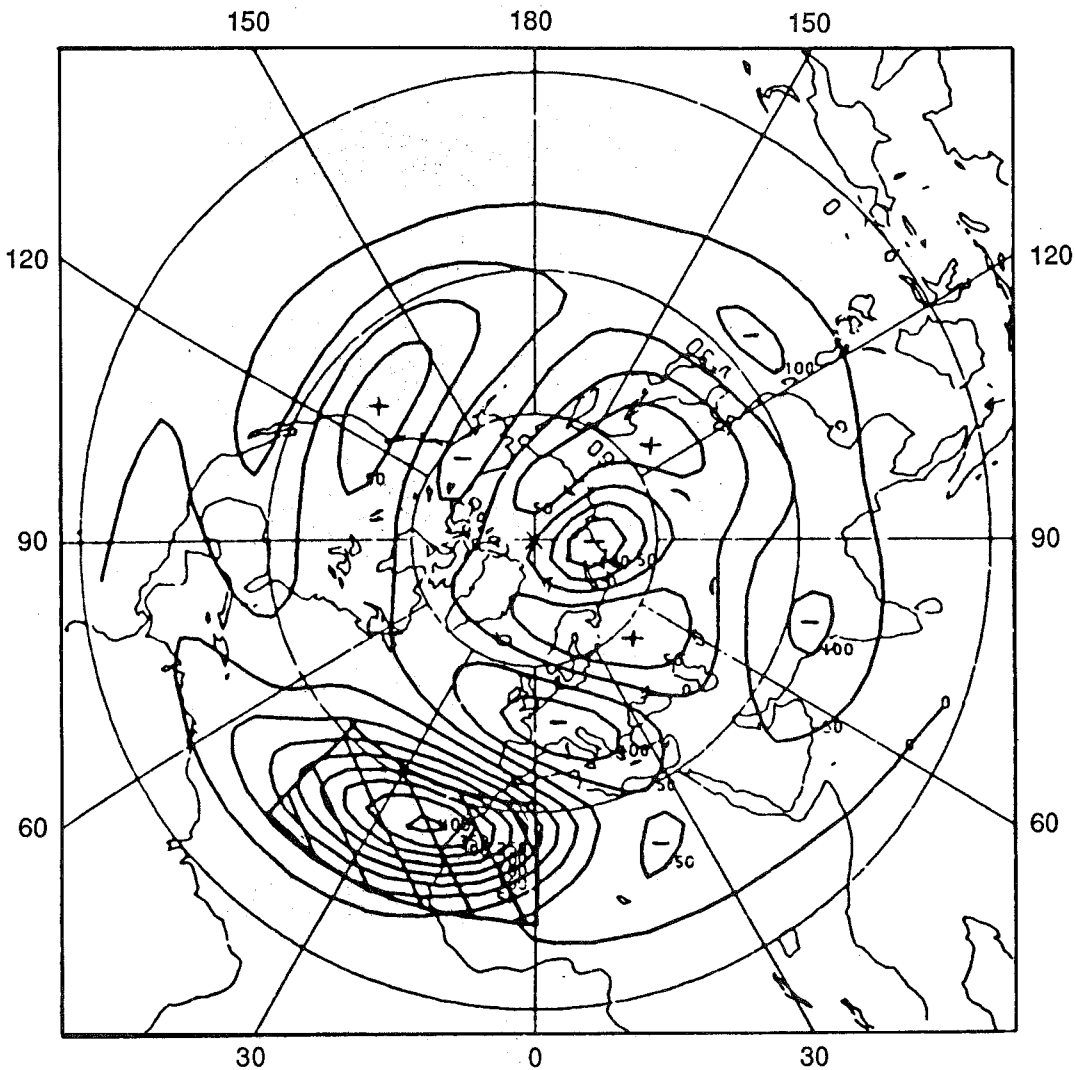


Fig. 2. Geografische verdeling van de temperatuurveranderingen die het gevolg zijn van een warmtebron in de subtropen. De warmtebron die een verwarming veroorzaakt van 1 K/dag, bevindt zich in het gearceerde gebied (tussen 15-30°NB en 0-45°WL). Isolijnen zijn getrokken om de 0,2 K. Dit is de reactie van een modelatmosfeer voor de maand januari.

fysisch inzicht en vormen een te zwakke basis voor voorspellingen.

Mondiale beïnvloeding

Uit het voorgaande bleek dat een mondiale verandering van het klimaat zou kunnen worden veroorzaakt door een regionale beïnvloeding. Om precies aan te geven hoe en wat zal nog veel onderzoek nodig zijn. Ondertussen hebben we echter ook te maken met een rechtstreekse mondiale beïnvloeding

van de atmosfeer door menselijke activiteiten. Het gaat om de door de mens teweeggebrachte veranderingen in de samenstelling van de atmosfeer. De atmosfeer wordt zodanig goed gemengd dat veranderingen in de samenstelling, wáár ook veroorzaakt, na verloop van enkele maanden of jaren, overal op aarde kunnen worden gemeten. Het bekendste voorbeeld in dit verband is de toeneming van het CO₂-gehalte van de atmosfeer, samenhangend met de verbranding van fossiele brandstoffen. Voor de volledigheid volgt hier echter

de complete lijst van waargenomen of realiseerbare veranderingen in de samenstelling van de atmosfeer, waarbij ik me beperk tot die gassen en aerosolen die klimatologische effecten kunnen veroorzaken. In volgorde van belangrijkheid op dit moment zijn dit:

1. De toeneming van het CO₂-gehalte door gebruik van fossiele brandstoffen.
2. De toeneming van het CH₄ (methaan)-gehalte door produktie van steenkool en aardgas, alsmede door uitbreiding van de veestapel en de rijstbouw.
3. De toeneming van de N₂O (lachgas)-concentratie door gebruik van fossiele brandstoffen en kunstmest.
4. De toeneming van de CFC (chloorfluorkoolwaterstoffen)-concentratie, samenhangend met het gebruik hiervan als koelvloeistof en als drijfgas in spuitbussen.
5. De toeneming van de O₃ (ozon)-concentratie in de troposfeer en mogelijk gelijktijdige afneming in de stratosfeer als gevolg van een complex van oorzaken, deels samenhangend met 1 t.m. 4.
6. De toeneming van de stofconcentratie, weliswaar niet wereldwijd, maar over uitgestrekte gebieden met veel steden en industrie.

Stralingshuishouding en broeikaseffect

Veranderingen in de samenstelling van de atmosfeer als hierboven genoemd, leiden alle tot veranderingen in de stralingshuishouding van het systeem aarde plus atmosfeer, en daardoor mogelijk tot veranderingen in het klimaat.

Bij de genoemde veranderingen in de samenstelling van de atmosfeer is het vooral het infrarode deel van de stralingshuishouding dat wordt beïnvloed. De drie- of meeratomige gassen hebben rotatie- en vibratieovergangen in dat deel van het spectrum. Ze laten de

kortgolvlige zonnestraling ongehinderd door, maar dragen bij tot het zg. broeikaseffect van de atmosfeer. Bij een grotere atmosferische concentratie van deze gassen neemt aan het aardoppervlak de IR-instraling dus toe. Dit is de term I_{\downarrow} in Tabel 1. Bij verdubbeling van het CO₂-gehalte van de atmosfeer van 300 naar 600 parts per million is de toename van de IR-instraling ca. 4 W/m²; men zou dit het primaire effect kunnen noemen. Waar het vervolgens om gaat, is natuurlijk hoe het systeem aardoppervlak plus atmosfeer hierop reageert. In een artikel in *Energiespectrum*^[3] is het broeikaseffect van de atmosfeer nader uitgelegd en is tevens aangegeven hoe op een eenvoudige manier de uiteindelijke temperatuurverandering kan worden berekend (zie kader) – de verandering althans van de wereldgemiddelde temperatuur. Bij een verandering van de IR-instraling $\Delta I_{\downarrow} = 4 \text{ W/m}^2$ blijkt deze temperatuurverandering $\Delta T_s = 2,5\text{-}4,5 \text{ K}$, afhankelijk van de mate van positieve terugkoppeling, die voornamelijk wordt veroorzaakt door waterdamp (bij hogere temperatuur neemt de absolute vochtigheid van de lucht toe, waardoor het broeikaseffect verder wordt versterkt). Over deze en andere terugkoppelingen bestaan nog grote onzekerheden, en het probleem is met eenvoudige energie- en stralingsbalansmodellen dan ook niet op te lossen (zie boven).

Nog een enkel woord over de invloed van toenemende stofconcentraties in de atmosfeer. Die kunnen zowel de kortgolvlige zonnestraling (hogere albedo en/of hogere absorptie) als de langgolvlige infraroodstraling beïnvloeden. De nettoïnvloed is, behalve van de aard van het stof, ook afhankelijk van de verticale verdeling van het stof in de atmosfeer. Bovendien, en dat is minder triviaal, ook van de helderheid en thermische eigenschappen van het oppervlak waarboven het stof zich bevindt^[4]. Een bijzondere vorm van antropogene

stoftoename van de atmosfeer treedt mogelijk op bij een kernoorlog. De wereldbrand die dan letterlijk ontstaat, leidt tot zulke hoge concentraties roetdeeltjes dat vrijwel geen zonlicht de aarde nog kan bereiken. Men heeft berekend dat het stof lang genoeg in de atmosfeer aanwezig blijft om weken- tot maandenlang een nucleaire winter te laten ontstaan^[5].

Gevolgen van het broeikas-effect

Over de klimatologische gevolgen van een toenemend CO₂-gehalte in de atmosfeer is al veel geschreven. Ook dit blad besteedde er aandacht aan in een artikel van Reiff in 1980^[6]. Reiff besprak behalve de klimatologische gevolgen ook de verwachte verdere toename van het CO₂-gehalte. Naast het toekomstige energieverbruik speelt daarbij ook het toekomstige gedrag van de koolstofkringloop in de natuur een rol. Van de totale hoeveelheid CO₂ die door verbranding van fossiele brandstoffen in de atmosfeer wordt gebracht, blijkt ca. 60% in de atmosfeer achter te blijven. De rest verdwijnt voornamelijk in de bovenlaag van de oceanen; een klein deel wordt vastgelegd in de biosfeer. In principe kan de diepe oceaan alle CO₂ die bij verbranding van fossiele brandstoffen vrijkomt gemakkelijk opnemen, maar de snelheid waarmee het van de bovenlaag naar de diepe oceaan wordt doorgegeven, is veel geringer dan de snelheid waarmee het door verbranding in de atmosfeer wordt gebracht. CO₂ hoopt zich daarom in de atmosfeer op, maar of die ophoping ook in de toekomst 60% van de geëmitteerde hoeveelheid blijft bedragen, is niet met zekerheid bekend. Ondanks deze onzekerheden lijkt het waarschijnlijk dat halverwege de 21e eeuw de CO₂-concentratie twee keer zo hoog zal zijn als in de vóór-industriële periode (ca. 1850). De klimatologische gevolgen van zo'n verdubbeling zijn in het artikel van

Reiff eveneens beschreven. In het kort komen ze neer op:

- 1) Een temperatuurstijging aan het aardoppervlak van gemiddeld 2-3°C, maar in de poolgebieden aanzienlijk meer.
- 2) Afkoeling van de stratosfeer.
- 3) Meer neerslag en meer verdamping (intensivering van de hydrologische cyclus met 5 à 10%).

Sindsdien zijn de te verwachten veranderingen niet wezenlijk gewijzigd. Zoals eerder in dit artikel is betoogd, kan men de gevoeligheid van het klimaat voor veranderingen in de samenstelling van de atmosfeer het best bestuderen met behulp van drie-dimensionele algemene circulatiemodellen. Ik moet daaraan toevoegen dat zo'n algemeen circulatiemodel van de atmosfeer gekoppeld moet worden aan een algemeen circulatiemodel van de oceaan. In werkelijkheid gaat het ook om gekoppelde systemen. Door zijn grote warmtecapaciteit reageert de oceaan echter honderd tot duizend keer zo traag als de atmosfeer. Bovendien zijn de mechanismen die het horizontale warmtetransport verzorgen, in de oceaan veel kleiner van omvang (100 km) dan die in de atmosfeer (1000-10 000 km). Dit brengt in een computermodel bijna onoplosbare problemen met zich mee, als de twee media een gecoördineerde ontwikkeling moeten doorlopen. De klimaatonderzoeksgroep van het KNMI legt zich o.a. toe op de oplossing van dit probleem. In het klimaatmodel van het Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) te Princeton is voor de koppeling een voorlopige oplossing gekozen. Het is interessant om te zien hoe in dit model de temperatuur reageert op een verhoging van het CO₂-gehalte (fig. 3).

In de figuur is de uiteindelijke evenwichtstoestand zelf niet aangegeven. Maar daar zijn we ook minder in geïnteresseerd. Vooral in de diepe oceaan kan het immers duizenden jaren duren voor een thermisch evenwicht

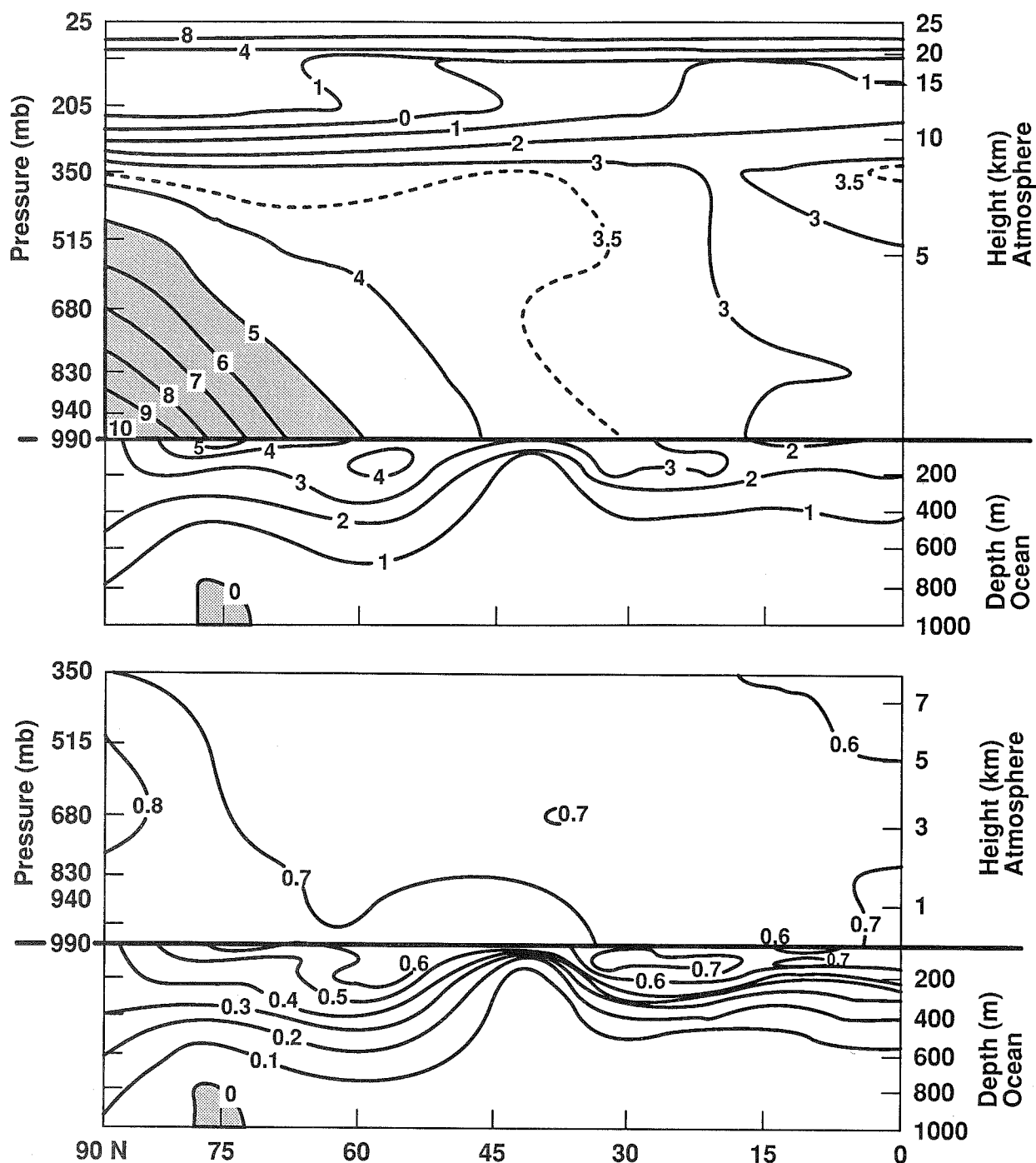


Fig. 3. Temperatuurverandering t.g.v. een verviervoudiging van het CO₂-gehalte, berekend met een algemeen circulatiemodel met gekoppelde atmosfeer en oceaan. In (a) zijn de werkelijke temperatuurveranderingen na 25 jaar aangegeven; in (b) hetzelfde als in (a), maar nu als percentage of fractie van de temperatuurverandering die zich uiteindelijk bij 4 × CO₂ zal instellen.

wordt bereikt. Fig. 3a laat zien hoe de temperatuurverandering er uitziet 25 jaar nadat een verviervoudiging van het vóórindustriële CO₂-gehalte heeft

plaatsgevonden. Het lijkt overdreven om de gevoeligheid voor zulke grote concentratieveranderingen te bestuderen, maar het wordt al realistischer als

men bedenkt dat de invloed van de toename van andere sporegassen samen (CH₄, N₂O enz.) wel eens even groot zou kunnen zijn als die van de CO₂-toename. De temperatuurreactie in de atmosfeer vertoont dezelfde kenmerken als de atmosfeermodellen zonder gekoppelde oceaan eerder te zien gaven: toeneming van het effect met de geografische breedte, temperatuurstijging in de troposfeer en daling in de stratosfeer. In fig. 3b ziet men dat de oceaan traag reageert vergeleken bij de atmosfeer. Na 25 jaar is in de atmosfeer al 70% van de evenwichtstoestand gerealiseerd, in de oceaan is beneden 500 m dan nog weinig te merken.

Detectie

De temperatuurveranderingen zoals die in fig. 3 te zien zijn, zijn naar klimaathistorische maatstaven gemeten erg groot. De afgelopen 1000 jaar waren de schommelingen in de jaargemiddelde temperatuur vermoedelijk niet veel groter dan 1 à 2 K. Toch spreken we van de 'warme' Middeleeuwen 1000-1200, waarin wijnbouw tot op onze breedte voorkwam en van de Kleine IJstijd in de 17e eeuw, waarin de winters bij ons vaak streng waren en de gletsjers sterk groeiden. Uitgedrukt in termen van de lengte van het groeiseizoen of stookseizoen betekent 1 K temperatuurverandering al gauw een verandering van 2 à 3 weken. Ruwweg het gemiddelde verschil tussen Zuid- en Noord-Nederland. Niemand twijfelt dan ook aan de ernst van de veranderingen wanneer deze zich zouden gaan voltrekken. Nog afgezien van de andere klimaatveranderingen die zich daarbij zullen voordoen: nattere winters, drogere zomers, stijging van de zeespiegel. De vraag is eerder *wanneer* het zal gebeuren en of sommige veranderingen misschien nu al meetbaar zijn. Sinds 1850 is het CO₂-gehalte toegenomen van 285 tot 345 ppm (dus met ruim 20%), en terecht vraagt men zich af of de temperatuurverandering die daarvan het gevolg moet zijn, al kan worden waargenomen. Volgens de beste schat-

tingen zou de antropogene temperatuurstijging op dit moment 0,3-1,1 K bedragen. Bij die schatting is ook rekening gehouden met toeneming van andere sporegassen dan CO₂ en met de vertragende invloed van de oceanen. De geschatte verandering geldt voor de wereldgemiddelde temperatuur. Helaas is deze grootte pas met enige betrouwbaarheid te berekenen vanaf het begin van deze eeuw, toen er een voldoende uitgebreid netwerk van temperatuurmetingen was ontstaan. Fig. 4 laat het verloop sinds 1904 zien. Een temperatuurstijging van ca. 0,5 K is onmiskenbaar.

Maar daarmee is de kous niet af. Een temperatuurverandering van deze omvang ligt nog binnen de grenzen van de natuurlijke (niet-antropogene) schommelingen. Het is daarom niet zonder meer duidelijk dat de stijging het gevolg is van de CO₂-toename. Het ontrafelen van de gevolgen van de verschillende mogelijke oorzaken is een moeilijk probleem. Zoals men in fig. 4 ziet, is de jaar-op-jaar-verandering van

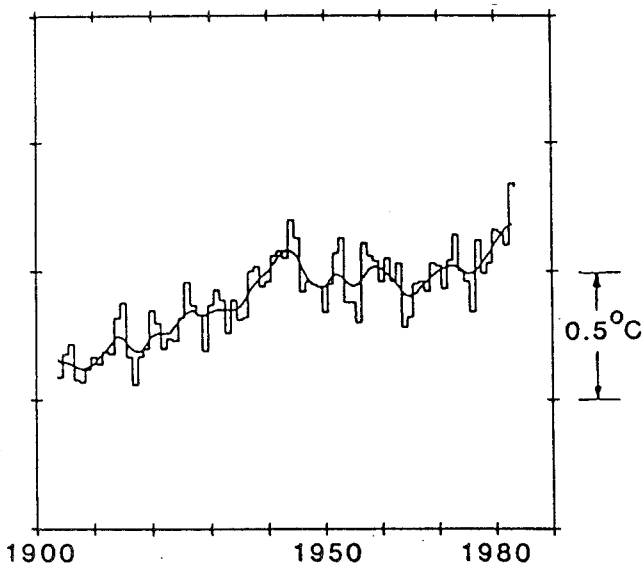


Fig. 4. Verloop van de wereldgemiddelde luchttemperatuur aan het aardoppervlak sinds 1904. De doorgetrokken lijn geeft het verloop weer van de gemiddelde temperatuur, berekend met een Gauss-filter met een karakteristieke tijd van 10 jaar. Het wereldgemiddelde is gebaseerd op een representatieve steekproef van waarnemingen op het Noordelijk en Zuidelijk Halfrond, inclusief de oceangebieden.

de temperatuur soms vrij groot. Dit is voornamelijk terug te brengen tot toevallige weersomstandigheden in een bepaald jaar. Dit kan statistisch doorwerken en een deel van de waargenomen tendentie verklaren. Veranderingen in de zonnestraling, ofschoon slecht bekend, en vulkaanuitbarstingen kunnen ook hebben bijgedragen tot het waargenomen temperatuurverloop. Het is dus moeilijk uit te maken met welke 'ruis' het geschatte CO₂-signaal moet worden vergeleken. Zolang dit probleem niet is opgelost, kan men hoogstens concluderen dat 'de temperatuurstijging die in deze eeuw is opgetreden, niet in strijd is met het verwachte CO₂-effect'. Op zichzelf is deze conclusie al alarmerend genoeg om het probleem van de menselijke invloed op het klimaat serieus te nemen. Behalve maatschappelijk relevant is het probleem ook wetenschappelijk nog interessant. ■

Theorie van het broeikaseffect

Aan de 'rand' van de atmosfeer heerst stralingsevenwicht. De inkomende zonnestraling S wordt gemiddeld gecompenseerd door de gereflecteerde zonnestraling aS (a is de reflectiecoëfficiënt) plus de uitgaande IR-straling I . Dus bij stralingsevenwicht:

$$S(1 - a) = I. \quad (1)$$

Hierin is I een functie van de temperatuur van het aardoppervlak T_s en van de atmosfeer, van de samenstelling van de atmosfeer (H₂O, CO₂ enz.), van de bewolgingsgraad, de wolkenhoogte enz. Als het CO₂-gehalte C van de atmosfeer verandert, zal I veranderen. In het streven naar een nieuw evenwicht zullen allerlei andere grootheden veranderen, waarbij we in de eerste plaats zijn

geïnteresseerd in de verandering ΔT_s van de temperatuur. Differentiatie van (1) naar T_s :

$$-S \frac{da}{dT_s} = \sum \frac{\partial I}{\partial x} \frac{dx}{dT_s} + \frac{\partial I}{\partial C} \frac{dC}{dT_s},$$

waarbij x de overige variabelen zijn, leidt tot de volgende formule voor ΔT_s :

$$\Delta T_s = \frac{-\frac{\partial I}{\partial C} \Delta C}{\sum \frac{\partial I}{\partial x} \frac{dx}{dT_s} + S \frac{da}{dT_s}}. \quad (2)$$

De waarde van de teller van (2) volgt uit stralingsberekeningen. Bij verdubbeling van het CO₂-gehalte is de orde van grootte + 4 W/m². De eerste term uit de noemer vertegenwoordigt een aantal slecht-bekende terugkoppelingsprocessen. De waarde van deze term is dan ook niet nauwkeuriger aan te geven dan 1,6-2,2 W/m² K. De tweede term uit de noemer beschrijft de ijsalbedotemperatuurterugkoppeling. Op wereldschaal is deze term negatief: hogere temperaturen leiden tot minder ijs- en sneeuwbedekking, en daarmee tot een geringer terugkaatsend vermogen voor kortgolvlige straling. Uit waarnemingen volgt:

$da/dT_s = -0,002 \text{ K}^{-1}$, zodat met $S = 350 \text{ W/m}^2$ de waarde van $S da/dT_s = -0,7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ wordt gevonden. Uit (2) blijkt na substitutie van deze getallen:

$$2,7 < \Delta T_s < 4,4 \text{ K}. \quad (3)$$

Deze simpele beschouwing geeft aan dat de nog gebrekkige kennis van de verschillende terugkoppelingsprocessen in de atmosfeer het onmogelijk maakt om de gevolgen van het toenemend CO₂-gehalte nauwkeurig aan te geven.

Overigens is uit (1) ook af te leiden dat zonder terugkoppelingsprocessen de ΔT_s bij verdubbeling van het CO_2 -gehalte ruim 1 K bedraagt. Dit resultaat is gebaseerd op de vrij redelijke veronderstelling dat de uitgaande IR-straling I geschreven kan worden als een fractie ε van de IR-uitstraling van het aardoppervlak. Vatten we het aardoppervlak als zwarte straler op, dan geldt dus:

$$I = \varepsilon \sigma T_s^4. \quad (4)$$

Hiermee kunnen we berekenen hoeveel T_s moet toenemen om de vermindering van I door de CO_2 -toename weer te compenseren. Uit (4) en (1) volgt onmiddellijk:

$$\frac{dI}{dT_s} = 4\varepsilon\sigma T_s^3 = \frac{4}{T_s} I = \frac{4}{T_s} (1 - a)S. \quad (5)$$

Met $S = 350 \text{ W/m}^2$, $a = 0,3$ en $T_s = 288 \text{ K}$ volgt een waarde $dI/dT_s = 3,4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Om opnieuw stralingsevenwicht te bereiken aan de rand van de atmosfeer, is bij een stralingsvermindering $\Delta I = -4 \text{ W/m}^2$ (bij verdubbeling van het CO_2 -gehalte) dus een temperatuurstijging nodig die gelijk is aan:

$$\Delta T_s = \frac{4}{3,4} = 1,2 \text{ K}. \quad (6)$$

Uit een vergelijking van (6) met (3) volgt dat de terugkoppelingsprocessen in de atmosfeer gemiddeld een versterkend effect hebben op de initiële temperatuurverhoging. ■

Referenties

1. W.N. Hess (ed.): Weather and climate modification. J. Wiley & Sons, Inc. New York, 1974.
2. J. Reiff, C.J.E. Schuurmans (red.): Antropogene klimaatveranderingen. Overzicht van de stand van zaken. KNMI, Verslagen V-347 (1980).

(Verkrijgbaar bij KNMI)

3. C.J.E. Schuurmans, J. Oerlemans, R. Mureau, H.M. van den Dool: Fysische aspecten van het CO_2 -probleem. *Energiespectrum*, **6** (1982), 218-228.
4. J.M. Mitchell: The effect of atmospheric aerosols on climate with special reference to temperature near the Earth's surface. *J. Appl. Met.*, **10** (1971), 703-714.
5. P.J. Crutzen, I.E. Galbally, C. Brühl: Atmospheric effects from post-nuclear fires. *Climatic Change*, **6** (1984), 323-364.
6. J. Reiff: De klimatologische gevolgen van een toenemend CO_2 -gehalte in de atmosfeer. *Ned. T. v. Nat.*, **A46** (1980), 92-95.
7. M.J. Spelman, S. Manabe: Influence of oceanic heat transport upon the sensitivity of a model climate. *J. Geo. Res.*, **89** (1984), 571-586.

3 Het broeikaseffect en zijn gevolgen

Het broeikaseffect

P. Siegmund

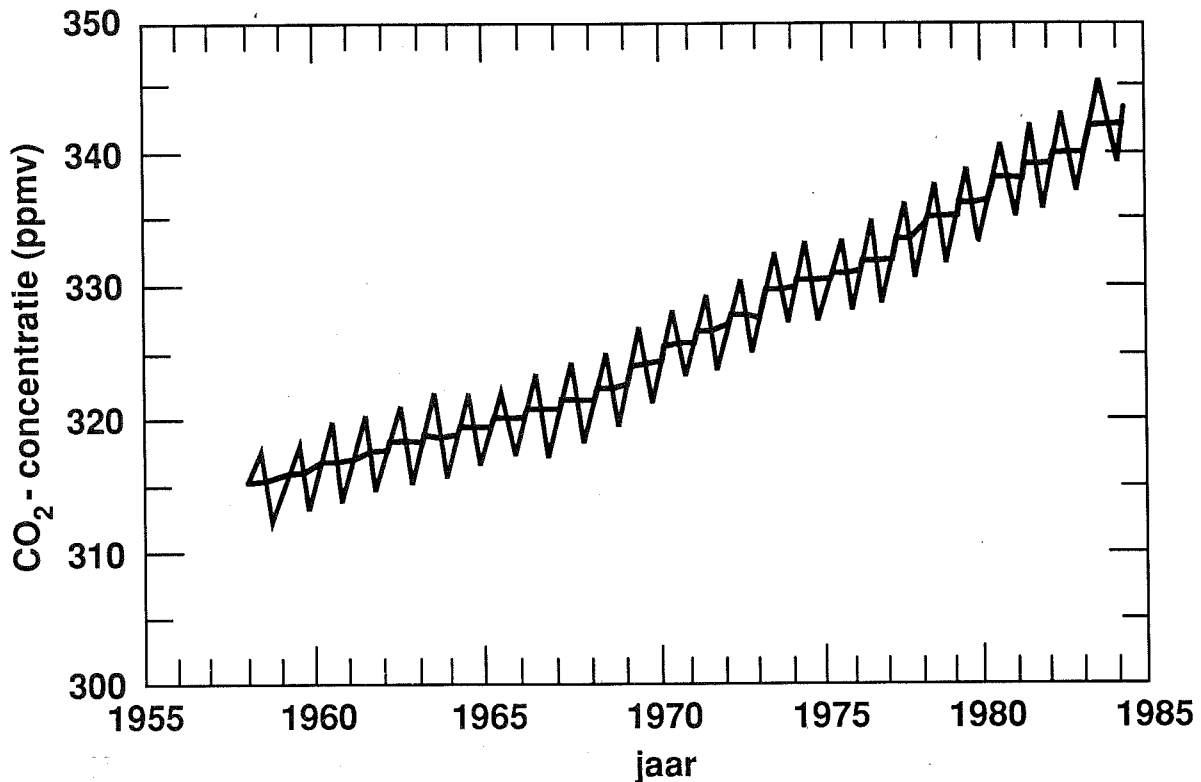
Door een aantal grootschalige menselijke activiteiten, zoals verbranding van fossiele brandstoffen, ontbossing, luchtvervuiling en landbouw, verandert de samenstelling van de atmosfeer. De laatste jaren is er een groeiend besef dat de veranderende samenstelling van de atmosfeer grote gevolgen kan hebben voor ons leefmilieu. We zullen ons hier beperken tot de gevolgen voor het wereldklimaat, zoals de gemiddelde temperatuur op aarde, de sterkte en richting van de wind, de neerslag etc.. Er zijn sterke aanwijzingen dat door de veranderende samenstelling van de atmosfeer in de komende eeuw de gemiddelde temperatuur op aarde enkele graden zal stijgen. Dit verschijnsel staat bekend als "het broeikaseffect".

Hieronder worden eerst de belangrijkste waarnemingen op het gebied van het broeikaseffect beschreven. Vervolgens wordt uitgelegd waarom en hoe het klimaat kan veranderen als de samenstelling van de atmosfeer verandert. In een intermezzo, dat los staat van de overige tekst, wordt een eenvoudig natuurkundig model van het broeikaseffect beschreven.

Kooldioxide (CO₂)

De atmosfeer van de aarde bestaat voor bijna 100% uit twee gasen: zuurstof en stikstof. Daarnaast bevat de atmosfeer echter ook een aantal gasen waarvan de concentratie zeer gering is. Deze gasen, in hoofdzaak waterdamp en CO₂, zijn echter van grote invloed op het klimaat. Sinds het begin van de industriële revolutie, rond 1850, neemt de CO₂-concentratie in de atmosfeer toe, vooral door verbranding van fossiele brandstoffen, zoals olie, gas en kolen. Ook ontbossing, waarbij de bomen vaak verbrand worden, draagt bij tot de toename van de CO₂-concentratie.

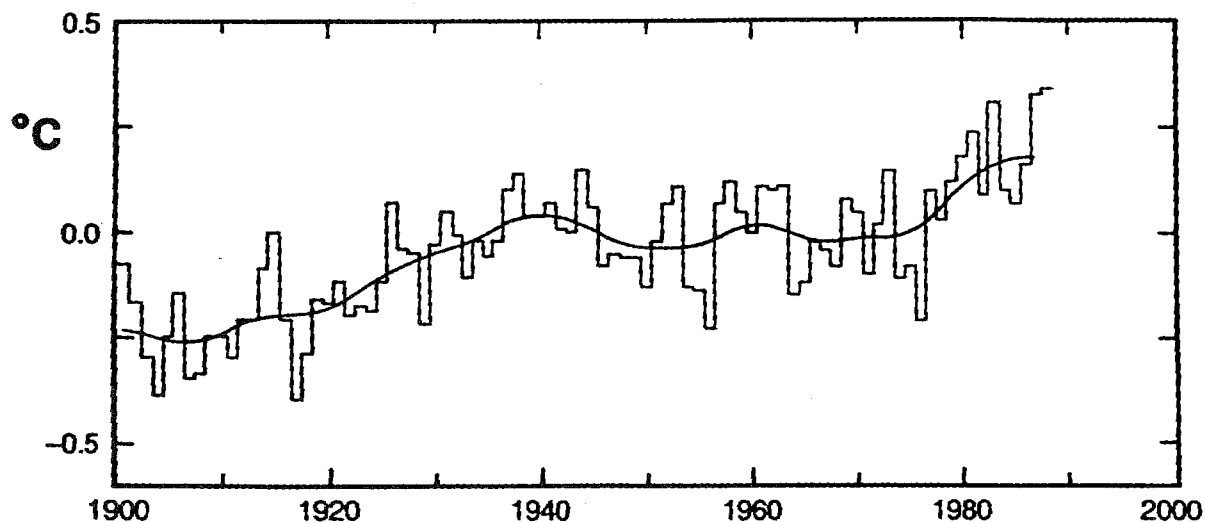
In fig. 1 is deze concentratie (met als eenheid ppmv = parts per million by volume = delen CO₂ per miljoen delen lucht) vanaf 1958 gegeven. Uit de regelmatige wisselingen van jaar tot jaar blijkt dat de CO₂-concentratie afhankelijk is van het seizoen. In het groeiseizoen wordt door planten CO₂ uit de atmosfeer opgenomen. Deze CO₂ komt weer vrij als de planten afsterven. Ook het seizoensafhankelijke brandstofverbruik draagt bij tot de jaarlijkse variatie. Het tweede kenmerk van de



grafiek is de stijgende trend. De CO₂-concentratie is toegenomen van ca. 280 ppmv in 1850 tot ca. 347 ppmv in 1988. Momenteel is de stijging ca. 0.5% per jaar. Als deze stijging zich voortzet zal aan het einde van de 21e eeuw de CO₂-concentratie ruim twee keer zo hoog zijn als in 1850.

De Oppervlaktetemperatuur

De wereldwijd gemiddelde oppervlaktetemperatuur is een belangrijke maat voor de toestand van ons klimaat. In fig. 2 is deze grootte gegeven van 1900 t/m 1988. In deze periode steeg de temperatuur met ca. 0.5°C. Binnen deze periode bestonden er echter ook kleinere perioden, bijvoorbeeld van 1940 tot 1970, waarin de temperatuur juist daalde. De temperatuur varieert sterk van jaar tot jaar. Dit is een heel normaal verschijnsel binnen een klimaat en hoeft niets te maken te hebben met variërende externe factoren van het klimaat, zoals de intensiteit van de zonnestraling of de CO₂-concentratie. Deze variaties van jaar tot jaar maken het moeilijk om vast te stellen of een temperatuurverandering het gevolg is van de verandering in een externe factor of niet. Tot nu toe is het nog niet gelukt om met voldoende zekerheid te bepalen of de wereldwijde temperatuurstijging sinds 1880 van 0.5°C het gevolg is van toevallige fluctuaties binnen het klimaat of van het broeikaseffect.



wereld gemiddelde oppervlakte temperatuur

Het Broeikaseffect

Om de invloed van CO_2 en waterdamp op het klimaat te kunnen begrijpen is het nodig om in te gaan op de stralingshuishouding van de atmosfeer.

Ieder lichaam, ook de aarde en de zon, zendt straling uit. De golflengte en de energie van deze straling zijn afhankelijk van de temperatuur. Hoe warmer het lichaam, hoe korter de golflengte en hoe hoger de energie van de uitgezonden straling is. De zon zendt voornamelijk straling uit in het zichtbare gebied (rond de 470 nm). Door de zonnestraling wordt de aarde opgewarmd en begint terug te stralen. De evenwichtstemperatuur van de aarde is juist die waarbij de hoeveelheid inkomende straling gelijk is aan de hoeveelheid uitgezonden straling. Zonder atmosfeer zou dat het geval zijn bij een temperatuur van -18°C . De golflengte van de door de aarde in deze evenwichtstoestand uitgezonden straling is veel langer dan die van de zon en is onzichtbaar voor het menselijk oog. Deze straling wordt infra-rood straling genoemd.

De waargenomen wereldwijd gemiddelde temperatuur is echter niet -18°C maar ca. $+14^{\circ}\text{C}$. Dit temperatuurverschil van 32° wordt veroorzaakt door het broeikaseffect dat in de atmosfeer optreedt, zoals hierna wordt toegelicht. De atmosfeer bevat, zoals gezegd, kleine concentraties CO_2 en waterdamp. Deze gassen laten de kortgolvlige zonnestraling vrijwel ongehinderd door. De langgolvlige infraroodstraling wordt echter voor een belangrijk deel door deze gassen geabsorbeerd. Hierdoor ontstaat het broeikaseffect: door de absorptie van stralingsenergie stijgt de temperatuur van de atmosfeer. Hierdoor zendt de atmosfeer in alle richtingen infraroodstraling uit. Door dit proces ontvangt de aarde een deel van de uitgezonden zonnestraling weer terug. Om toch netto evenveel infraroodstraling uit te blijven zenden moet de temperatuur van de aarde stijgen. De nieuwe evenwichtstemperatuur ligt bij ca. $+14^{\circ}\text{C}$. Zonder het broeikaseffect zou het op aarde te koud zijn om te leven. Het broeikaseffect speelt dus van nature in de atmosfeer een belangrijke rol. Door menselijke activiteiten stijgt de CO_2 -concentratie, waardoor de atmosfeer nog meer infra-rood straling absorbeert. Hierdoor kan de temperatuur op aarde nog verder stijgen. In het intermezzo wordt met een eenvoudig natuurkundig model nader ingegaan op het broeikaseffect.

Terugkoppelingen

Het effect van de CO_2 -toename op het klimaat is in werkelijkheid gecompliceerder dan hierboven geschetst. De belangrijkste andere effecten hebben te maken met waterdamp, zee-ijs/sneeuw en wolken.

Waterdamp

Net als CO_2 heeft waterdamp de eigenschap infraroodstraling te absorberen. In feite wordt het grootste deel van de infraroodstraling geabsorbeerd door waterdamp in de atmosfeer en niet door CO_2 . Als de wereldwijd gemiddelde temperatuur met één graad zou stijgen neemt de hoeveelheid waterdamp die lucht maximaal kan bevatten met enige procenten toe. Het is dus te verwachten dat door een temperatuurstijging meer waterdamp in de atmosfeer komt, waardoor nog meer infraroodstraling wordt geabsorbeerd

en de temperatuur verder stijgt. Dit effect wordt een positieve terugkoppeling genoemd omdat het effect van de CO₂-toename wordt versterkt.

Zee - IJs / Sneeuw

Als de temperatuur stijgt smelt een deel van het zee-ijs en de sneeuw. Hierdoor wordt een geringer deel van de zonnestraling teruggekaatst: water en land zijn donkerder dan ijs en sneeuw. De fractie van de zonnestraling die terugkaatst wordt albedo genoemd. Door de afname van het albedo neemt de temperatuur op aarde toe. Deze positieve terugkoppeling is het sterkst aan de rand van de polaire gebieden.

Wolken

Wolken reflecteren zonnestraling en absorberen infraroodstraling. Een afname van het bewolkte oppervlak vermindert zowel de reflectie van zonnestraling, waardoor de oppervlaktetemperatuur stijgt, als de absorptie van infraroodstraling, waardoor de oppervlaktetemperatuur daalt. Het is niet eenvoudig in te zien welk effect het sterkst is, en ook niet of het bewolkte oppervlak toe- of afneemt door het broeikaseffect. Daarnaast kunnen eigenschappen van wolken veranderen als de temperatuur verandert. Zo zijn de reflecterende en absorberende eigenschappen van wolken afhankelijk van de hoeveelheid water in de wolken. Het verband tussen deze hoeveelheid en de temperatuur is niet goed bekend. De onzekerheid over de precieze sterkte van het broeikaseffect wordt voor een groot deel bepaald door de gebrekkige kennis over de invloed van wolken. Een tweede belangrijke onzekere factor is de rol die de oceanen spelen.

De rol van de Oceanen

Bij het broeikaseffect spelen de oceanen een vertragende rol. Door zijn grote warmtecapaciteit warmt de oceaan slechts langzaam op. De temperatuurstijging van de atmosfeer houdt gelijke tred met die van de oceaan. In eerste instantie warmt vooral de bovenste laag van de oceaan op. De dikte van deze laag is niet goed bekend, evenals de grootte van de warmtestroom van de bovenste laag naar diepere delen van de oceaan. Een tweede rol van de oceanen in het broeikaseffect is de opname van CO₂ uit de atmosfeer. Momenteel blijft ruim 50% van de door

mensen geïnjecteerde CO₂ in de atmosfeer achter. Dit volgt rechtstreeks uit de thans waargenomen toename van de CO₂-hoeveelheid met ca. 11.000 miljoen ton per jaar, vergeleken met de geschatte injectie van ca. 20.000 miljoen ton CO₂ op wereldschaal. De andere 50% wordt grotendeels door de oceanen en voor de rest door de biosfeer opgenomen. Het is niet bekend of dit percentage in de toekomst zal toe- of afnemen. Het antwoord moet komen uit modellen van de koolstofcyclus, waarop hier niet nader wordt ingegaan. Wel wordt hieronder kort ingegaan op de modellen die momenteel de door de mens veroorzaakte klimaatsveranderingen vermoedelijk het beste voorspellen.

Klimaatmodellen

Het is niet mogelijk het broeikaseffect te onderzoeken met experimenten in de echte atmosfeer. We weten alleen de toestand van de atmosfeer in het heden en verleden en bovendien slechts op een beperkt aantal plaatsen en momenten. Daarnaast is de huidige CO₂-concentratie pas 25% hoger dan die voor de industriële revolutie terwijl we juist geïnteresseerd zijn in eventuele klimaatsveranderingen door de verwachte toekomstige hogere concentraties. In een model kan daarentegen de CO₂-concentratie eenvoudig bijvoorbeeld verdubbeld worden. De meest gecompliceerde modellen bootsen het klimaat op de gehele aarde na. In deze zgn. Algehele Circulatie Modellen (ACM's) zijn zo veel mogelijk natuurkundige verschijnselen in de atmosfeer en oceaan gemodelleerd. Er bestaan momenteel slechts enkele van deze zeer veel computertijd verbruikende ACM's.

De ACM's voorspellen een wereldwijd- en jaar-gemiddelde temperatuurstijging van 1,5°C tot 4,5°C. De stijging aan de polen is sterker dan aan de evenaar, zodat het temperatuurverschil tussen polen en evenaar afneemt door het broeikaseffect. Dit temperatuurverschil is de drijvende kracht achter de belangrijkste luchtstromingen rondom de aarde, en bepaalt daarom voor een groot deel het dagelijkse weer. Deze luchtstromingen hebben als belangrijke taak warmte te transporteren van de evenaar naar de polen, en zullen wereldwijd gemiddeld minder sterk worden als de atmosferische CO₂-concentratie stijgt. De voorspelde regionale klimaatsveranderingen verschillen nog sterk tussen de ACM's onderling en zijn daarom nog niet betrouwbaar.

Literatuur

1. Inleiding tot de Meteorologie;
F.H. Schmidt, Aula-reeks.
2. Computermodellen van de Atmosfeer;
C. Floor en B. Zwart, Zenit, november 1988.
3. Wat is er mis met het weer?
J.v. Arkel; Ekologische Uitgeverij.
4. Climate Modelling;
St. Schneider; Scientific American,
mei 1987.

INTERMEZZO: EEN EENVOUDIG NATUURKUNDIG MODEL
VAN HET BROEIKASEFFECT

Het verband tussen de door een lichaam uitgestraalde energie per oppervlakte- en tijdseenheid, I , en de temperatuur van het oppervlak van dat lichaam, T_0 , wordt in goede benadering beschreven door de wet van Stefan-Boltzmann:

$$I = \sigma T_0^4, \quad (1)$$

waarbij σ de constante van Boltzmann is ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$). De temperatuur wordt hierbij uitgedrukt in Kelvin (K).

Deze wet passen we eerst voor de zon en vervolgens voor de aarde toe. Hierbij worden de volgende symbolen en getallen gebruikt:

- r = afstand van de aarde tot de zon
(ca. $150 \cdot 10^9$ m),
 A_z = oppervlakte van de zon
(ca. $6,0 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$),
 R_A = straal van de aarde (ca. $6371 \cdot 10^3$ m),
 T_z = oppervlaktetemperatuur van de zon
(ca. 5800 K).

Vanuit de zon gezien is de aarde een platte schijf, die een oppervlak heeft van πR_A^2 en die zonnestraling onderschept op een afstand r van de zon. Voor het vermogen (energie per tijdseenheid) dat deze schijf per oppervlakte-eenheid ontvangt, P , geldt:

$$P = \frac{A_z \sigma T_z^4}{4\pi r^2}. \quad (2)$$

De teller van het rechterlid van (2) is het door de zon uitgestraalde vermogen, de noemer is het oppervlak van de bol om de zon waarop de aarde ligt. De zonneënergie wordt onderschept door een oppervlak van πR_A^2 , en wordt vervolgens verdeeld over de aardbol met oppervlak $4\pi R_A^2$. Voor het gemiddeld op aarde ontvangen vermogen per oppervlakte-eenheid aan

zonnestraling, S , geldt dus:

$$S = \frac{A_Z \sigma T_Z^4 \pi R_A^2}{4\pi r^2} \frac{\pi R_A^2}{4\pi R_A^2}. \quad (3)$$

Door (3) toe te passen op de bovengenoemde getallen volgt dat $S = 340 \text{ W/m}^2$. Een fractie α (α is het albedo van de aarde, $\alpha = 0,3$) van de zonnestraling wordt teruggekaatst, de rest wordt door de aarde geabsorbeerd, warmt de aarde op en wordt omgezet in infraroodstraling. Dit wordt beschreven volgens

$$(1-\alpha)S = \sigma T_A^4, \quad (4)$$

waarbij T_A de temperatuur van het aardoppervlak is. Het linkerlid van (4) is de energie die de aarde ontvangt, en bestaat uit het vermogen van de zonne-energie dat de aarde per oppervlakte-eenheid absorbeert. Het rechterlid van (4) is het per oppervlakte eenheid door de aarde uitgezonden vermogen aan infra-rood energie. Het in (4) beschreven stralingsevenwicht geldt slechts als er geen atmosfeer zou zijn, omdat bij de aanwezigheid van een atmosfeer de aarde niet alleen zonnestraling maar ook door de atmosfeer teruggezonden infraroodstraling zou ontvangen. Invullen van de genoemde waarden van α , S en σ in (4) levert:

$$T_A = 255 \text{ K} = -18^\circ\text{C}.$$

Bij een aarde met atmosfeer wordt een fractie γ van de door de aarde uitgezonden infraroodstraling geabsorbeerd door de atmosfeer. De geabsorbeerde straling wordt vervolgens in alle richtingen weer uitgezonden. Sterk vereenvoudigd geldt dat de helft van deze infraroodstraling omhoog gaat, terwijl de andere helft omlaag gaat en het aardoppervlak bereikt. Bij gelijke invallende en uitgezonden straling bij het aardoppervlak geldt nu dat

$$(1-\alpha)S + \frac{1}{2}\gamma \sigma T_A^4 = \sigma T_A^4. \quad (5)$$

In werkelijkheid wordt niet alle geabsorbeerde zonnestraling door het aardoppervlak omgezet in infra-roodstraling: een deel dient als verdampingswarmte of verplaatst zich als voelbare warmte van het aardoppervlak naar de atmosfeer. In de atmosfeer worden deze twee warmtestromen uiteindelijk omgezet in infraroodstraling.

Met de reële waarde $\gamma = 0,76$ volgt uit (5) dat $T_A = 287 \text{ K} = +14^\circ\text{C}$. Als de CO_2 -concentratie

zou verdubbelen, neemt γ toe tot ca. 0,78.
Volgens (5) neemt door de CO_2 -verdubbeling T_A
ca. $1,2^\circ\text{C}$ toe. Door een aantal terugkoppelin-
gen (zie hoofdtekst) voorspellen gedetailleer-
dere modellen hogere waarden, die variëren van
 $1,5^\circ\text{C}$ tot $4,5^\circ\text{C}$. ■

Verandert ons klimaat ?

C.J.E. Schuurmans

Niet constant

Ons klimaat is niet constant. We kennen ijstijden en interglaciale perioden op een schaal van tien-duizenden jaren. In een interglaciale periode waarin we nu leven en die nog duizenden jaren kan duren zien we op een schaal van meerdere eeuwen een afwisseling van warme (de Middeleeuwen) en koudere (de Kleine Ijstijd: 1550-1850) tijdvakken. Op nog kortere tijdschaal van tientallen jaren komen ook nog verschillen voor maar die zijn meestal niet erg groot (zie hierna) en ze zijn voor een belangrijk deel een gevolg van een toevallige opeenvolging van individuele jaren, die stuk voor stuk verschillend weer opleveren.

Broeikaseffect

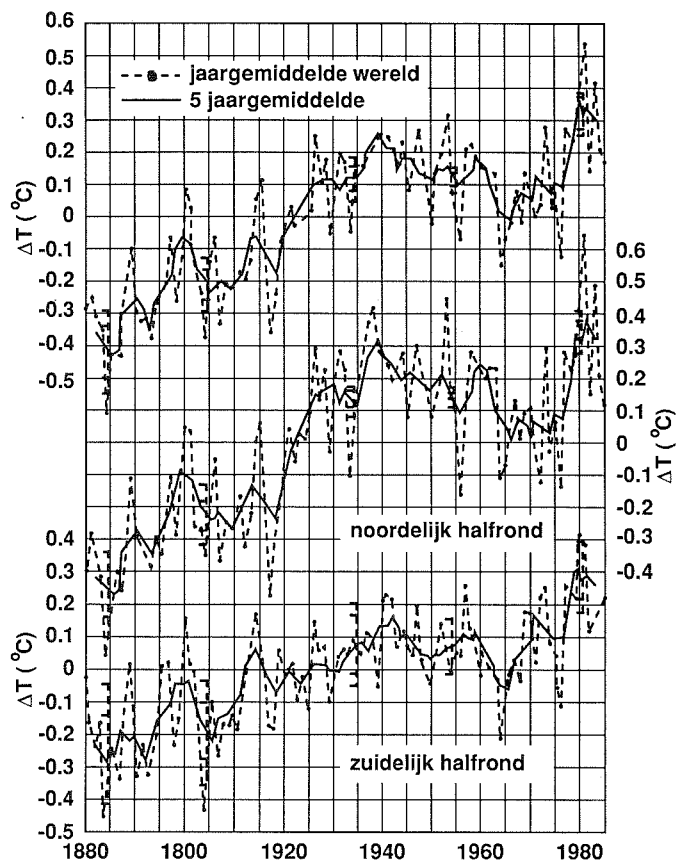
Door het broeikaseffect van het toenemend CO₂-gehalte van de atmosfeer moet de temperatuur op aarde toenemen. De vraag "Verandert ons klimaat?" betekent momenteel dus feitelijk: Is ons klimaat al aan 't veranderen? Is de temperatuur stijging al waar te nemen?

Wereldtemperatuur

Een eventuele temperatuurstijging als gevolg van het CO₂ (en andere sporegassen)-effect zal vermoedelijk het eerst zijn waar te nemen in het temperatuurgemiddelde, bepaald uit waarnemingen over de hele wereld. Immers, op iedere plaats op aarde wordt de wisseling van de temperatuur voor een belangrijk deel bepaald door de wisselingen in weertype (windrichting, bewolgingsgraad, etc.). Door een gemiddelde te nemen over de gehele globe wordt de invloed van het weer als het ware geëlimineerd.

Meerdere onderzoeksgroepen in de wereld (USA, USSR, UK) hebben zich bezig gehouden met de bepaling van de wereldgemiddelde temperatuur,

over zoveel mogelijk jaren in het verleden. De ontstane reeksen gaan ruim 100 jaar terug in het verleden, waarbij het gemiddelde over het noordelijk halfrond op aanzienlijk meer waarnemingen berust dan dat van het zuidelijk halfrond. Het gaat om de luchttemperatuur op normale waarnemingshoogte boven het



aardoppervlak. Zoals uit de grafiek blijkt is de wereldgemiddelde temperatuur en ook die van het noordelijk en zuidelijk halfrond afzonderlijk de afgelopen eeuw toegenomen. Van 1880 tot ca. 1940 was de toename circa 0,5 °C, daarna tot ± 1970 enige afkoeling, vooral op het noordelijk halfrond, en vervolgens weer een stijging van enige tienden.

CO₂ - effect

Een mondiale temperatuurstijging is precies wat verwacht wordt als gevolg van het broeikaseffect van

CO₂. De algemene temperatuurstijging over de afgelopen eeuw bevestigt dus mogelijk het optreden van een CO₂-effect op het wereldklimaat, maar een aantal details van het temperatuurverloop zijn er duidelijk mee in strijd. Waarom steeg bv. de temperatuur in het begin van deze eeuw toen er van een CO₂-toename nog nauwelijks sprake was? En daalde de temperatuur toen het CO₂-gehalte een flinke stijging te zien gaf?

In een aantal onderzoeken is gepoogd om het werkelijke temperatuurverloop te verklaren op grond van drie factoren: zonne-activiteit, vulkaanuitbarstingen en de toenemende CO₂-concentratie van de atmosfeer. Binnen de onzekerheden over het verloop van deze factoren is een geslaagde simulatie mogelijk, maar het geeft geen uitsluitsel over de juistheid van de aldus berekende CO₂-bijdrage tot de temperatuurtoename.

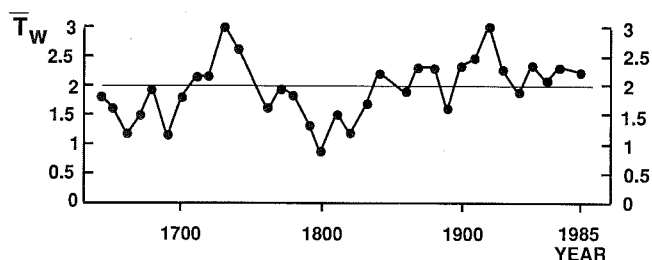
Waarschijnlijkheid

Dat de temperatuurstijging gemiddeld op aarde een gevolg is van het CO₂-effect kan dus niet bewezen worden. Daarvoor zou een meer specifieke "vingerafdruk" reactie op het stijgend CO₂-gehalte nodig zijn. Die hebben we nog niet, ook niet in de vorm van droogte en overstromingen die de afgelopen jaren zijn opgetreden. Wel is het mogelijk om de kans aan te geven dat een bepaald jaar door het toeval een hoge temperatuur bereikt. Zo was het jaar 1987 mondiaal gemiddeld 0.4 °C warmer dan het gemiddelde over de periode 1951-1980 (de thans gehanteerde "normaal"-periode). Gezien de standaard deviatie van de individuele jaartemperatuur in die periode, die een waarde heeft van 0.13 °C, is de kans op een afwijking van 0,4 °C, slechts 1%.

Regionale veranderingen

De temperatuurstijging die gemiddeld over de aarde optreedt is verre van

uniform. Dat geldt voor ieder van de trends in bovenstaande grafieken. Aan de temperatuurstijging van 1880-1940 hadden bijna alle gebieden op aarde deel. Ook bij ons is die trend aanwezig, maar in hoofdzaak in de wintertemperatuur. Zie de lange reeks van wintertemperaturen waarover we in Nederland beschikken. De temperatuurdaling tussen 1940 en 1970 trad vooral op hoge breedten op het noordelijk halfrond op. Aan de recente temperatuurstijging doet behalve een groot deel van het zuidelijk halfrond, vooral Alaska, noordwest Canada en het noordelijk deel van Azië mee.



Nederland

De recente temperatuurstijging is in Europa, en in het bijzonder in Nederland, nog niet waargenomen. Dit geldt voor de wintertemperatuur waar doorgaans de veranderingen het grootst zijn, maar ook voor de gemiddelde jaartemperatuur. In onderstaande figuur is deze laatste uitgezet, met ter vergelijking de gemiddelde jaartemperatuur van het noordelijk halfrond.

Andere elementen

Klimaatveranderingen kunnen behalve in de temperatuur natuurlijk ook optreden in de neerslag, zonneshijnduur, wind, etc. Mondiaal gezien is er over deze elementen weinig te zeggen. Daar zijn de waarnemingen te onvolledig voor.

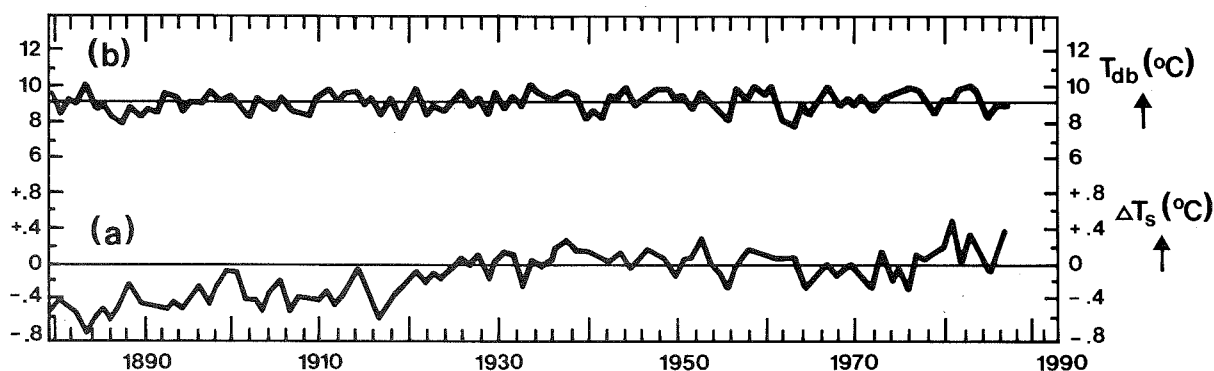
Lokaal bestaan wel betrouwbare lange reeksen, waaruit soms opmerkelijk grote veranderingen, vaak van quasi-periodieke aard kunnen worden afgeleid. Een voorbeeld vinden we bv. in de langjarige wisseling van de hoeveelheid neerslag in de

Sahelzone van Afrika. Systematische veranderingen in neerslag, bewolgingsgraad, enz. die het gevolg zouden kunnen zijn van het toenemend CO₂-gehalte zijn nog nergens aangetoond.

Steekproefeffect ?

Toch wordt door velen in Nederland opgemerkt dat het vergeleken met vroeger somberder is geworden: er is minder zon.

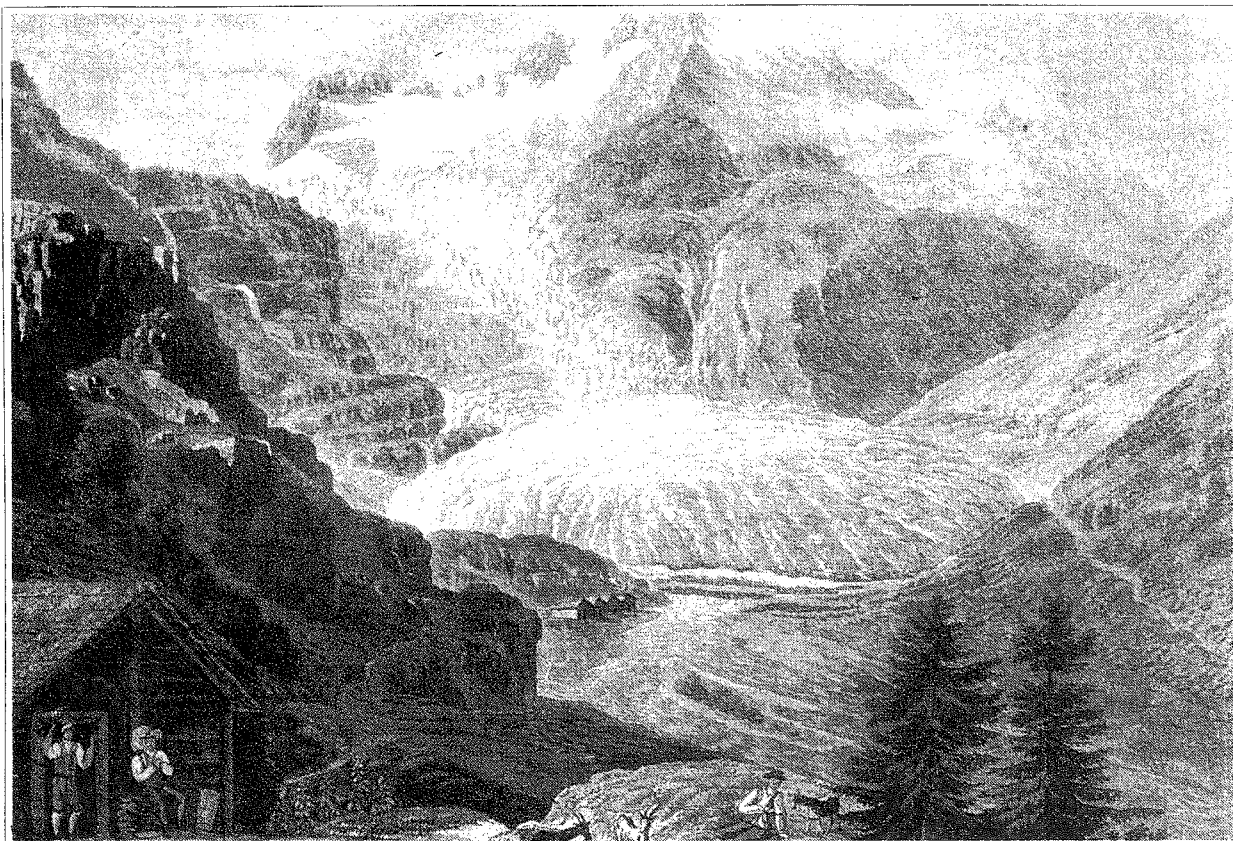
De getallen voor de normaalperiode 1951-1980 vergeleken met die voor de periode 1931-60 laten dat ook zien. De recente periode was in midden-Nederland (De Bilt) wat natter en somberder, in de meeste maanden van het jaar. Natuurlijk zijn deze verschillen reëel en ze zijn blijkbaar voldoende groot om bij een deel van het publiek op te vallen.



Toch is er geen reden om hierin iets voorspellends voor de toekomst te zien (al dan niet veroorzaakt door het CO₂-effect). Ook in een klimaat waarvan bekend is dat er geen veranderingen door externe oorzaken kunnen zijn opgetreden, zullen steekproeven van een bepaald aantal jaren zulke verschillen te zien geven. ■

Het klimaat op glad ijs

W.Schoonen



„De klimaatveranderingen komen nergens zo sprekend tot uitdrukking als in de terugtrekkende gletsjers. Fascinerend vind ik dat. De kunstschilders die de gletsjers in vroeger tijden hebben vastgelegd, hebben niet vermoed dat hun voorstellingen nog eens van wetenschappelijk belang zouden worden.“

Dr. J. Oerlemans is sinds een half jaar bijzonder hoogleraar aan de rijksuniversiteit Utrecht. Zijn leeropdracht: dynamische klimatologie. Een professor in de klimaatveranderingen, die de vraag krijgt voorgelegd hoe ver de zeespiegel zal stijgen als de gemiddelde temperatuur op aarde enkele graden zal toenemen. Wie voorspelt, waagt zich in het diepe, zo zal blijken.

Twee feiten doemen op uit het verleden: de gemiddelde temperatuur op aarde is de afgelopen eeuw met een halve graad gestegen, en gedurende diezelfde eeuw is het zeeniveau gestegen met 10 - 15 centimeter. Dat is een gemiddelde over de hele aarde. Door toedoen van lokale invloeden mag je daar voor de Noordzee-

kust gerust 5 tot 10 centimeter bij optellen. Zien we in die halve graad temperatuurstijging al een broeikas effect? We weten dat verscheidene gassen die in de atmosfeer terecht komen, zoals kooldioxide en organische chloorverbindingen, werken als het glas in de Westlandse kassen. Kortgolvlige straling van de zon laten ze passeren, maar de teruggekaatste straling van de aarde houden ze tegen. We weten ook dat de mens sinds het begin van de industriële revolutie enorme hoeveelheden broeikasgassen in de atmosfeer heeft gebracht. De broeikas lijkt al een feit. Oerlemans: „Het is niet bewezen dat de halve graad temperatuurstijging van de afgelopen honderd jaar een gevolg is van de broeikasgassen. Het kan heel goed zijn dat de gemiddelde temperatuur op aarde stijgt doordat we nog steeds aan het herstellen zijn van de kleine ijstijd (circa 1500 - 1900).“

Metingen van het temperatuurverloop over eeuwen maken in ieder geval duidelijk dat het huidige temperatuurniveau niet uniek is in de moderne geschiedenis; we zitten ongeveer op het

niveau van de Middeleeuwen. Oerlemans: „Er zijn veel aanwijzingen dat er in het verleden perioden zijn geweest dat de gemiddelde temperatuur hoger was dan nu. Zo lang je niet precies weet wat destijds de oorzaak was, moet je voorzichtig zijn met uitspraken over de oorzaak van de huidige trend.”

„Maar”, voegt Oerlemans eraan toe, „vast staat ook dat de temperatuurstijging van de afgelopen eeuw niet in tegenspraak is met onze berekeningen van het broeikas-effect. Je kunt het effect van meer kooldioxide in de atmosfeer in een rekenmodel stoppen. En dan blijkt dat een temperatuurstijging van een halve graad sinds 1850 als gevolg van die broeikasgassen heel goed mogelijk is.”

De zeespiegelstijging van tien tot vijftien centimeter moet een gevolg zijn geweest van die temperatuurstijging, denkt Oerlemans, ook al ontbreekt hier eveneens een sluitende verklaring. Twee factoren zijn bekend. Als de gemiddelde temperatuur stijgt, zet het water in de oceanen uit. Zoals alle andere vloeistoffen neemt water meer ruimte in beslag als het warmer wordt. Bij een temperatuurstijging van een halve graad is dat effect weliswaar klein, maar de oceanen herbergen zo'n enorme watermassa, dat deze 'thermische expansie' zorgt voor een zeespiegelstijging van 2 tot 5 centimeter.

Gletsjers

De andere bekende factor is de bijdrage van gebergtegletsjers en kleine ijskappen. Van een handvol gletsjers is de geschiedenis nauwkeurig bekend. De klimaatonderzoekers van nu zijn daarvoor verscheidene, reeds lang overleden kunstschilders dankbaar. De doeken die zij, op een zonnige middag in de vorige eeuw vervaardigden, liggen nu onder de meetlat van de wetenschappers.

De levenslopen van de verschillende gletsjers tonen steeds hetzelfde beeld: sinds het laatste kwart van de vorige eeuw trekken ze zich in rap tempo terug. Dit afsmelten heeft gezorgd voor een zeespiegelstijging van 2 tot 4 centimeter. Rest nog een respectabel aantal centimeters dat verklaard moet worden. Onvermoede grondwaterbronnen die zijn vrijgekomen, opperen sommige onderzoekers. Maar Oerlemans acht het onwaarschijnlijk dat zich in de afgelopen eeuw in de grondwatervoorraden ineens drastische ver-

anderingen hebben voorgedaan. Het restant van de zeespiegelstijging van de afgelopen eeuw, zegt hij, zou weleens op de rekening van Groenland kunnen komen.

Van de Groenlandse ijskap, met een oppervlakte van 1.8 miljoen vierkante kilometer en een gemiddelde dikte van 1700 meter, weten we bijzonder weinig, zegt Oerlemans. De enorme ijsmassa kun je zien als een overblijfsel uit vroeger tijden; de ijskap zou onder de huidige klimatologische omstandigheden niet ontstaan. „Op Groenland is weinig onderzoek gedaan, zelfs in vergelijking met Antarctica. De Denen hebben Groenland altijd een beetje afgeschermd, terwijl Antarctica van niemand en iedereen was. We weten niet eens zeker of de Groenlandse ijskap in evenwicht is.”

Vijf centimeter

„Er komt per jaar zo'n vijfhonderd kubieke kilometer ijs bij op Groenland. En men heeft altijd gedacht dat er door afsmelten en afbrokkelen van ijs aan de randen jaarlijks ook ongeveer vijfhonderd kubieke kilometer ijs verdwijnt. Maar die uitstroom zou weleens groter kunnen zijn. De uitstroom-gletsjers op West-Groenland trekken zich behoorlijk terug. Dus we vermoeden dat er aan de randen jaarlijks meer ijs verdwijnt dan erbij komt. Dat afsmelten van Groenland kan best hebben gezorgd voor een zeespiegelstijging van een centimeter of vijf gedurende de afgelopen eeuw.”

Oerlemans staat te popelen om op Groenland metingen te gaan doen om de massabalans van de ijskap te bepalen. Over twee jaar hoopt hij met een Utrechts onderzoeksteam op Groenland neer te strijken om er zo'n zeven meetstations te installeren. Die moeten gedurende enige zomers automatisch gaan draaien (op zonne-energie) en meteorologische gegevens verzamelen zoals de temperatuur en de stralingsbalans. Om de af- of toename van de ijsmassa te bepalen worden er peilstokken in het ijs gezet, die opgezette tijden worden afgelezen. Na enige jaren van meten en aflezen moet je dan te weten kunnen komen of er aan de randen van de Groenlandse ijskap inderdaad meer ijs verdwijnt dan er bij komt. De ijskappen van Groenland en Antarctica herbergen de grootste onzekerheden als je de zeespiegelstijging wilt voorspellen voor de komende eeuw. We gaan ervan uit dat de huidige trend

zich zal voortzetten: de gemiddelde temperatuur is nu een halve graad hoger dan in het midden van de vorige eeuw, in het jaar 2050 zal de gemiddelde temperatuur naar schatting twee graden hoger zijn dan in 1850.

De belangrijkste invloeden op de zeespiegel op deze tijdschaal zijn de thermische expansie van het water in de oceanen en het afsmelten van gletsjers en kleine ijskappen. Oerlemans: „De hoeveelheid ijs in de gletsjers is natuurlijk zeer klein vergeleken met de ijsinhoud van Groenland en Antarctica. Maar als je uitspraken wilt doen over de zeespiegelstijging van de komende decennia, zijn gletsjers bijzonder belangrijk, omdat een temperatuurstijging daar veel eerder doorwerkt dan in de grote ijskappen.”

Expansie van het zeewater door de temperatuurstijging en het verder afsmelten van gletsjers zullen tezamen goed zijn voor een zeespiegelstijging van iets meer dan 30 centimeter in 2050, ten opzichte van het jaar 1985. De bijdrage van de ijskappen van Antarctica en Groenland zal in de komende decennia nagenoeg nul zijn, vermoeden vele onderzoekers; Groenland en Antarctica zullen elkaar in evenwicht houden.

Antarctica herbergt de grootste ijsmassa op aarde; 12 miljoen vierkante kilometer ijs ligt er, met een gemiddelde dikte van 2,5 kilometer! En in tegenstelling tot Groenland, waar een vrij mild klimaat heerst, is het op Antarctica steenkoud; de gemiddelde temperatuur ligt op Antarctica 30 graden lager dan op Groenland. Afsmelting van de ijskap vindt nauwelijks plaats, en zal ook bij een temperatuurstijging van enkele graden niet plaatsvinden. Voor zover er ijs verloren gaat, verdwijnt dat door afbrokkelen.

De hoeveelheid ijs die er op Antarctica jaarlijks bij komt is zeer gering. De zeer lage temperaturen die er heersen zorgen ervoor dat de atmosfeer nauwelijks vocht bevat. De hoeveelheid neerslag is daardoor klein. Wanneer nu de gemiddelde temperatuur op aarde stijgt, zal de hoeveelheid neerslag op Antarctica toenemen en dus de aangroei van de ijskap. Groenland zal door een temperatuurstijging ijs verliezen, Antarctica zal er ijs bij krijgen. Modelberekeningen van Oerlemans wijzen uit dat die twee effecten ongeveer even groot zijn en elkaar zullen opheffen.

Maar, er ligt nog een probleem aan de zuidpool: West-Antarctica, een gebied dat de afgelopen jaren tot verhitte debatten heeft geleid onder de

wetenschappers. In tegenstelling tot Oost-Antarctica rust het grootste deel van de ijskap van West-Antarctica niet op een echt continent, maar op de zeebodem. Vanaf dit onder water gelegen land strekken de ijsmassa's zich uit in de richting van de oceaan. Aan de rand rusten ze nog op verscheidene plaatsen op de zeebodem, de zogenaamde *pinning points*. Die pinning points werken als steunpilaren voor de ijskap van West-Antarctica.

Aan het eind van de jaren zeventig kwamen er verontrustende berichten uit de wetenschappelijke wereld. Bij een stijging van de temperatuur en/of een stijging van de zeespiegel zou de ijskap van West-Antarctica weleens uiteen kunnen vallen. De ijsmassa's van West-Antarctica zouden loskomen van hun steunpunten op de zeebodem, waardoor grote delen van de ijskap sneller zouden afstromen naar de oceaan. Gevolg: een stijging van de zeespiegel van zo'n zes meter in de komende eeuwen.

Onwaarschijnlijk

Inmiddels is duidelijk dat er weinig grond is voor dat dramatische scenario, zegt Oerlemans. Modelstudies van onder anderen C. J. van der Veen (RU Utrecht) hebben uitgewezen dat de ijskap van West-Antarctica heel wat stabielier is dan werd aangenomen. Een volledig uiteen vallen van de ijskap van West-Antarctica is bijzonder onwaarschijnlijk. Zo deze ijsmassa in de toekomst al invloed zal hebben op de zeespiegel, zal die op korte termijn gering zijn.

In de komende eeuw zal de bijdrage van de ijskappen van Antarctica en Groenland aan een stijgende zeespiegel dus klein zijn. Maar, waarschuwt Oerlemans, de onzekerheden zijn groot. „We gaan ervan uit dat een temperatuurstijging voor Groenland en Antarctica tegengestelde gevolgen zal hebben, zodat die elkaar in evenwicht houden. Maar in onze schattingen kunnen fouten zitten, en die fouten zouden best in dezelfde richting kunnen werken.”

„We weten nog bijzonder weinig. Om een voorbeeld te noemen: we weten nog steeds niet zeker of West-Antarctica bestond in het laatste interglaciaal, zo'n 135 000 jaar geleden. We weten dat het toen een paar graden warmer was dan nu. En we weten dat de zeespiegel ongeveer vijf meter hoger lag dan nu. Het is best mogelijk dat de ijskap van West-Antarctica toen helemaal

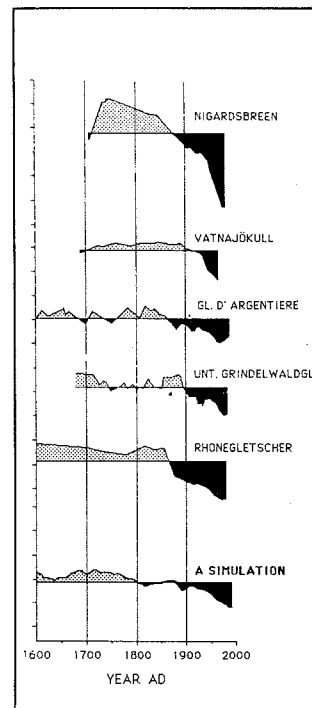
niet bestond. Maar andere onderzoekers hebben al geopperd dat destijds West-Antarctica wel bestond, maar Groenland er niet was." Onzekerheden schuilen in de schattingen van de invloed van de temperatuur op de ijskappen, in de schatting van de thermische expansie van het zeewater, in de modellen van Antarctica en Groenland. En in de schattingen van de toekomstige temperatuurstijging zelf. We weten weliswaar hoeveel kooldioxide en andere broeikasgassen jaarlijks de lucht in gaan, en de modellen van de stralingshuishouding zijn redelijk nauwkeurig, maar niemand kent de omvang van mogelijke terugkoppelingsmechanismen. Als het warmer wordt, zullen er dan meer wolken komen, die meer van de inkomende zonnestraling zullen terugkaatsen naar de ruimte en daardoor zorgen voor een daling van de temperatuur? Misschien.

Kansberekening

En dan wordt de wetenschapper gevraagd hoe hoog de zeespiegel zal zijn in het jaar 2050. Een dikke dertig centimeter hoger dan nu. Tel daar voor de Nederlandse kust nog een centimeter of zeven bij, vanwege lokale invloeden. Om precies te zijn zegt de wetenschapper: er is een kans van vijftig procent dat de zeespiegelstijging tot het jaar 2050 33 centimeter of meer bedraagt.

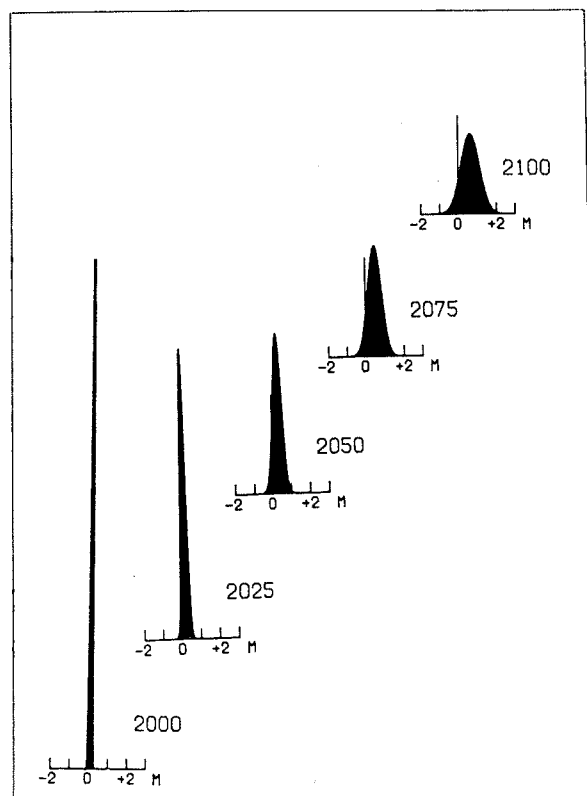
Als je een schatting probeert te maken van de onzekerheden in de voorspellingen kom je terecht in ingewikkelde kansberekening, weet Oerlemans. Hij heeft een poging gewaagd, waarvan de resultaten in de onderstaande figuur zijn weergegeven. Bij iedere stand van de zeespiegel kun je een staafje tekenen dat staat voor de kans dat die zeespiegel zich in werkelijkheid voordoet. Al die staafjes samen vormen een zogeheten kansverdeling.

De huidige zeespiegel is nauwkeurig bekend: de kansverdeling is smal en hoog. Naarmate je verder in de toekomst kijkt, wordt de kansverdeling breder en lager. Hij zakt als het ware in elkaar. Voor het jaar 2050 zit de hoogste piek bij een zeespiegel die 33 cm hoger ligt dan nu. Maar er is, volgens de huidige berekeningen, nog altijd een kans van een kleine tien procent dat de zeespiegel lager of gelijk zal zijn aan de huidige.



De lengte van verscheidene gletsjers in kilometers: het terugtrekken sinds het eind van de vorige eeuw is in alle gevallen duidelijk te zien.

ILLUSTRATIES J. OERLEMANS



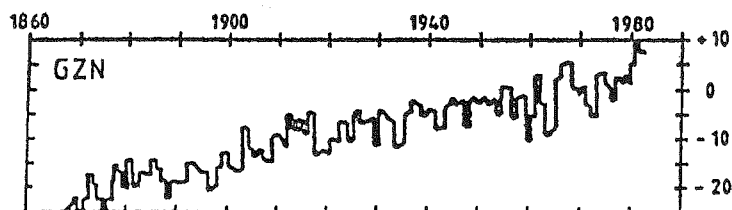
De verwachte zeespiegel: hoe verder je in de toekomst moet kijken hoe groter de onzekerheid.

Zeespiegelrijzing door klimaatverandering.

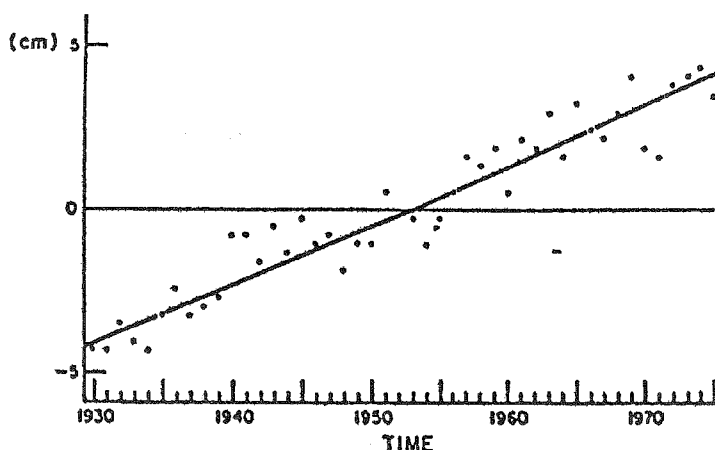
A. Kattenberg

1. Inleiding

De zeespiegel rijst! Stormvloed en springvloed: wij zijn in Nederland maar al te vertrouwd met de dreiging van het wassende water! Eb en vloed duren maar een paar uur, stormen, die het water flink kunnen opstuwen tegen de kust misschien een paar dagen, maar hoe zit het met de gemiddelde zeespiegel op langere termijn? Er is sprake van een mogelijk versnelde zeespiegelrijzing. Een versnelling die samenhangt met een klimaatverandering die door ons zelf veroorzaakt wordt! Hoe zit dat?



reactie op het verdwijnen van de grote ijskap (15000 jaar geleden) die tijdens de laatste ijstijd duizenden jaren de grond van Scandinavie en Denemarken indrukte, waardoor de grond naast de ijsrand



(midden en zuid Nederland en België) omhoog werd geperst. Maar zeespiegelrijzing zien we over de hele wereld, zoals te zien is in figuur 2, waar de resultaten van een statistisch onderzoek van metingen van de zeespiegel op kuststations over de hele wereld verdeeld staan samengevat. De zeespiegel is de afgelopen tientallen jaren gemiddeld zo'n 1.8 a 2 mm per jaar gestegen; Bijna 20 cm per eeuw. Hoe komt dat? Wat bepaalt de snelheid waarmee die zeespiegel rijst? Gaat het over vijftig jaar nog steeds omhoog? Sneller of langzamer? Dat zijn vragen waar we in onderstaand stuk wat verder op in gaan.

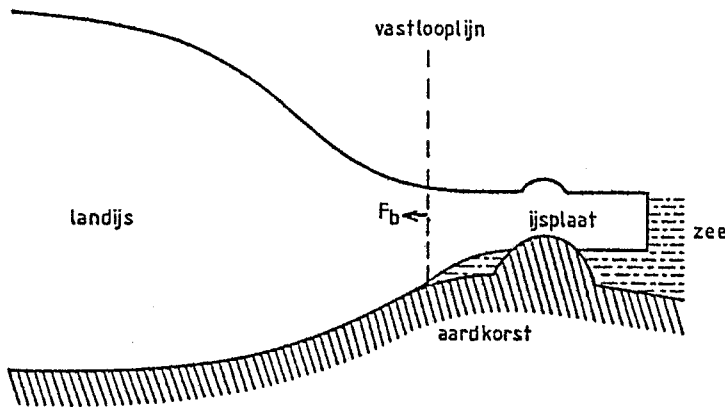
2. Oorzaken

Hoe wordt de zeespiegel eigenlijk beïnvloed? Rechtstreeks veranderen van de zeespiegel door menselijk ingrijpen is nogal moeilijk: al het water dat we de afgelopen eeuw in spaarbekkens, stuwmuren e.d. zijn gaan bewaren wordt tesamen geschat op zo'n 6000 kubieke kilometer: genoeg om de zeespiegel 15 mm te laten dalen. Verandering van het klimaat op zich, waardoor er bv. meer of minder water in de atmosfeer zit, telt ook al niet aan: als al het water dat in de vorm van wolken en damp in de atmosfeer zit in de oceanen zou terecht komen zouden de oceanen 2 a 3 cm stijgen. Nee, echt belangrijk kunnen de gevolgen van een temperatuurstijging zijn: het smelten van ijs en de uitzetting van water. Als al het landijs (waarmee we bedoelen: gletschers in berggebieden en de grote ijskappen op Groenland en het Zuidpoolgebied) zou smelten, dan zou de zeespiegel meer dan 70 meter stijgen! (Smelten van zeeijs heeft, volgens de wet van Archimedes, geen directe gevolgen voor de zeespiegel.) Als al het oceaankwater een graad warmer zou worden dan zou de zeespiegel, door de uitzetting van het water, ongeveer een meter gaan stijgen.

2.1 Landijs

Zou al het landijs kunnen smelten door klimaatverwarming? De meeste gletschers op het land zijn de afgelopen honderd jaar inderdaad flink geslonken (wat enkele centimeters van de waargenomen zeespiegelrijzing verklaart). Dankzij geologisch onderzoek weten we dat in het verleden soms flinke delen van de ijskappen zijn gesmolten: - 95000 jaar geleden steeg het water binnen honderd jaar tijd zo'n 15 a 20 meter! Men vermoedt dat hierbij een groot deel van de 'Oost Antarctische ijskap' is ver-

dwenen. - 125000 jaar geleden is de 'West Antarctische ijskap' waarschijnlijk gesmolten en was de zeespiegel zo'n 5 a 6 meter hoger dan nu. Tegenwoordig hebben we weer een West Antarctische (en een Oost Antarctische) ijskap. Deze ijsmassa ligt eigenlijk niet op land maar op de zeebodem. Net

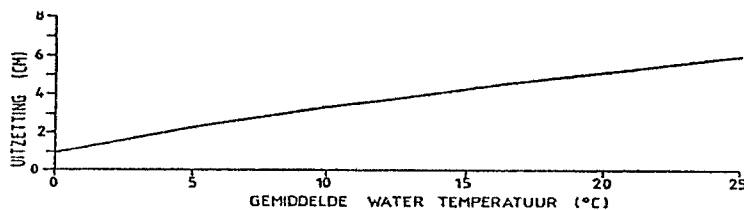


zoals een gletcher gedraagt zo'n grote massa ijs zich als een stroperige "vloeistof". Het lijkt erop dat slechts enkele uitsteeksels (bergen) vanuit de zeebodem ervoor zorgen dat het ijs niet onder zijn eigen gewicht inzakt en wegglijdt in zee (zie figuur 3). Onderzoekers hebben een tijd lang gedacht dat er maar een kleine verwarming en een lichte stijging van de zeespiegel voor nodig zou zijn om de West Antarctische ijskap te laten verdwijnen. Tegenwoordig denken we dat dit wel mee zal vallen: voorlopig lijken de grote ijsmassa's stabiel. Er zal wel

wat extra ijs afkalven en smelten, maar bij een klimaatverwarming komt er ook meer vocht in de atmosfeer, wat kan leiden tot meer neerslag (sneeuw) op de ijskappen, waardoor ze juist zouden groeien.

2.2 Uitzetting van Oceaanwater

Oceaanwater zet uit bij verwarming, net zoals b.v. alcohol of kwik in (koorts) thermometers. In figuur



4 is te zien hoeveel een 100 m dikke laag oceaanwater water (van een bepaalde temperatuur) zou uitzetten bij 2 graden temperatuurverhoging. De uitzetting van dat water is sterk afhankelijk van de temperatuur ervan: Een opwarming van de bovenste honderd meter water bij de evenaar (gemiddelde temperatuur: 25 graden) zou die

laag 6 cm dikker maken; bij de polen, of in de diepzee, waar het water veel kouder is leidt 2 graden opwarming maar tot 1.5 a 2 cm extra voor een laag van honderd meter dik.

3. Verwachtingen

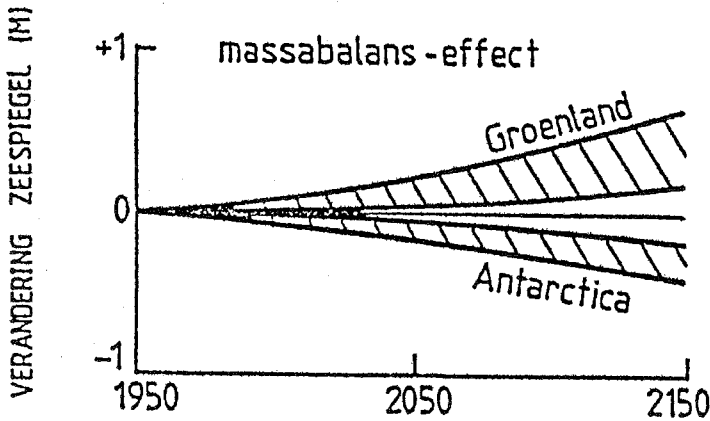
De meningen van de onderzoekers over de preciese oorzaken voor de waargenomen zeespiegelrijzing van 15 a 20 cm per eeuw lopen uiteen van "voornamelijk door smeltend ijs; bijna geen uitzettingseffect" tot "ongeveer evenveel bijdrage van smeltend ijs als van de uitzetting van zeewater". Het blijkt erg moeilijk om preciese schattingen van de totale hoeveelheid landijs, de groei door sneeuwval en het verlies door afbrokkelen en smelten te maken. Ook kennen we de verdeling van temperaturen in het binnenste van de oceanen erg slecht, laat staan dat we veranderingen daarin, gedurende de afgelopen honderd jaar kunnen schatten. Dit gebrek aan kennis speelt een grote rol wanneer we ons toeleggen op voorspellingen! We moeten dan een verloop van gebeurtenissen die we niet erg goed kennen, vanuit een slecht bepaalde 'huidige situatie' doortrekken naar de toekomst. Daar komt nog bij dat we het temperatuurverloop in de atmosfeer, waar al die veranderingen mee samenhangen, wel goed kennen van de afgelopen honderd jaar, maar niet voor de komende honderd jaar.

3.1 Klimaatverandering

Extra zeespiegelrijzing kunnen we dus verwachten als het klimaat gaat opwarmen. Klimaatverwarming die het gevolg is van extra CO₂ (en andere z.g. sporegassen) die wij in de atmosfeer brengen door verbranding van fossiele brandstoffen zal vrijwel zeker plaatsvinden (z.g. 'Broeikas effect'). Met grote computermodellen van atmosfeer en oceanen probeert men de mate van verwarming, het tempo waarin dit zal gebeuren en de plaatsen waar die verwarming meer of minder zal zijn te berekenen. Hoewel de ontwikkeling van dit soort klimaatmodellen nog in de kinderschoenen staat, lijkt er al een globaal beeld te schetsen: De komende honderd jaar zal de gemiddelde temperatuur op aarde zo'n 1 a 2 graden stijgen; bij de polen zal die stijging sterker zijn (3 a 4 graden) dan in tropische streken (0 a 1 graad). De 'hydrologische cyclus' (verdamping van zeewater dat neerregent (sneeuwt) op het land en uiteindelijk via grondwater en rivieren weer naar zee stroomt) zal sterker worden: gemiddeld meer neerslag en meer vocht in de atmosfeer.

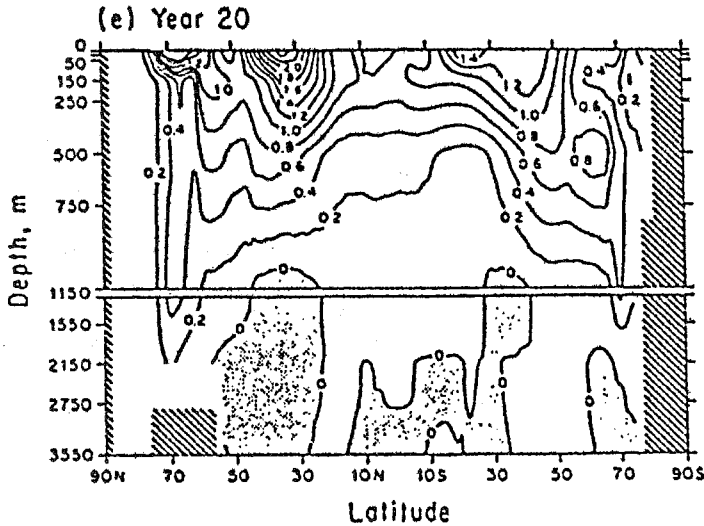
3.2 Zeespiegelrijzing

Bij genoemde klimaatverwarming zou afbrokkelen en smelten van ijskappen ongeveer in evenwicht kunnen blijven met aangroei van die ijskappen door extra sneeuwval. Er wordt veel onderzoek



gedaan naar deze zg. 'massabalans' van ijskappen. Figuur 5 toont een schatting voor deze bijdrage aan zeespiegelrijzing, waarbij we zien dat de ijskap op Groenland enigszins in grootte zou afnemen, terwijl de ijskappen op Antarctica juist zouden groeien. Het afsmelten van gletschers zal in een versneld tempo doorgaan. Dat kan in de komende honderd jaar zo'n 20 cm extra zeespiegelrijzing te weeg brengen. Om toekomstige uitzetting van zeewater te schatten moeten we weten hoeveel water er verwarmd wordt, en bij welke temperatuur

die verwarming gebeurt. Dit opwarmen van oceaanwater kan ook met behulp van klimaatmodellen worden nagebootst. In figuur 6 zien we het indringen van de extra warmte in de oceaan (in zo'n model). We zien dat vooral de bovenste paar honderd meter en de diepere oceaan op hoge breedtes (nabij de polen) verwarmd worden. De uitzetting van het oceaanwater kan in de komende honderd jaar nog eens ongeveer 20 cm extra zeespiegelrijzing veroorzaken. Niet alleen de uitzetting van het oceaanwater maar ook het hele tempo waarmee zo'n klimaatverwarming verloopt wordt bepaald door dit langzame indringen van warmte in de oceanen. In tabel I worden de verwachtingen over zeespiegelrijzing in de komende honderd jaar nog eens samengevat: De zee blijft inderdaad stijgen; en sneller dan voorheen! ■



TABEL 1

Bestaande stijging	20 cm
Uitzetting van oceaanwater	12 .. 24 cm
Afsmelten Gletschers (50%)	15 .. 25 cm
Afsmelten Groenland	4 .. 8 cm
Groei Zuidpoolgebied	-5 .. 0 cm

Verwachting komende 100 jaar 46 .. 77 cm zeespiegelstijging.

Komt de droogte in Amerika door het broeikaseffect ?

Henk Donkers

Sinds het broeikaseffect maken Nederlanders zich zorgen over de stijging van de zeespiegel. De Amerikanen daarentegen zijn bang voor hun landbouw.

De huidige droogte in Amerika wordt in verband gebracht met het broeikaseffect. Maar wetenschappers kunnen dat verband nog niet aantonen. Toch overwegen politici al maatregelen. Beiden waren vorige week in Toronto bijeen op een conferentie over klimaatsveranderingen.

In zijn boek *Gast in eigen huis* onderscheidt oud-minister Winsemius vier fasen in de oplossing van een milieuprobleem. In de eerste fase wordt het probleem op lokaal niveau gesignaleerd en houdt een klein kringetje er zich mee bezig. Pas als er echt iets aan de hand is, krijgt het probleem politieke erkenning. Er is meestal concrete aanleiding nodig om een probleem in de fase van het beleid te doen belanden en op politieke agenda's te krijgen (waarna volgens Winsemius nog de twee fasen van wetgeving en van beheer volgen).

De probleem van de zure regen werd twintig jaar geleden al in Scandinavië en Canada gesignaleerd en erkend, maar de politiek ging er zich pas mee bemoeien toen in de jaren '80 de vitaliteit van de bossen in Midden-Europa en de Verenigde Staten ineens sterk begon terug te lopen. De ontdekking van een heus gat in de ozonlaag boven Antarctica (1984) deed politici wakkerschrikken en leidde snel tot het zogenaamde Protocol van Montreal (1987), dat het gebruik van chloorfluorkoolwaterstoffen (CFK's), de grote boosdoener, moet terugdringen.

Volgens dr.ir. Pier Vellinga van het

Waterloopkundig Laboratorium en prof.dr. Cor Schuurmans, adjunct-directeur wetenschappelijk onderzoek bij het KNMI en hoogleraar meteorologie in Utrecht, brengt de droogte in de Verenigde Staten en Canada eenzelfde schokeffect te weeg als het gat in de ozonlaag. Vellinga en Schuurmans zijn net terug uit Canada, waar zij — evenals Winsemius, Nijpels, beleidsambtenaren van VROM en nog driehonderd andere wetenschappers en politici uit 48 landen — deelnamen aan de conferentie *The Changing Atmosphere. Implications for Global Security*. Vellinga was er als deskundige zeespiegelrijzing en Schuurmans als voorzitter van de klimaatcommissie van de Koninklijke Academie voor Wetenschappen.

Vellinga: "Nijpels heeft op de conferentie verklaard: 'Jullie hebben mij ervan overtuigd dat er echt iets aan de hand is. Elke dag die we langer wachten met het terugbrengen van emissies van broeikasgassen brengt ons dichterbij een ramp'. Ook MacMillan en Mulroney, milieuminister en premier van Canada, lieten zich zo uit. De conferentie nam in de slotverklaring de aanbeveling op om de CO₂-emissies in 2005 terug te brengen met 20%. Volgend voorjaar vindt er in Ottawa (Canada) een vervolconferentie plaats over het maken van wetten en in najaar '89 organiseert Nijpels een conferentie voor politici om te komen tot een internationaal verdrag voor de bescherming van de atmosfeer. Na tien jaar komt nu — door de droogte in Amerika — het broeikaseffect in een versnelling."

In de Amerikaanse media wordt een direct verband gelegd tussen broeikaseffect en droogte. De Amerikaanse NASA-weerkundige Jim Hansen verklaarde voor een speciale droogtecommissie van het Amerikaanse Congres, dat *als* er een broeikaseffect optreedt dit soort klimaatverstoringen vaker zullen voorkomen en dat *deze* droogte een duidelijk signaal is.

Warmste jaren van de eeuw

Het is echter zeer de vraag of die droogte een gevolg is van het broeikaseffect en — sterker nog — of er überhaupt wel sprake is van een broeikaseffect. Om met het laatste te beginnen stelt Schuurmans: "De absoluut doorslaggevende argumenten liggen inderdaad nog niet op tafel. Wel is de gemiddelde tempera-

tuur op de wereld gestegen en vielen de vier warmste jaren van deze eeuw allemaal in de jaren tachtig ('80, '81, '83 en '87). Ook is het CO₂-gehalte in de lucht toegenomen, vooral door verbranding van fossiele brandstoffen. Maar een causaal verband tussen beide is nog niet afdoende bewezen."

Volgens Vellinga geldt hetzelfde voor de zeespiegelstijging. "Die bedroeg de laatste tweehonderd jaar (inclusief de daling van Nederland) 15 tot 17 centimeter per eeuw, maar is nu verdubbeld tot 20 centimeter in een halve eeuw. Dat dat door het broeikaseffect komt is wetenschappelijk niet keihard te maken, maar wel zo aannemelijk dat je maatregelen niet kunt wachten tot je honderd procent zekerheid hebt."

Als er inderdaad sprake mocht zijn van een broeikaseffect, hoe kan de droogte in de Verenigde Staten en Canada daarvan dan een gevolg zijn? Vorig jaar april schreven twee medewerkers van het Amerikaanse *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* van de *National Oceanographic and Atmospheric Administration* (NOAA), volgens Schuurmans 'het toonaangevende instituut', in het gezaghebbende *Journal of Atmospheric Sciences* een artikel over de mogelijke gevolgen van een hoger CO₂-gehalte in de lucht. Het instituut beschikt over het — volgens Schuurmans — beste gecomputeriseerde wereldklimaatmodel. De onderzoekers berekenden met dit model welke invloed verhoogde CO₂ concentraties in de lucht hebben op het vochtgehalte in de bodem, want daar draait het om bij plantegroei en landbouw. Op het Noordelijk Halfrond bleek de bodemvochtigheid in vier uitgestrekte gebieden terug te lopen: Noord-Canada, Noord-Siberië, Zuid-Europa en... de Great Plains in Noord-Amerika.

Opvallend is nu dat dit laatste gebied, dat zich uitstrekt ten oosten van de Rocky Mountains en de graanschuur van de wereld is, nu door ernstige droogte getroffen wordt. Volgens de berekeningen komt er bij een hoger CO₂-gehalte in lente en zomer minder vocht beschikbaar voor de planten. Daarvoor geven de onderzoekers verscheidene oorzaken. De sneeuw smelt eerder en het water verdampt sneller, zodat er aan het begin van het groeiseizoen minder vocht voor de planten beschikbaar is. Door het eerder verdwijnen van het sneeuwdek wordt de bodem meer verwarmd (er wordt

minder zonlicht weerkaatst), wat weer leidt tot meer verdamping en een lagere bodemvochtigheid.

Ook bleek warme vochtige lucht verder naar hetnoorden te kunnen doordringen, zodat de Great Plains ten zuiden komen te liggen van de zone waarin de regenbrengende depressies op de gematigde breedtes overtrekken. De daling van de bodemvochtigheid versterkt zichzelf weer doordat er minder bewolking ontstaat, hetgeen weer leidt tot meer directe instraling van de zon en een warmer aardoppervlak met meer verdamping. Tegenover de geringere bodemvochtigheid in de lente en zomer staat een grotere bodemvochtigheid in de winter, maar daar hebben de planten niets aan.

De huidige droogte in Amerika wordt — net als in de jaren '30 — veroorzaakt doordat een hoge-drukgebied lange tijd op dezelfde plaats blijft liggen. De slingerbewegingen in de luchtcirculatie houden het hogedrukgebied op zijn plaats. Zoiets kun je volgens Schuurmans 'niet pinpointen op een hoog CO₂-gehalte'.

Maar een hoog CO₂-gehalte en het broeikas effect kunnen de luchtcirculatie wel beïnvloeden. Schuurmans: "De motor voor de luchtcirculatie op de gematigde breedten zijn de temperatuurverschillen tussen de evenaar en de polen".

Als daar verandering in komt, verandert de luchtdrukverdeling en als die verandert, veranderen de overheersende windrichtingen en de zee-stromingen. Het broeikas effect zou kunnen leiden tot een gemiddelde temperatuurverhoging op aarde van 1,5 tot 4 graden, maar die temperatuurverhoging zal bij de polen veel groter zijn dan bij de evenaar. In de tropen is de atmosfeer veel dikker en wordt de warmte over meer lucht verdeeld dan bij de polen. Bovendien leidt de afsmelting van sneeuw en ijs, die een hoog terugkaatsend vermogen van zonlicht hebben, tot minder terugkaatsing en meer warmte-opname. De gemiddelde temperatuurstijging door het broeikas effect zou hierdoor op hoge breedte wel eens het dubbele kunnen bedragen van het wereldgemiddelde. Zo zou een verhoogd CO₂-gehalte dus toch kunnen leiden tot andere temperatuurverschillen, luchtdrukverdelingen en luchtcirculatiesystemen.

Maar klimatologen hebben nog steeds veel te weinig inzicht in het functioneren van het wereldklimaatstelsel om daarover gedetailleerde uitspraken te kunnen doen. Zo vormen de oceanen, die een enorme warmteopslagcapaciteit hebben en

door stromingen warmte verplaatsen, een kritische component in het geheel, die niet goed begrepen wordt. Wel verwacht Schuurmans de komende jaren door de bouw van computermodellen 'ontzaglijke vorderingen'.

Kernenergie

Ondanks alle wetenschappelijke onzekerheid zijn Vellinga en Schuurmans voorstander van beperking van emissies van de zogenaamde broeikasgassen. Ze zijn blij met de aanbeveling van de conferentie de CO₂-emissie in 2005 te beperken met 20% van het huidige niveau. Efficiënter energiegebruik en andere energiebronnen moeten elk voor tien procent reductie van de CO₂-emissie zorgen. Dus minder kolen en olie stoken en per verstookte ton minder CO₂-uitstoot.

De kernenergielobby veert op bij dergelijke aanbevelingen. Nijpels verklaarde echter op de conferentie de voorkeur te geven aan efficiënter energiegebruik. "Kernenergie verdeelt ons. We hebben behoefte aan oplossingen die ons verenigen. Zelfs bij de huidige energieprijzen is efficiënter energiegebruik rendabel", aldus de bewindsman.

Nijpels vond ook dat de industrielanden het probleem moeten oplossen. Pas als deze hun emissies hebben gereduceerd, kan van ontwikkelingslanden een bijdrage gevraagd worden. De conferentie riep regeringen op haast te maken met een 'actieplan voor de bescherming van de atmosfeer' en een *World Atmosphere Fund* dat betaald moet worden uit heffingen in industrielanden op het gebruik van fossiele brandstoffen.

Het World Atmosphere Fund als potje voor ontwikkelingslanden zal Nijpels in serieuze overweging nemen en bepleiten bij zijn EG-collega's. In de herfst van 1989 zal hij een conferentie voor politici organiseren om een bijdrage te leveren aan het internationale verdrag voor de bescherming van de atmosfeer.

Oud-minister Winsemius, die er door zijn aanwezigheid in Toronto blijk van gaf nog steeds in het milieu geïnteresseerd te zijn, pleitte ervoor te beginnen met een beperkt verdrag tussen industrielanden in plaats van een wereldwijd verdrag. Dat is het gemakkelijkst haalbaar en tevens het effectiefst. ■

Amerikaanse droogte wellicht periodiek verschijnsel

De boeren in de Verenigde Staten en Canada kampen met de ernstigste droogte sinds de jaren dertig. Toen liet de neerslag vijf jaar achtereen praktisch verstek gaan. Nu is er voor de vijfde keer in acht jaar tijd ook veel minder regen gevallen. De gevreesde stofstormen, die destijds de tarwevelden veranderden in 'gerimpelde oceanen van stof', loeien nu ook over de eindeloze vlaktes en zorgen voor een 'sneeuwbankenlandschap'.

De Great Plains, die zich ten oosten van de Rocky Mountains uitstrekken van Texas tot ver in Canada, vormen een zeer productief, maar ook kwetsbaar landbouwgebied. De eindeloze vlaktes, de lössgronden en de vruchtbare zwarte-aarde-bodems zijn gunstige natuurlijke voorwaarden.

Maar er valt tamelijk weinig neerslag. Door het gebied loopt de kritieke neerslaggrens van 500 mm per jaar, ook wel de droogtegrens genoemd. Deze hoeveelheid neerslag is voldoende voor akkerbouw, vooral omdat 70 tot 80 procent van de neerslag in de periode tussen mei en september valt, het groeiseizoen. Omdat de neerslag in de winter in de vorm van sneeuw valt, die pas in de lente smelt, hebben planten extra vocht.

Er komen echter van jaar tot jaar grote schommelingen voor in de hoeveelheid neerslag. Dat komt doordat de vochtige lucht uit de Golf van Mexico, die voor regen moet zorgen, er grillige gewoonten op na houdt. Variaties in neerslag van 25% zijn heel normaal.

Een extra probleem is dat natte en droge jaren de neiging vertonen in groepjes voor te komen. Sommige klimatologen zien zelfs een periodiciteit in de schommelende neerslaghoeveelheden en onderscheiden periodes van dertig jaar. Gedurende dertig jaar zouden de neerslaghoeveelheden stijgen om in de daaropvolgende dertig jaar te dalen. Boeren kunnen door deze periodiciteit in een 'klimatologische val' lopen. Dat is gebeurd in de jaren '30 en is misschien nu ook weer het geval.

Zo is er voor de periode 1875-1905 een opgaande lijn in de hoeveelheid neerslag geconstateerd. De omstandigheden voor akkerbouw werden daardoor steeds gunstiger. Kolonisten ploegden grasvlaktes om en zaaiden tarwe, daartoe gestimuleerd door een toenemende vraag op de wereldmarkt en betere transportmo-

gelijkheden. Tot na de Eerste Wereldoorlog ging men door met de uitbreiding van het tarwe-areaal, want de prijzen waren goed en de vraag groot.

Toen de neerslaghoeveelheden, die sinds 1905 een dalende lijn waren gaan vertonen, in de jaren dertig een dieptepunt bereikten, klapte de klimatologische val dicht. Jaren achtereen mislukten de oogsten bijna totaal. Landerijen werden verlaten en vielen ten prooi aan winderosie.

Stofstormen staken op en zorgden tot in New York voor zonsverduisteringen. Miljoenen hectaren goede landbouwgrond gingen voorgoed verloren.

Programma's voor economisch herstel en bodembescherming hadden succes, mede door een opgaande lijn in de neerslagcijfers. Erosiegevoelige gronden werden uit productie genomen en er werd een ruimere vruchtwisseling toegepast. De grond begon zich aardig te herstellen.

Begin jaren zeventig veranderde het landbouwbeleid in de VS. De graanexport werd opgevoerd, want op de wereldmarkt ontstond een grote vraag (OPEC-landen, misoogsten in de Sovjet-Unie). Het landbouwareaal werd tussen 1970 en 1985 uitgebreid van 110 naar 140 miljoen hectare. De export steeg en de inkomens van de boeren namen toe. De uitbreiding van het areaal kon echter alleen plaatsvinden door marginale, erosiegevoelige gronden in productie te nemen.

Door moderne landbouwtechnieken, die leiden tot een lager gehalte organische stof en een slechtere bodemstructuur, werden de gronden steeds gevoeliger voor droogte. Humus zorgt ervoor dat een bodem veel water kan opnemen en vasthouden.

Door verwaarlozing van de vruchtwisseling en verwaarlozing van groenbemesting (het onderploegen van stikstofbindende planten) bevat de bodem steeds minder humus. Kunstmest compenseert dat verlies onvoldoende. Het toenemend gebruik van chemische bestrijdingsmiddelen verslechterde de structuur eveneens, want deze doden veel bodemorganismen.

In de jaren tachtig ging het steeds slechter met de landbouw wegens de graanoverschotten en de dalende prijzen. Boeren konden hun hoge schulden niet afbetalen; bij tienduizenden gingen ze failliet. De rest probeerde het hoofd boven water te houden door maximale productie tegen minimale kosten van hun grond te eisen. Dat vergrootte de droogte- en erosiegevoeligheid verder.

De klap komt nu extra hard aan. Bodembescherming heeft onder het be-

wind van Reagan nooit een hoge prioriteit gehad. William Fecke van de US Soil Conservation Service verklaarde vorige week in *Time* dat er alleen al in Montana, Wyoming, en de beide Dakota's 750.000 acre land is weggewaaid (1 acre is 4047 m²). Zeven miljoen acre heeft grote schade opgelopen en 12 miljoen acre wordt bedreigd. Fecke: "Als de wind niet gaat liggen, waaien er stukken van de Plains naar New England". ■

4 Ozon

Ozon in de atmosfeer

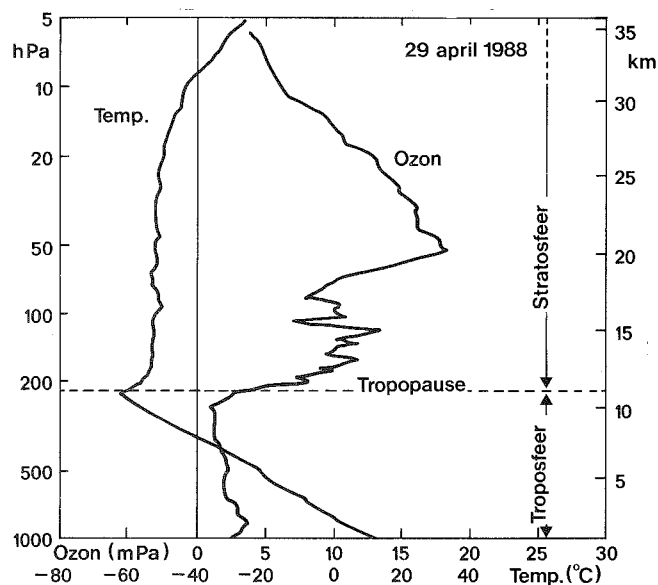
Hennie Kelder

Inleiding

De aardse atmosfeer bevat naast stikstof, zuurstof en waterdamp minderheidsbestanddelen, waarvan ozon (een zuurstofverbinding, in formulevorm O_3) de belangrijkste is. Toch is de hoeveelheid ozon zeer gering. Als bijvoorbeeld de atmosfeer zou kunnen worden gereduceerd tot een laag met overal een druk van 1 atmosfeer zou de laag een dikte hebben van ongeveer 8 km; ozon zou onder dezelfde druk slechts een dikte innemen van 2 tot 6 mm. In massa uitgedrukt: de massa van de hele aardatmosfeer is ongeveer 5×10^{18} kg en die van ozon slechts 3.3×10^{12} kg. Of nog anders uitgedrukt, slechts ongeveer 1 op de miljoen luchtmoleculen is een ozonmolecuul. Het grote belang van ozon is te danken aan het feit dat het nagenoeg als enige van de atmosfeergassen het ultraviolet licht, uitgezonden door de zon, met golflengtes tussen 200 en 330 nm absorbeert. Zonder deze absorptie zou het leven in zijn huidige vorm op aarde onmogelijk zijn.

Meetmethoden van ozon

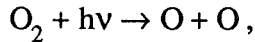
De klassieke methode om de totale hoeveelheid ozon te bepalen, is door meting van de absorptie van ultraviolette zonnestraling. De techniek bestaat uit het gelijktijdig meten van de intensiteit van twee of meer banden in het ultraviolet rond de 300 nm. Rond deze golflengte varieert de absorptie namelijk sterk. De 290 nm band bijvoorbeeld wordt sterk geabsorbeerd maar de 310 nm daarentegen nauwelijks. De verhouding tussen de intensiteiten is dan een maat voor de totale hoeveelheid ozonmoleculen tussen de zon en de waarnemer langs de rechte lijn die de waarnemer en de zon met elkaar verbindt. Een tweede techniek is: met behulp van een satelliet de hoeveelheid ultraviolet zonnelicht te bepalen nadat deze tegen het aardoppervlak of in de atmosfeer is gereflecteerd respectievelijk verstrooid. Nadeel is echter dat de ijkconstanten van de ultraviolette apparatuur aan boord van de satelliet onvoorspelbaar veranderen. De verticale verdeling van ozon kan worden gemeten door de ozonsonde op te laten met behulp van een ballon. Een ozonsonde kan bijvoorbeeld geconstrueerd worden door een kaliumjodideoplossing met daarin een platina gaas kathode en een zilverdraad anode. De ozonrijke lucht wordt dan door de oplossing gepompt. Ozon reageert met de kaliumjodide en bevrijdt de jodide. Als er een potentiaalverschil wordt aangelegd, gaat er een stroom vloeien evenredig met de hoeveelheid vrije jodide en dus met de hoeveelheid ozon. Een nieuwe techniek maakt gebruik van lasers. De zogenaamde DIAL (Differential Absorption Lidar) maakt gebruik van het verschil in intensiteit tussen twee gereflecteerde en deels geabsorbeerde ultraviolette laserstralen. Een voorbeeld van een ozonprofiel, gemeten met een ozonsonde door ons Belgisch zusterinstituut het KMI, is gegeven in figuur 1.



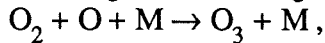
Figuur 1 Ozon en temperatuur-profiel gemeten door het KMI in België. De ozonwaarden zijn gegeven als partiële drukkens met als eenheid de m Pa (milli Pascal).

Ozon in de stratosfeer

Ozon in de atmosfeer wordt gevormd door een verbinding van een zuurstofatoom met een zuurstofmolecuul. De zuurstofatomen ontstaan in de stratosfeer door splitsing van zuurstofmoleculen onder invloed van UV-lucht van de zon. We kunnen dit voorstellen door

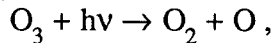


waarbij $h\nu$ het ultraviolette foton voorstelt met frequentie n en h de constante van Planck is. De vorming van ozon gebeurt dan volgens

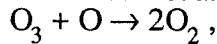


waarbij M een molecuul voorstelt dat de overtollige energie moet opnemen. Ozon kan vernietigd worden op verschillende manieren:

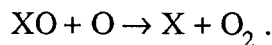
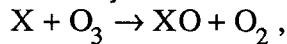
- door photodissociatie



- door een reactie met atomaire zuurstof



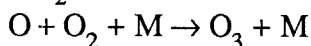
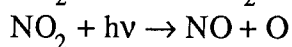
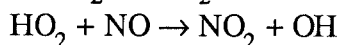
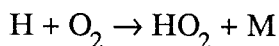
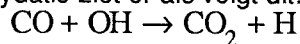
- door een katalytische reactiecyclus



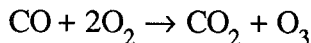
Het symbool X stelt een katalytisch molecuul dat wil zeggen een molecuul dat de reactie mogelijk maakt, maar zelf onveranderd is gebleven aan het eind van de cyclus. De katalytische moleculen zijn voornamelijk het hydroxyl radicaal OH, stikstofmonoxyde NO en het atomaire chloor Cl. De laatste destructiemogelijkheid (5) is de belangrijkste in de stratosfeer. In de atmosfeer neemt de hoeveelheid zuurstofmoleculen toe met de diepte terwijl de hoeveelheid ultraviolette straling afneemt, dat wil zeggen dat er een maximum moet zijn in de hoeveelheid geproduceerde ozon; dit bevindt zich op ongeveer 22 km hoogte.

Ozon in de troposfeer

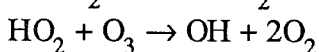
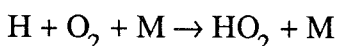
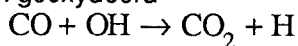
De hoeveelheid ultraviolet licht is in de troposfeer onvoldoende om veel ozon te produceren door photodissociatie. Dit gebeurt voornamelijk door oxydatie van koolmonoxyde (CO) en methaan (CH₄). Laten we bijvoorbeeld de oxydatie van koolmonoxyde nader beschouwen. Het reactieschema voor CO-oxydatie ziet er als volgt uit:



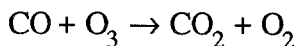
netto:



Cruciaal voor deze reactie is de aanwezigheid van NO. Koolmonoxyde kan namelijk ook anders worden geoxydeerd



netto:



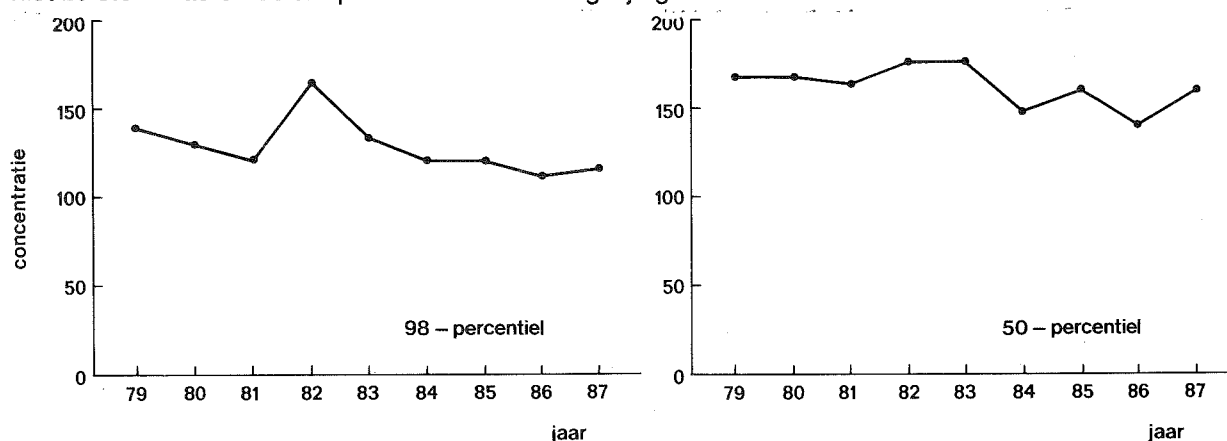
Deze reactieketen leidt tot verlies van ozon. De reactie van HO₂ met NO verloopt echter 4000 maal sneller dan die met O₃. Dus als de verhouding van NO tot O₃ groter is dan 1:4000, vindt er productie van ozon plaats. In de laagste kilometers van de atmosfeer komt dit neer op een NO volumeverhouding van 5-10 pptv (1 pptv = 10⁻¹²). Ter illustratie van de veranderingen in de ozon zijn in figuur 2 enige resultaten van ozonmetingen in Nederland weergegeven (Bron: RIVM, Bilthoven).

Menselijke beïnvloeding van de hoeveelheid ozon

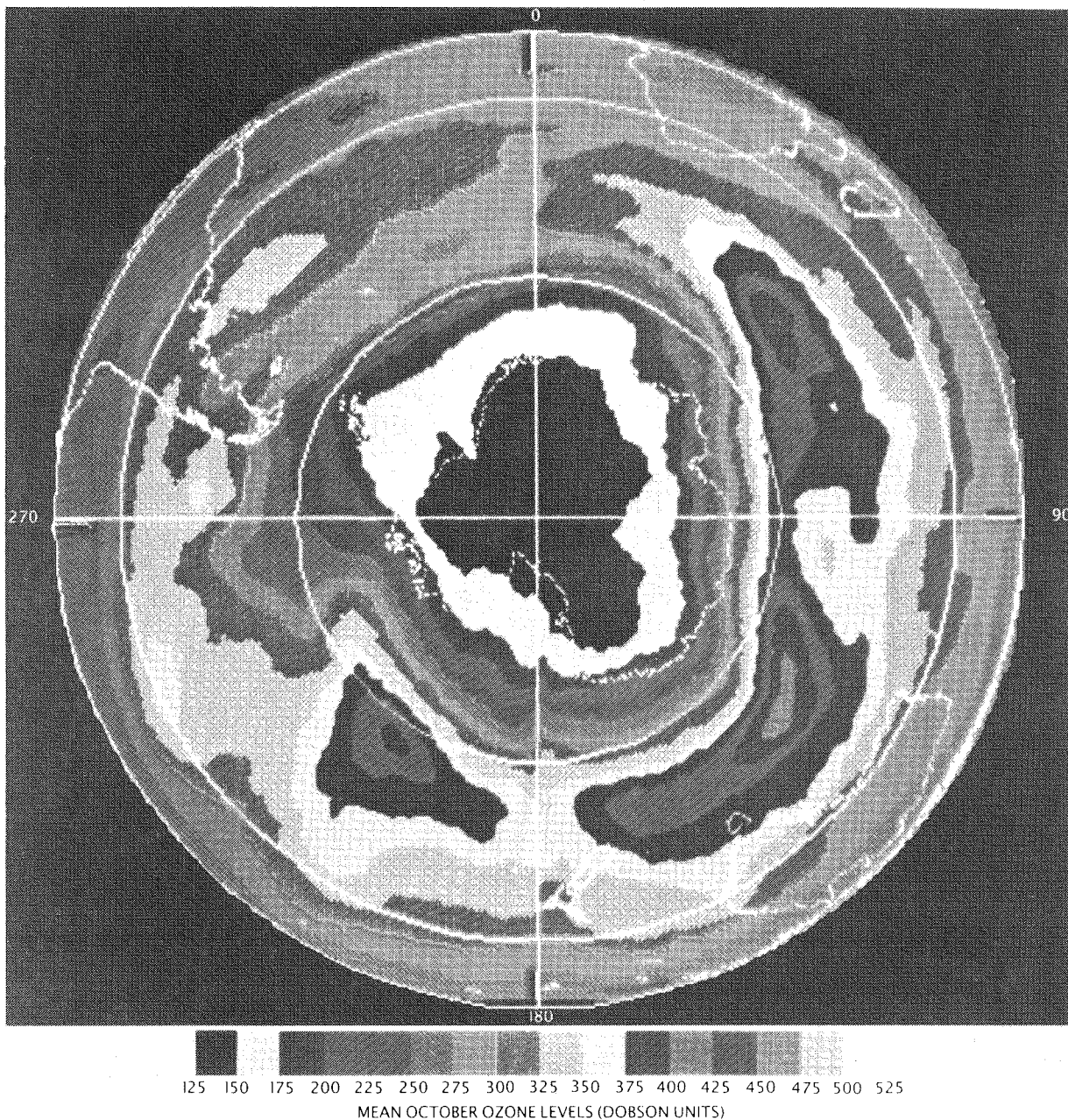
De afbraak van ozon in de stratosfeer wordt voornamelijk bepaald door de katalytische reacties (5) met als katalysatoren OH, NO en Cl. Deze stoffen zijn van nature aanwezig in de atmosfeer. Menselijke activiteiten kunnen echter de concentraties veranderen. -Door het gebruik van stikstofmest ontstaat er distikstofoxyde (N_2O) dat gedeeltelijk in de stratosfeer terecht kan komen. Door photodissociatie wordt daar NO gevormd. -Uitlaatgassen van vliegtuigen bevatten zowel OH als NO en een gedeelte daarvan kan door transport in de stratosfeer terecht komen. -De chloorfluormethanen $CFCI_3$ en $CFCI_2$, ook wel freonen genaamd en gebruikt als drijfgas in spuitbussen, als koelgas en bij de productie van kunststofschuimen, zijn in de troposfeer chemisch inert. Na verloop van tijd komen deze gassen in de stratosfeer waar door photodissociatie chlooratomen worden afgesplitst. In de troposfeer wordt de hoeveelheid ozon bepaald door de oxydatie van koolmonoxyde en methaan. Is er voldoende NO beschikbaar dan ontstaat er ozon. Stikstofmonoxyde kan echter ook ozon vernietigen. De menselijke activiteiten produceren deze gassen op de volgende wijze: -stikstofoxyden door industriële activiteiten en in uitlaatgassen van auto's; -koolmonoxyde ontstaat eveneens als verbrandingsproduct; -methaan wordt door koeien geproduceerd maar wordt ook gevormd in moerassige gebieden zoals rijstvelden. Het beeld is dus een afname van ozon in de stratosfeer en een toename in de troposfeer. Dit doet denken aan een compensatie maar dit beeld is bedrieglijk. Ozon is een giftig gas voor mens, dier en plant. Bovendien absorbeert het infrarode straling en verhoogt zo de temperatuur in de troposfeer wat kan leiden tot klimaatsveranderingen. Dus een toename in de troposfeer heeft vele gevolgen.

Het ozongat boven de Zuidpool

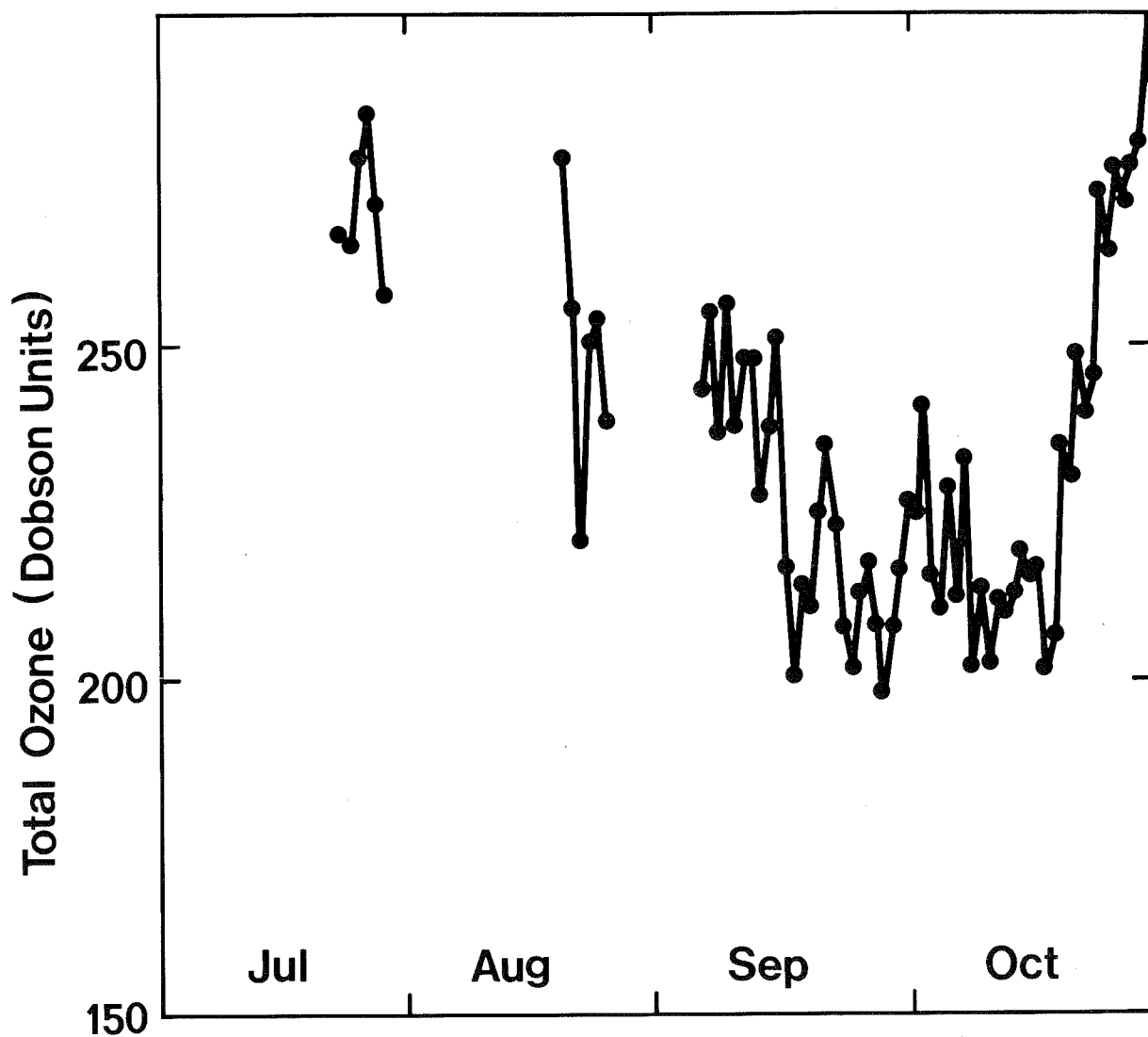
De laatste jaren is uit metingen gebleken dat er boven de Zuidpool gedurende de lente een groot gat in de ozon ontstaat. In figuur 3 is dit geïllustreerd. De huidige verklaring is dat de temperaturen in de Zuidpoolstratosfeer in de winter zakken tot -100 graden Celsius en lager. Dit is een gevolg van de luchtcirculatie boven de Zuidpool. Dat is een wervel die de toegang van warmere lucht van hoge breedte belemmert. In deze kou worden stratosfeerwolken gevormd bestaande uit ijskristallen die Cl-verbindingen bevatten. Door heterogene reacties op het oppervlak van de ijskristallen komt het chloor vrij in de vorm van Cl_2 en HOCl. Bij de terugkeer van de zonnestraling in de lente worden de chloorverbindingen snel gedissocieerd en Cl en OH vernietigen dan de ozon. Ook hier is sprake van een combinatie van een natuurlijke omstandigheid: een geïsoleerd circulatiesysteem en een verhoogde chloorconcentratie, vermoedelijk door menselijke activiteit, die leidt tot dit verontrustende verschijnsel. De meest recente meetresultaten tonen aan dat in 1988 het gat niet zo diep is geworden. In figuur 4 staan ozon waarden voor Halley Bay uitgezet. Er is een ozonreductie van ongeveer 26 procent en dit is vergelijkbaar met 1984, 1986 maar minder dan in 1985 en 1987. Over de verklaring van het minder diepe ozonminimum in 1988 is men het nog niet eens. Wel is waargenomen dat de Zuidpoolwervel niet zo sterk was en de temperaturen minder laag zijn geworden.



Figuur 2 Verloop van de gemiddelde 98- en 50-percentielwaarden voor ozon in de periode 1979-1987. Gebaseerd op percentielen van uurswaarden. Concentraties in $\mu g m^{-3}$. (bron: RIVM)



Figuur 3 Kaart van ozon niveaus in de atmosfeer van het zuidelijk halfrond op 5 oktober 1987. Duidelijk zichtbaar is het lente ozongat boven Anartica. In het gat is de hoeveelheid ozon de helft van de waarde van 10 jaar geleden toen het rond de 300 Dobson eenheden schommelde. De kaart is gebaseerd op gegevens van de "Total Ozone Mapping Spectrometer" (TOMS) aan boord van de NASA Nimbus 7 satelliet.



Figuur 4 Ozonwaarden boven Halley, Zuidpool in 1988 ■

Chlorine blamed for growing "ozone hole"

Andrew Bell

Like acid on lace, chlorine from man-made chemicals appears to be eating away the tenuous fabric of our protective ozone layer, at least over Antarctica in spring. That's the nearly inescapable conclusion from the most recent set of stratospheric measurements made last year by more than 150 scientists, who flew their most sophisticated instruments into the centre of the now-renowned 'ozone hole'.

They found that the diffuse ozone layer, spread out between 12 and 20 km above the icy continent, registered in August a thickness equivalent to 3.0 mm at sea level, but by early October — as the sun returned after the long winter night — it had been reduced to only 1.3 mm. Other instruments showed that at the heart of the ozone layer — at an altitude of 16.5 km — more than 97% of the ozone had been consumed.

Fortunately, within a further month or so, the 'hole' had been repaired, as air with normal ozone levels swept in from lower latitudes (just as has happened every year since the springtime ozone hole apparently first came into being 9 years ago). The filling-in of the hole results from the natural changeover between winter and summer circulation patterns in the Antarctic atmosphere.

Nevertheless, the phenomenon has scientists worried, because the hole is getting progressively deeper and wider each year (apart from a slight turnaround in 1986). Last year's hole had 15% less ozone than the previous minimum in 1985, and represents a thinning of ozone of more than half.

Furthermore, last year the filling in of the hole occurred later than it ever had (mid December). This could be the first observed result of the ozone hole having an impact on climate.

Because ozone shields living things from the sun's damaging ultraviolet radiation, the possibility that the Antarctic ozone hole is the forerunner of thinning elsewhere in the stratosphere has profound implications

for future life on earth. Thankfully, the hole is presently confined to an isolated air mass (the very cold vortex of air that swirls in constant darkness around the South Pole every winter), and the chemistry of its formation is different from that governing the stratospheric ozone sheltering the rest of the globe.

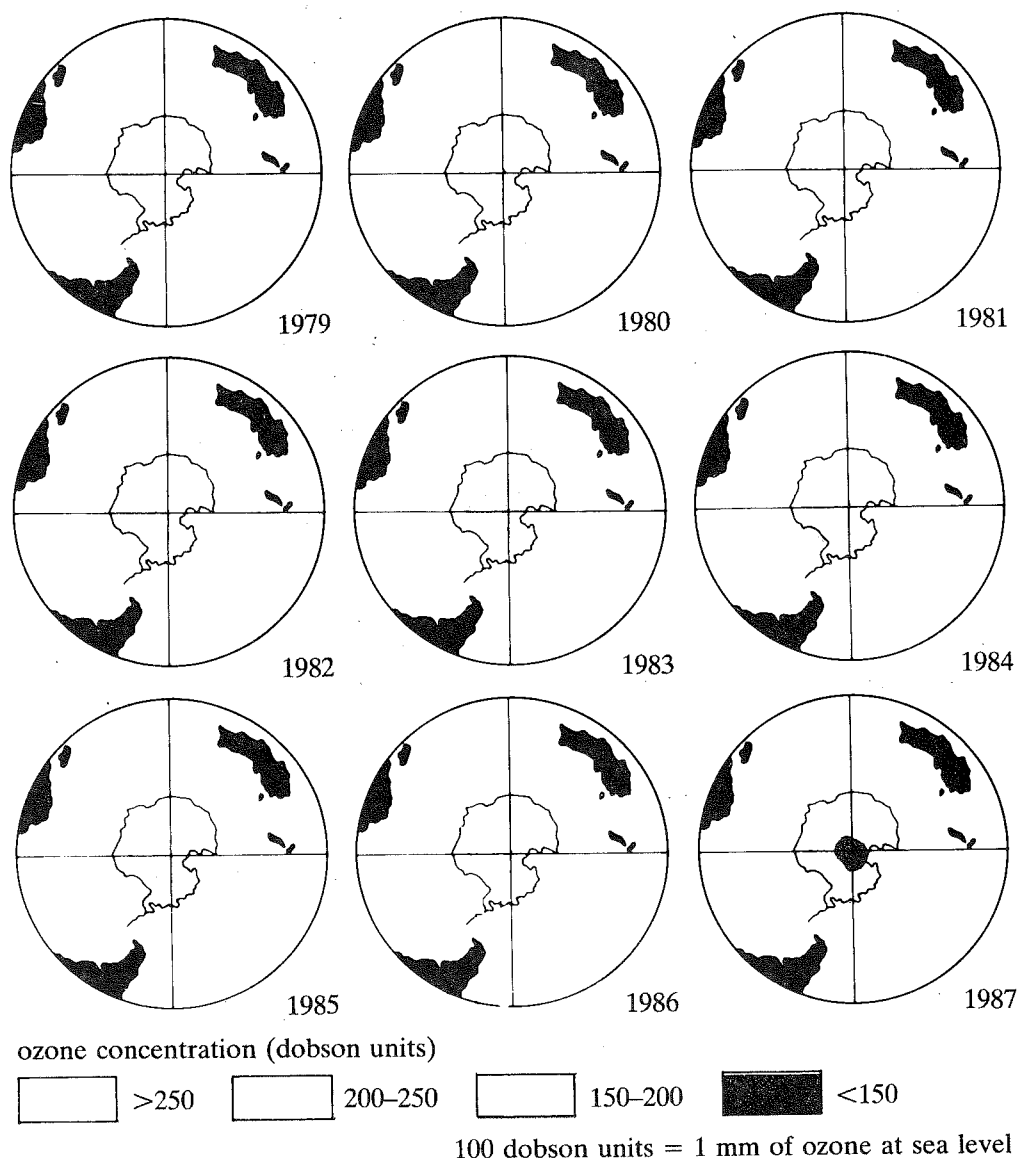
However, if ozone at temperate latitudes were to disappear at a similar rate, we'd really have something to worry about (more skin cancer, reduced crop yields, diminished phytoplankton activity, and so on). An unrestrained growth in the release of man-made chlorofluorocarbons (CFCs) to the atmosphere could bring this about, scientists warn.

So far, the only significant long-term ozone change found outside Antarctica has been a 2–3% loss since 1970 in the mid to high latitudes of the Northern Hemisphere. This loss was revealed in March this year by NASA's Ozone Trends Panel. (Dr Alan Plumb and Dr Paul Fraser, of the CSIRO Division of Atmospheric Research, belong to the Panel, and they have contributed to its recent comprehensive report on atmospheric ozone.)

With the current ozone-observing network, such an ozone change is barely detectable because many processes affect global ozone levels, often in opposite directions. The gas is constantly created (by sunlight from ordinary oxygen, mostly above the Equator) and destroyed (by various atmospheric constituents, natural and man-made) as winds distribute it in the upper atmosphere. Cyclical changes in atmospheric motion and variations in solar activity with the solar cycle can have a big influence on these processes.

Reports last year of large decreases in total ozone since 1979 (and of the appearance last year of a small Arctic ozone hole)

How the hole has grown



Satellite measurements have shown a progressive decline in springtime ozone levels over Antarctica. How long can the decline continue?

have now been shown to be incorrect; they were due to satellite data that failed to allow for drifts in sensitivity of the on-board detectors.

The key question is whether the Antarctic ozone hole is a symptom of something far more drastic — is it an early warning sign of what may happen over the whole planet if increased quantities of CFCs are released to the atmosphere?

Another worry, voiced by Dr Plumb, is

that Australia may already be feeling some effects from the loss in Antarctic ozone. Last spring, the Antarctic hole covered 15% of the Southern Hemisphere, and when it filled in it most likely did so at the expense of neighbouring regions. Dr Plumb suspects that an early summer depletion in Australian ozone levels may now be detectable, and he is keen to see if analysis of surface and satellite ozone data for the Australian region confirms his suspicions.

Montreal Protocol

As *Ecos* 52 pointed out, atmospheric concentrations of CFCs — used as refrigerants, blowing agents in plastic-foam production, propellants in some spray cans, degreasers of electronic assemblies, and so on — are rapidly increasing. Inert in the lower atmosphere, these gases slowly migrate to the stratosphere where ultraviolet radiation breaks them down, creating very reactive radicals of chlorine and chlorine monoxide (Cl^{\bullet} and ClO^{\bullet}) and starting a chemical chain reaction. The radicals act as catalysts, with each one formed leading to the destruction of thousands of ozone molecules (O_3) into oxygen (O_2). The most common CFCs in the atmosphere have an effective lifetime of 75–110 years.

Placing a ceiling on the release of CFCs into the atmosphere is the aim of the historic Montreal Protocol, agreed to last September (2 weeks before the latest ozone hole findings became known) under the earlier Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer. Australia is one of the countries, along with the United States, the European Economic Community, and many other nations, that have ratified the Protocol or are about to do so.

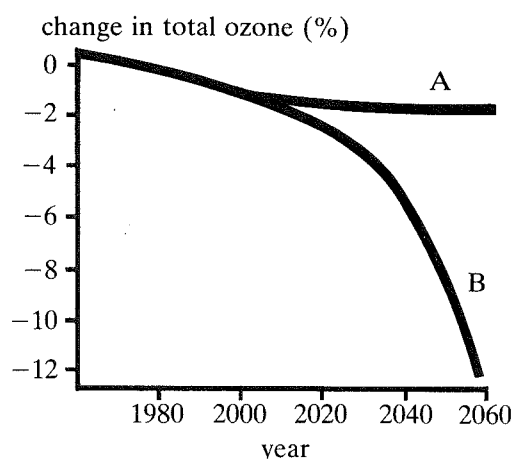
The Montreal Protocol for Substances that Deplete the Ozone Layer calls for a freeze (at 1986 levels) on the national consumption, but not production, of CFC-11, -12, -113, -114, and -115 by 1990, followed by a 20% cutback before 1994 and a further 30% cut before 1999. In addition, consumption of halons 1211 and 1301 (bromine-containing compounds used in some fire-extinguishers) will be frozen at 1986 levels by 1993. We use 40 times less halons than CFCs, but then they destroy ozone up to 10 times more effectively.

Developing countries received a 10-year period of grace, during which they would

be allowed to steadily increase annual consumption of CFCs to 0.3 kg per person, which compares with a present average of about 0.8 kg in developed countries, such as Australia (this country currently consumes 12–13 million kg of CFCs each year).

Curve A models the effect on ozone if CFC emissions cease in 1997 (prior emissions detailed in text). In an alternative scenario, non-compliance with the Montreal Protocol sees one-third of the current world CFC production increasing by 2.5% per year — a path to major ozone depletion.

The outcome of two patterns of CFC use



The required reductions are measured in ozone-depleting potential, not tonnes. In other words, a country can increase its consumption of CFCs, but still reduce environmental impact, by switching to CFCs with shorter atmospheric lifetimes and lesser ozone-destroying abilities.

Of course, a big drive is now under way for companies to come up with new CFCs that possess minimal ozone-consuming side-effects (and are not too expensive to make). Normally competitive companies are co-operating to find alternatives in the shortest possible time. Nevertheless, toxicological testing of proposed substitutes will take about 5 years, and implementing changes to production facilities may take

even longer.

The Protocol is a landmark achievement — the first international treaty to limit the pollution of the planet's atmospheric mantle.

Dr Fraser, a scientist with broad expertise in the effects of trace gases on ozone, believes the measures prescribed by the Montreal Protocol are probably sufficient to prevent long-term depletion of the ozone layer outside Antarctica, provided we are correct in assuming that the simultaneous release of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and other greenhouse-effect gases brings about a countervailing effect to that of chlorine on ozone levels.

Increased levels of these gases (that incidentally include CFCs themselves) trap extra heat low in the atmosphere, which calls for a corresponding cooling in the stratosphere to balance the energy budget. This cooling slows ozone-depleting reactions, and in addition methane acts to some extent as a chlorine 'sink'.

If we use a widely accepted model of ozone chemistry to examine the net result of these two effects, we get the ozone levels shown in the graph. Curve A shows what happens if the Protocol's provision for a 20% reduction from 1986 levels in consumption of CFCs has a compliance rate of 65%. It assumes that non-complying countries continue to emit CFCs at a growth rate of 2.5% per year until 1997, when growth stops. The final ozone depletion is less than 2% by the year 2060.

In another possible development, non-complying nations may continue to increase CFC usage at 2.5% per year indefinitely, and curve B shows the worrying result — an ozone depletion of 12% by 2060.

These predicted depletions are based on chemical processes that have been thoroughly investigated over the past 20 years, and they form the scientific basis of

the Montreal Protocol. Scientists currently believe that adherence to this Protocol will prevent future global ozone depletions from reaching unacceptable levels (outside Antarctica). However, they are now seeing that chemical processes, previously thought unimportant, are causing the Antarctic ozone hole; a substantial effect on regional ozone concentrations is resulting even from present chlorine levels (previously regarded as 'safe').

Because we are currently putting CFCs into the atmosphere five times faster than natural processes can dispose of them, the amounts of CFCs in the atmosphere will still be increasing even after the envisaged 50% cuts have taken place in 1999. If we wanted the amounts of atmospheric CFCs to grow no bigger, and the Antarctic ozone hole to stop deepening, we would need to cut their emissions by 85%.

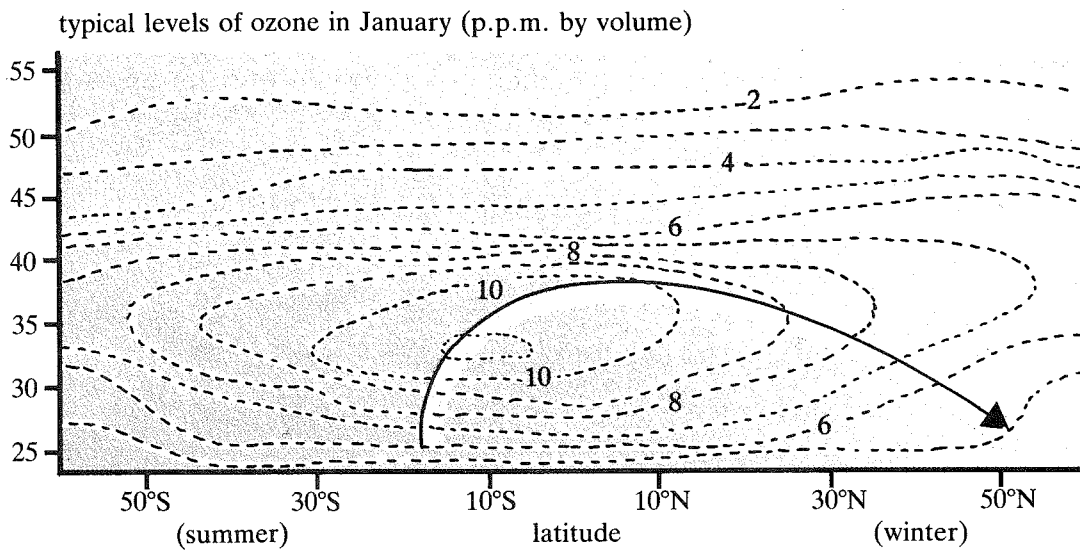
As the Protocol stands at the moment, by 2020 stratospheric chlorine levels will be about three times the present level (10 times the amount present before use of CFCs became widespread).

Maybe if the Montreal delegates had known the results of the latest Antarctic probings they would have made the emission limitations more stringent. Fortunately, the Protocol contains provisions for reassessments, and these must be undertaken at least every 4 years.

Chlorine is it

The latest Antarctic probings involved international teams of scientists and technicians operating high-flying aircraft out of southern Chile between 19 August and 30 September last year. Managed by NASA, the Airborne Antarctic Ozone Experiment saw researchers from agencies and universities in the United States, Britain, and several other countries working together to find the cause of the recurring Antarctic

Ozone moves from Equator to Poles



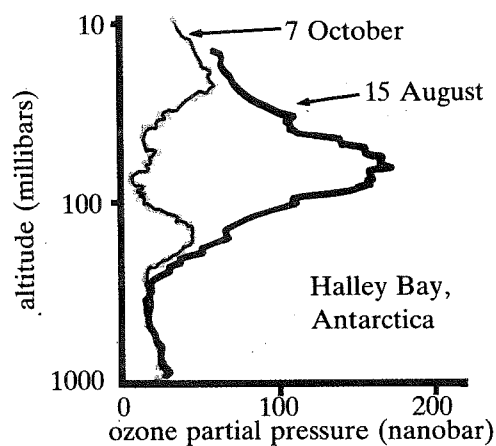
Ozone is formed by sunlight — mostly above the Equator. Its predominant movement is from the Equator towards the winter Pole. Because the lower atmosphere is denser, most of the ozone can be found below 35 km (the peak in relative abundance).

hole.

An ER-2 aircraft made 12 sorties from Punta Arenas (Chile's southernmost city) as far south as 72° and at altitudes up to 19.5 km, carrying sensitive instruments to measure the chemical content and meteorological properties of the air. A larger modified DC-8 made 13 flights; this heavily instrumented plane was limited to an altitude of 11.1 km, but it reached the South Pole on several occasions, and finally flew right across Antarctica to New Zealand. The scientists also made use of ground-based and satellite observations.

When the Experiment's initial findings were released on 30 September, it was immediately apparent that chlorine, acting within the unique Antarctic meteorology, was to blame for the ozone depletion. As the ER-2 flew into the ozone hole, and ozone levels dwindled, the concentration of chlorine monoxide (the smoke from the CFC gun) rose steeply; indeed, small variations in one quantity were matched by opposite deviations in the other.

A profile of the 1987 ozone hole



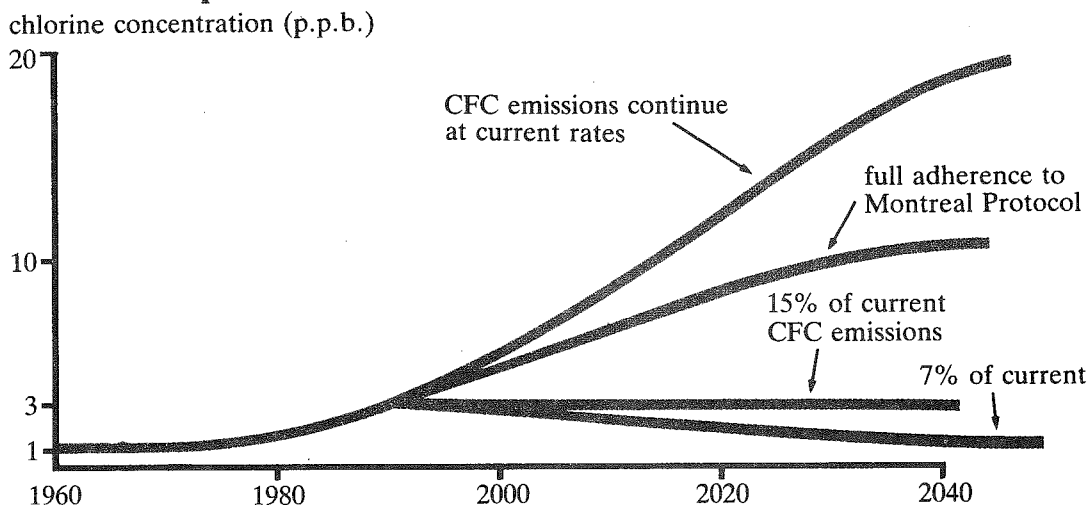
At a height of 16.5 km (70 millibars) the ozone concentration fell by 97% from the level recorded on 15 August 1987, before the 'hole' formed.

The 1987 measurements confirm those of 1986, which revealed particularly low levels of NO_x, thus ruling out the solar cycle theory (wherein increased solar activity produces high levels of ozone-destroying nitrogen oxides).

The purely dynamical theories are not looking too good, either. Dr Plumb, an

If we want to see a turnaround in the rising levels of stratospheric chlorine, we will need to cut emissions of CFCs to less than 15% of current rates. However, it should be noted that, although chlorine is the primary cause of ozone depletion, the concentrations of the two can't be directly related. In particular, chlorine is kept out of harm's way when it reacts with methane, and one of the incidental effects of accumulating greenhouse gases is to lower stratospheric temperatures and so favour ozone production.

Trends in stratospheric chlorine



expert in the atmospheric dynamics of ozone transport, once favoured this sort of explanation, but he now believes that observations don't support any such picture.

For example, the most popular dynamical theory — that ozone is depleted because the Antarctic sunrise causes upwelling from below — is incompatible with measurements of nitrous oxide (N₂O) and CFCs. These compounds, originating at the surface, should increase in the stratosphere if upwelling is going on. They don't!

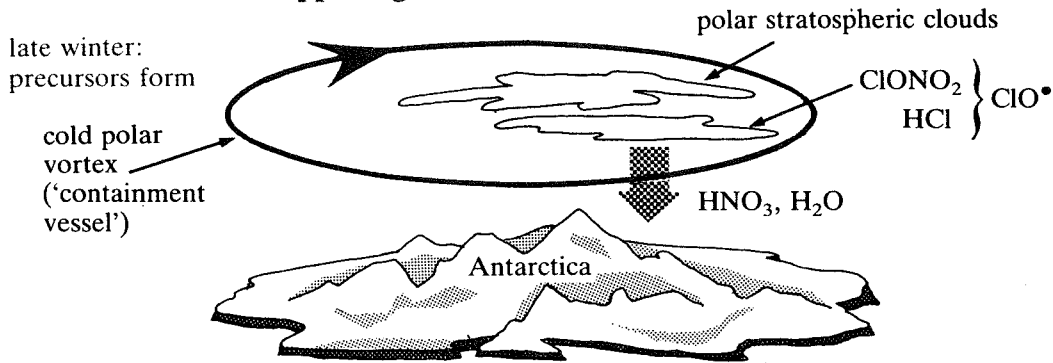
And so, the chlorine theory seems to have come up trumps. The big question is

no longer whether CFCs are responsible for ozone depletion, but rather how they do it.

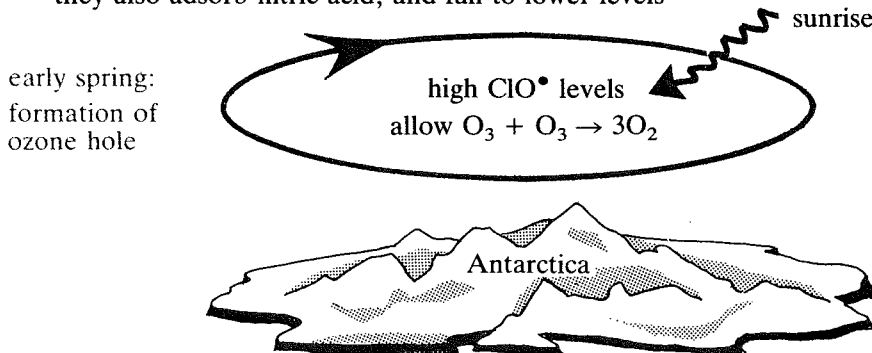
Most researchers believe that the key lies with chemical reactions that take place on the surface of frozen particles in polar stratospheric clouds. The dark Antarctic stratosphere, isolated in the polar vortex, is intensely cold, reaching -85°C or lower; under these conditions water vapour passes the frost point and ice crystals form.

According to current theory (incomplete though it is), reactions on these crystals provide a reservoir of reactive chlorine that destroys ozone when the sun returns in the

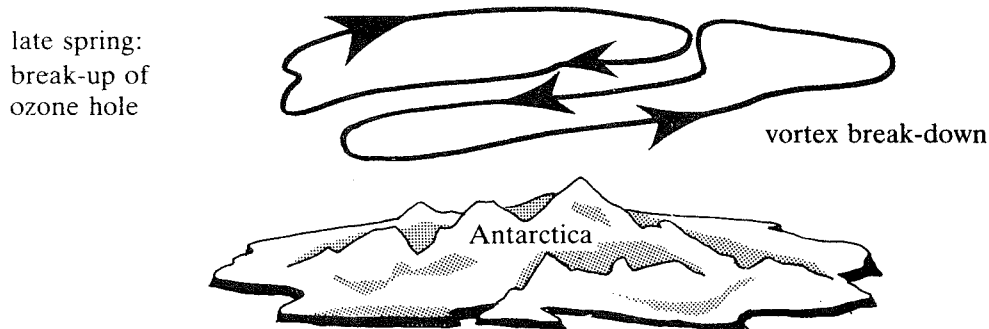
What seems to be happening



1. polar stratospheric clouds provide surfaces on which ClO^\bullet can form they also adsorb nitric acid, and fall to lower levels



2. with nitrogen absent, ClO^\bullet cannot revert to ClONO_2 sunlight and ClO^\bullet catalyse the reaction of ozone to oxygen



3. warming breaks up the polar vortex and the ozone hole is filled by air with normal ozone levels

spring. Basically, the ice surfaces are required to convert chlorine from inactive forms (such as ClONO_2 and HCl) into active forms like ClO^\bullet

To explain the observed ozone loss, the theory requires ClO^\bullet levels of 1 part per billion — an amount at least 100 times greater than the normal stratospheric concentration. It further predicts that these high levels of ClO^\bullet should be accompanied by low amounts of NO_x and H_2O because

the cloud particles fall, taking away both ice and nitrates. With substances like nitric acid out of the way, chlorine is free to destroy ozone.

Indeed, these predictions have received strong support from the recent Experiment. Levels of ClO^\bullet did reach 1 p.p.b. in a clearly defined region above 18 km and poleward of 68°S ; NO_x and H_2O levels fell abnormally low, and high levels of nitrate were sometimes observed in collected ice

particles.

The fast reaction between HCl and ClONO₂ in the presence of ice particles has recently been studied in the laboratory. It appears that chlorine gas (Cl₂) is liberated from ice particles and oxidised to ClO[•], while nitric acid (HNO₃) stays absorbed on them — just as required by the chlorine-blaming ozone-hole theory.

The theory also explains why an ozone hole appears in the Antarctic but not the Arctic: the Arctic stratosphere is perhaps 10° warmer (the polar vortex is not so strong there), and so stratospheric clouds are much less common.

It is becoming clear that meteorology sets up the special conditions required for the unusual chemistry. Scientists are now observing a finely tuned system involving photochemistry and stratospheric circulation.

They are talking of the polar vortex creating a stratospheric 'containment vessel' in which ozone chemistry could proceed without being influenced by mixing with air below or outside. The ER-2 flights showed that the ozone hole remained well inside the vortex.

Why has the ozone hole formed and deepened so quickly, while CFC concentrations have been steadily increasing at only about 5% per year? Perhaps a slight upset in stratospheric circulation precipitated a major change in the chemistry of the containment vessel, some scientists are thinking. Thus, maybe a small reduction in temperature triggered the dramatic deepening of the ozone hole by increasing the amount of polar stratospheric clouds. Alternatively, perhaps the amount of ozone depletion depends very sensitively on the concentration of reactive chlorine (that is, there is a threshold effect).

For the future, two major questions

remain outstanding, according to Dr Plumb:

- ▷ How, and to what extent, does the depth of the ozone hole depend on the level of stratospheric chlorine — ultimately, how deep can the hole get?
- ▷ Will loss of Antarctic ozone be followed by loss over the rest of the globe? If the explanation involving ice crystals in the polar vortex is correct, then the area suffering ozone destruction is unlikely to widen. Nevertheless, atmospheric mixing processes could reduce ozone levels outside the vortex simply by dilution.

Clearly, we need to advance rapidly to a full understanding of the processes that control the integrity of the ozone layer. Until we do, we cannot be totally confident that our present policies on CFC emissions won't lead to untoward effects. The Antarctic ozone hole has taught us that our understanding of ozone chemistry is lacking, and we'd best act prudently in preserving an unexpectedly fragile ozone layer.

Andrew Bell

More about the topic

Mystery of the Antarctic 'ozone hole'. A. Bell. *Ecos* No. 52, 1987, 7-9.

'Environmental, Health and Economic Implications of the Use of Chlorofluorocarbons as Aerosol Propellants and Possible Substitutes.' Ed. P.J. Fraser. (Australian Environment Council and National Health and Medical Research Council: Canberra 1988.) ■

UNEP Meeting: Scientific review of the Depletion of the Ozone Layer

C.J.E. Schuurmans

Inleiding

Op uitnodiging van Nederland (VROM) hield UNEP (United Nations Environment Programme) een viertal vergaderingen over het ozonprobleem, de uitwerking van het Montreal Protocol dat voorziet in een reductie van het gebruik van CFK's (chloorfluor koolwaterstoffen die de ozonlaag aantasten) en over vervangende middelen voor CFK's. Ik heb alleen het eerste deel van het vierluik bijgewoond. Dat ging over de huidige stand van zaken m.b.t. de ozonlaag en over de opstelling van een rapport dat in 1990 gebruikt moet worden om het Montreal Protocol verder aan te scherpen. Dit laatste is duidelijk nodig omdat nu reeds voorzien kan worden dat de reductie van het gebruik van CFK's die in het Protocol is overeengekomen (50% vóór 2000) lang niet ver genoeg gaat.

Huidige stand

1. Het gat in de ozonlaag boven Antarctica is in 1988 (sept., okt.) minder diep in 1987. Het gebied met waarden van onder de 200 Dobson Units is dit jaar vergelijkbaar met het gat in 1984 en 1986. Buiten het poolgebied komen dit jaar juist zeer hoge waarden voor (tot 450 DU).
2. Sterker dan voorheen moet worden aangenomen dat CFK's een wezenlijke invloed hebben op de ozonconcentraties boven Antarctica in het voorjaar. Het mechanisme is chemisch goed begrepen en geverifieerd en studies naar de dynamica van de voorjaarsstratosfeer bevestigen dat de dynamische condities alleen een voorwaarde vormen voor het optreden van ozonreducties, zij het een noodzakelijke voorwaarde (de engelsen hebben nogal wat onderzoek op dit gebied gedaan).
3. Uit modellen (voor 1-D en 2-D) volgt dat de CFK's in concentratie terug moeten tot ca. 2 ppb om van de O₃-aantasting af te zijn. Maar zelfs met het Montreal Protocol blijft de concentratie toenemen tot ca. 7 ppb in 2030.
4. Uit analyse van O₃-metingen (total column) blijkt dat er wereldwijd een afneming plaats vindt van de hoeveelheid ozon. Op het noordelijk halfrond waar de meeste stations zijn (± 25) volgt een dalende trend van 1970 die vooral in de winter groter is dan door natuurlijke variabiliteit (inclusief

zonneactiviteit) kan worden verklaard. Van 30-64 °NB is de daling in 1970-1986 in de winter 4%.

De daling is door modellen met CFK-invloed niet te verklaren. Het is mogelijk dat de broeikas-effect-temperatuurdaling in de stratosfeer mede-oorzaak is.

5. De bijdrage van CFK's tot het broeikas-effect is van de orde 10% of meer.

Afspraken

Er moet een rapport on Assessment of Control Measures of the Montreal Protocol komen. In dit rapport kan ook de noodzaak tot aanscherping van het Protocol worden aangetoond.

Het rapport moet eind 1989 klaar zijn om in 1990 gevolgd te (kunnen) worden door nieuwe onderhandelingen over uitbreiding van het Protocol.

Besloten is de rapporten die de WMO in 1985 heeft uitgebracht als algemene basis te nemen. Als aanvulling wordt een rapport gemaakt over 3 onderwerpen:

1. Polar Ozone: Solomon (USA)

Jones (UK)

Arnold (FRG)

2. Global Trends: Kattatov (USSR)

Megie (FR)

Fraser (Austr.)

3 Theoretical Predictions: Russell (USA)

Brasseur (Belg.)

Cox (UK)

Een internationaal review panel zal dit rapport met de opstellers samen bestuderen, alvorens het aan UNEP wordt aangeboden. In dit panel zitten:

Watson (USA)

Isaksen (Noorwegen)

Ehhalt (FRG)

Matsuno (Japan)

Prendez (Brazilië)

Subbaraya (India)

Bojkov (WMO)

Usher (UNEP)

Verdere punten

1. Ook voor effecten van ozonvermindering (UV-invloed op mens, dier en plant), voor vervangende middelen en voor economische aspecten zijn vervolgstudies afgesproken. Er werd een sterk pleidooi gehouden voor uitvoering van UV-metingen.

Van de meeste effecten is nog bitter weinig bekend: experimenten en proeven beginnen pas, maar alles wijst er op dat met name in de tropen (en in de poolzomers) de schade voor levende wezens groot kan zijn.

2. De broeikaswerking van CFK's is experimenteel in de atmosfeer vastgesteld door stralingsmetingen in het IR-gebied (zie W.F.J. Evans, A measurement of the altitude variation of greenhouse radiation from CFC-12, *Nature*, 333, 750-752, 1988).

3. De Russen hebben een grote achterstand op dit gebied opgelopen. Twee aanwezige vertegenwoordigers - geen echte O₃-experts - probeerden vergeefs een dynamische verklaring voor het ozongat te verdedigen. De lange-termijntrend zou met langjarige schommelingen in het atmosfeer-oceaanstelsel samenhangen. Wat overigens best kan, maar de stelling werd totaal niet onderbouwd.

4. Voortdurend wordt ook gesproken over ozongaten op het noordelijk halfrond. Vooral bij het bespreken van satellietwaarnemingen van ozon, uitgezet op hemisferische kaarten. De "gaten" zijn dan gewoon de minima, afgewisseld door maxima van ozon, precies zoals je dat ook verwacht in een patroon van planetaire golven (die op het noordelijk halfrond veel sterker zijn dan boven Antarctica). De "gaten" zijn dan ook zeer kortlevend. In maand-gemiddelde kaarten is er niets van terug te vinden, in tegenstelling tot de zuidelijke hemisfeer. Volgens de huidige inzichten is juist het stationair worden van een ozonminimum een voorwaarde om uit te groeien tot een gat (met extreem lage O₃-waarden).

Om toch wat meer aan de weet te komen over de chemie van ozon op het

noordelijk halfrond wordt in januari-februari 1989 een stratosfeermeetproject uitgevoerd boven het Arctische gebied (samenwerking USA, UK, FRG, Scand.).

5. Ozonwaarnemingen worden gepubliceerd en beschikbaar gesteld door het World Ozone Data Center in Toronto/Downsview, Canada, een onderdeel van de Atmospheric Environment Service. (dr. Larry Morrison).

6. De conferentie ging over stratosferische ozon (want daar slaat het Montreal Protocol op). Natuurlijk wordt ook het troposferisch ozon in de gaten gehouden (fotochemische smog, broeikas effect). In sommige gebieden (Europa, USA) zijn de concentraties een factor 2 hoger dan in de vorige eeuw. Er kan een relatie worden gelegd met het Montreal Protocol via de ODP's (Ozon Depleting Potential) van sommige van de gassen die als vervanger voor de CFK's worden voorgesteld. ■

5 Maatregelen

Maatregelen in voorbereiding voor minder energiegebruik

B.C.J. Zoeteman

VROM – Een aantal bij de milieuproblemen betrokken ministeries is in overleg over concrete maatregelen om het energiegebruik te verminderen. Er wordt ook overlegd over een aantal andere milieuproblemen die samenhangen met een overmatig energiegebruik, zoals verzuring. De resultaten van het overleg zullen een belangrijk element vormen in het Nationaal Milieubeleidsplan dat in maart 1989 verschijnt. Aldus plv. directeur-generaal Zoeteman, die minister Nijpels verving op de studiedag van Orde van Nederlandse Raadgevende Ingenieurs op 2 november in Den Haag. In onderstaande toespraak gaat de heer Zoeteman onder meer in op de beleidsaspecten ten aanzien van de mondiale luchtverontreiniging en de daardoor dreigende klimaatverandering.

U zult teleurgesteld zijn dat minister Nijpels niet tot u spreekt. Hij moet zijn begroting in de Tweede Kamer verdedigen, anders was hij hier graag gekomen. Hij heeft mij gevraagd u zijn hartelijke groeten over te brengen en u te complimenteren met de keuze van het thema van deze bijeenkomst. Dat u zich als Orde van Nederlandse Raadgevende Ingenieurs bezig wilt houden met de stralingsbalans van de aarde, getuigt van visie. Aan ingenieurs met visie zal onze nationale en internationale gemeenschap de komende jaren veel behoefte hebben. Wij zullen elkaar hard nodig hebben, omdat we alléén met grote geestkracht en daadkracht de toekomstige mondiale veranderingen tijdig kunnen onderkennen en in goede banen leiden.

Over de aarde en de gevolgen van de mondiale veranderingen op onze planeet bent u door de voorgaande eminente sprekers reeds in ruimte mate ingelicht. Graag wil ik met u stilstaan bij de vraag welke nieuwe uitdagingen dit nieuwe milieuprobleem ten aanzien van het milieubeleid oproept.

De mondiale milieuproblemen van klimaatverandering en aantasting van de ozonlaag brengen de mensheid hardhandig tot een bewustwording van

de eindigheid van onze planeet en haar grondstoffen. We konden landschappen vergraven of vergiftigen en weken naar andere uit. We hebben rivieren vervuild en hun waterloop naar onze hand gezet.

Het Afrikaanse continent is mede door onze overexploitatie van watervoorraden en tropische regenwouden aan het afsterven. Sommigen hebben daarover de schouders opgehaald; er zijn immers nog genoeg andere plaatsen op aarde waar de ontwikkeling zich kan voortzetten. Maar van de aarde zelf is er maar één. Met deze planeet zullen we het moeten doen, op het draagvlak van de aarde zal de menselijke beschaving haar omvang en wensenpatroon moeten afstemmen.

Dat bewustzijn begint sprongsgewijs in de natiën van de aarde te ontwaken door het probleem van klimaatverandering en het ozongat. Zo kunnen we niet doorgaan, dit is geen duurzame ontwikkeling. Het rapport 'Our Common Future' van de VN-commissie Brundtland van vorig jaar is een klemmend signaal op dit punt. Een signaal dat niet is weggeëbt, maar een steeds grotere weerklank begint te ondervinden. De minister-presidenten van Canada en Noorwegen traden juni

jl. in Toronto op tijdens een conferentie over de mondiale atmosfeer. Onze minister-president bevestigde enkele weken geleden tijdens de Algemene Politieke Beschouwingen dat het milieubeheer de vierde pijler is geworden van het regeringsbeleid. CDA en VVD dienden een motie in die honderd miljoen extra vroeg voor het milieubeleid.

Zonder een goed milieubeheer wordt onze economische groei aangetast en hebben de generaties die na ons komen geen met ons vergelijkbare kansen voor ontplooiing. Het inzicht wint veld dat wij op een keerpunt staan; zij die het op tijd zien zullen de pioniers worden van een nieuwe tijd van duurzame ontwikkeling.

Met deze uitdaging als thema wil ik met u ingaan op drie zaken:

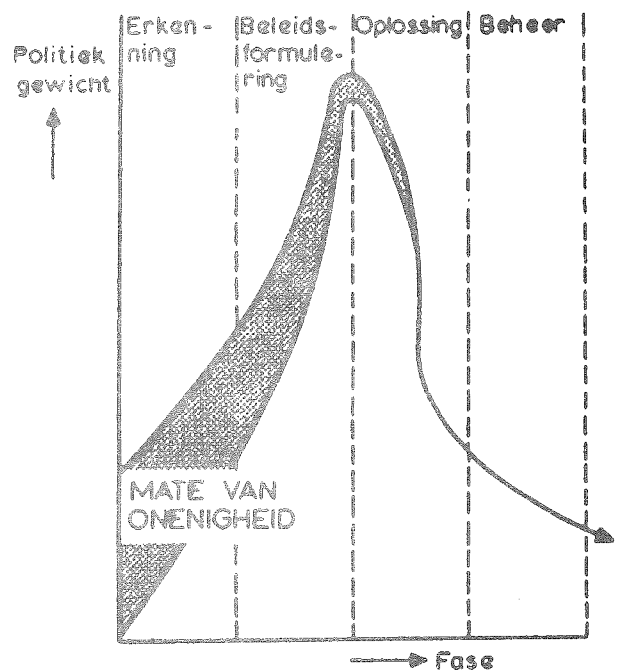
1. de mondiale luchtverontreiniging, de daardoor dreigende klimaatverandering en de relevante beleidsaspecten;
2. de besluitvorming hieromtrent in een onzekere situatie zowel mondiaal als nationaal;
3. de strategie van uw bedrijfstak waarbij ik u een aantal zaken in overweging wil geven.

Klimaat in de beleidslevenscyclus

De burger voelt zich vaak verrast door weer een nieuw milieuprobleem. Dit heeft echter meer te maken met de manier waarop wij mensen reageren dan met het ontdekken van problemen. Dit wil ik u graag duidelijk maken met een aantal voorbeelden.

De eerste niets aan duidelijkheid overlatende publikaties over de verzuring van de meren in Scandinavië dateren van de jaren vijftig. Het werd echter pas algemeen als probleem erkend toen de bossen in Duitsland massaal doodgingen in het begin van de jaren tachtig. De eerste maatregelen worden, zij het nog mondjesmaat, effectief in de jaren '90.

Figuur 1 Beleidscyclus



In figuur 1 wil ik u laten zien hoe er vanuit het beleid enigszins herkenbaar kan worden omgegaan met nieuw opkomende milieuproblemen.

Ongetwijfeld herkent u in deze figuur de beleidslevenscyclus van Pieter Winsemius. Deze figuur geeft de fasen aan die een beleidsvraagstuk moet doorlopen alvorens het onder controle is. De beleidslevenscyclus geeft aan welke politieke aandacht het probleem in de verschillen fasen krijgt.

Problemen worden veelal het eerst gesignaleerd door de wetenschap. Als ook burgers bezorgdheid gaan tonen groeit de aandacht, tot het probleem op de politieke agenda wordt geplaatst. Na deze signalerings- en erkeningsfase volgt de fase van beleidsformulering. De grote lijnen van de te volgen aanpak worden uitgestippeld. In deze fase bereikt de politieke betrokkenheid haar maximum.

In de derde fase vindt, in overleg met de doelgroepen een nadere uitwerking plaats tot het probleem beheersbaar is geworden. In de beheersfase gaat het om het beheersbaar houden van het

probleem door controlematregelen en permanente metingen.

In de figuur is ook aangegeven hoe de maatschappelijke consensus over de aanpak van het probleem toeneemt naarmate het verder de levensloop doorloopt. In de signalerings- en erkenningsfase zijn de wetenschappelijk onzekerheden nog groot evenals de verschillen van mening over de mogelijke aanpak.

Het klimaatprobleem is nog een typisch fase-1-probleem. Al omstreeks de eeuwwisseling verschenen de eerste publikaties over het mogelijk effect van toenemende CO₂ concentraties in de atmosfeer. Dat is dus het begin van de 'signaleringsfase'.

Pas zeer recent en ook nog niet overal in de wereld, gaat de politiek zich voor het klimaatprobleem interesseren. Dit is ondermeer het gevolg van de 4 warmste jaren wereldwijd van de eeuw

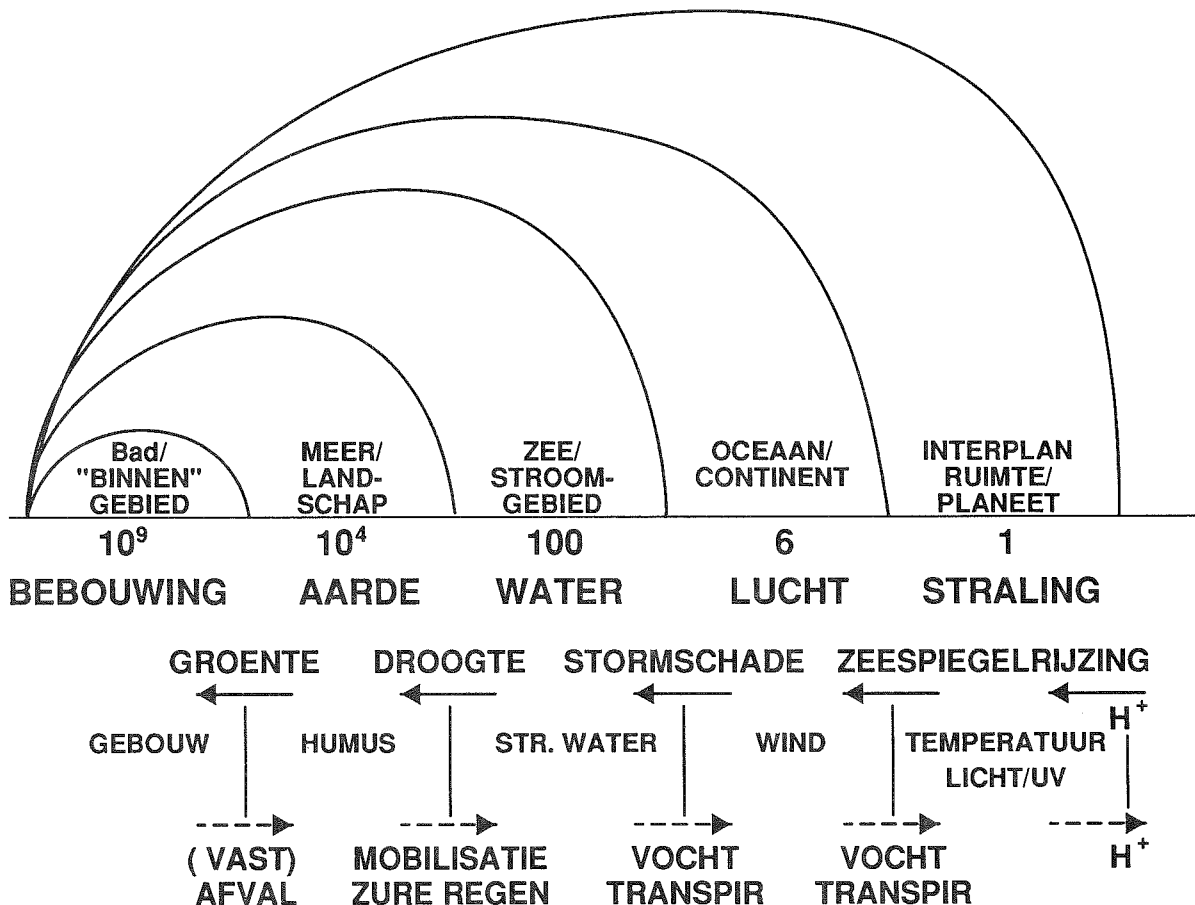
die we nu in de jaren tachtig meemaken en de droogte in Amerika van afgelopen zomer.

Opvallend is ook dat in de gezamenlijke verklaring van juni jl. van president Reagan en partijleider Gorbatsjov is opgenomen dat de grootmachten gezamenlijk het broeikas effect zullen onderzoeken. Deze en andere ontwikkelingen wijzen er op dat de wereldwijde erkenning van het klimaatprobleem op handen is.

Na de erkenningsfase volgt dan de fase van beleidsformulering. Dat wil zeggen er moeten besluiten worden genomen over maatregelen.

Voor ik daar op in ga wil ik eerst nog een ander model aan u presenteren dat naast de beleidslevenscyclus wordt gebruikt in ons milieudenken. Dit model gebruiken we om ervoor te zorgen dat we de problemen op de juiste schaal waarnemen en aanpakken.

Figuur 2 Hiërarchisch 5-niveaumodel



Dit is het zogenaamde vijf-schalenmodel, waarover u in het komende Nationaal Milieubeleidsplan, dat 15 maart wordt gepubliceerd, meer zult kunnen lezen.

Vijf-schalenmodel

Het aarde-ecosysteem wordt in dit model gedacht opgebouwd te zijn uit vijf schaalniveaus:

- de planeet
- het continent
- het stroomgebied
- het landschap
- de gebouwde omgeving

Op elk schaalniveau vindt een stof- en energie-huishouding plaats die meer verdicht naarmate het schaalniveau lager is. In het landschap circuleren mineralen, in het stroomgebied van rivieren circuleert water, in het continent/oceaan-systeem circuleert lucht, in de atmosfeer van de aarde is een warmte- of broeikasstelsel actief; dit systeem kent een stralingshuishouding die wordt aangedreven door de zon. De stofhuishouding van elk schaalniveau wordt gestuurd vanuit de hogere niveaus, terwijl terugkoppeling plaatsvindt door selectieve uitwisseling van materie of energie van een lager schaalniveau naar een hoger.

Waarom deze verhandeling over schalen?

Dat is om u duidelijk te maken dat milieuproblemen vaak zogenaamd werden opgelost door ze naar een hoger schaalniveau te tillen. Een bekend voorbeeld hiervan is de bouw van fabrieksschoorstenen. Hierbij speelt vaak de idee dat milieuproblemen kleiner worden door verdunning van de schadelijke stoffen. Eigenlijk hebben we veel problemen opgelost door ze af te wentelen op andere plaatsen of ze uit te stellen naar latere tijden (begraven). We leven op de pof ten koste van onze kinderen. We leren door het klimaatprobleem inzien dat:

1. Effecten spelen op steeds hoger schaalniveau. Daarbij neemt de afstand tussen de veroorzaker van een bepaald effect en het slachtoffer steeds meer toe.
2. Emissiebronnen komen thans over de gehele wereld voor waarbij op continentaal en mondiaal niveau tevens sprake is van uitputting van stoffen als hout, metalen en energiebronnen.
3. Effecten leiden tot het verlies van draagkracht van het milieu, niet alleen waar het gaat om de draagkracht van natuurlijke ecosystemen maar in toenemende ook de draagkracht voor menselijke activiteiten als landbouw, wonen, recreëren, industrie, watervoorziening.

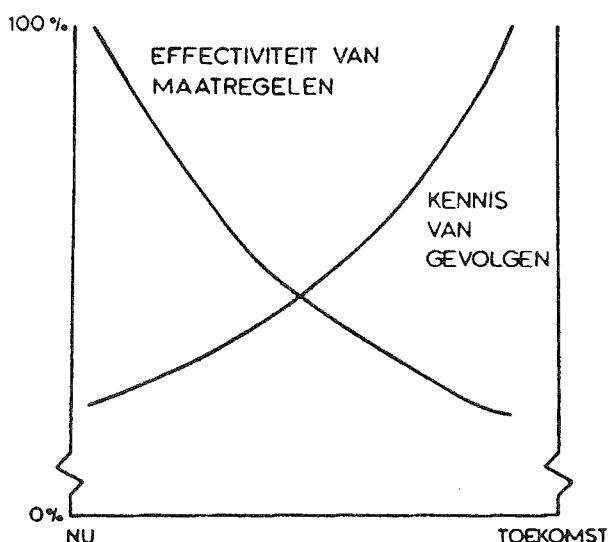
Het derde aspect kan worden gezien als een terugkoppelingsmechanisme dat er in beginsel toe zou kunnen leiden dat uitputting van de draagkracht, uiteindelijk ook de menselijke activiteit zal afremmen. Van een duurzame ontwikkeling zou dan evenwel geen sprake zijn, integendeel het voortbestaan van de beschaving wordt op het spel gezet. Vanuit onze wens te komen tot een duurzame ontwikkeling is het autonome en ongecontroleerde terugkoppelingsmechanisme niet aanvaardbaar. Er zullen andere terugkoppelingsmechanismen moeten worden gezocht. Dit geldt zeker voor het klimaatprobleem. Vanuit dit begrip wil ik met u verdergaan over de moeilijkheden en de uitdagingen bij de besluitvorming daarover.

Beleidsoverwegingen

De overgang naar beleidsmaatregelen is nu juist voor het klimaatprobleem de grote uitdaging. De mensheid als geheel wordt hier op de proef gesteld. Kunnen we de sprong naar een andere economische orde maken? Een aantal dilemma's doemt immers op. De oorzaken van klimaatverandering zijn mondiaal, Nederland draagt slechts 1% aan de CO₂ uitstoot bij, de effecten treffen het ene land sterker dan het

andere, een bestrijding van de oorzaak zal ook alleen succes kunnen hebben als het mondiaal gebeurt. Gezien deze aspecten zal de neiging bestaan eerst nader onderzoek te doen naar de oorzaken en naar de processen die er spelen. Het probleem kenmerkt zich immers door gebrek aan consensus over de aanpak ervan. Onderzoek is bovendien relatief goedkoop en kan zeker in politieke kaders dienen om pijnlijke maatregelen uit te stellen. Nader onderzoek zal de kwaliteit en de effectiviteit van een maatregel kunnen vergroten. Het kan echter ook zo zijn dat we dan in het probleem verzeilen van 'operatie geslaagd maar de patiënt is dood'. De hoogleraar Schlesinger, bekend bouwer van klimaatmodellen in Amerika, die onlangs een lezing gaf in Amsterdam voor de Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen, bracht dit probleem als volgt in beeld (figuur 3):

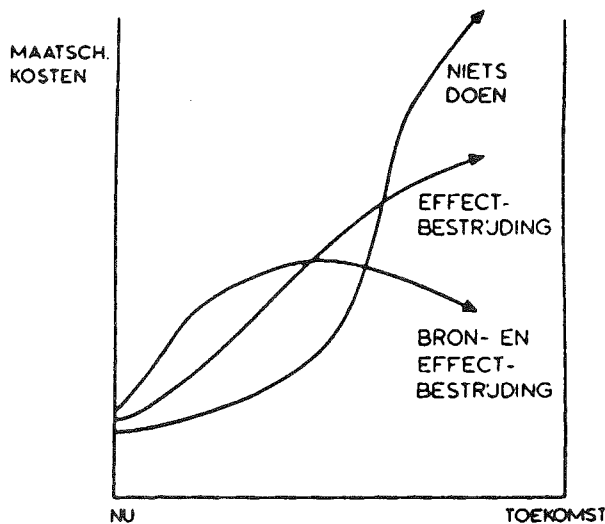
Figuur 3 Beleidsdilemma



Naarmate we meer tijd nemen voor onderzoek zullen we meer zekerheid krijgen over de effecten van klimaatverandering. Echter gezien de langdurige nawerking van de emissies van CO₂ en

de andere gassen, neemt de effectiviteit van maatregelen sterker af naar mate met het begin ervan langer gewacht wordt. Er is moed nodig om temidden van de discussie en de onenigheid de problemen aan te pakken. Een ander voorbeeld dat het voor ons Nederlanders nog duidelijker maakt is het volgende, nl. de kosten ten gevolge van het al of niet op peil houden van onze kustveiligheid. U kunt zich voorstellen dat waarborgen van een goede kustverdediging, een vorm van effectbestrijding, goedkoper is dan niets doen en ons land te laten overstromen. Maar een aanpak die er in voorziet de verandering van het klimaat en daarmee de stijging van de zeespiegel zo beperkt mogelijk te houden, kan, gecombineerd met ook dan nog noodzakelijke effectgerichte maatregelen, uiteindelijk goedkoper uitkomen.

Figuur 4 Kosten

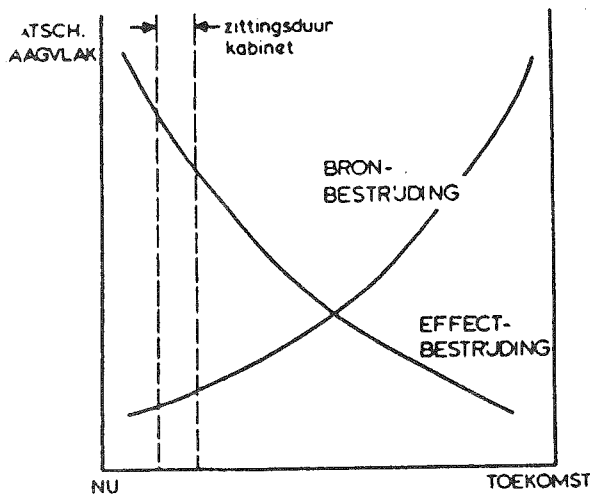


Dit brengt me bij een volgend dilemma nl. dat van de keuze tussen preventie en effectgerichte maatregelen (figuur 4). In deze figuur wil ik laten zien waar we bij een korte termijn beleid het eerst voor zouden kiezen. Een rechtgeaarde polderbewoner zal al gauw kiezen voor dijkverhoging. De techniek kennen we. De interesses en

de belangen dienaangaande zijn diep verankerd in onze samenleving. En het effect, nl. een grotere veiligheid, is direct meetbaar. Van brongerichte maatregelen die een lange aanlooptijd zullen hebben zowel t.a.v. invoering als t.a.v. uitwerking, moet nog maar afgewacht worden of wij daar beter van worden.

Wanneer we ons laten leiden door de lange termijn zullen we als samenleving het voordeligst uit zijn, maar die moed en dat inzicht brengen wij maar zelden op. Voor mondiale vraagstukken is preventief lange-termijnbeleid echter de enige veilige weg. Anders zullen de veranderingen in een snelheid komen waarop wij dan onvoldoende kunnen anticiperen. Wel voert deze problematiek ons tot een politiek dilemma (figuur 5).

Figuur 5 Politiek dilemma



Figuur 5 schetst het probleem. Niet alleen voor de politiek maar tevens voor de samenleving als geheel. Echter over het beleid dat vanuit het Ministerie van VROM wordt gevoerd wil ik geen misverstand wekken.

Binnen elk schaalniveau zal de maatschappij van de toekomst de stofkringloop moeten gaan sluiten. Geen onverwerkbare vaste afvalstoffen lozen of storten binnen het landschap,

geen onverwerkbare afvalgassen lozen binnen het continentale en mondiale ecosysteem. We zullen ons moeten aanpassen aan het natuurlijke draagvlak van deze planeet.

Welke acties brengt een bronbestrijdingsbeleid gericht op een duurzame ontwikkeling met zich mee? Hierbij wil ik nu met u stilstaan.

Acties

Het klimaatprobleem is zich internationaal aan het ontwikkelen tot een politiek erkend probleem. Ook het Nederlandse parlement heeft een toegenomen aandacht voor het broeikasprobleem getoond.

Om de politieke agendavorming te bevorderen heeft minister Nijpels in juni jl. tijdens de klimaatconferentie te Toronto het initiatief genomen om volgend jaar een aantal collega's van landen over de gehele wereld in Nederland bijeen te laten komen om te bespreken hoe we een volgende stap kunnen zetten.

Deze politieke ministersconferentie zal een bijdrage leveren aan het proces in UNEP-kader om te komen tot een internationaal verdrag ter bescherming van de atmosfeer begin jaren '90.

In dit verdrag moet geregeld worden dat het broeikas effect tot staan wordt gebracht. De enige mogelijkheid hiertoe is een drastische reductie van de CO₂-uitstoot en van een aantal andere broeikasgassen, zoals de CFK's waar al een eerste regeling voor is overeengekomen.

Ten einde de CO₂-uitstoot enigszins om te buigen werd tijdens het klimaatcongres in juni van dit jaar in Toronto voorlopig voorgesteld de CO₂-uitstoot tussen 1988 en 2005 te reduceren met 20%. De helft te bereiken door vergroting van energie-efficiency en besparing, en de andere helft door veranderingen in energiebronnen. Het komend jaar zal moeten blijken in hoeverre regeringen

bereid zijn dergelijke aanbevelingen over te nemen in hun nationale beleid. Een mondiale reductie van 20% houdt in dat de nu geïndustrialiseerde landen waaronder Nederland nog grotere reducties moeten toepassen, om enige groei in ontwikkelingslanden, zoals China, tijdelijk mogelijk te maken. Het milieu maakt de mensheid tot een familie, wellicht meer dan velen lief is. Het terugbrengen van het energiegebruik zal een belangrijk element vormen binnen het in voorbereiding zijnde Nationaal Milieubeleidsplan. Door VROM wordt nu met EZ, L&V en V&W gesproken over concrete doelstellingen op energiebesparingsgebied en tegelijkertijd over een aantal andere milieuproblemen die samenhangen met een overmatig energieverbruik, zoals de verzuring.

Duidelijk is geworden dat met bescheiden technologische aanpassingen een duurzame ontwikkeling niet veilig kan worden gesteld. Er is een ander ontwerp van onze maatschappij nodig. Overigens wil ik duidelijk naar voren brengen dat ook het onderzoek versterking behoeft.

Minister Nijpels heeft aan het RIVM gevraagd hoe op korte termijn de samenhang en de coördinatie in het Nederlandse klimaatonderzoek versterkt kan worden. Een reactie van het RIVM verwacht ik deze maand.

Aansluitend hierop zal een interdepartementale organisatie worden opgezet, ongeveer volgens de lijnen van het succesvolle Additioneel Programma Verzuringsonderzoek.

Strategie ONRI

Tot slot, wat betekent het klimaatprobleem nu voor de ONRI-bureaus? Er ligt een grote uitdaging. In welke hoek moet u die zoeken?

Ik zie de ONRI-bureaus als intermediair tussen onderzoek enerzijds en bouw en beheer anderzijds.

Gezien de grote en groter wordende milieuproblemen zijn fundamentele veranderingen nodig in onze wijze van wonen, werken en produceren. Omdat de veranderingen sneller zullen moeten gaan, zal het intermediair sneller moeten reageren. Dit vraagt een andere vorm van organisatie. Om sneller te kunnen reageren zullen de verschillende fasen en de verschillende functies van onderzoek, ontwerp, produktie, bouw en beheer meer geïntegreerd moeten worden.

Er zijn hierbij al voorbeelden te noemen van succesvolle bureaus die vanuit de traditionele taakopvatting van raadgevend ingenieur een eigen laboratorium hebben opgezet, bijvoorbeeld op het gebied van waterkwaliteitsanalyse en andere die specialistische aannemersactiviteiten verrichten, bijvoorbeeld op het gebied van het schoonmaken van verontreinigde bodems. Voor deze bureaus is milieu inmiddels big business. En indien dit tot resultaat heeft dat milieuproblemen optimaal creatief worden aangepakt dan vind ik financieel resultaat een gezonde prikkel.

Wat ik hiermee wil zeggen is dat u ten aanzien van uw bedrijfsstrategie niet alleen moet denken aan de opzet van nieuwe afdelingen. Nee, u moet een milieuprobleem volledig analyseren en integraal oplossen. Het is hierbij mijns inziens van groot belang dat u als raadgevend ingenieursbureaus met een traditioneel sterk nationale achtergrond zich ervan bewust bent dat mondiale milieuproblemen zoals het broeikas-effect ook mondiale samenwerking vragen. Mijns inziens zullen ook de raadgevende bureaus daarom nog sterker internationaal moeten samenwerken.

Wat zie ik samenvattend als de grote ontwikkelingen wanneer klimaatverandering vanuit de doelstelling van

duurzame ontwikkeling wordt aangepakt.

1. De maatschappij zal de komende decennia uitgroeien tot een op mondiaal niveau beheerd ecosysteem voor de oplossing van vraagstukken als klimaatverandering en het ozongat boven de Zuidpool.

2. Een land als Nederland zal katalyserende initiatieven nemen om deze ontwikkeling te versnellen.

3. In lijn hiermee zal op nationale schaal een substantiële daling van het energiegebruik en een drastische verhoging van de energie-efficiency sterk worden bevorderd.

4. Onderzoek en intensivering van toepassing van duurzame energiebronnen zal krachtig worden gestimuleerd, evenals exploitatie van nieuwe mogelijkheden van duurzame energiewinning.

5. Ruimtelijke ordening en milieubeheer zullen beter dan in het verleden worden afgestemd op een energie-extended kringloop-economie (compacte stad, communicatietechnieken, openbaar vervoer, afvalsector).

Ik hoop u een indruk gegeven te hebben van de ernst van de situatie en de vastberadenheid van de regering om het hoofd te bieden aan deze problemen die onze nationale grenzen overschrijden. In het Nationaal Milieubeleidsplan zult u hier meer over kunnen lezen. Op dit moment wil ik volstaan met de constatering dat voor hen die met visie anticiperen op de veranderingen die komen, de toekomst stralend zal zijn. ■

Mogelijke maatregelen tegen aantasting van de ozonlaag

J. Swager

Inleiding

Ik wil beginnen met enkele aanvullingen op Reijnders. Een jaar of 8 geleden kwamen de eerste resultaten over de gevolgen voor planten. Er kwamen dramatische getallen uit. Toen men overging op andere onderzoeksmethoden, van het laboratorium naar buiten in het veld, waar kunstmatig UV-licht werd toegevoegd aan de natuurlijke omstandigheden, daalde het effect voor de meeste planten enorm. De resultaten die door Reijnders worden gemeld, zijn behoorlijk realistisch; het gaat om natuurlijk licht en toegevoegd UV. In het laboratorium kunnen de gemeten effecten 5 of 10 keer zo groot zijn.

Een volgende aanvulling betreft het effect op mensen. Toevallig zit hier in Utrecht aan het Academisch Ziekenhuis een groep bij Professor Van der Laan, die ook internationaal -denk ik- hele grote faam heeft.

En tot slot als inleiding op mijn verhaal over maatregelen: het afgelopen jaar is er stevig gediscussieerd over internationale maatregelen. Er lag een Amerikaans voorstel vanuit de milieutak van de Reagan-administratie en vanuit Buitenlandse Zaken. Toen in de industriehoek doordrong wat de voorstellen waren, kwam daar bloedserieus het voorstel dat men de CFK's niet moest beperken, maar zich tegen de toename in UV-straling moest beschermen met een grote hoed, een zonnebril en meer kleding aan het strand. Het uiteindelijke resultaat was een compromis, maar dit is wel de realiteit van de internationale onderhandelingen.

De nederlandse overheid

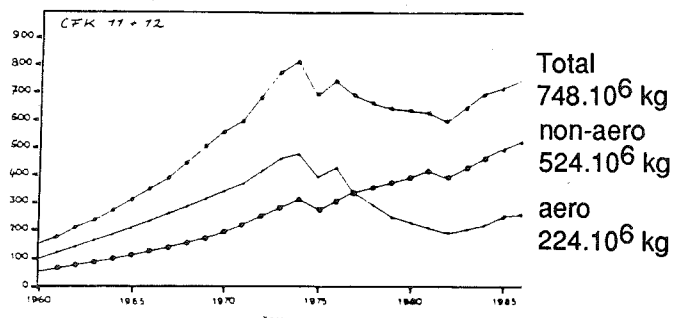
De bescherming van de ozonlaag is al meer dan 10 jaar een punt van zorg voor de Nederlandse rijksoverheid. Maar het gebruik van stoffen die de ozonlaag aantasten, is ook in Nederland nog aanzienlijk. Ook in dit geval geldt voor het milieubeleid de dichtregel: "Tussen droom en daad staan wetten in de weg, en praktische bezwaren." Voordat ik u een overzicht ga geven van de mogelijke maatregelen, lijkt het me nuttig dat u een beeld krijgt van de wetten en bezwaren die er kunnen bestaan om tot daden te komen.

Voor een probleem als de aantasting van de ozonlaag zijn niet alleen de Nederlandse visies van belang, minstens even belangrijk is hoe daar internationaal mee wordt omgegaan. De eerste reden daarvoor is dat Nederland niet alleen voor de oplossing van een wereldwijd probleem kan zorgen. Nederland is bijvoorbeeld verantwoordelijk voor 1% van het gebruik van CFK's. Dat ontslaat ons niet van onze verantwoordelijkheden, maar beperkt wel de doeltreffendheid van nationale maatregelen. Ten tweede is Nederland voor gegevens ten aanzien van de aantasting van de ozonlaag volledig afhankelijk van de wetenschappelijke kennis uit de Verenigde Staten, en tegenwoordig ook uit West-Duitsland. Verder is van belang dat

Nederland lid is van de E.G.. Dit geeft extra internationale beleidsmogelijkheden, maar beperkt anderzijds zeer sterk de beleidsvrijheid van de Nederlandse rijksoverheid.

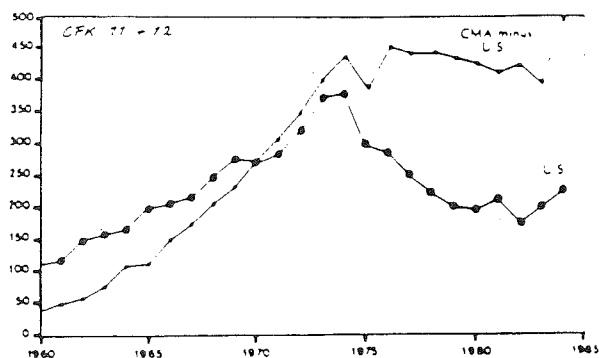
Historisch overzicht

In mijn historisch overzicht wil ik beginnen met de ontwikkeling in de CFK-productie. Bij gebrek aan goede cijfers over de totale wereldproductie, bijvoorbeeld door gebrek aan Oostblok-gegevens, moeten we ons dan ook behelpen met de cijfers van de CMA (de vereniging van de chemische industrie) voor de CFK's 11 en 12. Naar schatting vertegenwoordigen deze gegevens zo'n 90% van de totale wereldproductie van de CFK's 11 en 12, die samen verantwoordelijk zijn voor zo'n 2/3 van het probleem. Fig. 1 laat een spectaculaire groei tot en met 1974 zien. Na een daling van de productie gedurende de daaropvolgende jaren, heeft zich de laatste jaren weer een groei ingezet. Uit een schatting blijkt dat de uitwerpen gelijke tred houden met de productie.



FIGUUR 1.

De dunne lijn (aerosols) geeft het gebruik van CFK's 11 en 12 als drijfgas in spuitbussen weer, de nonaerosol-lijn het gebruik in andere toepassingen. Het is opvallend dat de tijdelijke daling vooral is veroorzaakt door de daling in het gebruik in spuitbussen, terwijl er een vrijwel doorgaande groei is geweest van de andere toepassingen.



FIGUUR 2

Fig. 2 laat zien dat de afname in het

gebruik vooral kan worden toegeschreven aan de V.S.. De stijging vindt daarentegen zowel plaats in de V.S. als in de rest van de wereld.

Als we een onderverdeling maken naar de toepassingen op wereldniveau (fig. 3), leveren koeling, schuimplastic en spuitbussen alledrie een bijdrage van 30%. Binnen de E.G. neemt het gebruik van spuitbussen een veel belangrijker plaats in, omdat in landen als de V.S., Canada en een aantal Scandinavische landen wel maatregelen zijn genomen tegen spuitbussen. Ook Nederland heeft een hoog percentage spuitbussen, wat samenhangt met de grote uitvoer (meer dan 60%) uit Nederland.

In 1972 was een grote belangstelling ontstaan voor de wereldwijde milieuproblemen, waarbij de Club van Rome een belangrijke rol speelde. In 1972 werd de UNEP, de milieu-organisatie van de Verenigde Naties, opgericht. In de V.S. was bovendien ongerustheid ontstaan over de gevolgen die de uitlaatgassen van supersone vliegtuigen kunnen hebben voor de ozonlaag. Naast de economische overwegingen waren het daardoor milieu-bezwaren die voor de V.S. aanleiding waren te besluiten geen eigen concordies te gaan ontwikkelen. De discussie had tevens geleid tot een wetenschappelijke infrastructuur voor onderzoek naar de aantasting van de ozonlaag en tevens was er een maatschappelijke en politieke belangstelling voor dergelijke dreigingen.

In 1974 werd duidelijk dat de CFK's in toenemende mate de ozonlaag zouden bereiken. Een heftige discussie in de V.S. sloeg over naar Scandinavië en Nederland.

Een sterke verbreding van de internationale discussie vond plaats in 1977, toen UNEP kwam met een World Plan of Action on the Ozone Layer en met een Coördinatie Commissie inzake de Ozonlaag (CCOL). Het actieplan was slechts een breed opgezet schema voor onderzoek, maar door de CCOL kwam een wereldwijd platform tot stand, waarin vertegenwoordigers van regeringen uit oost en west, van internationale organisaties en van de betrokken chemische industrie samen tot een rapport moesten komen over de stand van wetenschap. De rapporten van de CCOL bevestigden keer op keer dat het ging om een echte bedreiging van de ozonlaag door CFK's en andere stof-

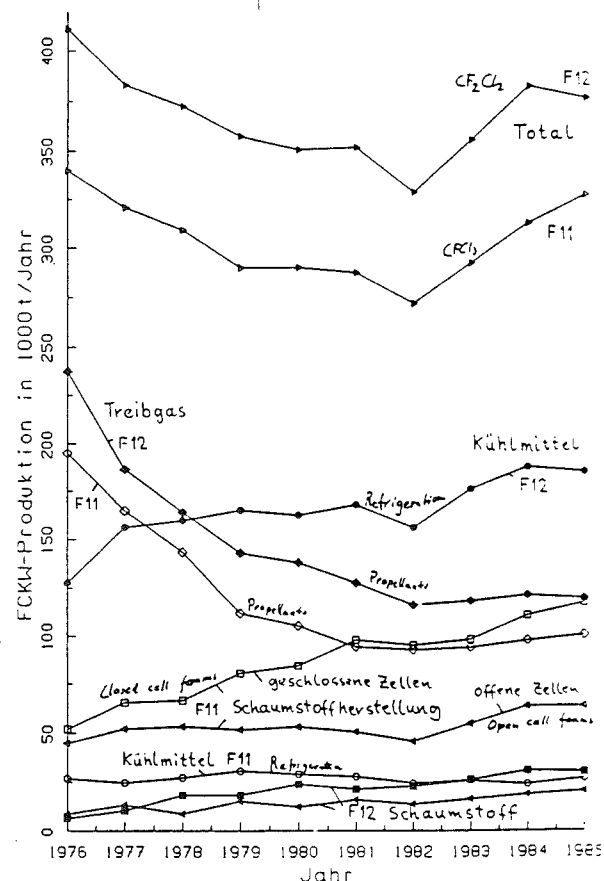
Gebruik CFK's 11 en 12 (CMA ; 1986)

	CMA 10 ⁶ kg	CMA %	EG %	NL %
koeling	224	30	10	9
schuim gesloten cel	168	23	30	40
schuim open cel	86	11		
spuitbussen	224	30	50	47
andere toepassingen	47	6	10	4
	749	100%	100%	100%

fen. De CCOL kon een tegenwicht vormen tegen de houding van de Europese Commissie, van een groot deel van de E.G.-lidstaten en van het bedrijfsleven, die probeerden om de ozon-aantasting af te doen als een "non-problem".

In het begin van de jaren zeventig richtte de aandacht zich vooral op spuitbussen, op dat moment de belangrijkste toepassing van de CFK's, waarvoor bovendien alternatieve drijfgassen en producten beschikbaar waren. In 1978 werd in de V.S. een verbod afgekondigd op het gebruik van CFK's in spuitbussen. De Nederlandse regering probeerde hetzelfde in E.G.-verband te bereiken, maar kreeg weinig bijval. Nederland maakte gebruik van haar beperkte mogelijkheden: een waarschuwing op spuitbussen met CFK's, afschaffing van de accijns op alcohol als drijfgas in spuitbussen en op alternatieve producten, en steun aan een onderzoek van Akzo naar de toepasbaarheid van dimethylether als alternatief drijfgas. Akzo heeft de exclusieve vertegenwoordiging daarvan voor Europa. Veel landen benadrukten echter hun eigen commerciële belangen en verklaarden dan ook dat dimethylether een levensgevaarlijk product was.

De druk in de E.G. bleef niet geheel zonder uitwerking. In 1980 sprak de Raad van Europese Ministers uit dat er voorlopig geen nieuwe CFK-productie-capaciteit bij mocht komen. Er was overigens een aanzienlijke overcapaciteit. Verder zou per lidstaat het CFK-gebruik in spuitbussen met minimaal 30% moeten dalen ten opzichte van het basisjaar



FIGUUR 3 a en b.

1976. In Nederland werd in afspraken met de Nederlandse Aerosol Vereniging (de vereniging van Nederlandse fabrikanten van CFK's) vastgelegd, dat minstens 50% zou worden vermindert.

Na 1980 begon de problematiek in rustiger vaarwater te komen. De regering Reagan trad aan in de V.S. en toonde minder belangstelling voor de CFK-problematiek. De aandacht van de pers taande, doordat de problematiek complexer bleek te zijn dan eerst was verondersteld. Bovendien ging er veel belangstelling uit naar de verzuring. Inmiddels gingen de onderhandelingen nog wel verder, waardoor in 1985 in Wenen een verdrag ter bescherming van de ozonlaag tot stand kwam. Daarin kon echter geen overeenstemming worden bereikt over maatregelen, er werd slechts vrijblijvend opgeroepen te gaan onderhandelen over een protocol en alvast beperkende maatregelen door te voeren inzake CFK's. Ik heb niet gemerkt dat daar ook daadwerkelijk iets extra mee gebeurd is.

In de houding ten opzichte van het probleem kwam in 1986 een doorslaggevende verandering, waarbij de ontdekking van het gat in de ozonlaag aan de Zuidpool een belangrijke rol heeft gespeeld. Tevens was er internationaal een toenemende belangstelling voor de broeikasproblematiek en daarbij worden CFK's steeds genoemd als de eerste kandidaten om aan te pakken. Daarnaast bleek een hernieuwde groei op te treden in het wereldwijde gebruik van CFK's. Modelberekeningen toonden aan dat een dergelijke groei zou leiden tot een vermindering van de hoeveelheid ozon in de atmosfeer. Verscheidene CFK-producenten pleitten voor een wereldwijde begrenzing van de CFK-productie. Dit alles had tot gevolg dat op 16 september 1987 in Montreal een internationale overeenkomst werd getekend inzake stoffen die de ozonlaag aantasten. De afspraken zijn onvoldoende om verdere aantasting te voorkomen, maar vormen wel degelijk een ontzettend belangrijke stap in de goede richting.

Protocol van Montreal

Het doel van het Protocol van Montreal is de ontwikkeling van de wetenschappelijke kennis en het afkondigen van maatregelen, waarmee de uitworp wordt stopgezet van stoffen die de ozonlaag kunnen aantasten. Daarbij is principieel gekozen geen maatregelen te treffen tegen bepaalde toepassingen, want dat is dweilen met de kraan open. De totale productie en het totale gebruik moeten worden aangepakt. Naast maatregelen die nu nog onvoldoende zijn, biedt het protocol mogelijkheden om het protocol aan te passen aan toegenomen kennis.

De ontwikkelingslanden worden ontzien bij de huidige maatregelen, omdat deze landen afhankelijk zijn van de beschikbare CFK's in de ontwikkelde landen en veelal niet de mogelijkheden hebben alternatieven te ontwikkelen of toe te passen. Ook voor Oost-Europa, waar enkele CFK-fabrieken in aanbouw zijn of op de tekentafel staan, zijn er uitzonderingsbepalingen.

De afspraken zijn weergegeven in fig. 4.

Stoffen waarop het protocol betrekking heeft					
Groep I		Groep II			
CFK	weegfactor	halon	weegfactor		
11	1,0	1211	3,0		
12	1,0	1301	10,0		
113	0,8	2402	nog te bepalen		
114	1,0				
115	0,6				
Gebruik en productie ten opzichte van 1986 (=100%)					
Groep		I		II	
Jaar		1990	1994	1999	1993
(a) niet-ontwikkelingslanden gebruik		100%	80%	50%	100%
productie		110%	90%	65%	110%
(b) ontwikkelingslanden krijgen 10 jaar uitstel mits het gebruik lager blijft dan 0,3 kg/inwoner					
(c) over verdere verminderingen kan onderhandeld worden:					

FIGUUR 4.

Groep I bestaat uit volledig gehalogeneerde CFK's, groep II uit halonen. De weegfactoren (ODP="ozone depletion potential") geven de grootte van het effect op de ozonlaag aan. Indien er in een land een grote behoefte bestaat aan een bepaalde stof, kan daaraan tegemoet worden gekomen, mits daar bij een of meer van de andere stoffen een extra vermindering tegenover staat.

De halonen worden als brandblusmiddel gebruikt. Het gebruik groeide de laatste jaren enorm sterk. De populariteit van halon komt voort uit het feit dat het blussen van branden met halon nauwelijks schade veroorzaakt (aan bijvoorbeeld hoogwaardige elektronika).

Het verschil tussen afname van de productie en afname van het gebruik mag gebruikt worden voor uitvoer naar ontwikkelingslanden of voor uitruil van productie tussen landen. De handhaafbaarheid van de gebruiksafspraken wordt vergroot door bij in- en uitvoer slechts CFK's te tellen die als grondstof (niet verwerkt) worden verhandeld.

Aan de E.G.-lidstaten is toegestaan om bij het gebruik de verplichtingen te bundelen en de E.G. als een geheel te beschouwen. Nederland is voorstander van een dergelijke bundeling. De Europese Commissie heeft aangekondigd over een maand voorstellen op tafel te leggen over de uitvoering van het Protocol in E.G.-kader.

Maatregelen

Alvorens de mogelijkheden te beschouwen die er zijn om het gebruik van CFK's en halonen terug te dringen, wil ik even de toepassingen noemen. CFK's worden gebruikt als:

- schuimplastics (zachtschuim, zoals matrassen; hardschuim, voor warmte-isolatie en verpakkingen)
- koeling (bedrijven en huishoudens)
- oplosmiddelen (dry cleaning van kleding, ontvetting)

CFK's komen verder vrij bij productie, vervoer en opslag. Halonen worden gebruikt als brandblusmiddel.

Het gebruik kan worden vermindert door af te zien van de soort toepassing, waarin CFK's zijn verwerkt, over te schakelen op een produkt met hetzelfde gebruiksdoel, vervaardiging van het produkt zonder CFK's, vermindering van de verliezen, overscha-

keling op minder schadelijke CFK's en beleidsmaatregelen van de overheid. De Nederlandse fabrikanten van spuitbussen bijvoorbeeld zullen, overeenkomstig afspraken met de overheid, in 1990 voor de Nederlandse markt geen spuitbussen meer produceren met volledig gehalogeneerde CFK's. Andere voorbeelden zijn: het zodanig ontwerpen van gebouwen dat kan worden afgezien van het gebruik van air-conditioners, andere technieken om voedsel te conserveren (bv. inblikken), het gebruik van dimethylether in spuitbussen, terugwinning van CFK's bij het uit bedrijf nemen van koelinstallaties.

Door Reijnders is een overzicht gemaakt van de beperkingen bij volledig gehalogeneerde CFK's die naar zijn mening technisch mogelijk zijn in de E.G. (fig. 5). Over de vraag in hoeverre deze maatregelen haalbaar zijn op grond van politieke, economische of maatschappelijke overwegingen valt te twisten.

Mogelijkheden tot beperking bij volledig gehalogeneerde CFK's (volgens Reijnders)

toepassing	aandeel in EG verkopen	technisch mogelijk per aandeel	methode	totaal beperking
spuitbus	50%	95%	vervanging	47,5%
schuim-plastic	30%	50-90%	hergebruik	15-27%
koeling	10%	70-90%	hergebruik	7-9%
schoonmaken	10%	90%	hergebruik	9%
totaal	100%			78,5-92,5%

FIGUUR 5.

Bij de hele discussie over de haalbaarheid speelt ook de beschikbaarheid van CFK's een rol en de eigenschappen daarvan (fig. 6). De CFK's zijn eveneens verantwoordelijk voor het broeikaseffect. Globaal zijn alle CFK's ongeveer even slecht, alleen de halonen zijn aanzienlijk schadelijker. De alternatieve CFK's (fig. 7) hebben als nadeel dat ze veel duurder zijn.

CFK	koeling	schuim	spuit-bus	oplos-middel	brand-baar	ODP	broeikas
11	+	+	+	+	-	1,0	0,4
12	+	+	+		-	0,9	1,0
113	+	+		+	-	0,8	0,3-0,8
114	+	+	+		-	0,6	0,5-1,5
115	+	+			-	0,3	1,0-3,0
halon							
1301						10	0,8
1211						3	

FIGUUR 6.

Alternatieve CFK's

CFK	koeling	schuim	spuit-bus	oplos-middel	brand-baar	ODP	broeikas
22	+		+		-	0,05	0,07
142b			+		+	<0,05	<0,2
152a	+		+		+	0	<0,1
onderzoek gaande							
123	+		+		-	<0,05	<0,1
124	+	+			-	<0,05	<0,1
125	+				-	0	<0,2
134a	+				-	0	<0,1
141b		+	+		+	<0,05	<0,1
143a	+				+	0	<0,3

FIGUUR 7.

Het nederlandse beleid

Minister Nijpels zal binnen twee weken aan de Kamer rapporteren, welk beleid hij voert om het gebruik van CFK's en halonen terug te dringen. Daarom is het nu niet mogelijk meer te doen dan alvast wat zaken op een rij te zetten:

1. Er zijn verdergaande beperkingen nodig dan zijn afgesproken in het Protocol van Montreal.
2. De verantwoordelijkheid voor de aantasting van de ozonlaag ligt vooral bij het bedrijfsleven. Vertegenwoordigers van het bedrijfsleven onderschrijven de wenselijkheid van beperkingen.
3. Maatregelen moeten voldoende milieurendement hebben. Rendement is de milieuverdienste, afgezet tegen de inspanning die nodig is om dat resultaat te bereiken. De inspanning bestaat uit kosten voor het bedrijfsleven en de inzet van geld en menskracht door de rijksoverheid. Bij de milieuverdienste zijn ook de internationale aspecten van belang: een verbod op uitvoer van CFK-houdende spuitbussen zou onder de huidige omstandigheden leiden tot overname van de levering door producenten in België en Engeland.

Het eerste resultaat van het overleg met het bedrijfsleven is de reeds genoemde overeenkomst met de producenten van spuitbussen. In West-Duitsland bestaat een soortgelijke afspraak. West-Duitse en Nederlandse fabrikanten moeten wederzijdse afspraken maken om geen CFK-houdende bussen te leveren binnen deze landen.

Bij de TH-Twente loopt een proefproject over het slopen van koelkasten, maar toch moeten we wat betreft de huishoudelijke koeling niet optimistisch zijn over de haalbaarheid van allerlei maatregelen. Het is een schrale troost dat het hier gaat om een paar procent van de CFK's die in de lucht komen.

De bedrijfsmatige koeling biedt meer mogelijkheden: het gaat om grotere hoeveelheden CFK's per apparaat en veelal kan voor nieuwe bronnen het alternatief CFK-22 gebruikt worden. Koeling heeft echter sterk te maken met de internationaal georiënteerde agrarische sector. De economische gevolgen moeten scherp in het oog worden gehouden.

Bij de produktie van zacht schuim kan een aanzienlijk deel van de CFK's worden teruggewonnen. Een proefproject bij het bedrijf Recticel bij Kesteren heeft het laatste halfjaar al een besparing van zo'n 40 ton CFK opgeleverd.

Bij de produktie van schuimplastic isolatiemateriaal blijft het merendeel van de CFK's in het schuim. Wellicht is het hier nodig om te wachten op de nieuwe generatie CFK's die in ontwikkeling zijn.

Bij schuimplasticverpakkingen zijn de vooruitzichten wat rooskleuriger. In de afgelopen jaren waren de Nederlandse fabrikanten van polystyreenverpakkingsmateriaal al grotendeels overgeschakeld op gebruik van pentaan.

Ook bij het gebruik van CFK's als oplosmiddel wordt gewerkt aan vervanging. Een bedrijf als Philips is bezig met praktijkproeven.

Bij het reinigen van kleding dreigde juist een omgekeerde ontwikkeling. Er werd een wettelijke regeling voorbereid voor het gebruik van perchlooretheen. Mede als gevolg van de strenge eisen voor perchlooretheen dreigde een groei aan reinigingsmachines met CFK113. Die ontwikkeling is een halt toegeroepen door in de wettelijkheidsregeling grenzen te stellen aan het aantal machines met CFK 113.

Een overzicht van de verwachte vermindering van het gebruik van CFK's rond 1990 is te vinden in figuur 8.

Gebruik	Omstreeks	Omstreeks
	1986 (10 ³ kg/jaar)	1990 (10 ³ kg/jaar)
Spuitbussen	< 4600	1800
Bedrijfsmatige koeling	500 - 800	500 - 700
Schuimplastic	2900 - 3200	2700 - 2900
Oplosmiddelen	1000 - 1500	1000 - 1400
Totaal gebruik	8800 - 9300	6000 - 6800
Uitwerpen		
a. uit huish.koelkasten	50 - 200	50 - 200
b. bij produktie CFK's	< 200	< 200

FIGUUR 8.

Tenslotte wil ik nog opmerken dat Akzo enkele dagen geleden bekend heeft gemaakt dat het tezamen met een twaalftal andere internationale CFK-producenten onderzoek gaat doen naar de toxicologische eigenschappen van alternatieve CFK's. AKZO onderzoekt verder de mogelijkheid bij de fabriek in Weert een installatie te bouwen voor het reinigen van verontreinigde CFK's. Dit bewijst dat het de chemische industrie ernst is met hun bereidheid mee te werken aan de oplossing van het CFK-probleem. ■

Er is weer voor vijf dagen

H. Tennekes

Miljoenen Nederlanders leveren dagelijks commentaar op de weersverwachting. Klagen over het KNMI hoort tot het nationale cultuurpatroon. Ondanks geavanceerde wetenschap en technologie is de voorspelbaarheid van het weer beperkt en dat blijft zo, meent professor Tennekes, onderzoeksdirecteur van het KNMI en buitengewoon hoogleraar meteorologie in Amsterdam. De atmosfeer blijkt een eigen organiserend vermogen te hebben waar de wetenschap nog maar weinig kijk op heeft.

Prof. dr. ir. H. Tennekes kijkt naar de lucht die als een grijze dweil over De Bilt hangt en bekent: 'In mijn beleving is deze zomer veel te somber geweest.' De persoonlijke beleving van het weer kan haaks staan op wat de statistieken laten zien. Tennekes (52) is niet zo'n liefhebber van het Nederlandse klimaat. 'Ik kan er slecht tegen als ik dagen geen zon zie, daar word ik heel sikkeneurig van.' Hij heeft zijn hart verpand aan het 'bonkige klimaat' van Colorado. Maar Nederland is, zo geeft hij toe, een boeiend werkterrein voor een meteoroloog. 'Nergens is het weer zo veranderlijk als in West-Europa.' De onvoorspelbaarheid van het weer hier ziet hij als een uitdaging om tot een andere manier van waarnemen te komen, niet als een falen.

Vroeger waren de winters kouder en de zomers warmer, hoor je vaak. Is het klimaat aan het veranderen?

'De herinnering vervormt, vrees ik. Er wordt inderdaad nog al eens gesuggereerd dat het klimaat verandert, de winter komt later, het voorjaar zou regenachtiger en killeler zijn, de nazomer mooier dan vroeger. Daarmee kun je als meteoroloog niet uit de voeten. In de jaren zeventig hield men nog rekening met een nieuwe ijstijd, nu houdt het broeikaseffect iedereen bezig. Veronderstel dat dat doorgaat dan is het pas over honderd jaar gemiddeld twee graden warmer. Maar dat zijn menselijke berekeningen. Als de atmosfeer zelf van plan is een ijstijd te gaan maken, dan wordt het kouder. Twee graden warmer of kouder, dat is een wereld van verschil. In de zeventiende eeuw hebben we in Nederland een kleine ijstijd gehad met een jaar of vijftig achter elkaar koude winters.

'Je ziet dat terug op de schilderijen van Hollandse meesters zoals Hendrick Avercamp. De mensen die toen leefden, wisten niet beter of het vroom's winters altijd dat het kraakte. In de levensloop van planeet aarde is zoiets echter een zeer kortstondige verkoudheid. De duur van een mensenleven is te kort om conclusies te trekken over eventuele veranderingen in het klimaat. Daar heb je minstens honderd jaar voor nodig.'

Het klimaat mag dan niet opvallend veranderd zijn, de meteorologie heeft een revolutie doorgemaakt.

'De weersverwachting tegenwoordig is inderdaad het produkt van uiterst geavanceerde wetenschap en technologie. Sinds de Tweede Wereldoorlog is de kwaliteit van de weersvoorspellingen ook zeer verbeterd.

We beschikken over de gegevens van meer dan tienduizend weerstations, weerscheppen, satellieten, ballonnen en vliegtuigen. Die gegevens worden in een supercomputer gestopt die in Reading staat, een plaats in Engeland waar het Europees Centrum voor weersverwachting op middellange termijn is gevestigd. In het elektronisch brein van de computer daar bevindt zich een model van de aardatmosfeer. Langs rekenkundige weg simuleert men de werking van die atmosfeer. Dat gaat aanzienlijk sneller dan in de echte atmosfeer, een etmaal duurt in de computer slechts twintig minuten. Zo ontstaat het beeld van het weer van morgen, overmorgen en de dag daarna. De computer rekent tien dagen vooruit. Dat is de uiterste grens waarop de voorspelling nog waarde heeft. Wij gaan met onze voorspellingen echter niet verder dan maximaal vijf dagen.'

En dan zijn ze vaak nog onbetrouwbaar.

'In het verleden zeiden meteorologen altijd dat hun voorspellingen faalden omdat men niet wist wat er in de Golf van Biskaje of op de Stille Oceaan gebeurde, omdat er niet voldoende weerscheppen waren of omdat de computers te klein waren. We hebben nu prima spullen, weersatellieten die elke wolk op aarde in de gaten houden, eert wereldwijd communicatiesysteem en een voorbeeldige internationale samenwerking. Toch kunnen we niet met zekerheid zeggen of het morgen zonnig of bewolkt zal zijn. Sommige collega's verwachten de komende jaren door de bouw van ingewikkeldere computermodellen, meer weerstations en verder wetenschappelijk onderzoek, nog aanzienlijke vorderingen op het gebied van de weersverwachting. Maar naar mijn mening zitten we tegen een grens aan.

'De voorspelbaarheid van het weer is beperkt en dat blijft zo. Er komt geen grote

doorbraak in de betrouwbaarheid van het weerbericht. Bovendien zijn de computers steeds beter in staat hun eigen variaties op nukken en grillen van het weer te verzinnen. Daar schiet de verwachting ook niet veel mee op.'

Valt er echt niets meer te verbeteren?

'De rekenmodellen kunnen nog worden uitgebreid en er kan beter gebruik gemaakt gaan worden van satellietgegevens. Ook kunnen we nog meer leren over bewolking, met name de onweersbewolking in de tropen hebben we nog niet goed onder de knie. Van de oceanen weten we ook nog weinig. De oceanografie heeft geen mondiaal waarnemingssysteem dat van enige betekenis kan zijn voor de bewaking van het klimaat. Op diverse plaatsen in de wereld worden er trouw gegevens van scheepsjournalen bewerkt maar dat is volstrekt onvoldoende om te weten wat er zich op de oceaan afspeelt. De oceaan is de bron van het regenwater dat op de aarde valt. Bovendien levert hij een aanzienlijke bijdrage aan het warmtetransport in het klimaatsysteem. De oceaan is ook de belangrijkste opslagplaats voor warmte en tempert dus de klimaatfuncties.

'Pas in 1990, wanneer de eerste Esa Remote Sensing-satelliet in zijn baan wordt gebracht, krijgen we eindelijk de eerste gegevens die nodig zijn voor de ontwikkeling van klimaatmodellen waarin de bewegingen van de oceaan op realistische wijze kunnen worden gecalculeerd. Maar nogmaals: een perfecte weersverwachting is onmogelijk, zelfs al zouden we onbeperkte technische mogelijkheden hebben. De atmosfeer laat zich namelijk niet onbeperkt voorspellen, die heeft een eigen organiserend vermogen waar wij nog weinig kijk op hebben. Dat besef begint bij het KNMI ook te

dagen. Als we het niet weten, zeggen we het tegenwoordig gewoon. Ook het toegeven van missers is iets van de laatste tijd. Veel mensen reageren daar gelukkig ook positief op en zeggen: jullie zijn volwassener geworden.'

De natuurwetenschappers van de 21ste eeuw zullen zich moeten gaan toeleggen op dingen die principieel onvoorspelbaar zijn

De meteorologie erkent als eerste natuurwetenschap haar grenzen?

'Lange tijd zijn de verwachtingen binnen de natuurwetenschappen hooggespannen geweest. Men dacht processen in de natuur te kunnen ontrafelen en te beheersen. Dat blijkt nu een illusie te zijn die wij bij het KNMI ook niet meer willen verkopen. In 1812 schreef de wiskundige Laplace: een denkende geest die voor een bepaald ogenblik alle krachten en de wederzijdse ligging der deeltjes waaruit de wereld bestaat zou kennen, zou als hij machtig genoeg was om dit vraagstuk wiskundig te behandelen, verleden, heden en toekomst helder voor ogen zien. Maar het determinisme dat Laplace zo briljant verwoordde is eigenlijk heel naïef, het heeft er nooit rekening mee gehouden dat kleine oorzaken grote gevolgen kunnen hebben.

'Zijn idee vormt de basis waarop in de hele natuurwetenschap nog steeds onderzoek wordt gedaan en waarover men ook in de meteorologie soms blijft doordrammen: als ik maar genoeg metingen had dan zou ik een perfecte voorspelling kunnen doen. Die mythe is radicaal naar de bliksem. We staan aan de vooravond van een post-Newto-

naanse wetenschap. Tot nu toe hebben we ongelooflijk ons best gedaan om de onderdelen van de natuur te doorgronden. Maar als je de bouwstenen kent, ben je nog geen architect en heb je geen flauw idee hoe de kathedraal zelf in elkaar zit. We weten alles over eiwitten en DNA maar begrijpen nog steeds niet hoe een kuiken uit zijn ei komt.

'Het idee van de perfecte voorspelbaarheid komt uit de klassieke hemelmechanica, de atmosfeer kan dat voorbeeld helaas niet volgen. De moderne sterrenkunde trouwens ook niet. Nog afgezien van recente ontwikkelingen in de baanmechanica, hoef ik de zonnevlekken en magnetische stormen maar te noemen of de begrensde voorspelbaarheid die ligt besloten in het gebruik van termen als geboorte en levensloop van de sterren. Maar juist in de meteorologie loopt de eendimensionale manier van kijken die in de wetenschap gebruikelijk is, het eerste spaak.

'De wetenschap is sinds Newton een manier geworden om problemen te isoleren van hun omgeving. Daarmee werd die wetenschap waardevrij. In de meteorologie, waarin je je met het wereldklimaat bezig houdt, ontdek je dat je de delen niet kunt isoleren zonder hun samenhang te respecteren. De atmosfeer gedraagt zich bovendien chaotisch, daardoor lopen berekeningen altijd uit de hand. In zo'n complex chaotisch systeem ontstaat een onontwarbare kluwen van oorzaak en gevolg, omdat een oorzaak vele gevolgen kan hebben en een gevolg vele oorzaken. Dit chaotisch gedrag van de atmosfeer werd aan het begin van de jaren zestig ontdekt door de wiskundige Edward Lorenz die in de meteorologie verzeild raakte. Hij is de man die de constructie van de *strange attractors* ontwierp en de werking daarvan aantoonde. Daaruit blijkt hoe systemen gevoelig zijn voor sto-

ringen en hoe ze onvoorspelbaar worden. Je kunt het vergelijken met een mug die wordt aangetrokken door een lamp, een chaotische rondedans kan daarvan het gevolg zijn, waarin geen enkele baan ooit precies wordt herhaald.

'We worden in de meteorologie geconfronteerd met de eigen creativiteit van complexe natuurlijke systemen die per definitie onvoorspelbaar zijn. Maar ik zie soortgelijke confrontaties ook in andere wetenschappen. De econometristen hebben macro-economische modellen die precies dezelfde soort problemen vertonen als onze weermodellen. Biologen hebben vergelijkbare problemen met het voorspellen van de populatie van bepaalde insecten. En ook het Centraal Plan Bureau geeft toe dat hun voorspellingen net zo onbetrouwbaar zijn als de voorspellingen van het KNMI. In het voetspoor van de meteorologie zullen alle exacte wetenschappen voor de bijl gaan. Er is geen ontkomen aan. Voor zover men er nog niet mee te maken heeft zal men op den duur met onvoorspelbare verschijnselen worden geconfronteerd.'

Wat heeft dat voor consequenties voor de wetenschapsbeoefening?

'Driehonderd jaar lang hebben de natuurwetenschappen zich met het kenbare en het beheersbare beziggehouden. Dat hebben we nu onder de knie. De natuurwetenschappen van de 21ste eeuw zullen zich moeten gaan toeleggen op het onbeheersbare, op al die dingen die principieel onvoorspelbaar zijn. Dat is een enorme uitdaging. We moeten op een hele andere manier naar verschijnselen gaan kijken, minder mechanistisch en met meer respect. De manier waarop wij nu wetenschap bedrijven wordt gekenmerkt door onze behoefte de natuur naar onze hand te zetten. Het is

een vorm van onzekerheidsbestrijding. Chaos heeft voor ons de klank van risico en onzekerheid, dingen die uit de hand lopen, ontwikkelingen die onbeheersbaar worden. Maar chaos en creativiteit zijn onlosmakelijk met elkaar verbonden. Nieuwe coherentie kan alleen maar ontstaan door onvoorspelbare ontwikkelingen.

'In een ordelijk systeem moet alles voorgeschreven worden want daar is het zelforganiserend vermogen per definitie nul. Als je vanuit dit besef naar de atmosfeer kijkt, ontdek je dat ze prima in staat is haar eigen boontjes te doppen. In die atmosfeer die een bioloog toch levenloos zou noemen, ontstaan uit de chaos van wolken en winden elke keer weer prachtige depressies die het planetaire warmte- en impulstransport dagenlang een uiterst precieze structuur geven en dat over gebieden van enkele miljoenen vierkante kilometers.

'Nu we met de weersvoorspellingen de grens van de technologische mogelijkheden dicht zijn genaderd, heeft het niet vreselijk veel zin meer om met grote inspanningen een paar procent kwaliteitsverbetering eruit te wurmen. De observatie van complexe interactiepatronen die de warmtehuishouding van onze planeet voor hun rekening nemen, is veel interessanter. De uitdaging is meer zicht te krijgen op het uitbundige zelforganiserende vermogen van de natuur.'

Hoe kijkt u vanuit die visie aan tegen het broeikas-effect?

'Twaalf jaar geleden hebben de Britse chemicus James Lovelock en de Amerikaanse microbiologe Lynn Margulis de Gaia-hypothese geformuleerd. Volgens deze hypothese, een logische voortzetting van de ideeën van Teilhard de Chardin, kan onze planeet gezien worden als een levend

organisme, in voortdurende dynamische ontwikkeling, met een voortdurend toenemend bewustzijn en flexibel genoeg om steeds weer in te spelen op gewijzigde omstandigheden. In deze visie wordt de planeet zeer wel in staat geacht de chemische samenstelling van haar atmosfeer aan te passen aan de behoeften van de biosfeer.

'De energiehuishouding van levende wezens op aarde heeft zuurstof nodig en dat was oorspronkelijk niet in de huidige concentratie aanwezig. De zuurstofproductie van groene planten in zonlicht is dus een uitstekend voorbeeld van het zelforganiserend vermogen van onze planeet. Weliswaar redeneert men: meer CO₂ veroorzaakt een opwarming van de aarde, maar je zou je ook de vraag kunnen stellen wat de aarde zelf van plan is met het teveel aan kooldioxide (CO₂) dat wij veroorzaken. Als we ons daar zorgen over maken, dreigen we te vergeten dat een verdubbeling van het CO₂-gehalte in de atmosfeer het waterverbruik van sojabonen verdubbelt en dat van maïs met ten minste 35 procent verhoogt. Een aantal belangrijke landbouwgewassen zouden over honderd jaar dan in aanzienlijk drogere streken verbouwd kunnen worden.

'De aarde heeft een eigen bewustzijn en strategie, misschien is ze van plan de mensheid te helpen in de strijd tegen de honger. De huidige wetenschap gedraagt zich zo arrogant. Wat meer bescheidenheid zou haar sieren. Wat weten wij van het zelforganiserend vermogen van die aarde? Van allerlei kringlopen en processen die zich daarop afspelen en van het hele *life-support*-systeem dat ze ons biedt? We kunnen nu wel een rampenscenario gaan klaarmaken voor het teveel aan CO₂-emissies, maar wie zegt dat de aarde zich in een uiterst fragiel

evenwicht bevindt? We behandelen haar als een seniele grootmoeder die in een verzorgingstehuis wordt opgeborgen en waar het personeel bepaalt wat goed voor haar is.'

We hoeven ons niet ongerust te maken over het broeikas-effect?

'Dat zult u mij niet horen zeggen. De discussie over het broeikas-effect vind ik vooral van groot belang omdat mensen moeten leren zorgvuldiger om te gaan met de aarde en de atmosfeer. Maar de benadering van het probleem is veel te kortzichtig en rechtlijnig. Er zit geen respect in voor het temperament van het systeem. Veronderstel dat door dat warmer worden het ook vochtiger wordt over de hele aarde. Dan ontstaan er meer wolken, gaan meer zonnestralen terug de ruimte in en die komen dan niet op aarde. Als de gemiddelde bewolking vijf procent meer wordt, is de temperatuuropdaling voldoende om het broeikas-effect ongedaan te maken.

'Als u nu weet dat wij niet eens de bewolking van morgen exact kunnen voorspellen, zouden wij dan wel de bewolking gedurende een periode van honderd jaar nauwkeurig kunnen voorspellen? Toch is dat nodig om te weten of het warmer wordt of kouder. De scenario's voor het broeikas-effect suggereren dat het systeem zich laat afdwingen. Wie weet is de atmosfeer van plan aan een ijstijd te beginnen. Met een zuiver rationele benadering van het broeikas-effect kom je bovendien niet verder dan symptoombestrijding.'

Welke benadering staat u dan voor?

'Daar is een bewustzijnsverandering voor nodig. In 1937 voorzag Theilhard de Chardin een toekomst waarin een mondiaal bewustzijn de planeet zou omspan-

nen. De benodigde technologie daarvoor is al volwassen geworden. Dank zij communicatie- en televisiesatellieten is men snel op de hoogte wat er in de wereld gebeurt, men woont als het ware in een werelddorp. Ook de meteorologie is gebouwd op het fundament van een wereldomspannend communicatiesysteem, een meteoroloog moet wel mondiaal denken en zich bezig houden met zoiets als het wereldklimaat. Depressies houden niet bij de grens op.

'Als je je bezig houdt met het wereldklimaat ontkom je er niet aan dat ook als een metafoor te zien van de ecologie van de menselijke geest. Dan zie je gelijkenissen tussen turbulentie in de atmosfeer en turbulentie in de samenleving, beide chaotische en creatieve systemen die kunstmatig worden beheerst. Hun ware aard is onvoorspelbaar en dat tonen ze ook met grote regelmaat. Je ziet die paradox ook bij de monetaire kringloop: er wordt steeds meer ingegrepen en toch zijn er voortdurend verrassingen.

'De technologie voor één groot wereldbrein is aanwezig, nu moeten wij nog tot het inzicht komen dat wij allen collectief dat brein zijn. Met tien miljard mensen op aarde heb je een aantal bereikt dat overeenkomt met de cellen in je hersenen. Op die manier kan een mondiaal planetair bewustzijn ontstaan, een mensheid die ontdekt dat we de hersenen zijn van de planeet en zo ontvankelijk kan zijn voor de ware aard en samenhang van allerlei verschijnselen. Misschien is dat de wetenschappelijke revolutie die ons over de grenzen tilt waar we nu op stuiten. Wellicht dat op die manier ook een beter inzicht kan ontstaan hoe het weer zich ontwikkelt.'

Ik vind het best prettig dat het KNMI ook wat commerciëler mag gaan werken. Zakelijk als het kan, onafhankelijk als het moet

Hoe ziet u de toekomst van het KNMI?

'Veel meteorologische diensten bevinden zich in een identiteitscrisis, omdat er wat de weersverwachtingen betreft een grens in zicht is. Tegelijkertijd is de commercialisering van de weerdiensten een internationale trend, en in zekere zin onvermijdelijk, waarbij ik overigens wel kritische kanttekeningen wil plaatsen. Wij doen hier op het KNMI nog wel wat meer dan de weersverwachting voor de radio samenstellen en Erwin Kroll op de televisie brengen.

'Als overheidsdienst hebben we een aantal kerntaken die onvervreemdbaar zijn en dus ook niet gecommmercialiseerd mogen worden. Ik denk daarbij aan het instandhouden van de infrastructuur, nationaal en internationaal, die nodig is voor de waarnemingen en metingen, het bijdragen aan de veiligheid van de samenleving en het doen van onderzoek. De mondiale meteorologie staat of valt bij het gratis aan elkaar verstrekken van gegevens. Wanneer bij voorbeeld een land als Venezuela zijn weergegevens alleen maar openbaar wil maken tegen betaling van honderdduizend gulden per jaar, gaat het mis.

'De volgende stap is dan dat men zegt: Nederland is zo klein, het heeft geen eigen waarnemingsinstituut nodig, we vragen dat wel aan Engeland of Duitsland. Als je geen

onafhankelijke weerdienst hebt, baan je de weg voor allerlei manipulatie en verstrengeling van belangen. Bij commercialisering is de klant koning. Bij een overheidsdienst wordt het belang van de totale samenleving afgewogen.

'We hebben een heleboel verantwoordelijkheden die veel tijd en aandacht kosten, zoals betrouwbare waarschuwingen, voorspellingen van golven en deining op de Noordzee, storm- en dijkbewaking. Daarnaast gaat bijna de helft van onze inspanningen zitten in het bijdragen aan de internationale infrastructuur. Daar merkt de buitenwereld heel weinig van. Om al deze redenen kunnen commerciële weerdiensten zoals Meteo Consult dingen doen die wij vaak niet erg goed of vlug kunnen. Maar het KNMI levert natuurlijk al diensten aan het bedrijfsleven, tuinders, aannemers, boeren. De veiling van Aalsmeer is altijd al onze klant geweest. Bij het versturen van bloemen over de hele wereld moet je op de hoogte zijn van het weer daar ter plaatse. Overigens vind ik het best prettig dat het KNMI ook wat commerciëler mag gaan werken. Zakelijk als het kan, onafhankelijk als het moet, lijkt mij de beste houding.

'We zijn hier bij het KNMI net op tijd wakker geworden om het planetair bewustzijn te gaan ondersteunen. Ons onderzoek zal zich daar ook op gaan richten. We tillen er niet zo zwaar aan dat die weersverwachtingen vaak niet exact kloppen. Dat de consument dat wel doet heeft te maken met het feit dat men niet geconfronteerd wil worden met de chaos en onvoorspelbaarheid van het eigen temperament. Ook de mens is een complex chaotisch en creatief systeem dat maar beperkt beheersbaar is. De natuur confronteert ons met ons zelf, het weer is een spiegel van onze eigen natuur. Daarom

houdt het weer mensen ook zo bezig. Het KNMI geeft in ieder geval stof tot praten, iedere dag weer.' ■

Ruimtevaart voor de aarde

H. Tennekes

Prof. dr. ir. H. Tennekes is onderzoeksdirecteur op het KNMI in De Bilt en buitengewone hoogleeraar in de meteorologie aan de Vrije Universiteit te Amsterdam.

Venus, Mars, de maan, de buitenplaneten, de televisiekijker en de inlichtingendiensten, allemaal hebben ze hun satellieten. Maar willen we de planeet aarde zorgvuldig beheren, dan zal er nog heel wat de lucht in moeten. Een pleidooi voor een mondiale aanpak van de grensoverschrijdende problemen van milieu en klimaat.

Vooraan in de boekenkast van mijn dochter, die onlangs éénnentwintig jaar is geworden, staat *Kinderen van Moeder Aarde*, Thea Beckmans sprookje over het wel en wee van de bewoners van Groenland na de Derde Wereldoorlog. Een aantal waterstofbommen is in actieve vulkanen terechtgekomen; daardoor zijn de continenten gaan schuiven en is de aardas gekanteld. Groenland heeft een mild klimaat gekregen en de ijskap is gesmolten. Als het boek begint, is de nasleep van de nucleaire winter inmiddels geschiedenis geworden.

Het eiland wordt door vrouwen geregeerd. De regering baseert haar beleid op respect voor de planeet die ternauwernood aan volledige verwoesting is ontkomen. De diplomatieke betrekkingen met de schaarse nazaten van de overlevende bewoners van Europa en Noord-Amerika zijn uiterst koel. De dames in kabinet en parlement hebben niet veel op met de agressieve afstammelingen van de heren die de planeet zo geschonden hebben. Moeder Aarde verdraagt geen liefdeloosheid. Dat is ook het uitgangspunt van mijn dochter.

Terug naar de wereld van vandaag, al blijven we nog wel even op Groenland. Sinds enkele jaren zijn daar alle weerstations geautomatiseerd. De oorspronkelijke locaties, bij vissersdorpjes aan de mond van fjorden, waren lang

niet optimaal; nu staan de meetposten op onbewoonde eilandjes buiten de kust. Eén keer per twee jaar komt er een helikopter langs om de accu's te vervangen. Elk halfuur stuurt de zender een rij getallen naar de satelliet. Die getallen bereiken de weerkamer in Kopenhagen binnen een seconde, minstens een half uur eerder dan de gegevens van de bemande posten in Denemarken zelf. Satellietmeteorologie: ruimtevaart in dienst van de planeet.

Nieuw perspectief

De ruimtevaart ontleent haar inspiratie in hoofdzaak aan de verkennende kant van de menselijke natuur. Wij kunnen het niet nalaten onbekend terrein steeds verder binnen te dringen. Het oog van de Space Telescope, die volgend jaar gelanceerd zal worden als de problemen met de Space Shuttle tijdig kunnen worden opgelost, reikt tot de verste uithoeken van het heelal. Niet één, maar een hele rij satellieten heeft onlangs de komeet Halley bezocht. De maan is al jarenlang een gepasseerd station in de voortdurende exploratie van de kosmos.

Er is echter ook een andere kant aan de ruimtevaart. Het zal niemand ontgaan zijn dat verreweg de meeste satellieten rond de aarde draaien. De geostationaire parkeerbaan is dichtbezet met communicatiesatellieten. In diezelfde baan bevinden zich ook vijf weersatellieten: een Japanse, een Indiase, een Europese en twee Amerikaanse. Kennelijk is de ruimtevaart niet alleen bezig met lange reizen naar steeds verder gelegen doelen, zij geeft ons ook de kans naar de aarde te kijken en over de aarde na te denken. De ruimtevaart biedt ons een nieuw perspectief op onze eigen planeet.

Het lijken misschien uitgesloten woorden, maar de planeet waarop wij leven is ons eigenlijke ruimteschip en ruimteveer. 'Spaceship Earth' voert de wereldbevolking op reis door de ruimte. Onze planeet geeft ons te eten en te drinken, ze heeft een uiterst ingewikkeld *life support system* ontwikkeld, waarop we nog maar sinds kort enig zicht beginnen te krijgen. Onze planeet is, zoals dat zo kernachtig in Genesis 1 staat beschreven, 'woest en ledig' begonnen; toch heeft ze een diersoort voortgebracht die haar van een afstand kan

bekijken. Kijken we wel echt?

Waar het me om te doen is, is de inspiratie die de ruimtevaart ontleent aan de verzorgende kant van de menselijke natuur. Die verzorgende kant behoort in mijn perceptie een afspiegeling te zijn van de zorg die de planeet aan ons besteed. Ik zal proberen een beeld te schetsen van de aandacht die onze eigen planeet nodig heeft op haar ruimtereis en van de vele manieren waarop de ruimtevaart dienstbaar gemaakt kan worden aan de zorg voor Moeder Aarde.

Ik kies daarbij mijn voorbeelden voornamelijk uit de meteorologie, de oceanografie en de overige vormen van aardobservatie (in beleidsstukken heet dat *remote sensing*). Eerst even iets over de communicatie- en televisie-satellieten die zich als een diadeem om de evenaar hebben geregen. Helaas wordt Sky Channel gevuld met herhalingen van Green Acres, Lucille Ball en Lost in Space (of all things!). Het lijkt dus wel alsof deze fantastische technologie in dienst moet staan van opgewarmde onbenulligheid.

De kern van de zaak is echter dat de telefooncentrale van Marshall McLuhans 'global village' (radio en televisie hebben tot gevolg dat men zo snel op de hoogte is van wat er in de wereld gebeurt, dat men als het ware in een wereldwijd dorp woont), het kabelnet van het werelddorp, al is geïnstalleerd. In 1937 zag Teilhard de Chardin een toekomst waarin een mondiaal bewustzijn de planeet zou omspannen; nog geen vijftig jaar later is de daarvoor benodigde technologie al volwassen geworden. Nu de rest nog.

Beperkingen

Ook de meteorologie is gebouwd op het fundament van een wereldomspannend communicatiesysteem. Zodra de ontwikkeling van de telegrafie dat mogelijk maakte, is er in ons vak een internationaal waarnemingsnetwerk ontstaan. De groei van dat netwerk loopt al meer dan honderd jaar parallel met de technologische mogelijkheden. Waarom moet een meteoroloog mondiaal denken? Heel eenvoudig: het KNMI kan een depressie niet bij Hoek van Holland terugsturen. We kunnen niets beginnen zonder waarnemingen uit het buitenland.

Een tweede kenmerk van de meteorologie is voor mijn thema ook van belang. De meteorologie is een bescheiden wetenschap: wij worden bijna dagelijks geconfronteerd met het ontsporen van onze verwachtingen. Wij gebruiken de beschikbare technologie om de natuur te observeren, niet om haar naar onze hand te zetten. We denken er niet aan een dijk te laten bouwen om de koude lucht uit Rusland tegen te houden. Trouwens, die dijk zou op zijn minst drie kilometer hoog moeten zijn en hij zou de regenval in West-Duitsland zo sterk doen afnemen, dat we onmiddellijk voor het Internationaal Gerechtshof zouden worden gedaagd. Massaal grensoverschrijdend transport van zwaveldioxyde wordt nog steeds door de vingers gezien, maar knoeien met de hoeveelheid neerslag gaat zelfs juristen te ver.

In de meteorologie houden we ons niet met interventie bezig. We beseffen terdege dat we de baan van depressies niet kunnen kanaliseren. We hebben onze handen al meer dan vol aan het zorgvuldig observeren van de bewegingen van de atmosfeer en de oceanen. Zelfs dan plaatst de natuur ons nog voortdurend voor verrassingen.

Observeren is echter niet voldoende. We zijn met zijn allen niet bijster zorgvuldig met onze eigen planeet. Water, lucht en grond worden systematisch vergiftigd en vervuild. We dumpen enorme hoeveelheden kooldioxyde, zwaveldioxyde, methaan en andere gassen in de atmosfeer, en door de mondiale luchtvervuiling nemen de concentraties van ozon en stikstofoxyden snel toe. Maar we hebben geen flauw idee van de mogelijke consequenties. Wordt de atmosfeer zoveel warmer dat de ijsskap van West-Antarctica binnen honderd jaar smelt? Of wordt ze koeler omdat de planetaire waterhuishouding ontregeld raakt, waardoor er meer wolken komen die het zonlicht afschermen? De beperkingen van onze competentie in het voorspellen van de bewolking voor morgen zijn bekend, laat staan dat wij de bewolking van het jaar 2050 op beter dan één procent nauwkeurig zouden kunnen berekenen. Als er meer wolken zouden komen, valt er dan misschien meer sneeuw op Antarctica, zodat de ijsskap juist dikker wordt en de zeespiegel daalt?

Zelfregulatie

Het immens complexe wereldklimaatstelsel bevat een ongekeerd groot aantal relaties tussen water, lucht en biosfeer. Dit systeem wordt gekenmerkt door de onmogelijkheid onderdelen ervan te isoleren. Vuilnis kan buiten de stad worden gebracht, maar in het klimaat is er geen verschil tussen binnen en buiten. Zure regen kan niet uitgebannen worden door wasinstallaties voor zwaveldioxyde aan onze landsgrenzen. Waar we ook ingrijpen, we moeten er rekening mee houden dat ergens anders de rekening wordt gepresenteerd.

Toch moet deze problematiek nuchter onder ogen worden gezien. Ik heb er geen enkele behoefte aan paniek te zaaien met een rampscenario dat gebaseerd is op de fictie dat onze planeet in een uiterst fragiel evenwicht verkeert. We moeten ons niet door angst laten regeren. Het is maar de vraag of we moeten kiezen tussen het terugschroeven van de technologische vooruitgang en het aanbrengen van massale technologische correcties. Het is maar de vraag of het huidige evenwicht op aarde angstvallig en krampachtig in stand moet worden gehouden. De planeet waarop wij leven is geen seniele grootmoeder die in een verzorgingshuis is opgenomen, waar het personeel wel bepaalt wat goed voor haar is.

Dat is nu precies het probleem. De mens kan de consequenties van zijn handelen op de planeet volstrekt niet overzien. We zijn absoluut nog niet in staat vast te stellen of we het op bepaalde punten wel of niet te bont maken. We kunnen bijvoorbeeld van mening zijn dat de aarde de massale ontbossing van grote delen van het noordelijk halfrond redelijk goed heeft opgevangen, maar wie kan garanderen dat dat werkelijk waar is? Er is geen enkel bewijs dat wij mensen het allemaal beter weten. Integendeel: denk maar even aan het gif dat we overal in de grond hebben gestopt. Wie kan zeggen of de planeet er misschien niet verstandig aan doet homo sapiens te laten uitsterven en een andere diersoort te verzinnen?

De verhouding tussen de planeet en de mensen die erop leven behoort liefdevol te zijn. Wij moeten ons niet verbeelden dat wij maar

in het wilde weg kunnen doorgaan. We mogen ons eigen ruimteschip niet mishandelen en misbruiken. Daarmee wil ik echter in het geheel niet zeggen dat de planeet hulpeloos is. Integendeel, Moeder Aarde kan zich heus wel weren, desnoods met een flinke zeespiegelrijzing. Laten we vooral niet blindvaren op onze eigen intelligentie en ons eigen organisatievermogen. Als we het goed bekijken, hebben we maar weinig in de hand. Misschien is zelfoverschatting nog het grootste gevaar dat de mensheid bedreigt. Is de ramp met de Challenger een waarschuwing? En welke lessen trekken wij uit de ramp in Tsjernobyl?

Twaalf jaar geleden hebben de Britse chemicus James Lovelock en de Amerikaanse microbiologe Lynn Margulis de Gaia-hypothese geformuleerd. Gaia (of Gaea) is de Griekse aardegodin. Volgens de Gaia-hypothese, die een logische voortzetting is van de ideeën van Teilhard de Chardin, kan onze planeet gezien worden als een levend wezen, in voortdurende dynamische ontwikkeling, met een voortdurend toenemend bewustzijn, en flexibel genoeg om voortdurend in te spelen op zich wijzigende omstandigheden. In deze visie wordt de planeet zeer wel in staat geacht de chemische samenstelling van haar atmosfeer aan te passen aan de behoeften van de biosfeer. De energiehuishouding van levende wezens op aarde heeft zuurstof nodig; dat was oorspronkelijk niet in de huidige concentratie aanwezig. De zuurstofproductie van groene planten in zonlicht is een uitstekend voorbeeld van het zelforganiserend vermogen van onze planeet.

Wat is ze eigenlijk van plan met kooldioxyde?

Als we ons zorgen maken over de toename van kooldioxyde, dreigen we te vergeten dat een verdubbeling van het CO₂-gehalte in de atmosfeer het waterverbruiksrendement van sojabonen verdubbelt en dat van maïs met ten minste 35 procent verhoogt. Een aantal belangrijke landbouwgewassen zou over honderd jaar dus in aanzienlijk drogere streken verbouwd kunnen worden. Misschien is de aarde van plan de mensheid ondanks haar stomiteiten, te helpen in de strijd tegen de honger. Het zelforganiserende vermogen van de planeet mag niet worden onderschat. Zelfs

in de atmosfeer, die een bioloog toch levenloos zou noemen, ontstaan uit de chaos van wolken en winden elke keer weer prachtige depressies, die het planetaire warmte- en impulstransport dagenlang een uiterst precieze structuur geven, en dat over gebieden van enkele miljoenen vierkante kilometers. Dat doet de mens de planeet voorlopig nog niet na.

Satellieten onmisbaar

Er valt kennelijk nog veel te leren van Moeder Aarde. Een gedegen kennis van al haar kringlopen en processen biedt ons de mogelijkheid zonder onnodige of schadelijke technologische ingrepen bij te dragen tot de behouden vaart van onze planeet. Het is verstandig en voordelig zo natuurlijk mogelijk met de natuur om te gaan. En daarvoor hebben we inmiddels satellieten hard nodig.

De aarde zorgt voor haar bewoners, maar natuurlijk ook voor zichzelf. Als de bewoners haar liefdeloos behandelen, zou ze wel eens alleen voor zichzelf kunnen gaan zorgen. Het minste wat wij kunnen doen om dat laatste te voorkomen is: haar zorg te retourneren, voor zover dat in ons vermogen ligt. Veel kunnen we niet doen, in termen van bewuste interventie; daarvoor kennen we de vele kringlopen in ons *life support system* nog lang niet goed genoeg. Maar we kunnen beginnen met aandacht. En aandacht begint met uiterst zorgvuldige observatie.

Hoewel het misschien lijkt of daaraan al veel gedaan wordt, valt dat in werkelijkheid erg tegen. Één voorbeeld: alle levende materie bestaat uit koolstofverbindingen; desondanks verdwijnt er elk jaar ongeveer tweeënhalf miljard ton koolstof uit de wereldhuishouding zonder dat het teruggevonden kan worden. Misschien komt er veel meer in de oceaan terecht dan we weten. Er is nog maar zo weinig bekend van onze planeet.

Kunnen we ook zonder satellieten aan de informatie komen die we nodig hebben? Het antwoord is zonder enige twijfel: nee. Alleen satellieten kunnen de atmosfeer, de oceanen en al het groen op aarde op een betaalbare manier in de gaten houden. Alleen satellieten bieden de mogelijkheid mondiale waarnemingen te doen die onafhankelijk zijn van politieke grenzen, de beperkte mogelijkheden

van ontwikkelingslanden, de uitgestrektheid van oceanen en de onbewoonbaarheid van woestijnen, ijskappen en bergketens.

De Cumulus, het weerschip dat onlangs voor één pond aan Engeland is verkocht, kostte ongeveer drieënhalf miljoen gulden per jaar, rente en afschrijving niet meegerekend. Nederland betaalde daar ongeveer anderhalf miljoen aan mee. En dat is nog maar voor één enkel meetpunt. Het Noordatlantische weerschepenverdrag loopt ten einde, want de conventionele waarnemingstechnologie is onbetaalbaar geworden, zelfs voor de westerse industrielanden. Er is geen schijn van kans dat het zuidelijk halfrond de kosten kan opbrengen voor een klimaat- en milieubewakingsstelsel dat in hoofdzaak op lokale metingen aan het aardoppervlak is gebaseerd.

In dit kader moet ik ook iets over weersatellieten zeggen. Het is onmiskenbaar dat de satellietmeteorologie aanzienlijk heeft bijgedragen tot de verbetering van weersverwachtingen. Maar toekomstige weersatellieten hebben als hoofdtaak, de afbrokkeling van het conventionele waarnemingsnetwerk op te vangen. Ik ga geen betere weersverwachting beloven. Maar ik voorzie dat de verwachtingstechnologie tegen de eeuwwisseling volwassen zal zijn geworden, met een redelijke balans tussen de kosten van het waarnemen en de baten van de verwachting.

Perfect wordt de verwachting nooit: de beperkte voorspelbaarheid van de atmosfeer kan niet met technologie worden bedwongen. Huizinga beschreef het spelelement van de cultuur; misschien is dit een spelelement van de natuur.

Oceanen

Op zee staat het er heel anders voor. De satellietmeteorologie begint volwassen te worden, maar de satellietoceanografie staat nog in de kinderschoenen. De oceanografie heeft geen mondiaal waarnemingsstelsel dat van enige betekenis kan zijn voor de bewaking van het klimaat. Weliswaar worden op diverse plaatsen op de wereld trouw scheepsjournalen bewerkt, maar die gegevens zijn volstrekt onvoldoende om te weten wat er zich op en in de oceaan afspeelt.

Het wereldklimaat wordt gevormd door de wisselwerking tussen lucht en zee en grond en

planten. De oceaan is de bron van het regenwater dat op de aarde valt. De oceaan levert een aanzienlijke bijdrage aan het warmtetransport in het klimaatsysteem, ze is ook de belangrijkste opslagplaats voor warmte en tempert dus klimaatsfluctuaties. De eventuele opwarming die de vermoedelijke verdubbeling van het kooldioxyde in de atmosfeer veroorzaakt, wordt door de wereldoceaan waarschijnlijk zo'n vijftig jaar vertraagd. De oceaan is bovendien een goede spons voor CO₂ – daar kan het plankton nog plezier van hebben, en dus de hele voedselketen in de wereldzee.

Uit deze opsomming is het duidelijk dat de uitwisselingsprocessen tussen atmosfeer en oceaan bijzondere aandacht verdienen als we het wereldklimaat een beetje willen begrijpen. Precies op dit punt liggen de grootste hiaten in ons kennen en kunnen. We weten natuurlijk wel dat de circulatie in de oceaan door de atmosfeer op gang wordt gehouden, maar dat proces wordt nog in 't geheel niet door wereldwijde metingen bewaakt. De wind jaagt golven op en brengt zeestromen in beweging, maar in de huidige generatie klimaatmodellen gaat er van alles mis als dat proces wordt nagebootst.

Pas in 1990, wanneer de eerste ESA Remote Sensing Satelliet (ERS-1 in het jargon van de specialisten) in zijn baan is gebracht, krijgen we eindelijk de eerste gegevens die nodig zijn voor de ontwikkeling van klimaatmodellen waarin de bewegingen van de oceaan op realistische wijze kunnen worden meegecalculeerd. Dat is dan ook het jaar waarin het Wereld Oceaan Klimaat Experiment begint. Mijn vertrouwen in de nauwkeurigheid van interactieve klimaatmodellen blijft evenwel voorlopig nog uiterst beperkt.

Het is duidelijk waarom de missie van ERS-1 zich heeft toegespitst op golven en stromingen. Als we de atmosferische circulatie niet voldoende kennen, kunnen we de atmosferische transportprocessen niet goed begrijpen. Zo moeten we ook eerst de circulatie en de turbulentie in de oceaan goed kennen voordat we weten wat er met de warmte en diverse opgeloste gassen in de oceaan gebeurt. Als we zelfs niet weten waar alles naar toe gaat, is het zéker onmogelijk het huishoudboekje op orde te houden.

Oceanografen krijgen er nog een hele klus aan om dit goed te doen. De storingsen in de atmosfeer die een groot deel van het warmtetransport voor hun rekening nemen, hebben een diameter van enkele duizenden kilometers. De overeenkomstige wervels in de oceaan zijn veel kleiner: daar is honderd kilometer een betere maat. Alleen de Noord-Atlantische Oceaan bevat op elk moment al tientallen van deze wervels. Het is volstrekt onbegonnen werk om die allemaal met boeien of schepen in de gaten te houden.

Geen winst

De ESA Remote Sensing Satelliet is ook een aardig voorbeeld van de diversiteit van gebruikersbelangen. Voor mij is ERS-1 primair een klimaatsatelliet, die als bijproduct zeegolven meet en schattingen voor de wind boven zee kan leveren. Die gegevens zijn nodig bij het maken van golfverwachtingen voor zeeën en oceanen, en die verwachtingen hebben commerciële waarde voor reders en off shore-operators. Maar het is de omgekeerde wereld als remote sensing satellieten commercieel rendabel gemaakt zouden moeten worden. Mijn primaire zorg is voor de planeet die we zo slecht kennen, niet voor het profijtbegin-sel. En uitzicht op winst zit er helaas niet in. Toch wil ik het probleem van de kosten niet uit de weg gaan. De Nederlandse bijdrage aan weer- en aardobservatiesatellieten vergt tegen 1995 ten minste tien miljoen gulden per jaar meer dan de achttien miljoen die er nu aan worden besteed. Dit is maar zeer ten dele een kwestie van rechtstreeks gebruikersbelang. De hoofdzaak is dat wij onze contributie aan de internationale infrastructuur zullen moeten betalen. We komen toch niet in aanmerking voor ontwikkelingshulp? De Nederlandse overheidsinstanties die bij remote sensing betrokken zijn, zijn wél gebruikers, maar niet in de zin dat het financieringsprobleem alleen door hen opgelost kan worden. Atmosfeer-, oceaan- en aardobservatie is een planetair gemeenschapsbelang: daaraan moet Nederland zijn steentje bijdragen.

Dat is nog niet alles. Als Nederland de vruchten van haar contributie aan het mondiale meetsysteem wil plukken, moet bovendien in eigen land worden geïnvesteerd in de bewerking en distributie van meetgegevens. Anders

komen we natuurlijk niet toe aan toepassingen die onze eigen economie dienen. Dit deel van het probleem moet door de betrokken overheidsdiensten gezamenlijk kunnen worden opgelost.

Nog een enkele opmerking over de relatie tussen onderzoek en beheer. Aardobservatiesatellieten zijn onmisbaar bij het mondiale klimaat- en milieu-onderzoek. Dit betekent echter niet dat de kosten van deze satellieten per se volledig aan het onderzoek moeten worden toegeschreven. De primaire motivatie is immers niet het onderzoek, maar het vergaren van meetgegevens.

Het opbouwen van een solide gegevensbestand is de noodzakelijke eerste stap naar stelselmatig en coherent beheer van de planeet. Het besef dat het weer een grensoverschrijdend verschijnsel is dat internationale samenwerking noodzakelijk maakt, leidde al in 1879 tot de oprichting van een internationale Meteorologische Organisatie. Het besef dat de problemen van milieu en klimaat óók grensoverschrijdend zijn, en dat een mondiale aanpak van deze problematiek geboden is, begint langzamerhand tot politici in de gehele wereld door te dringen. De ramp in Tjernobyl heeft de noodzaak tot internationale samenwerking op dit gebied nog eens onverbidde-lijk onderstreept. Voor het beheer van de planeet is een snelle uitwisseling van alle relevante gegevens van het allergrootste belang.

Lang voordat de ingenieurs van Rijkswaterstaat stuwen gingen bouwen, werd er langs onze grote rivieren een netwerk van peilschalen geplaatst, die elke dag werden afgelezen. Op dezelfde wijze moet de nog op te richten Wereld Waterstaat beginnen met het oprichten van een Mondiale Meetkundige Dienst. Dat geldt ook voor het Wereldinstituut voor Volksgezondheid en Milieubeheer, het Wereld Bosbeheer en alle andere instanties die te maken hebben met het behoud van de planeet. Nederlandse initiatieven in deze richting zouden heel wat mogelijkheden openen voor de exportbevordering van onze kennis over het beheer van infrastructurele voorzieningen.

Het getuigt in elk geval van wijs beleid van de zijde van Rijkswaterstaat om zijn Meetkundige Dienst te belasten met de coördinatie

van de remote sensing in Nederland. Zorgvuldige en ononderbroken observatie is de grondslag voor ieder beheersysteem, zeker nu het beheer van onze planeet onderwerp van overheidszorg begint te worden.

Nu is men licht geneigd te denken: daar zorgen de grote landen dan maar voor – wij doen er pas aan mee als we eraan kunnen verdienen, of als we onze kennis en apparatuur kunnen exporteren. Ik kan niet voor u kiezen, maar ik wil u er wél aan herinneren dat de minister van Financiën enkele maanden geleden in Ootmarsum vergaderde om onze bijdrage aan de Europese kringloop van geld te regelen. Hij deed dat, neem ik aan, om onze participatie in de wereldmarkt veilig te stellen, niet om eraan te verdienen. Dat is ook zijn taak niet. Hij moet het mogelijk maken dat er verdiend wordt.

In een circulatie die de aarde omspant, kan niemand autonoom over zijn deelname beslissen. Hetzelfde geldt voor alle andere kringlopen op de huid van de planeet. In de eenentwintigste eeuw zullen schone lucht, helder water, vruchtbare grond, veilige kusten en gezonde bossen schaars worden, voor zover ze dat niet al zijn. Op de wereldmarkt van die natuurlijke bronnen mag Nederland niet ontbreken. ■

Met dank aan Fons Baede, Marlie Collet, Bert Kamp, Tjalling Landmeter, Hans Reiff, Cor Schuurmans, Kees Swarttouw en Ruth Tennekes.

Deze tekst is gebaseerd op een voordracht die de auteur op 9 april jl. heeft gegeven, ter gelegenheid van een door de ministers Van Aardenne en Deetman georganiseerde conferentie over de toekomst van de ruimtevaart.

