Over de auteur

John Gribbin werd in 1946 te Maidstone, Kent, Engeland geboren. Hij promoveerde te Cambridge in de astrofysica en ontving daar een prijs voor zijn werk. Hij werkte vijf jaar bij het weekblad "Nature", drie jaar bij de wetenschapsbeleid-eenheid van de Universiteit van Sussex en werd in 1978 fysisch adviseur van het weekblad de "New Scientist".
Zijn vorige boek, "Op zoek naar de Oerknal" was de afsluiting van een trilogie over de belangrijkste wetenschappelijke ontwikkelingen van de twintigste eeuw, die begon met "Op zoek naar Schrödingers Kat"(1984) en werd voortgezet met "Op zoek naar de Dubbele Spiraal"(1985).
Ook was hij mede-auteur van een aantal science-fiction romans. Hij levert wetenschappelijke bijdragen aan het dagblad de "Guardian", aan de New Scientist en aan binnenlandse- en werelduitzendingen van de BBC-radio.
Hij ontving een aantal prijzen voor zijn publikaties over de wetenschap, waaronder in 1974 de belangrijkste Britse prijs, een Slaxo Travelling Fellowship. Tot zijn recente projecten behoort een studie, tezamen met Mary Gribbin, over de sociale psychologie van het mens-zijn, een science-fiction roman en een belangrijk werk over het uiteindelijke lot van het Universum, met de titel "Het Omega Punt".

UB
Nabe - 92 - 01
533A03

OM HET BEHOUD VAN DE OZONLAAG

De rol van de wetenschap, industrie en politiek

John Gribbin

Onder redactie van P.J.M. Builtjes
D.A. Kraijenhoff van de Leur

Pudoc Wageningen 1992

ISN: 555047

CIP-Gegevens Koninklijke Bibliotheek, Den Haag

Gribbin, John

Om het behoud van de ozonlaag : de rol van de wetenschap, industrie
en politiek / John Gribbin : onder red. van P.J.H. Builtjes,
D.A. Kraijenhoff van de Leur. – Wageningen: Pudoc. – Ill.
Vert. van: The hole in the sky : man's threat to the ozone layer. –
Toronto [etc.] : Bantam Books, 1988. – (Bantam new age books). –
Met index.
ISBN 90-220-1061-9
NUGI 835
Trefw.: ozonlaag.

© John Gribbin, 1988
© Translation copyright 1992, by Pudoc, Wageningen

Ontwerp omslag en typografie binnenwerk: Frederik Helfrich
ontwerper bNO Deventer

Inhoud

Voorwoord		1
Hoofdstuk 1	1.1 Zuurstof, ozon en het leven	5
	1.2 De huidige ozonlaag	7
	1.3 Zuurstof en leven	12
	1.4 Kanker, gewassen en vee	15
Hoofdstuk 2	2.1 Een supersonisch dwaalspoor?	21
	2.2 We komen vliegend in moeilijkheden	21
	2.3 Het ruimteveer brengt chloor in de stratosfeer	27
Hoofdstuk 3	3.1 De spuitbusoorlog	33
	3.2 De vergissing van Lovelock	34
	3.3 Rowland brengt het probleem ter sprake	37
	3.4 De boodschap wordt uitgedragen	41
	3.5 Hoe staan de zaken nu?	45
Hoofdstuk 4	4.1 Ozon-eters en de biosfeer	49
	4.2 Biologische kringlopen	50
	4.3 Lachgas is niet zo grappig	53
	4.4 Dinosaurussen en scenario's voor de ondergang	56
	4.5 Kleine dingen kunnen van grote betekenis zijn	59
Hoofdstuk 5	5.1 Broeikasgassen	65
	5.2 Het broeikaseffect van koolstofdioxide	67
	5.3 Andere broeikasgassen	69
	5.4 Het vooruitzicht op lange termijn	72
	5.5 Wonen in een warmere wereld	73
	5.6 De invloeden op de ozon	77
Hoofdstuk 6	6.1 Het gat boven de Zuidpool	81
	6.2 Het gat verschijnt	81
	6.3 Chemische aspecten	84
	6.4 Een proces van eliminatie	87
	6.5 Ten zuiden van Punta Arenas	91
	6.6 Het Dahlem-overleg	96

Hoofdstuk 7
7.1 De gevolgen voor de hele aarde 105
7.2 De dynamica van de verdunning 105
7.3 De wereldwijde ozonuitputting 106
7.4 Een noordelijk gat? 108
7.5 Een griezelig scenario 118
7.6 Omslagpunten 121
7.7 Vaarwel Gaia? 123

Hoofdstuk 8
8.1 Strategieën voor actie 127
8.2 Het broddelwerk van Montreal 128
8.3 CFK's vandaag 133
8.4 Lokale tactieken 134
8.5 Morgen is het te laat 136

Naschrift 139

Namenregister 163

Zakenregister 167

Afkortingen

AAOE	Airborne Antarctic Ozone Experiment
AASE	Airborne Arctic Stratospheric Expedition
AFEAS	Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptibility Study
ALE	Atmospheric Lifetime Experiment
CFK	Chloorfluorkoolwaterstof
CIAP	Climatic Impact Assessment Program
CMA	Chemical Manufacturers Association
CPSC	Consumer Product Safety Commission
DMS	Dimethylsulfide
ECE	Effective Conversion Efficiency
EPA	(US) Environmental Protection Agency
FDA	Food and Drug Administration
GAGE	Global Atmospheric Gases Experiment
GWP	Global Warming Potential
HCFK	Hydrochloorfluorkoolstof
HFK	Hydrofluorkoolstof
HGWP	Halocarbon Global Warming Potential
HSCT	High Speed Civil Transport
IIASA	International Institute for Applied System Analysis
IMOS	Inadvertent Modification of the Stratosphere
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
NAS	(US) National Academy of Sciences
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NOAA	(US) National Oceanic and Atmospheric Administration
NOZE	National Ozone Experiment
NRDC	National Resources Defence Council
ODP	Ozone Depletion Potential
OTP	Ozone Trends Panel
PAFT	Program for Alternative Fluorocarbon Toxicity Testing
PSC	Polar Stratospheric Cloud
SBUV	Solar Backscatter Ultraviolet
SST	Supersonic Transportation
SUNY	State University of New York
TOMS	Total Ozone Mapping Spectrometer
UFO	Unidentified Flying Object

UNEP	United Nations Environmental Program
USDOE	United States Department of the Environment
WMO	World Meteorological Organisation

Voorwoord

Op 16 september 1987 werden de vertegenwoordigers van de technisch ontwikkelde landen het op een bijeenkomst te Montreal, onder auspiciën van de Verenigde Naties, eens over het eerste wereldwijde verdrag betreffende het terugdringen van de luchtvervuiling. Na maandenlange onenigheid en geruzie over wat er moest worden gedaan en hoeveel en hoe snel, tekende een initiatiefgroep van zevenentwintig naties het document waarbij zij zich verplichtten om de uitstoot van bepaalde chemische stoffen, chloorfluor-koolwaterstoffen of CFK's genoemd, voor het einde van de twintigste eeuw met 50 procent omlaag te brengen. De milieuorganisaties reageerden enerzijds verheugd op deze positieve stap en anderzijds met kritiek op de onuitvoerbaarheid en de vele 'mazen'. Niettemin was dit de eerste keer dat politici zich in voldoende mate om de bedreiging van het wereldmilieu hadden bekommerd om stappen te ondernemen ten einde dit probleem aan te pakken.
De kwestie die aanleiding was tot deze opmerkelijke ontwikkeling was niet een verschijnsel dat zich in een of meer van de ondertekenende landen voordeed - geen zure regen die de bossen vernielt, of lood van uitlaatgassen dat de gezondheid van de mens bedreigt, of enig ander probleem dat zich dicht bij huis afspeelt. Integendeel, de politici namen, op aandringen van de wetenschapswereld, stappen om de ozonlaag in de atmosfeer te beschermen, een gebied vele kilometers boven ons hoofd, waar een ijle laag van het gas ozon, een drie-atomige vorm van zuurstof, de aarde beschermt tegen de binnenkomende ultraviolette straling van de zon.
In bepaald opzicht was het tijdstip van de bijeenkomst te Montreal ongelukkig gekozen. De ontdekking drie jaar voordien, dat ieder voorjaar op het zuidelijk halfrond de ozon boven Antarctica verdwijnt wanneer de terugkerende zon een eind maakt aan de lange poolnacht, is een van belangrijkste redenen waarom de politieke machinerie die tot het internationale verdrag leidde, moeizaam op gang kwam. Die verdwijning van ozon is zo opvallend dat de wetenschappers prompt zijn gaan praten over het 'gat' in de ozonlaag, wat de media dan weer vertaalden in 'het gat in de dampkring'. Aansluitend op de ontdekking van het gat stelde in 1986 een expeditie naar Antarctica de omvang daarvan vast. Deze expeditie vond tevens sterke aanwijzingen dat het door de aanwezigheid van chlooratomen in de stratosfeer werd veroorzaakt. De chlooratomen zijn zelf weer het gevolg van de afbraak van chloorfluorkoolwaterstoffen, en dat zijn verbindingen die uitsluitend worden veroorzaakt door menselijke industriële activiteiten op aarde en die alom worden gebruikt als drijfgassen in spuitbussen, voor de vorming van gasbelletjes in de schuimplastic doosjes die hamburgers warm moeten houden, in koel- en

airconditioninginstallaties ook in auto's, bij de industriële vervaardiging van computerchips, enz. In dezelfde tijd dat de politici in Montreal er over spraken wat hun antwoord op deze menselijke bedreiging van zo'n belangrijk deel van ons atmosferische milieu zou moeten zijn, was er op het uiterste zuidelijke puntje van Chili vanuit Punta Arenas een veel grotere, door NASA geleide expeditie met twee vliegtuigen, in het ozongat bezig en ontdekte daar dat de verschijnselen sterker waren dan ooit tevoren. Die zelfde expeditie leverde ook het uiteindelijke onomstotelijke bewijs - het 'rokende pistool' - dat chloor afkomstig uit de chloorfluorkoolwaterstoffen (CFK's) de schuldige was.
Vanwege het grote belang van deze ontdekkingen en vanwege de alom verbreide publieke belangstelling en bezorgdheid over de bedreiging van de ozonlaag, hield het Punta Arenas-team aan het eind van september (net twee weken nadat de Montreal-overeenkomst was getekend) een persconferentie om aan de wereld te vertellen wat er allemaal aan hun ontdekkingen vastzat. Als de Montreal bijeenkomst in plaats van twee weken daarvoor, twee weken na die persconferentie had plaatsgehad zou die zeker een veel verdergaand verdrag hebben opgeleverd. Op een hoogte van ongeveer 18 km boven het aardoppervlak van Antarctica was in het voorjaar van 1987 het grootste deel van de ozon vernietigd. En veranderingen in de hoeveelheid aanwezig chlooroxide liepen precies gelijk op met veranderingen in de hoeveelheid ozon. Waar het chlooroxide toenam, nam de ozon af, waaruit duidelijk was te zien dat de chloor de ozon vernietigde.
Waarom zouden wij ons daar zorgen over moeten maken? Nadat men in de jaren zeventig had ontdekt welke belangrijke rol ozon in het ecosysteem van de aarde speelt, ontstond er bezorgdheid over de gevolgen die de ozonlaag zou kunnen ondervinden van hoogvliegende supersonische vliegtuigen (SST's), zoals de Concorde en zijn (veronderstelde) opvolgers. Aansluitend op het SST-debat is er in de Verenigde Staten in het midden van de jaren zeventig heftig gediscussieerd over de schade die CFK's aan de ozonlaag zouden kunnen berokkenen.
De directe bedreiging voor de mens is dat, als de ozon boven onze hoofden afneemt, er meer ultraviolette straling van de zon op het aardoppervlak zal aankomen, die het optreden van bepaalde vormen van huidkanker bij de mens zal doen toenemen en mogelijk schade zal toebrengen aan gewassen en dieren. Een stap verder gaande dan deze bedreiging van het menselijk leven, waarschuwde de atmosferische wetenschap ook voor een mogelijke verlaging van de temperatuur in de stratosfeer die de warmtebalans van de aarde zou kunnen veranderen, en daarmee ook de weerpatronen waarbij zowel de wind als de regenzones waaraan we gewend zijn, zouden kunnen veranderen. Terwijl deze tweede bedreiging in de discussies van de jaren zeventig nog maar een bijkomstigheid was, komt die in het licht van de recente studies veel sterker naar voren.
Zelfs zonder dat er toen directe metingen waren die aantoonden dat de ozonlaag werd beschadigd, beschouwde de wetgever van de Verenigde Staten de bedreiging ernstig genoeg om maatregelen te nemen die de produktie en uitstoot van CFK's vanaf 1978 moesten beperken. In die tijd produceerden de Verenigde Staten meer dan de helft van alle CFK's en deze wetgeving had het onmiddellijk resultaat dat de

werelduitstoot van deze verbindingen omlaag werd gebracht. De rest van de wereld negeerde evenwel het probleem met het gevolg dat in de jaren tachtig de werelduitstoot van deze gassen alweer omhoog ging toen het gat in de atmosfeer boven Antarctica werd ontdekt. Met dit dramatische bewijs van de menselijke aantasting van de atmosfeer voor ogen is nu de tijd gekomen om het hele ozondebat nog eens opnieuw te beoordelen en eens en voor altijd, maar nu in internationaal verband, te beslissen of we er zonder chloorfluorkoolwaterstoffen niet beter aan toe zouden zijn.
In de eerste week van november 1987 had in Berlijn de eerste wetenschappelijke bijeenkomst plaats waarop de nieuwe resultaten van de Punta Arenas expeditie werden besproken en in een brede samenhang met andere milieuaspecten werden geplaatst. Het was op één van een reeks wetenschappelijke bijeenkomsten die in die stad regelmatig plaatsvinden als 'Dahlem Konferenzen' waarbij onderwerpen worden behandeld die internationaal de aandacht hebben, die actueel en interdisciplinair van aard zijn en waarbij veel verschillende wetenschappelijke specialisten bijeen worden gebracht. Het onderwerp 'De veranderende atmosfeer' voldeed volkomen aan deze voorwaarden. En de keuze van het tijdstip voor deze bijzondere bijeenkomst - wel enigermate toevallig omdat die al maanden tevoren was vastgesteld - was met het oog op de meest recente waarnemingen boven Antarctica al even gunstig als het gekozen tijdstip voor de Montreal-bijeenkomst ongunstig was.
Ik had het voorrecht om als uitgenodigd waarnemer bij die bijeenkomst in Berlijn aanwezig te zijn en het is daardoor dat het me mogelijk is om u een overzicht te geven van wat er tot nu toe besproken is en wat de resultaten zijn. Er is geen twijfel aan dat zich ieder voorjaar een gat in de atmosfeer boven Antarctica voordoet en dat dit verschijnt als gevolg van menselijke activiteiten, dat het er niet was voor ongeveer 1979 en dat het in 1987 'dieper' was (in die zin dat er meer ozon was verdwenen) dan ooit tevoren. *Hoewel de ozonafname in 1988 geringer was dan in 1987, was het ozongat in 1989 en 1990 van nog grotere omvang dan in 1987 (zie fig. 12). Recente satellietgegevens hebben aangetoond dat de ozonlaag wereldwijd in de afgelopen 12 jaar 3% dunner is geworden.* Dit boek gaat over de vraag waarom wij ons hierover zorgen moeten maken, wat dit voor de toekomst te betekenen heeft en welke maatregelen we zouden moeten nemen, zowel als persoon als in wereldverband, om alle mogelijke bedreigingen voor het leven op aarde zo goed mogelijk af te wenden.
Als ik de gelegenheid niet had gekregen om de Dahlem-bijeenkomst bij te wonen had ik dit boek niet kunnen schrijven, en ik dank Silke Bernhard en haar team voor de uitnodiging daarvoor en voor de organisatie van zo'n goed geregelde bijeenkomst op een zo goed gekozen tijdstip. Maar bovenal zou ik dank willen brengen aan de elf leden van de groep die zich op die bijeenkomst in het bijzonder hebben beziggehouden met de veranderingen in de Antarctische ozon. Hoewel enige van hen in het begin leken te schrikken van de aanwezigheid van een journalist tijdens de discussies, spaarde men elkaar niet bij de debatten en allemaal namen ze de tijd om mij in te lichten over hun eigen werk aan dit probleem. Het waren: Guy Brasseur, van het U.S. National Center for Atmospheric Research; Joe Farman, van de British Antarctica Survey; Ivar Isaksen, van de Universiteit van Oslo, Bernd Krüger van het Alfred Wegener Institut in Bremerhafen; Karin Labitzke van de Freie Universität te

Berlin; Jerry Mahlman van Princeton University; Pat McCormick, van het NASA-Langley Research Center; Phil Solomon, van de State University of New York; Richard Stolarski, van NASA-Goddard; Richard Turco, van R & D Associates; en Bob Watson, van NASA Washington.
Andere deelnemers aan de bijeenkomst, die in hoofdzaak bij andere aspecten van de discussies over de veranderde atmosfeer waren betrokken, hebben ook de tijd genomen om een paar van mijn misvattingen recht te zetten.
Daarom dank aan: Bob Charlson van de University of Washington in Seattle; Ralph Cicerone, van NCAR (National Center of Atmospheric Research te Boulder, US); Paul Crutzen, van het Max Planck Institut für Chemie te Mainz, Duitsland; Jim Lovelock, van Coombe Mill; en Sherry Rowland, van de University of California te Irvine. Als er nu nog misvattingen zijn overgebleven, dan zijn die geheel voor mijn eigen rekening.

John Gribbin
7 December, 1987

Als vertalers van het boek 'The Hole in the Sky' hebben wij niet alleen een omzetting van het boek in het Nederlands voor ogen gehad, maar tevens getracht de meest recente wetenschappelijke en beleidsmatige informatie toe te voegen. Door per hoofdstuk de meest relevante literatuurinformatie, waarvan gebruik is gemaakt, op te geven, is het mogelijk geworden om het boek als startpunt te gebruiken voor een meer gedegen studie van alle facetten van dit boeiende en bedreigende fenomeen. Ten einde de vele behandele aspecten overzichtelijker en toegankelijker te maken hebben wij een samenvatting in de vorm van een uitgebreide inhoudsopgave bijgevoegd. Verder moeten het register van onderwerpen en personen en de lijst van afkortingen ook het gemak bij lezen en naslaan bevorderen.
Door ons toegevoegde tekstgedeelten zijn in een afwijkend lettertype gedrukt.
Deze bewerking van Gribbin's boek is mede de vrucht van informatie die ons door velen is aangereikt. Ook hebben wij gebruik kunnen maken van suggesties van de heren C.G. van der Lee (AKZO), J. Swager (VROM) en H. van der Woerd (RIVM). Dank aan hen allen, maar bovenal aan mevrouw E. Plesman-Bonnike die met onverflauwde en soms hardnekkige toewijding onze min of meer duidelijke geschriften en aanwijzingen tot de uiteindelijke tekst heeft verwerkt.

Peter Builtjes en
Dirk Krayenhoff van de Leur
september 1991

HOOFDSTUK 1

1.1 Zuurstof, ozon en het leven

Ozon is een lichtblauw gas, dat zelfs in lage concentraties giftig is voor het menselijk leven *en schadelijk is voor de vegetatie*. Het ontstaat bij elektrische ontladingen - in de natuur door de bliksem en kunstmatig in elektrische hoogspanningsapparatuur en ook bijvoorbeeld bij kopieerapparaten - en het heeft een typische, scherpe geur. Het kan ook op een laag niveau ontstaan door de gevolgen van chemische reacties waarbij zonlicht inwerkt op luchtvervuiling; ozon op dit grondniveau maakt deel uit van de fotochemische 'smog'. Zo op het eerste gezicht kan er niet veel goeds over ozon worden gezegd, hoewel het wel degelijk in de chemische industrie wordt gebruikt, als bleekmiddel en als een krachtig bacteriëndodend middel dat gebruikt wordt om zowel drinkwater als zwembaden te steriliseren. Maar op een veilige afstand is ozon van groot belang voor ons welzijn. De ozon in de stratosfeer boven ons hoofd beschermt het aardoppervlak tegen de ultraviolette straling van de zon die anders op het grootste gedeelte van het vaste land op aarde het leven zou wegvagen. En ozon is een vorm van zuurstof, het actieve bestanddeel van de lucht die we inademen, het gas dat essentieel is voor alle vormen van menselijk en dierlijk leven op aarde. Het verschil is alleen dat de moleculen van normale zuurstof ieder twee atomen bevatten terwijl de moleculen van ozon er drie hebben; dat is net het verschil tussen leven en dood voor een dier dat meer dan een spoortje ozon zou inademen; maar het is ook de ozon die nauw verbonden was met het ontstaan van leven op aarde.

Tegenwoordig is de atmosfeer van de aarde een warme deken, rijk aan zuurstof, die de voorwaarden in stand helpt houden die nodig zijn voor het leven, zoals wij dat kennen. Dat hoeft ons nauwelijks te verbazen omdat het leven zoals we dat kennen zo is geëvolueerd dat het past bij de omstandigheden onder die deken van lucht. En deel van de zorgen die we ons maken na de ontdekking van het gat in de atmosfeer boven Antarctica, betreft het feit dat de atmosfeer nu zo zou kunnen veranderen, dat er omstandigheden op aarde ontstaan die ons soort van leven nog nooit heeft meegemaakt.

Voor het gemak delen de atmosferische wetenschappers de atmosfeer op in denkbeeldige lagen. Deze lagen worden het eenvoudigste beschreven aan de hand van de manier waarop de temperatuur met de hoogte verandert, maar de grenzen tussen die lagen zijn nooit zo scherp als de namen, die de wetenschappers er aan geven, doen vermoeden. In werkelijkheid zijn die grenzen altijd meer of minder vaag en zullen de gassen zich opwaarts en neerwaarts over de grenzen vermengen (figuur 1).

De lucht dicht bij de grond is warm omdat de grond (en ook het oppervlak van de zee) zelf warm is. Als het zonlicht door de atmosfeer valt, wordt die daar niet direct

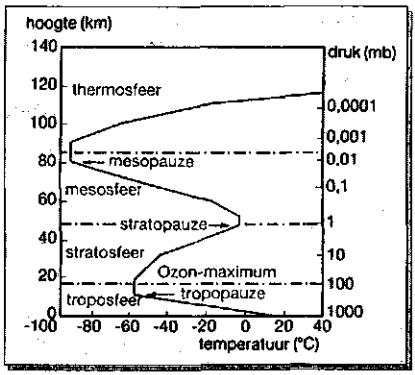


Fig. 1a Het verloop van de temperatuur met de hoogte

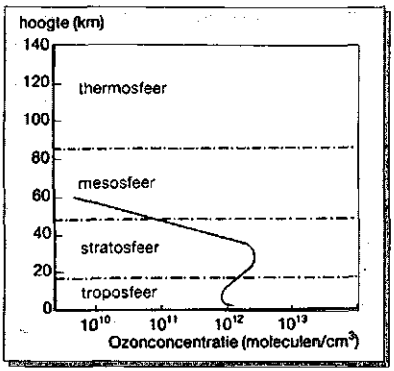


Fig. 1b. Het verloop van de ozonconcentratie met de hoogte

(Bron: Ozonlaag, de beschermer bedreigd, TNO Inforeeks 1989, Den Haag)

door verwarmd (tenminste niet bij de grond) maar het wórdt geabsorbeerd door de zee, het land en de vegetatie op het land. Het warme aardoppervlak straalt dan weer warmte terug naar de ruimte; maar deze buitenwaartse straling heeft veel grotere golflengten dan het zonlicht en ligt in het infrarode deel van het spectrum. Die infrarode straling wordt op zijn weg naar buiten wel gedeeltelijk geabsorbeerd door de atmosfeer bij de grond en maakt die warm. Om begrijpelijke redenen staat dit proces bekend als het broeikaseffect. Die opwarming neemt af met de hoogte - hoe verder verwijderd van het warme aardoppervlak hoe kouder het wordt - tot aan een hoogte van rond 12 km, waar de temperatuur ongeveer - 60 °C is. Dit 'rond 12 km' is een bijzonder vaag gemiddelde waarin het feit verborgen is dat boven de polen de afkoeling op 8 km stopt, maar bij de evenaar pas op 16 km. De laag van de atmosfeer onder deze grens wordt de troposfeer genoemd. De grens zelf heet de tropopauze en die geeft het begin aan van een laag waarin de temperatuur eerst constant blijft bij toenemende hoogte, maar dan met de hoogte gaat toenemen.

Tot aan ongeveer 48 km neemt de temperatuur met de hoogte toe, totdat de lucht op die hoogte, al is die erg dun, bijna even warm is als de lucht op zeeniveau. Deze laag van de atmosfeer, van even beneden 16 km tot aan 48 km, is de stratosfeer en waar de temperatuur het hoogst is, ligt de stratopauze. Maar nog eens, in deze wereldgemiddelden zijn belangrijke regionale verschillen verborgen. Hoewel het in het koudste gedeelte van de stratosfeer gemiddeld ongeveer - 60 °C is, wordt het 's winters boven de poolgebieden, wanneer de zon niet opkomt, veel kouder, en dat heeft belangrijke gevolgen voor de ozonlaag.

Boven de stratopauze wordt de atmosfeer, door de mesosfeer heen, opnieuw koeler tot aan een hoogte van 80 km en vervolgens weer warmer in de thermosfeer, maar daar zijn nog maar zo weinig moleculen dat het begrip 'temperatuur' daar al lang zijn alledaagse betekenis verloren heeft. Maar deze lagen boven de stratosfeer spelen

nauwelijks meer een rol in de geschiedenis van de ozon en het gat in de ozonlaag.
De onderste laag van de atmosfeer, de troposfeer, is het gedeelte waarin wij ademhalen en het gedeelte waarin het weer optreedt, aangedreven door convectie ('warme lucht gaat omhoog'). Hoewel die laag betrekkelijk dun is, is de troposfeer het dichtste deel van de atmosfeer omdat daar de lucht door de bovenliggende lagen wordt samengedrukt. In de troposfeer bevindt zich daarom 85% van de massa van de atmosfeer, de overblijvende 15% bevindt zich praktisch allemaal in de stratosfeer - onder een niveau van ongeveer 40 km bevindt zich 99% van de totale luchtmassa van de atmosfeer. De lucht in de stratosfeer is zeer ijl vergeleken met de lucht op grondniveau.
Maar, in tegenstelling tot de troposfeer en ondanks de geringe dichtheid, absorbeert de stratosfeer warmte van de zon in de vorm van ultraviolette straling. Dat gebeurt omdat zuurstof die uit de troposfeer doordringt naar boven, zonne-energie opneemt. De zonnestraling maakt de twee atomen van een zuurstofmolecuul daaruit los en maakt ze beide vrij om zich te binden aan andere, twee-atomige zuurstofmoleculen en aldus twee moleculen ozon te vormen. De term 'ozonlaag' heeft betrekking op de stratosfeer. Omdat de stratosfeer op grotere hoogte warmer wordt, stijgt de warme lucht daar niet langer op, omdat boven de lucht warmer is dan beneden en er geen convectie kan optreden. Zo is de stratosfeer dus in de ware zin des woords een deksel op de troposfeer, dat de convectie en het weer onder de tropopauze houdt.

1.2 De huidige ozonlaag

De ozonlaag dankt zijn bestaan aan de zuurstof van de troposfeer die daar door de levende materie wordt geproduceerd, in kleine hoeveelheden naar boven doordringt in de stratosfeer en daar reageert met zonlicht om drie-atomige ozonmoleculen te vormen. Over de hele hoogte gemiddeld bevat de huidige lucht ongeveer 78 procent stikstof (volume), 21 procent zuurstof (vrijwel geheel in de normale twee-atomige vorm), 0,035 procent koolstofdioxide en 1 procent argon en sporen van andere gassen. Zoals we zullen zien is het niet altijd zo geweest. Maar de huidige aanwezigheid van zoveel vrije zuurstof verklaart hoe de ozonlaag in stand kan blijven.
Die verklaring hangt samen met de aard van de straling die door de zon wordt uitgezonden, en met de manier waarop zowel ozon als zuurstof op die straling reageren (wanneer ik de term zuurstof, zonder nadere aanduiding gebruik bedoel ik daar de twee-atomige vorm mee). De meeste energie wordt door de zon uitgestraald in de vorm van geel licht waarvan de golflengten in het bereik van 500 tot 600 nanometers liggen (1 nm is één miljardste van een meter, 10^{-9} m). Het licht dat zichtbaar is voor onze ogen, ligt in het bereik tussen rood met 760 nm, en violet met 400 nm, maar er is nog een aanzienlijke hoeveelheid zonne-energie die ter weerszijden van dit bereik wordt uitgezonden, in het infrarood en het ultraviolet (UV). Het is de ultraviolette rand van het spectrum die een rol speelt bij het instandhouden van de stratosfeer (fig. 2).
De moleculen reageren alle op speciale golflengten van de straling. Voor het openbreken van een bepaalde moleculaire binding is een specifieke hoeveelheid

energie nodig en dat is ook het geval bij de binding van de twee atomen in een zuurstofmolecuul. Men kan zich elektromagnetische straling, zoals het licht van de

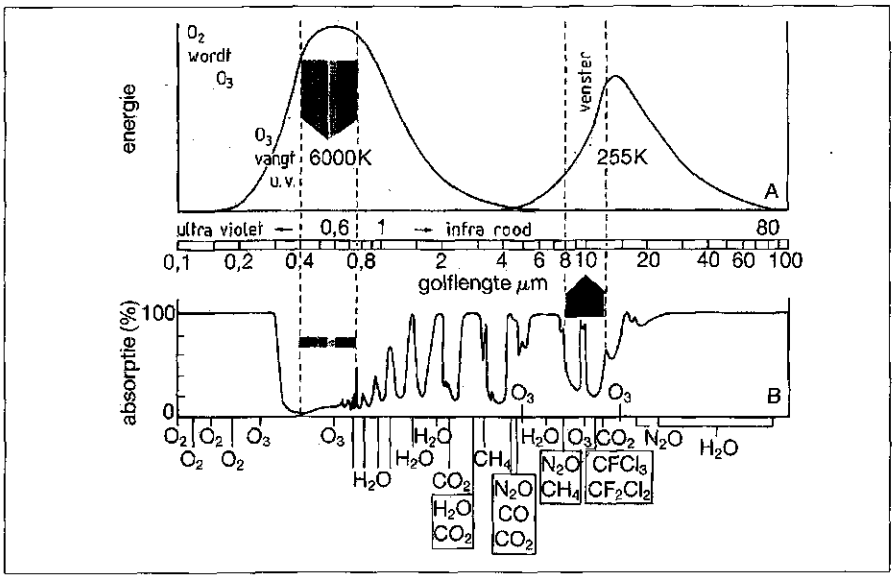
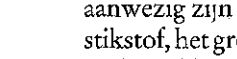


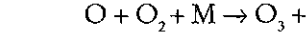
Fig. 2a Spectrum van de zonnestraling (6000 K) en de aardse straling (255 K). Het zichtbare licht is met de regenboogkleuren aangegeven
Fig. 2b Percentage van de straling die geabsorbeerd wordt tussen de aarde en de top van de atmosfeer. Aangegeven is bij welke golflengten diverse stoffen absorberen
(Bron: Ozonlaag, de beschermer bedreigd, TNO Inforeeks, 1989, Den Haag)

zon, indenken als pakketjes energie, fotonen genoemd. Zulke fotonen met korte golflengten (hogere frequenties) bevatten meer energie dan die met langere golflengten (lagere frequenties). De energie die door de zon in het ultraviolette deel van het spectrum wordt uitgezonden, is zwak vergeleken met de energie die in de gele band wordt uitgezonden, in die zin dat er minder fotonen met ultraviolette golflengten worden uitgezonden. Maar in ieder van deze ultraviolette energiepakketjes zit meer energie dan in één enkel energiepakketje van het gele licht. Zuurstofmoleculen reageren bijzonder sterk op golflengten onder 190 nm in de ultraviolette band. Energiepakketjes met die golflengten verbreken de band tussen de twee atomen van een zuurstofmolecuul omdat ieder pakketje meer energie bij zich heeft dan de energie die de atomen bij elkaar houdt. De reactie die daar het gevolg van is, de fotolyse, kan door de volgende vergelijking worden weergegeven:



$$O_2 + UV \rightarrow O + O$$

In het volgende stadium van het ozonvormingsproces moet een ander molecuul aanwezig zijn om als katalysator op te treden. Gewoonlijk is dit een molecuul van stikstof, het grootste bestanddeel van de atmosfeer, maar het zou ook bijna elk ander molecuul kunnen zijn, dus we kunnen het M noemen:



$$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$$

De reactie die ozon produceert, levert energie aan het extra molecuul M dat daardoor sneller gaat bewegen. Als gasmoleculen sneller bewegen betekent dat, dat het gas warmer wordt. Dus het effect van de ultraviolette straling van de zon met golflengten onder 190 nm op zuurstofmoleculen van de stratosfeer is, dat er ozon gevormd wordt en de stratosfeer wordt verwarmd. Het meeste zonne-UV met golflengten onder 200 nm wordt op deze manier geabsorbeerd en dat geldt ook voor een deel van de straling tot aan ongeveer 240 nm. Maar zelfs boven de troposfeer gaat de opbouw van de ozon in de atmosfeer niet alsmaar door omdat de ozonmoleculen zelf zowel met zonlicht als met andere stoffen reageren waardoor ze uiteenvallen en ten slotte weer opnieuw zuurstofmoleculen vormen.
De hoeveelheid energie die in een bepaald gedeelte van de stratosfeer wordt geabsorbeerd, hangt af van de aantallen zuurstofmoleculen die daar aanwezig zijn om de ultraviolette straling op te vangen, maar ook van de hoeveelheid straling zelf. Er zijn onderin de stratosfeer meer zuurstofmoleculen; daar is de lucht minder ijl en dichter bij de troposfeer waar zuurstof vandaan komt. Maar de ultraviolette straling is het sterkste bovenin de stratosfeer, voordat er nog iets van geabsorbeerd is. Bovendien moet, om ozon te kunnen vormen, een zuurstofatoom, dat door het uiteenvallen van een zuurstofmolecuul is ontstaan, nog een partner vinden in de vorm van een ander zuurstofmolecuul en dat is ook al weer gemakkelijker naarmate de lucht minder ijl is. Er is dus een zekere afweging die er op neerkomt dat de grootste concentratie van ozon ergens midden in de stratosfeer ligt tussen ongeveer 19 en 32 km hoogte. *Deze ozonlaag wordt vaak Chapman-laag genoemd, naar de ontdekker van het vormingsmechanisme van ozon uit zuurstof.*
Als ozon eenmaal is gevormd zal het gemakkelijker uiteenvallen dan zuurstof. De energie die het ozonmolecuul samenbindt, is kleiner dan de energie die een zuurstofmolecuul bij elkaar houdt en het is voor een energiepakketje met een langere golflengte, maar nog in het ultraviolette deel van het spectrum, betrekkelijk gemakkelijk om een zuurstofatoom van een ozonmolecuul af te stoten. Dit langgolvige ultraviolet, dat wel dichter ligt bij de top van de energieuitstraling van de zon, is overvloediger aanwezig dan het UV met hogere energie dat de zuurstofmoleculen uiteen laat vallen. Daardoor heeft ozon het dus erg moeilijk en de enige reden waarom het in de atmosfeer voorkomt is dat er zo veel zuurstof aanwezig is, zodat het mogelijk is dat de reacties die ozon produceren kunnen optreden. Praktisch alle straling met golflengten tussen 230 en 290 nm die onze atmosfeer binnenkomt, wordt door de ozon in de stratosfeer geabsorbeerd en bereikt nooit de troposfeer,

laat staan de grond; een deel van de straling met golflengten tot 350 nm wordt ook geabsorbeerd. Het proces is vrijwel gelijk aan dat waarmee het UV met hogere energie de zuurstof openbreekt:

$$O_3 + UV \rightarrow O + O_2$$

Van de vrije zuurstofatomen die op deze manier ontstaan zullen de meeste al snel een zuurstofmolecuul tegenkomen en opnieuw ozonmoleculen vormen. Dat heeft weinig gevolgen voor de chemie van de stratosfeer - maar men moet wel bedenken dat er een absorptie van zonne-energie heeft plaatsgevonden die de stratosfeer warmer heeft gemaakt; *O3 is dan ook een broeikasgas.* Maar er zijn ook andere reacties gaande die de ozon weer terug omzetten in zuurstof. Vrije atomen van zuurstof, die door het optreden van ultraviolette straling zijn ontstaan kunnen vrij eenvoudig weer een ozonmolecuul tegenkomen met het resultaat:

$$O + O_3 \rightarrow O_2 + O_2$$

Er is een hele familie van scheikundige reacties van de soort:

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$$

$$NO_2 + O \rightarrow NO + O_2$$

die hetzelfde karweitje verrichten met behulp van een katalysator (in dit geval stikstofoxide NO) die na afloop van de reactie weer in de atmosfeer terugkeert. Dit is belangrijk omdat in zo'n proces één molecuul NO steeds opnieuw vele malen de cyclus kan doorlopen waarbij het NO-molecuul ozon uit de lucht verwijdert door het om te zetten in zuurstof terwijl het zelf onveranderd blijft. *Een belangrijk deel van de NO in de stratosfeer is afkomstig van N_2O: $N_2O + O \rightarrow 2NO$, waarbij het O-atoom afkomstig kan zijn van de fotolyse van N_2O: $N_2O + UV \rightarrow N_2 + O$; waarbij ook de reactie $N_2O + O \rightarrow N_2 + O_2$ mogelijk is. N_2O komt van nature voor in de atmosfeer. Het is van bacteriële oorsprong en het vormt via de aanmaak van ozon door fotolyse van zuurstof en de afbraak via NO afkomstig van N_2O (en met de afbraak door OH beneden 30 km en door een geringe hoeveelheid Cl van natuurlijke oorsprong boven de 30 km) een evenwicht in de aanwezige natuurlijke concentratie ozon. Versterking van deze afbraakcycli doet de balans naar de afbraakkant doorslaan (zie hoofdstuk 4).*

Een soortgelijke serie reacties met chloor (Cl) in plaats van NO zou zeer effectief zijn voor het opruimen van ozon; maar chloor komt maar weinig in de stratosfeer voor - dat was tenminste zo voordat we CFK's in de lucht loslieten. Maar het is geen gemakkelijke zaak om uit te rekenen in hoeverre deze menselijke invloed het natuurlijk evenwicht zal aantasten.

Ondanks het feit dat ingewikkelde moleculen door ultraviolet licht in de stratosfeer worden afgebroken, wat de situatie aanzienlijk vereenvoudigt, moeten chemici met

gecompliceerde berekeningen werken. Bij het uitwerken van de bijzonderheden van de totale ozonbalans (afwegen van verlies door deze processen tegen winst door fotolyse van zuurstof) moeten zij berekeningen maken van reacties waarbij 50 of meer chemische verbindingen, 50 of meer daarmee verbonden fotolyseprocessen en misschien wel 150 chemische kettingreacties betrokken zijn. Men hoeft zich er dus nauwelijks over te verbazen dat ze niet precies kunnen voorspellen wat de gevolgen van verstoringen van het natuurlijk systeem zullen zijn - bijvoorbeeld door toevoeging van een zekere hoeveelheid chloor. Ik zal me hier concentreren op een algemeen beeld van de natuurlijke toestand van de ozonlaag die genoeg verrassingen bevat die er op duiden dat het een wonder mag heten dat de chemici ons überhaupt iets kunnen vertellen over wat er zou kunnen gebeuren, wanneer die natuurlijke toestand wordt verstoord.

Als de stratosfeer wordt verstoord, zal het chemisch systeem een bepaalde tijd nodig hebben om z'n evenwicht terug te vinden (of een ander evenwicht in te stellen) waarbij de inkomende en de uitgaande ozon elkaar opheffen. Maar die benodigde tijd zelf hangt af van de hoogte in de stratosfeer. Hoger dan ca. 40 km is er misschien maar een paar minuten nodig om weer een evenwicht tot stand te laten komen, terwijl dit onder ca. 30 km wel een aantal dagen kan kosten. *En op 20 km hoogte wel enkele honderden dagen.* Omdat de betrokken reacties van de aanwezigheid van zonlicht afhangen en dus de cyclus van dag en nacht moeten volgen (of trachten te volgen) betekent dit dat het onderste deel van de stratosfeer, waar een constante verstoring door interacties met de troposfeer en een toevloed van verse zuurstof plaatsvindt, in het geheel nooit echt in evenwicht zal zijn. Deze eigenschap van de ozonlaag wordt op dramatische wijze geïllustreerd door waarnemingen die verkregen worden door in de atmosfeer naar boven te kijken, en die ons laten zien dat de concentratie van ozon boven onze hoofden 's nachts in feite toeneemt, wanneer er geen energiepakketjes van ultraviolette zonnestraling zijn die de reacties teweeg kunnen brengen.

Deze concentraties worden met behulp van spectroscopie gemeten waarbij het licht van de sterren, de maan of de zon zelf wordt geanalyseerd en de donkere lijnen in het spectrum, die door absorptie in de ozonlaag zijn veroorzaakt, worden opgezocht. *Dergelijke spectroscopische metingen worden uitgevoerd met een zogenaamde Dobson-spectrofotometer.* De intensiteit van deze lijnen geeft aan wat de ozonconcentratie in een kolom boven onze hoofden is en die vertoont een nachtelijke toename. Dit komt waarschijnlijk doordat op hoogten boven ongeveer 40 km, waar de atmosfeer snel op veranderingen reageert, het algemene effect van de reacties de ozonmoleculen vernietigt die op een lager niveau worden geproduceerd en tot deze hoogte omhoog zijn gekomen. 's Avonds komt deze vernietiging binnen een paar minuten tot stilstand. Maar lager, waar het algemene effect van de reacties ozon oplevert, begint de atmosfeer pas te 'merken' dat de zon is ondergegaan wanneer die alweer aan het opkomen is. De hele nacht door komen de enkelvoudige zuurstofatomen, die in de vorige dag door fotolyse zijn ontstaan, zuurstofmoleculen tegen en vormen dan nieuwe ozonmoleculen.

Door reacties waarbij zonlicht en zuurstof zijn betrokken, wordt in de stratosfeer

voortdurend ozon geproduceerd en vernietigd. Het is een misverstand wanneer men daarbij aan een eindige voorraad denkt, zoals olie die eens en voor altijd kan worden vernietigd of aan een zeepbel die, als hij eenmaal is doorgeprikt, voor altijd verdwenen is. Wat zou kunnen gebeuren is dat het totaal van de verzameling van evenwichtsreacties die de laag in stand houdt, kan worden verschoven hetzij in de richting van meer - hetzij in de richting van minder ozon. De geschiedenis van het ontstaan van leven op aarde toont ons duidelijk hoe verstrekkend de gevolgen kunnen zijn.

1.3 Zuurstof en leven

In het begin bevatte de atmosfeer van onze planeet in het geheel geen vrije zuurstof. Toen de planeet net was gevormd uit een grote hoeveelheid kleinere delen, zoals planeetjes en meteorieten, die door de zwaartekracht tegen elkaar aan getrokken werden en toen versmolten tot één klomp in een baan rond de jonge zon, was er nog helemaal geen dampkring. Er kan alleen maar een deken van gassen zijn ontstaan door vulkanische activiteit en het ontsnappen van gassen uit de hete steenmassa. Gevormd door botsingen en inslagen was de jonge planeet inderdaad heet, net zoals een meteoorkrater heet is vlak na de inslag van de meteoor. Vrijwel het hele oppervlak was bij de aanvankelijke vulkanische erupties betrokken. Toen de aarde aan de oppervlakte afkoelde en door de zwaartekracht een beetje ineenkromp, kwam er in zijn binnenste zwaartekrachtenergie vrij die zich voegde bij de energie afkomstig van de van nature aanwezige radio-actieve elementen. Daardoor bleef het binnenste heet en in gesmolten toestand. Door natuurlijke radioactiviteit is de kern van de aarde zelfs nu nog vloeibaar, meer dan vierduizend miljoen jaren later. In al die afgelopen 4,5 miljard jaren nadat het zonnestelsel ontstond, zijn vulkanen, geisers en andere soortgelijke processen gassen blijven uitstoten, zij het in kleiner wordende hoeveelheden naarmate de aarde ouder werd. Wat waren die gassen en waar zijn ze allemaal gebleven?

Het simpele antwoord is dat een groot deel ervan waterdamp was en dat vormde, na afkoeling, de oceanen op aarde. De cijfers die door een aantal deskundigen, die verschillende vulkanen hebben bestudeerd, worden opgegeven, lopen enigszins uiteen maar tegenwoordig zijn vulkanische gassen in het algemeen een mengsel van hoofdzakelijk waterdamp (ongeveer 80 procent) en koolstofdioxide (ongeveer 12 procent) met een behoorlijke hoeveelheid zwaveldioxide (7 procent), een beetje stikstof (1 procent) en sporen van verbindingen die daarmee verwante stoffen bevatten zoals zwavelwaterstof, ammoniak en methaan. Er is geen reden om aan te nemen dat de gassen die in de vroege geschiedenis van de aarde werden uitgestoten, belangrijk van dit mengsel afweken en er zijn sterke aanwijzingen dat ze precies hetzelfde waren. Hoewel veel handboeken ons nog leren dat in de eerste dampkring van onze planeet hoofdzakelijk methaan en ammoniak voorkwamen, wordt dit tegenwoordig als een foutieve veronderstelling beschouwd die is gebaseerd op een niet opgaande vergelijking met Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus, de reuzeplaneten van het zonnestelsel.

Die planeten zijn ver van de zon verwijderd, hebben een enorme massa en zijn geheel

verschillend van de aarde. De twee planeten die in zeker opzicht op de aarde lijken, zijn onze naaste buren: Venus (bijna even groot als de aarde maar dichter bij zon) en Mars (kleiner dan de aarde en verder van de zon). Beide planeten hebben een dampkring die rijk is aan koolstofdioxide. Venus heeft een superdikke deken die de warmte zeer goed vasthoudt en die de temperatuur ver boven het kookpunt van water omhoog heeft doen schieten; Mars heeft een dun laagje atmosfeer met een zwak broeikaseffect dat niet heeft kunnen voorkomen dat de planeet bevroor. De aarde, met een stikstof-zuurstofdampkring, is een buitenbeentje. Men begrijpt nu dat dit een gevolg is van de aanwezigheid van *levende organismen op aarde, waarbij de aanwezigheid van vloeibaar water en de juiste afstand tot de zon essentiële voorwaarden zijn voor het ontstaan van leven zoals wij dat kennen.*
Venus was altijd te warm om daar oceanen te laten ontstaan en Mars is nu te koud, hoewel er eens misschien oceanen van water op zijn oppervlak zijn geweest. Mars is bevroren omdat hij verder van de zon af is dan wij en omdat, daar hij kleiner is dan de aarde, zijn zwaartekracht te klein is om een behoorlijke hoeveelheid lucht vast te houden die de infrarode uitstraling kon tegenhouden. De aarde was en is net op de juiste plaats, op de juiste afstand van de zon, zodat de waterdamp die het grootste bestanddeel van de vulkanische gassen uitmaakt, oceanen van vloeibaar water kon vormen en die vloeibare oceanen hebben de koolstofdioxide efficiënt opgenomen door het vanuit de lucht op te lossen en het vast te leggen in sedimenten die rijk zijn aan carbonaten zoals kalksteen.
Water was ook de sleutel tot het ontstaan van leven op aarde. Hoewel er aanwijzingen voor zijn dat er nog binnen een miljard jaren na het ontstaan van de planeet al ééncellige vormen van leven in de oceanen waren, verschenen de meercellige vormen van leven pas ongeveer 600 miljoen jaren geleden, bijna 4 miljard jaren na het ontstaan van de aarde; plantaardig leven op het land kwam pas ongeveer 420 miljoen jaren geleden tevoorschijn. De bewijzen voor deze algemene beweringen zijn in mijn boek Genesis te vinden*De reden waarom dit zo lang duurde, was hoogstwaarschijnlijk dat de atmosfeer zo lang nodig had om een beetje te gaan lijken op zijn huidige samenstelling. Zodra de atmosfeer was gevormd, zou zuurstof in die vroege dampkring kunnen zijn vrijgemaakt door de fotolyse van waterdamp onder de invloed van de ultraviolette zonnestraling, net zoals zuurstof en waterstof in de huidige stratosfeer van elkaar gescheiden worden. Maar berekeningen laten zien dat dit proces nooit meer zou kunnen produceren dan een duizendste van de zuurstof die er nu in de lucht zit. De onvermijdelijke conclusie is dat de zuurstof in de lucht door de werking van levende organismen is ontstaan. Planten hebben, door fotosynthese, grote hoeveelheden van de beschikbare koolstofdioxide, het deel dat niet in de zeeën was opgelost, omgezet in koolstof en zuurstof. Maar waar kwamen de levende organismen, die dat karwei hebben uitgevoerd, vandaan?
Totdat de atmosfeer een flink zuurstofaandeel had ontwikkeld, bereikte het zonne-UV de grond en steriliseerde het oppervlak van de aarde. Niemand weet precies hoe

* John Gribbin "Genesis" New York: Delta; London: Oxford University Press

leven ontstond, maar alle gegevens wijzen erop dat ultraviolette straling daar een belangrijke bijdrage in kan hebben geleverd door de energie voor het omvormen van moleculen te verschaffen en chemische processen te stimuleren in de waterplassen op het oppervlak van de jonge planeet - plassen die op beeldende wijze oersoep worden genoemd. Te veel ultraviolet zou natuurlijk een slechte zaak zijn geweest want dan zouden ingewikkelde moleculen sneller zijn afgebroken dan ze konden worden opgebouwd. Wanneer er helemaal geen UV zou zijn geweest dan zouden de chemische reacties niet op de vereiste manier zijn verlopen. Ergens moet de balans net goed zijn geweest. Eén boeiende veronderstelling is dat de juiste omstandigheden alleen daar optraden waar ongeveer 10 m water beschikbaar was om bescherming te bieden tegen het ergste UV, zodat de plassen waarin die oersoep ontstond, ongeveer zo diep moeten zijn geweest. Maar wat de details ook kunnen zijn geweest - en het is erg onwaarschijnlijk dat men daar ooit zekerheid over zal krijgen - een feit is dat het leven in de wateren van de aarde houvast kreeg en het milieu begon te veranderen. Voor de eerste levensvormen op aarde was zuurstof een vergif. Het gas reageert heftig met andere stoffen - speciaal de soort stoffen die belangrijk zijn voor het leven - verbindingen die waterstof en koolstof bevatten. Maar het was onvermijdelijk dat het gas werd geproduceerd toen levende organismen koolstofdioxide-moleculen begonnen af te breken, met gebruikmaking van de energie uit zonlicht, en de koolstof voor de opbouw van hun eigen cellen gingen gebruiken. De allereerste organismen voedden zich eenvoudig uit de chemische rijkdommen van de oersoep, de ingewikkelde moleculen ontstonden met behulp van ultraviolette energie. Dit levensproces heet fermentatie; het gaat vandaag nog door wanneer organismen zoals gist toegang krijgen tot voedselmoleculen, zoals suiker, die ergens anders zijn opgebouwd. Maar toen de voorraad oersoep uitgeput begon te raken, oefende dit op de oorspronkelijke organismen een evolutionaire druk uit om andere bronnen van energie te gaan zoeken. Hun antwoord kwam in de vorm van de fotosynthese waarbij zonlicht uit het zichtbare deel van het spectrum wordt genomen, waar de zon het helderste is (zelfs al is ieder energiepakketje niet zo krachtig als de energiepakketjes van het ultraviolet) en dat zonlicht wordt gebruikt om de moleculen die ze nodig hebben, op te bouwen. *Deze fotosynthetische activiteit verloopt als volgt:* $2H_2O + CO_2 + hn \rightarrow CH_2O + H_2O + O_2$ *waarbij hn een deel is van het zichtbare spectrum.*
Sommige van die vroege levensvormen sloten de gevaarlijke, agressieve zuurstof die bij fotosynthese wordt gevormd, op in andere verbindingen. Maar dat voegde een complicatie toe aan het levensproces, een complicatie die voor die levensvormen een achterstand betekende tegenover de organismen die eenvoudig een spoortje zuurstof als afval in de zee loslieten. De analogie van dit soort gedrag en de houding van sommige menselijke wezens tegenover onze vervuiling van het tegenwoordige milieu is te voor de hand liggend om verder uit te werken maar het geeft een aardig ironisch tintje aan de geschiedenis. In het begin had het kleine beetje zuurstof dat losgelaten werd, maar weinig invloed op de omgeving. Het reageerde met andere stoffen en het werd gebonden in geoxideerde oppervlakken van gesteenten. De fotosynthese werd ongeveer 2,7 miljard jaren geleden 'uitgevonden', en enorme afzettingen van ijzeroxiden - roestige 'rode lagen' - worden gevonden in geologische

formaties van ongeveer 2,6 miljard jaren oud. Maar er was een grens aan de hoeveelheid zuurstof die de omgeving kon opnemen, en de zuurstof begon zich onverbiddelijk in de atmosfeer op te hopen. Organismen die zichzelf niet tegen zijn agressieve eigenschappen konden beschermen - waaronder ook organismen die zelf zuurstof uitstootten - werden eenvoudig vergiftigd en stierven uit. Maar andere floreerden. En toen de zuurstofconcentratie eenmaal ongeveer één procent had bereikt, kon het leven een andere truc ontwikkelen - ademhaling.
Bij fermentatie voeden levende organismen zich eenvoudig met chemische rijkdommen die met andere middelen zijn verschaft. Of dat nu is door de werking van ultraviolet licht op de oersoep of door fotosynthese die door andere organismen tot stand is gebracht, ze weten het niet en het kan ze ook niet schelen. Bij fotosynthese gebruiken levende organismen direct de zonne-energie en scheiden zuurstof af als een afvalprodukt. En bij ademhaling gebruiken levende organismen de energie die vrijkomt wanneer zuurstof reageert met de waterstof die in organische verbindingen wordt afgesplitst, en waarbij water vrijkomt en koolstofdioxide wordt teruggeleverd aan het milieu. *Chemisch gezien wordt de ademhaling weergegeven door* $CH_2O + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$. Ademhaling komt neer op een langzame vorm van verbranding en die verschaft meer energie en doet dit ook sneller dan fotosynthese - en dat is de reden waarom men geen bomen ziet rondrennen. Maar de levensvormen, zoals de onze die op ademhaling berusten, konden zich pas ontwikkelen toen de levensvormen die de fotosynthese gebruiken, aan het werk begonnen waren om de atmosfeer van de aarde van een koolstofdioxiderijke in een zuurstofrijke- te veranderen (natuurlijk hangen we ook af van de fotosynthese van planten die ons het voedsel moeten verschaffen waaruit we de koolstof krijgen om met zuurstof in ons lichaam te 'verbranden'; zelfs als we vlees eten, eten we tweedehands planten). Zonder vrije zuurstof in de atmosfeer zou ademhaling niet mogelijk zijn en het leven van de mens - onder anderen - zou onmogelijk zijn. En zonder zuurstof in de atmosfeer zou er geen ozonlaag zijn, fel ultraviolet licht zou tot op de grond doordringen en er zou voor ons leven geen vooruitzichten zijn om op aarde te blijven bestaan. Volgens sommige berekeningen zou zelfs nu al een bescheiden reductie van de concentratie in de ozonlaag ernstige gevolgen kunnen hebben, speciaal, maar niet uitsluitend, voor mensen met een lichte huid.

1.4 Kanker, gewassen en vee

In het begin van de jaren zeventig begonnen mensen buiten de wetenschappelijke wereld hun oren te spitsen en aandacht te schenken aan de veronderstelde gevaren voor de ozonlaag toen hieraan het beladen woord 'kanker' werd gekoppeld. Leven, en daarbij ook het menselijk leven, is buitengewoon gevoelig voor ultraviolette straling met golflengten tussen ongeveer 290 nm en 320 nm - zo gevoelig dat deze band van het spectrum het biologisch actief ultraviolet wordt genoemd, ook bekend als UV-B. Dat is, zoals we hebben gezien, juist dat deel van het spectrum waarvan de stratosferische ozon de meeste, maar niet alle, doorvallende straling absorbeert. UV-B is een klein gedeelte van de zonnestraling die de grond bereikt. Hij is krachtiger boven in de bergen waar minder ozonmoleculen aanwezig zijn om het

karwei van het opruimen van het UV te klaren, en in de tropen waar de zon met volle kracht omlaag schijnt. Straling met golflengten kleiner dan 290, die thans volledig door de stratosfeer wordt geabsorbeerd, kan nucleïnezuren (RNA en DNA) verwoesten en ook eiwitten, de basismoleculen voor het leven; in de band tussen 240 nm en 290 nm spreekt men van UV-C. Niemand kan met zekerheid zeggen wat de gevolgen zouden zijn wanneer deze straling tot op de grond zou worden doorgelaten. Maar omdat UV-B inderdaad de grond bereikt, op sommige plaatsen sterker dan op andere, is het mogelijk om een juiste algemene regel op te stellen voor wat er zou gebeuren wanneer de intensiteit met een paar procent zou toenemen, gewoon door de huidige situaties op verschillende plaatsen van de wereld met elkaar te vergelijken. UV-B verbrandt de huid, en mensen die aan meer UV-B zijn blootgesteld hebben meer kans op bepaalde vormen van huidkanker en daartoe behoort ook de kwaadaardige melanoma, die dikwijls dodelijk is. Door de kankerstatistieken van verschillende gebieden met elkaar te vergelijken hebben onderzoekers die werken voor de U.S. Environmental Protection Agency (EPA), berekend dat voor iedere 1 procent afname van de ozonconcentratie in de stratosfeer er elk jaar 4 procent meer niet-kwaadaardige vormen van huidkanker in de Verenigde Staten zouden optreden - dus nog eens 10.000 à 20.000 slachtoffers boven op de huidige aantallen. Die kankers zijn verontrustend, maar ze kunnen gewoonlijk chirurgisch verwijderd worden zonder kwade gevolgen. De kwaadaardiger vormen van melanoma zijn minder nauw gekoppeld aan UV-B maar er zijn aanwijzingen dat elke 1 procent toename van de straling de mortaliteit door deze ziekte ook met 1 procent zal verhogen. In de jaren zeventig was in de Verenigde Staten het gemiddelde jaarlijkse optreden van kwaadaardige melanoma ongeveer 4,2 gevallen op iedere 100.000 mensen. Dit is een bedreiging die ongeveer net zo groot is als die van borstkanker en die was verantwoordelijk voor 1 procent van alle sterfgevallen door kanker.

Maar geen van deze kankervormen ontwikkelt zich onmiddellijk; ze vormen zich op latere leeftijd als het gevolg van blootstelling aan UV-B over een zekere tijdsduur. De nu optredende blootstelling aan straling hoopt voor de toekomstige tientallen jaren problemen op, zowel voor de individuen als voor de medische professie, *en zelfs voor levensverzekeringsmaatschappijen.*

Inderdaad is in de afgelopen decennia het voorkomen van kwaadaardige melanoom in praktisch alle landen toegenomen. Dit is vermoedelijk het gevolg van veranderde gewoonten, zowel in de zin dat moderne kleren grotere delen van ons lichaam aan de zon blootstellen, als de neiging die de mensen tegenwoordig hebben om meer tijd aan zonnebaden te besteden. Voor Victoriaanse dames zou dat een onbegrijpelijke gedachte zijn want die cultiveerden juist een bleek en interessant uiterlijk als teken dat ze niet voor hun bestaan hoefden te zwoegen. Men moet bovendien bedenken dat de mensen tegenwoordig langer leven onder andere omdat allerleid ziekten overwonnen zijn. De kans dat sluimerende ziekten zich op de oude(re) dag openbaren, wordt dus groter. In de negentiende eeuw waren de zwoegers in het veld waarschijnlijk al lang aan iets anders dood gegaan voordat ze de leeftijd hadden bereikt waarop de kwaadaardige melanoom zich manifesteert. Tegenwoordig is echter het uit de zon blijven niet het volledige antwoord op de vraag hoe te handelen

indien wat meer UV-B de grond zal bereiken in de toekomst. Er zijn studies waaruit volgt dat deze vormen van kanker meer voorkomen onder mensen die een leven binnenshuis leiden maar die zo nu en dan over korte perioden aan intense UV-B worden blootgesteld, zoals kantoorwerkers die elk jaar naar het zuiden vliegen voor hun vakantie. Een bruine kleur over het hele jaar schijnt ten minste enige bescherming tegen de schadelijke straling te bieden - en dat is een schrale troost als je een kantoorwerker bent. Maar als gevolg van een toegenomen blootstelling aan UV-B wordt huidkanker tegenwoordig beschouwd als één van de vele risico's voor de menselijke gezondheid. *Huidkanker is een van de meest voorkomende vormen van kanker bij blanken. De meest voorkomende vorm behoort tot de huidcarconomen, die inderdaad sterk gekoppeld is met UV-B belasting, maar relatief niet zo dodelijk is. De meest levensbedreigende vorm is het melanoom (kanker van de pigmentcellen), waarvoor een erg onzekere relatie met UV-B geldt.* De straling onderdrukt ook de activiteit van het menselijk immuunsysteem, het natuurlijk afweermechanisme van het lichaam. Eén van de gevolgen zou zijn dat tumoren gemakkelijker groeien zonder dat het lichaam met succes terugvecht. Volgens een EPA-rapport dat in 1987 werd gepubliceerd moet men ook tot de gevolgen rekenen dat er waarschijnlijk meer infecties zullen optreden door het herpesvirus (hepatitis) en door parasieten veroorzaakte infecties van de huid. Anders dan het probleem van de huidkanker, dat erger is voor mensen met een blanke huid, zijn dit problemen waar mensen met alle huidskleuren mee te maken krijgen. Niemand heeft nog in getallen kunnen uitdrukken hoe deze problemen toenemen bij elk procent toename van de hoeveelheid UV-B die de grond bereikt. Maar in nog een andere studie beweert Sidney Lerman van de Emory University in Atlanta, Georgia, dat 1 procent afname van de hoeveelheid ozon boven ons hoofd het aantal slachtoffers van staar in de Verenigde Staten met 25.000 zou doen toenemen. De boodschap van al deze studies is dezelfde - de menselijke gezondheid zal er onder lijden als de ozonlaag wordt aangetast.

Hoe staat het met dieren en planten? De meeste planten zijn eenvoudig nog niet op de gevolgen van een toename van UV-B onderzocht, maar van de 200 waarbij dat wel is gedaan, vertoonde tweederde op zijn minst enige gevoeligheid. Soja, één van de belangrijkste moderne landbouwgewassen, brengt 25 procent minder op wanneer het UV-B met 25 procent toeneemt. In de oceanen schijnt het fytoplankton, de kleine drijvende organismen die aan de basis van de voedselketen staan, ook te lijden onder een toenemende blootstelling aan UV-B, en van het larvestadium van sommige vissen is bekend dat het gevoelig is voor straling. Vissen die nu commercieel worden gevangen, zouden kunnen worden geschaad waardoor een extra beperking aan de voedselvoorraden voor de groeiende wereldbevolking zou worden opgelegd. Zelfs de favoriet van de milieubeweging, de walvis, zou in gevaar komen wanneer het krill waarvan hij leeft, ongunstig zou worden beïnvloed door een toenemend UV-B. Wat de dieren betreft heeft onderzoek al vastgesteld dat het vee te lijden heeft van een toename van de kwalen die bekend staan als 'cancer eye' en 'pink eye' wanneer ze aan meer UV-B worden blootgesteld; naar de gevolgen voor de wilde dieren en de natuurlijke begroeiing van de aarde kan men nu alleen nog maar raden.

Hoewel de gevolgen van een aanzienlijke toename van UV-B duidelijk negatief zijn,

kan het er misschien op lijken dat er weinig of geen reden voor bezorgdheid is als natuurlijke fluctuaties de concentratie van ozon belangrijk kunnen laten veranderen van maand op maand of van jaar op jaar (of dat van het ene tiental jaren op het andere) en als er tussen de polen en de equator al grote verschillen zijn in blootstelling aan UV-B. Hoe groot moet een verandering zijn om significant te worden? Zo is bijvoorbeeld boven Philadelphia de hoeveelheid UV-B die 's zomers binnenkomt, zes maal zo groot als in de winter. Maar kalm afwachten is zeker misplaatst! Indien de gemiddelde ozonconcentratie met één of twee procent zou afnemen zou dat zelfs niet ontdekt kunnen worden tegen de 'ruis' van de natuurlijke fluctuaties, maar er zou toch nog altijd een toename van het gemiddelde UV-B zijn die gedurende lange tijd iedere plek op aarde zou bereiken. Als u er niet van overtuigd bent dat dit er iets toe doet, moet u eens kijken naar een soortgelijke verandering van de temperatuur. Een verandering van 3,5 °C van dag tot dag of tussen dag en nacht is heel gewoon - niets om u over op te winden. Maar een verschuiving van 3,5 °C van de gemiddelde temperatuur op de wereld, in één richting zou ons in een volledige ijstijd laten onder gaan, of in de andere richting, de ijskappen aan de polen laten smelten waardoor steden als New York, London en Leningrad onder zouden lopen.
De zelfde soort van analogie kan ons ook duidelijk maken wat de regionale betekenis van de afbraak van de ozon kan zijn. De gemiddelde jaartemperatuur in Houston, bijvoorbeeld, is ongeveer 21 °C en in Chicago ongeveer 10 °C. In beide steden wonen mensen en die houden het redelijk goed uit. Sommigen geven er misschien de voorkeur aan om van Houston naar Chicago te verhuizen omdat de temperatuur daar gemiddeld 11 °C lager is. Als ze dat doen gaat het leven gewoon door. Maar het zou heel wat anders zijn wanneer de hele wereld 11°C zou afkoelen*. En zelfs wanneer er grote natuurlijke fluctuaties in de ozonconcentratie optreden zou een verlaging van de gemiddelde concentratie betekenen dat er meer UV-B het aardoppervlak zou bereiken dan enig hier levend organisme ooit heeft ondergaan; en dat zou optreden als het moment van de grootste neerwaartse fluctuatie in het voortdurend patroon van veranderingen zou zijn bereikt.
Dus de ozonlaag, een giftige laag rondom de aarde, staat in nauw verband met de aanwezigheid van leven op aarde. Dat is voor ons van persoonlijk belang, maar het is ook een teken van leven, een proclamatie in het heelal dat de aarde, onder alle planeten van ons zonnestelsel, het leven huisvest.
Voor ons is vuur iets wat we vanzelfsprekend vinden. Maar in het hele universum is een planeet die een atmosfeer heeft die zo rijk is aan een agressieve stof als zuurstof, dat verbranding vrij aan het oppervlak kan optreden, een zeer afwijkend verschijnsel. De natuurlijke toestand van een chemisch systeem dat aan zichzelf is overgelaten, is dat men alle mogelijke reacties zich ziet voltrekken, waarbij de actieve ingrediënten in stabiele verbindingen opgesloten worden. Gassen zoals koolstofdioxide zijn

* Ik heb deze temperatuuranalogieën ontleend aan 'The Ozone War' waarin het verhaal van de strijd over de ozon in begin en midden van de jaren zeventig wordt verteld. Dotto L., H. Schiff 'The Ozone War' New York: Doubleday, 1978.

inderdaad stabiel en reageren niet krachtig met de meeste andere stoffen. Een intelligent vreemd schepsel dat ons zonnestelsel bezoekt, zou van veraf de dampkringen van Venus en Mars kunnen onderzoeken, opmerken dat ze in hoofdzaak uit koolstofdioxide bestaan en concluderen dat het stabiele systemen zijn waar niet veel aan de hand is. Maar dezelfde afstandsobservaties van de aarde zouden een atmosfeer laten zien die rijk is aan zuurstof, dat door chemische reacties hoort te worden opgesloten, en nog sporen bevat van het zelfs nog agressievere ozon. Zo'n atmosfeer is chemisch onstabiel, dus in een of andere dynamische balanstoestand, maar niet in een stabiel evenwicht. Het zou een voor de hand liggende plaats zijn om eens te kijken naar de interessante biologische processen die zich daar afspelen.
De biosfeer, waartoe dit merkwaardige fenomeen van een chemisch onstabiele atmosfeer behoort, en die voor het leven noodzakelijk is, er mee samenhangt, ja er wellicht door wordt bepaald, wordt wel aangeduid met de term "Gaia" (Moeder Aarde), een zichzelf regulerend systeem, dat hierna nog ter sprake zal komen.
En hoeveel ozon zit er in die kritieke laag, die ons beschermt tegen een onaangename, of dodelijke, blootstelling aan ultraviolette zonnestraling? In de laag van de atmosfeer tussen 14,5 en 48 km, uitgedrukt in de hoogten, dus meer dan twee maal zo dik als de troposfeer waarin we leven - zal ongeveer vier of vijf miljard ton ozon aanwezig zijn. Als al dat gas omlaag kon worden gebracht naar het zeeniveau en gelijkmatig over de hele aardbol zou worden verdeeld, dan zou het gewicht van de atmosfeer het in elkaar drukken tot een laagje van maar ongeveer 2 à 3 mm dikte. Dat lijkt niet erg veel gas om zo'n belangrijke taak te vervullen. Maar de dikte van de hele atmosfeer van de aarde is, vergeleken met de grootte van onze planeet, niet meer dan de dikte van een appelschil vergeleken met de afmeting van de appel. In de geïndustrialiseerde wereld is een reis van 16 km nauwelijks van enige betekenis. Sommige mensen leggen dagelijks veel grotere afstanden af naar hun werk en terug, terwijl anderen een wandeltocht van 16 km op het weekend zien als een mooie gelegenheid om de benen te strekken en van het landschap te genieten. Maar om 16 km recht omhoog te gaan is groot technisch vernuft nodig (dat is de hoogte waarop de Concorde vliegt) en dat brengt ons in het onderste deel van de stratosfeer die zichzelf aan de rand van de ruimte bevindt. De mensen hebben zich pas gerealiseerd dat er een menselijke bedreiging van de ozonlaag zou kunnen bestaan met alles wat daaraan vastzit, toen de ruimtetechnologie was gevorderd tot het punt waarop het er naar uit ging zien dat vluchten tot zulke ontzagwekkende hoogten een mogelijke routinezaak begonnen te worden.

Literatuur

Chapman, S. - On ozone and atomic oxygen in the upper atmosphere - *Phil.Mag.* 10, 369-383 (1930)

Crutzen, P.J. - Ozone production rates in an oxygen-hydrogen-nitrogen oxyd atmosphere - *J.Geoph.Res.* 76, 7311-7327 (1971)

Crutzen, P.J. - A discussion of the chemistry of some minor constituents in the stratosphere and troposphere - *Pure and Appl.Geoph.* 106-108, 1385-1399 (1973)

En voor meer algemene beschrijvingen:

Junge, C.E. - *Air chemistry and radioactivity* - Academic Press, New York, London (1963)

Mészáros, E. - *Atmospheric chemistry-Fundamental aspects* - Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York (1981)

Hoofdstuk 2

2.1 Een supersonisch dwaalspoor?

De Concorde - het Engels-Franse supersonische transportvliegtuig (SST) - wordt dikwijls beschouwd als een soort witte olifant. Er zijn maar weinig van gebouwd en ze worden alleen maar gebruikt door de nationale luchtvaartmaatschappijen van de landen die de Concorde hebben ontwikkeld. Alleen wanneer men de enorme ontwikkelingskosten afschrijft en doet of die nooit zijn betaald en dan alleen maar kijkt naar wat het kost om het in bedrijf te houden, zou men kunnen zeggen dat het zijn geld opbrengt. Maar gezien in het kader van het zich ontwikkelende begrip dat door menselijke activiteit schade aan de ozonlaag kan worden aangebracht, lijkt het er meer op dat de Concorde een supersonisch dwaalspoor heeft getrokken. Het feit dat men bezig was om dit vliegtuig te ontwikkelen en dat er een mogelijkheid was dat er ook nog een concurrerende Amerikaanse SST zou worden gebouwd, was aanleiding tot het maken van berekeningen. Deze wezen erop dat ernstige schade aan de ozonlaag zou kunnen worden aangericht wanneer er maar genoeg vliegtuigen van dit soort op een hoogte van 16 km en meer zouden gaan vliegen. Latere berekeningen lieten zien dat de schadelijke gevolgen niet zo erg zouden zijn als eerst werd gevreesd en toen er maar zo weinig SST's in bedrijf werden genomen is dit bijzondere probleem uit zichzelf al verdwenen.
Maar de aan de orde gestelde zaken kwamen nu ter sprake in de bredere context van de gevolgen van menselijke activiteiten voor de ozonlaag- en er is altijd het risico dat een toekomstige regering in de verleiding zou komen om de ontwikkeling van een vloot van super SST's goed te keuren. Er zijn inderdaad al tekenen die daarop wijzen en er wordt zowel in de Verenigde Staten als in Europa gesproken over hypersonische vliegtuigen. Deze zouden als normale vliegtuigen starten om dan in een baan om de aarde terecht te komen net zo als een ruimteveer (space-shuttle). Ook het ruimteveer zelf zou, als dat ooit veelvuldig genoeg zou worden gebruikt, op z'n weg door de stratosfeer aanzienlijke hoeveelheden ozon kunnen vernietigen. Er is dus geen enkele reden om de zaken maar op hun beloop te laten, in tegendeel, er is alle reden om de bijzonderheden van het eerste ozondebat nauwkeurig na te gaan als een waarschuwing voor de toekomst.

2.2 We komen vliegend in moeilijkheden

Het ozondebat begon met het werk van James McDonald van de Universiteit van Arizona. Op verzoek van de U.S. National Academy of Sciences (NAS) voerde hij in de jaren zestig een onderzoek uit naar de gevolgen die de SST's voor het milieu zouden kunnen hebben. In die tijd hadden mensen die zich zorgen maakten bij het vooruitzicht van grote aantallen vliegtuigen in de stratosfeer, er op gewezen dat er

een mogelijkheid bestond dat de waterdamp die door het vliegtuig wordt uitgestoten (een van de uitlaatgassen van de motoren), grote condensatiesporen en wolken van fijne ijskristallen zou kunnen opleveren die maar langzaam zouden oplossen en het klimaat op aarde zouden kunnen veranderen door de zonnewarmte terug te kaatsen, voordat die in de troposfeer zou kunnen doordringen. McDonald was lid van de groep die zich binnen de Academy met weers- en klimaat-veranderingen bezighield, en een expert op het gebied van ijskristallen in de atmosfeer. Zijn berekeningen toonden aan dat dit gevreesde klimato-logische gevolg van een vloot van SST's in feite geen serieus probleem zou opleveren en die conclusies werden in 1966 gepubliceerd.

Het was tegen het einde van de jaren zestig dat het werk aan de Concorde (en zijn gelijksoortige Russische 'kopie', de Tupulev 144) begon op te schieten en dat ook Boeing bezig was met z'n plannen voor een verbeterde Amerikaanse SST die hoger en sneller dan de Concorde zou kunnen vliegen en die meer passagiers zou kunnen meenemen (die SST werd de 2707 genoemd). De Academy vroeg toen aan McDonald om nog eens te kijken naar de manier waarop zulke SST's de stratosfeer zouden kunnen beïnvloeden en toen hij daarmee bezig was besefte hij dat dit vliegtuig in principe de ozonlaag zou kunnen vernielen.

De manier waarop een vliegtuig de ozonlaag zou kunnen aantasten is in algemene zin gemakkelijk in te zien maar het is moeilijk om die aantasting precies te berekenen. Elke machine die grote hoeveelheden lucht opzuigt en daaruit de zuurstof gebruikt om brandstof bij hoge temperaturen te verbranden produceert in zijn uitlaatgassen ook stikstofoxide -per slot is stikstof verreweg het grootste bestanddeel van de atmosfeer. De groep oxides van stikstof wordt door de atmosferisch chemici NO_x genoemd en daartoe behoren diverse stoffen; de eenvoudigste, stikstofoxide (NO), ruimt, zoals we hebben gezien, de ozon zeer efficiënt op en ook andere oxides van stikstof spelen een rol in de reacties die ozon uit de stratosfeer verwijderen. Uit de brandstof zelf produceren de motoren ook oxides van waterstof, water daarbij inbegrepen, die door de chemici met HO_x worden aangeduid. Water zelf vernietigt geen ozon, maar het hydroxylradicaal HO doet dat wel, door een soortgelijk stel reacties als die waarbij NO betrokken is. McDonald was zelf niet zo bezorgd over de effecten van NOx op de stratosfeer, maar hij begon er zich zorgen over te maken dat HOx ernstige gevolgen voor de ozonlaag zou kunnen hebben.

De basisreacties die de aantasting van ozon typeren, zijn de volgende:

$$X + O_3 \rightarrow XO + O_2$$
$$XO + O \rightarrow X + O_2$$

Hierbij staat X voor NO, Cl, Br, OH of H. De reacties zijn katalytisch in X, d.w.z. dat X na afbraak van een molecuul O_3 weer opnieuw beschikbaar komt om een volgend O_3-molecuul af te breken.

In 1970 leek het er sterk op dat de SST's als een belangrijk transportmiddel, speciaal op de grootste Noord-Atlantische route zouden worden ingezet. De mensen van de vliegtuigindustrie spraken erover dat er een vloot van 800 SST's tussen 1985 en 1990 in bedrijf zou komen. Toen McDonald dat aantal in zijn berekening betrok kwam hij tot de conclusie dat zo'n luchtvloot een 4 procent daling van de ozonconcentratie

in de stratosfeer tot gevolg zou hebben. Toen hij met deze conclusie kwam, wees hij er op dat 1 procent daling van de ozonconcentraties een jaarlijkse toename van 5000 tot 10.000 gevallen van huidkanker als gevolg zou hebben, alleen al in de Verenigde Staten -niet een totaal van 5000 tot 10.000 gevallen, maar elk jaar zoveel nieuwe gevallen. Zeer bezorgd als hij was over deze ontdekking van het verband tussen het vliegen met SST's en kanker, rapporteerde McDonald voor eind 1970 zijn conclusies zowel bij de Academy als bij de Department of Transportation. In maart 1971 sprak hij in het openbaar zijn bezorgdheid uit toen hij optrad als getuige-deskundige bij hoorzittingen van het Congress over een wetsontwerp betreffende het voortzetten van de financiële steun aan het Boeing SST-project. Zijn optreden was emotioneel en soms moeilijk te volgen en waarnemers meldden dat hij de schijn wekte dat hij de SST wilde bestrijden in plaats van eenvoudig de wetenschappelijke feiten te leveren en die voor zichzelf te laten spreken. McDonald maakte geen vrienden op die hoorzitting maar het probleem was nu aan de dag getreden en het werd al gauw het onderwerp van bredere wetenschappelijke discussies.
In feite hadden al andere onderzoekers vóór McDonald berekeningen betreffende de gevolgen van zowel HO_x als NO_x op de stratosfeer gepubliceerd, maar die hadden niet zo'n algemene belangstelling gekregen. De oxides van waterstof en stikstof komen allebei van nature in het milieu voor en ze hadden al voordat de SST op het toneel verscheen de belangstelling van wetenschappers die de stratosfeer bestudeerden. John Hampson, een Engelsman die in Canada werkte, had het HO_x-probleem aangepakt en ook Halstead Harrison, een onderzoeker van Boeing publiceerde in november 1970 cijfers die met die van McDonald overeenkwamen, maar Harrison had daaruit geen alarmerende conclusies getrokken. Ook al in 1970 wees Paul Crutzen, een in Nederland geboren onderzoeker die in verschillende landen gewerkt heeft, op het belang van katalytische kettingreacties waar NO_x bij betrokken is (hij legde zelfs de schakel met SST's), erop wijzende dat de voorgenomen luchtvloot evenveel NOx in de stratosfeer zou brengen als de natuurlijke processen nu al doen. Maar hij was toen nog een jonge onderzoeker, oorspronkelijk opgeleid als meteoroloog en niet als chemicus, die nog wat terug-houdend was met het voor het wetenschappelijk forum brengen van z'n ideeën. Hij kreeg niet de gelegenheid om te getuigen voor een hoorzitting van het Congress en, wat erg belangrijk was, hij deed niet de stap die McDonald maakte door de ozonafname met kanker te verbinden.
In de tijd dat McDonald van zich liet horen was er een groep die door de Department of Commerce Technical Advisory Board was ingesteld, bezig de wetenschappelijke gegevens over de gevolgen die de voorgestelde SST luchtvloot op het milieu zou kunnen hebben, te verzamelen. Hoewel in het begin de stratosferische chemie niet één van de belangrijkste onderwerpen voor de groep was, was daar wel een chemicus bij, Joe Hirschfelder van de University of Wisconsin, die de andere leden ertoe wist te brengen een wetenschappelijke bijeenkomst over dit onderwerp te beleggen. Die werd op 18 en 19 maart 1971 te Boulder, Colorado gehouden en daar was het dat het mogelijke belang van NO_x in SST-uitlaatgassen voor het eerst ruime aandacht kreeg. De doorbraak kwam van Harold Johnston van de University of California te

Berkeley, die het probleem van de fotochemische smog bij de grond had bestudeerd, waar NO_x inderdaad een rol speelt bij de produktie van ozon. McDonald had op de eerste dag van de bijeenkomst zijn berekeningen over HO_x gepresenteerd en was daar openlijk uitgescholden door het gehoor omdat hij in de discussies kanker erbij gehaald had. Hoewel zijn werk nu wordt gewaardeerd en erkend heeft McDonald het gedurende het begin van 1971 zwaar te verduren gehad van de leden van het Congress, de pers en zijn collega-wetenschappers. Zijn werk aan ozon werd op dezelfde manier beoordeeld als zijn belangstelling voor UFO's waar algemeen om gelachen werd, zelfs al was het enige wat hij zei dat de berichten over UFO's wetenschappelijk moesten worden onderzocht om vast te stellen of daar wel iets of niets aan de hand was. Die zomer pleegde hij zelfmoord, maar er is geen bewijs dat die het gevolg was van zijn betrokkenheid bij de strijd over de ozon.
Op de tweede dag van de bijeenkomst presenteerde Johnston een gedetailleerde chemische analyse van de NO_x in de stratosfeer -hij was zich toen niet bewust van het werk dat Crutzen daaraan het jaar daarvoor had gedaan- en hij kwam tot de conclusie dat, hoewel er nog veel onzekerheden waren, de activiteiten van een luchtvloot van 500 SST's in twee jaar tijds de ozonconcentratie in de stratosfeer met ten minste 10 procent en misschien veel meer zou verlagen. In de discussies die op zijn officiële voordracht volgden waren zijn collega's het, zij het met enige aarzeling, met hem eens dat hij een aspect van de manier waarop de SST-uitstoot de stratosferische chemie zou kunnen beïnvloeden, op het spoor was gekomen dat wel eens ernstig zou kunnen zijn en tot nu toe was verwaarloosd. Hoofdzakelijk op grond van deze bijeenkomst in Boulder rapporteerde de groep aan de minister van handel dat aan de SST geen verklaring van onschadelijkheid voor het milieu kon worden uitgereikt en dat meer onderzoek van de chemie van de stratosfeer nodig zou zijn voordat het mogelijk zou zijn "om uit te maken of een groot aantal vluchten van supersonische vliegtuigen al of niet een reëel gevaar voor het milieu van de mensheid zou opleveren"*
Het SST-project was al in financiële moeilijkheden en het stond op het punt om door het Congress te worden gestopt. Boeing kreeg nooit het geld waarom ze hadden gevraagd en wat hen in staat had moeten stellen om twee prototypes van het nieuwe vliegtuig te bouwen. De schrik door het gelegde verband tussen SST's, ozon en huidkanker was geen beslissende factor; eigenlijk werd de beslissing in hoofdzaak op economische gronden genomen. Maar die schrik over de kanker bereikte wel de koppen van de kranten en maakte aan het brede publiek de kwetsbaarheid van de ozonlaag duidelijk. Hij zette bovendien ten minste een paar wetenschappers aan het werk om nauwkeuriger dan ooit te voren de stratosferische chemie te onderzoeken en daarbij vast te stellen welke reacties belangrijk zijn (en hoe snel die in de stratosfeer verlopen) en welke kunnen worden verwaarloosd. Dat onderzoek is een heel moeilijk proces, waar veel uren rekenwerk op moderne computers mee zijn gemoeid en waarbij het gaat om een grote vaardigheid bij het meten van de snelheid waarmee

* aangehaald uit Dotto en Schiff, The Ozone War, New York, Doubleday (1978).

chemische stoffen onder verschillende omstandigheden in het laboratorium reageren. Met betere computers en betere scheikunde was het zeker dat met de jaren de getallen die uit die berekeningen tevoorschijn komen, zouden veranderen, maar hopelijk zouden ze steeds beter worden.
De zaak kwam in augustus 1971 echt in beweging, toen Johnstons' berekeningen, zoals ze ook al tijdens de Boulder-bijeenkomst waren gepresenteerd, in het tijdschrift Science werden gepubliceerd. Daarbij werd de hele wetenschappelijke wereld erop gewezen dat het werkelijke probleem van het vliegen van SST's in de stratosfeer niet de uitstoot van HOx maar die van NOx was. De definitieve uitspraak over dit punt, in het licht van de beschikbare chemische kennis, kwam in 1974 als resultaat van een driejarig onderzoeksprogramma, waarbij een duizend wetenschappers waren betrokken en dat 21 miljoen dollar heeft gekost. Dit programma, dat door het Climatic Impact Assessment Program (CIAP) was georganiseerd, stelde vast dat een vloot van 500 Boeing 2707's die zeven of acht uur per dag in de stratosfeer zou vliegen, daarbij per vliegtuig ongeveer één deel stikstofoxide op 72 delen gebruikte brandstof uitstotend, een verlaging van ongeveer 15 procent in de totale ozonconcentratie van de stratosfeer van het noordelijk halfrond teweeg zou brengen. Zelfs zou er in het zuidelijk halfrond nog een verlaging van 8 procent optreden, hoewel daar maar weinig SST's zouden vliegen. Johnston had gelijk en in zekere zin werd ook McDonald gerehabiliteerd (hoewel hij wat betreft de betekenis van HO_x geen gelijk had) door de gevolgtrekking in het CIAP-rapport dat iedere Boeing 2707 die in bedrijf zou worden gesteld, een toename van enige honderden gevallen van huidkanker per jaar en ten slotte verschillende doden tot gevolg zou hebben. Maar dat was tegen het midden van de jaren zeventig een vrijwel academische kwestie geworden omdat niet te verwachten was dat zulke vloten SST's in bedrijf zouden worden gesteld en omdat er tal van andere redenen waren voor bezorgdheid over de ozonlaag. Hoewel de discussies in de strijd over het al of niet verlenen van landingsrechten voor de Concorde in Noord-Amerika telkens weer oplaaiden, was de kwestie van de SST's tegen het eind van de jaren zeventig in de publieke belangstelling voor het milieu al sterk op de achtergrond geraakt.
Wanneer het publiek zich nog steeds zorgen zou hebben gemaakt over de gevolgen van SST's voor de ozon dan zou dat zeer verbaasd hebben gestaan en er heel weinig van hebben begrepen toen verbeterde berekeningen (betere chemie en betere computermodellen) in 1977 aangaven dat de bestaande ontwerpen van deze vliegtuigen tenslotte toch weinig gevolgen voor de stratosfeer zouden hebben. Deze verandering was het gevolg van het feit dat de nieuwe berekeningen een andere hoogte in de atmosfeer aangaven waarop de reacties met NO_x niet meer de aanmaak van ozon begunstigen zoals ze dat in de smoglagen doen, maar overgaan naar een vernietiging van ozon, zoals ze dat in de stratosfeer doen waar heel andere omstandigheden aanwezig zijn (en waar ozon aanwezig is om afgebroken te worden). De Concorde vliegt nog maar net in de onderste lagen van de stratosfeer op een hoogte van ongeveer 15 km. De vroegere berekeningen hadden, wat de gevolgen van NO_x betreft, het omslagpunt tussen aanmaak en vernietiging van ozon op ongeveer 10 km gelegd, zodat de uitstoot van de Concorde ruim binnen de zone van de vernietiging

terecht zou zijn gekomen. De latere getallen bepaalden de positie van het omslagpunt aan de onderkant van de stratosfeer zelf, zodat men nu de NO_x op de hoogten van de Concorde maar als een kleine bedreiging voor de ozon beschouwt. Maar tegen de tijd dat dit werd ontdekt kwam er een ander voertuig, dat nog hoger vliegt, van de tekenborden af. Het ruimteveer (de space-shuttle) vliegt nu eenmaal dwars door de stratosfeer en braakt daarbij een enorme hoeveelheid gassen uit. Wat voor gevolgen zou dat voor de ozon hebben?

De plannen voor een Amerikaanse vloot van 500 supersonische Boeings 2707 zijn dus in de jaren zeventig op de achtergrond geraakt omdat de economische basis daarvoor ontbrak en er bovendien door Crutzen (1970-1971), Johnston (1971) en later door de CIAP (1974) op was gewezen dat de gevolgen voor de ozonlaag aanzienlijk zouden zijn.

Merkwaardig genoeg is daar in 1977 blijkbaar, op grond van 'betere chemie en betere computermodellen' weer een afzwakkende correctie op gekomen in die zin, dat de vluchthoogte van de Concorde, op 14 à 15 km, net nog onder de stratosfeer zou liggen en daarom toch geen gevaar voor de ozonlaag zou opleveren.

Inmiddels praat men zowel in Engeland en Frankrijk als in de Verenigde Staten en Japan al weer over een vloot van supersonische vliegtuigen en men meent dat daar in het begin van de volgende eeuw een economische basis voor aanwezig zal zijn. Zo is in september 1988 bij de Universiteit van North Dakota de 'First International Conference on Hypersonic Flight in the 21st Century' gehouden. Daarbij concludeerde men onder meer dat de nieuwe vliegtuigen een groot deel van hun vlucht in de stratosfeer, op zo'n 35 km hoogte, zouden afleggen.

Met steun van NASA en het U.S. Department of Energy gingen Johnston, Kinnison en Wuebbels aan het werk om de studies van de NO-bedreiging voor de stratosferische ozonlaag te moderniseren op grond van de nieuwste chemische en fysische kennis van de atmosferische processen. In de Journal of Geophysical Research D13 van 20 november 1989 meldden zij dat de uitstoot van verbrandingsgassen, met name NO, op een hoogte van 15 km wel degelijk schade aan de ozonlaag toebrengt en dat deze schade met de vlieghoogte zal toenemen tot een maximum bij ongeveer 25 km. Dat is de vlieghoogte die men voor de toekomstige hypersonische vliegtuigen (HSCT = High Speed Civil Transport) in gedachten heeft. De 'betere chemie en betere computermodellen' wijzen op een grotere kwetsbaarheid door NO dan voorheen werd aangenomen. De conclusie van de auteurs luidt dan ook dat een grote vloot van stratosferische vliegtuigen met de verbrandingstechnologie van de huidige burgervliegtuigen een sterke afname van de stratosferische ozon zal veroorzaken.

De spreiding van de doorgerekende situaties houdt ook rekening met de plannen van de NASA ingenieurs om vóór 1997 de NO-uitstoot, bij een zelfde brandstofverbruik, met een factor 8 à 10 omlaag te brengen. Men spreekt zelfs over de theoretische mogelijkheid voor een reductie met een factor 100. Maar al zou NASA slagen in de voorgenomen uitstootreductie met een factor 10, dan nog zou de ozonreductie vergelijkbaar zijn met die van een voortgezet CFK-gebruik op het niveau van 1985. Men zou dan die ongunstige invloed op de ozon alleen nog maar verder kunnen terugbrengen door lager te vliegen, minder vliegtuigen in te zetten en het

brandstofverbruik efficiënter te maken.Er is ook een aantal punten aangewezen waarop het inzicht in de atmosferische effecten van de nieuwe HSCT nog duidelijk tekortschiet. Zo geven de thans gebruikte modellen nog geen oplossing voor de interactie tussen de stikstofoxiden en de groep van hydroxyl- en chloorradicalen. Een ander belangrijk punt is de invloed van de verhoogde NO-uitstoot op de heterogene chemische processen, die zo belangrijk zijn in het Antarctische ozongat. Johnston vindt dat hier nodig aan gewerkt moet worden.
Het is duidelijk dat NASA het niet uitgesloten acht dat nieuwe technische ontwikkelingen en anderzijds nieuwe inzichten in de atmosferische processen de schattingen van de ozonaantasting tot een aanvaardbare maat zullen terugbrengen. NASA geeft daarom al in de loop van 1990 drie miljoen dollar uit aan zo'n voortgezet atmosferisch onderzoek. Dit is een onderdeel van een veel meer omvattend 'high speed research program' dat omstreeks 250 miljoen dollar moet gaan kosten. Johnston acht dit nieuwe atmosferische onderzoek uiterst zinvol, maar het behoeft niet te verbazen dat David D. Doniger, een belangrijk man bij de Natural Resources Defense Council, nu al positie kiest in deze ontwikkeling naar een mogelijke nieuwe belangenafweging. Hij stelt, dat zelfs de best mogelijke reductie van een nieuwe ozonaantasting deze niet aanvaardbaar maakt: het 'high speed research program' kan alleen maar narigheid opleveren en daarmee wordt door NASA alleen maar geld in het water gesmeten.
Onlangs meldde Hofmann (1991) dat straalvliegtuigen de ozonlaag ook nog langs een andere weg kunnen bedreigen, en dat is via een voortgaande toename van het stratosferisch sulfaatgehalte. Hij laat zien hoe in de jaren tachtig zowel het brandstofverbruik van de straalvliegtuigen als het 'achtergrond'-sulfaatgehalte van de stratosfeer met 5% per jaar is toegenomen. Hofmann vond ook aanwijzingen voor een oorzakelijk verband tussen dit toenemende brandstofverbruik en de sulfaattoename en ook hij vermeldt dat bij de verwachte verdubbeling van het luchtverkeer in de komende 15 jaren de commerciële luchtvaart zal doordringen in de stratosfeer. Gebruikt men dan geen zwavelvrije brandstof dan zal men ook om die reden schadelijke gevolgen voor de ozonlaag moeten verwachten, zoals die ook na de uitbarsting van de vulkaan El Chichon in 1982 zijn opgetreden.

2.3 Het ruimteveer brengt chloor in de stratosfeer

De SST was aanleiding tot een brede wetenschappelijke discussie over de gevolgen van menselijke activiteiten op de ozonlaag. Het ruimteveer introduceerde een nieuw element in de discussie en dat was chloor. Chloor (hoewel niet het chloor van het ruimteveer) is nu betrokken bij het ontstaan van het 'gat' in de ozonlaag boven Antarctica, een gat dat nog groter is dan het oppervlak van de Verenigde Staten. Maar de manier waarop het chloor bij de discussies naar binnen is gesmokkeld, bijna als door een achterdeurtje, is wel een van de vreemdste kronkels van het hele ozonverhaal. Als het oorspronkelijke voorstel van een ruimteveer voor geregeld gebruik was doorgegaan zou het chloorvraagstuk in dit verband helemaal niet te voorschijn zijn gekomen. Aan het begin van de jaren zeventig gaf NASA de voorkeur aan de ontwikkeling van een tweetrapssysteem waarbij een ruimtevoertuig, ter grootte van

een lijnvliegtuig voor de middelgrote afstand, op de rug van een aanjager ter grootte van een 747 zou worden gezet. Die aanjager zou dan met twaalf raketten zijn toegerust die door verbranding van vloeibare waterstof en zuurstof de aan elkaar gekoppelde voertuigen van de grond zouden moeten brengen. Als die raketten hun brandstof zouden hebben opgestookt zou het ruimtevaartuig zich losmaken en doorvliegen, de ruimte in, daarbij gebruik makende van de eigen met waterstof/ zuurstof gestookte raketten. Zo zou de aanjager worden losgelaten om naar de basis terug te vliegen met behulp van zijn extra straalmotoren.
Dat was een ambitieus en duur plan. Het haalde het niet en NASA moest terugvallen op een goedkopere tussenoplossing, het gedeeltelijk opnieuw bruikbare ruimteveersysteem dat tegen het einde van de jaren zeventig in bedrijf werd gesteld. Dit systeem is in beginsel gelijk aan het ruimtevaartuig van het oorspronkelijke plan maar nu één dat z'n eigen raketmotoren gebruikt met brandstof uit een grote uitwendige tank, om in z'n baan te komen. Maar om het benodigde gewicht aan vloeibare zuurstof en vloeibare waterstof van de grond te tillen en het voertuig genoeg snelheid te geven om in zijn baan te komen waren er een paar extra vaste-brandstof-raketten nodig die voor de lancering zijn vastgemaakt aan het samenstel van ruimteveer en tank. Het nu zo vertrouwde TV-beeld van een ruimteveer dat vlammend de lucht ingaat vanaf Cape Canaveral en hoog de lucht in vliegt waar dan de twee gebruikte vaste-brandstof-raketten worden losgelaten, is het resultaat van deze door de economie afgedwongen tussenoplossing. Diezelfde tussenoplossing is ook verantwoordelijk voor de aanwezigheid van de uitwendige brandstoftank die ook door het ruimteveer wordt afgeworpen voordat het zijn baan bereikt. Het was een combinatie van fouten in die vaste-brandstof-opduwers en de nabijheid van die enorme tank met waterstof en zuurstof - een bom die op ontploffen stond - die leidde tot de ramp van de Challenger en die het ruimteveer aan de grond zette. Maar dat alles lag nog ver in het verschiet toen verschillende in de VS werkende teams zich zorgen begonnen te maken over de afvalprodukten die door de vaste-brandstof-opduwers worden uitgestoten terwijl het ruimteveer door de stratosfeer omhoog klimt.
Eén van de gassen die bij het branden van de vaste-brandstof-"raketten" vrijkomen is waterstofchloride (HCl). Deze raketten branden totdat het voertuig al lang in de stratosfeer is, en de lege rakethulzen worden pas door het samenstel van ruimteveer en tank afgestoten als er een hoogte van 50 km is bereikt. De beslissing om de vaste-brandstof-opduwers te gebruiken werd in het begin van 1972 genomen en in de zomer van dat jaar had de NASA een milieu-effect-rapportage uitgebracht waarin met name wordt vermeld dat er HCl zou worden uitgestoten over de hele weg van het ruimteveer, vanaf de grond tot boven in de stratosfeer en dat de meeste HCl in de stratosfeer zou terechtkomen. Door één ruimtevlucht per week (de plannenmakers van de NASA waren optimistisch in het begin van de jaren zeventig) zou er elk jaar meer dan 5000 ton HCl in de stratosfeer terecht komen. Maar in dit document werd verzuimd het verband tussen HCl en ozon te leggen, hoewel er wel tot op zekere hoogte naar de gevolgen van HCl voor de troposfeer werd gekeken (met de conclusie dat er geen reëel gevaar voor het milieu aanwezig was). Dit is echt niet zo verbazingwekkend want deze rapportage werd opgesteld zelfs nog voordat de

discussies over de gevolgen van de SST's op de atmosfeer waren begonnen; in 1972 was nog niemand bezorgd over de invloed van chloor en chloorverbindingen op de ozonlaag. Ruimtevaartdeskundigen beseften niet dat chlooratomen de ozon doeltreffend opruimen en de scheikundigen wisten niet dat de opduwers van het ruimteveer HCl zouden uitstoten. Aan een team van wetenschappers van de Universiteit van Michigan werd opgedragen om na te gaan welke aspecten van de invloed op het milieu door de oorspronkelijke rapportage over het hoofd konden zijn gezien.
Tot dat team behoorden Richard Stolarski en Ralph Cicerone, twee jonge onderzoekers die geen speciale scholing in de scheikunde hadden gehad. (Stolarski was opgeleid in de fysica en Cicerone in de elektrotechniek), maar die de spannende ontwikkelingen in de stratosferische studies zagen en daaraan wilden meedoen. Ze zijn nu ervaren onderzoekers die al sinds 1973 betrokken zijn geweest bij alle aspecten van de voortdurende discussies over de ozonlaag en die nu belangrijke bijdragen leveren aan de bestudering van het gat boven Antarctica. Hun loopbaan is begonnen met dat NASA-contract dat hun opdroeg om de gevolgen van het ruimteveer op het milieu na te gaan, - maar het ging in het begin verre van gemakkelijk. Dotto en Schiff* vertellen hoe de twee nieuwelingen geleidelijk aan genoeg chemie onder de knie kregen om in te zien dat chloor in de atmosfeer een gevaar voor ozon zou kunnen opleveren en hoe, zonder dat ze dat wisten, een dergelijk onderzoek ook in het Palo Alto Research Laboratory werd uitgevoerd waar aan een team, in het kader van de CIAP-studie (Climate Impact Assessment Program), de opdracht was gegeven om in het algemeen de uitlaatgassen van motoren te onderzoeken. Het Palo Alto-team nam ook de raketten in zijn onderzoek op en het was Harold Johnston die hen op het belang van chloor attent maakte. Toen het Michigan team NASA waarschuwde voor de mogelijkheid dat de uitlaatgassen van het ruimteveer gevaar voor de ozonlaag zouden kunnen opleveren, werden ze onder zware druk gezet om geen ruchtbaarheid aan hun werk te geven, tenminste niet voordat er meer kon worden ontdekt over de kettingreacties waarbij chloor betrokken is. Dit had het vreemde gevolg dat in 1973 op een bijeenkomst in Kyoto, Japan, waar experts over de chemie van de stratosfeer spraken, Stolarski een overzicht gaf van het werk betreffende chloor in de stratosfeer, waarbij hij het ruimteveer helemaal niet vermeldde maar veronderstelde dat het chloor van vulkanische uitbarstingen afkomstig kon zijn. Desondanks werden Cicerone en Stolarski, toen zij een volledig rapport over hun werk klaarmaakten voor publikatie in Science, waarbij ze ook speciaal het ruimteveerprobleem vermeldden, door NASA opnieuw onder druk gezet en ertoe gedwongen om hun artikel weer in te trekken. Het artikel werd in feite door het tijdschrift afgewezen - de deskundige reviewers, die alle wetenschappelijke artikelen nauwkeurig nagaan voordat ze in druk verschijnen, hadden de uitgevers laten weten dat het werk niet voldoende nieuws of belangrijks over de stratosferische chemie bevatte om de publikatie daarvan te wettigen. Het

* Dotto, L., H. Schiff 'The Ozone War' New York, Doubleday (1978)

reviewersysteem werkt meestal goed, maar het is, zoals u ziet, niet onfeilbaar.
Maar nog niet alles was verloren. Het verslag van de Kyoto bijeenkomst zou bijna door de Canadian Journal of Chemistry worden gepubliceerd en er was nog (net) tijd voor het Michigan-team om daarin hun volledig verslag te publiceren, niet alleen de punten waarop Stolarski de nadruk had gelegd in Japan. Merkwaardig genoeg verscheen het bijna naast een ander artikel waarin de aandacht werd gevestigd op de gevolgen voor de stratosfeer van chloorverbindingen uit de uitlaatgassen van het ruimteveer. Dit artikel was geschreven door Mike McElroy en Steve Wofsy van Harvard University. McElroy was inderdaad een van de belangrijkste sprekers in Kyoto geweest, maar hij had daar hoofdzakelijk over de rol van stikstofoxiden in de stratosfeer gesproken en had chloor daar maar zijdelings, en het ruimteveer in het geheel niet, genoemd, hoewel hij in feite met Wofsy gewerkt had aan de uitlaatgassen van het ruimteveer. Hij had in Kyoto zelfs een heftig twistgesprek met Stolarski gehad over de beweringen dat vulkanen invloed op de stratosfeer zouden kunnen hebben. McElroy had de vergadering verteld dat onderzoekers in Harvard hadden vastgesteld dat vulkanisch chloor geen probleem was. Toen ze daar ruzie maakten over vulkanen zullen zowel Stolarski als McElroy wel hebben vermoed dat het ruimteveer het echte probleem was- maar dat was door geen van beiden genoemd. Beiden publiceerden ten slotte over hun werk aan het ruimteveer dat ze in werkelijkheid niet in Kyoto hadden gemeld, in het officiële verslag van die conferentie. En daardoor bestond er jaren later tussen de twee teams van Harvard en Michigan nog een diep wantrouwen.Toen het chloorprobleem eenmaal aan het daglicht was gebracht, althans in het strijdperk van de wetenschappelijke discussie ook al was het niet tot het algemene publiek doorgedrongen, moest NASA, of het wilde of niet, de nodige stappen nemen om de gevolgen daarvan onder ogen te zien. Hoewel de desbetreffende onderzoeksinspanning nooit de schaal van de climatic impact assessment program studie bereikte, gaven de gegevens die in 1977 door NASA en onafhankelijk daarvan door de National Academy of Sciences (NAS) waren verzameld, aan dat zestig ruimteveerlanceringen per jaar slechts een vermindering van ongeveer 0,2 procent van de ozonconcentratie in de stratosfeer van het noordelijk halfrond tot gevolg zouden hebben. Vanwege onzekerheden in de berekeningen (bijvoorbeeld een tekort aan nauwkeurige kennis van de snelheid van sommige reacties onder stratosferische omstandigheden) zou het gevolg driemaal groter kunnen zijn (0,6 procent) of driemaal kleiner (0,07 procent) dan deze 'beste schatting'. En omdat chloor direct door het ruimteveer in de stratosfeer wordt uitgestoten en dan vrij snel door chemische reacties in stabiele verbindingen wordt vastgelegd die snel in de troposfeer wegzakken, toonden de studies aan dat de ozonlaag maar een paar jaar nodig zou hebben om zich te herstellen nadat het ruimteveer zou worden gestaakt of de opduwraketten zodanig zouden zijn gewijzigd dat ze geen chemisch actieve chloorverbindingen meer zouden uitstoten. *De meest recente schatting komt van Prather e.a. (Journal of Geophysical Research, 18583-18590, oktober 1990). Zijn modelberekeningen met een zogenaamd GISS 3D-model, resulteren bij een continue lanceerfrequentie van 9 shuttles en 6 titans per jaar in een toename van de hoeveelheid actief chloor met hoogstens 0.01 ppb, of te wel*

0.5% t.o.v. het huidige niveau. Dit komt overeen met een zeer geringe ozonafname met minder dan 0.2% over het noordelijk halfrond.
Alweer een dwaalspoor? Nu hebben die getallen alleen nog maar een vrijwel academische betekenis. De kans op zestig ruimteveervluchten per jaar lijkt, op zijn zachtst gezegd, erg klein en de daaraan verbonden gevolgen -minder dan 1 procent verandering van de ozonconcentratie- lijken onbetekenend vergeleken met de schrikbarende ontdekkingen boven Antarctica, waar ieder voorjaar de helft van de ozon verdwijnt. Maar er valt wel het een en ander uit het ruimteveerverhaal te leren. Het ruimtestation staat nog steeds op de politieke agenda en als dat project doorgaat zullen daar zeer veel vluchten van het ruimteveer voor nodig zijn. De Sovjet-Unie ontwikkelt zijn eigen ruimteveer en de European Space Agency heeft plannen voor een ruimteveer en denkt ook aan de ontwikkeling van een 'ramjet' die van een startbaan omhoog gaat, op zijn weg door de troposfeer en de stratosfeer lucht inademt en dan overschakelt naar raketaandrijving. Uiteraard maakt geen van deze ontwerpen gebruik van de vaste-brandstofopduwers die tijdens de U.S.-ruimtevluchten verantwoordelijk zijn voor de uitstoot van HCl, maar ze zouden wel meer NO_x en meer HO_x in de stratosfeer brengen. In het licht van wat er met de SST's en het ruimteveer is gebeurd, is het duidelijk dat de gevolgen van ieder voertuig, dat ontworpen wordt om boven de troposfeer te vliegen, zeer nauwkeurig moeten worden nagegaan voordat toestemming wordt gegeven om daarmee te beginnen. Hoe meer projecten er zijn hoe ernstiger de situatie wordt. Een afname in de ozonconcentratie van 1 procent mag dan een aanvaardbaar risico lijken voor een enkel project zoals het ruimteveer, maar als tien projecten elk 1 procent reductie tot gevolg heeft, zal de totale teruggang van de ozon 10 procent bedragen, zonder dat men daarvan de schuld kan geven aan één enkel project of dat één project daarvoor de gevolgen zal willen aanvaarden.
Het ruimteveer heeft het chloor ter discussie gesteld, en het is ook de aanleiding geweest dat NASA aan een ernstige studie van de stratosfeer is begonnen. Dit ruimtebureau is goed voor de bestudering van de ozonlaag toegerust, het heeft zowel satellieten die van boven af de zaak bekijken als op de grond geplaatste en door de lucht vervoerde instrumenten. Bovendien heeft het een reservoir van deskundigheid op het gebied van de atmosferische chemie ontwikkeld. Misschien zou een ander bureau in de jaren zeventig net zo goed de leiding bij de bestudering van het ozonvraagstuk hebben kunnen nemen; maar toen het gat boven Antarctica werd ontdekt, was NASA ongetwijfeld de best toegeruste organisatie ter wereld om het onderzoek te leiden. Niemand had echter de noodzaak van die toepassing van de deskundigheid van NASA zien aankomen toen het publiek in het midden van de jaren zeventig zich zulke zorgen maakte over het verband tussen SST's en huidkanker en nauwelijks enige aandacht besteedde aan de discussies over de gevolgen van het ruimteveer voor de ozonlaag. Dat was niet alleen het gevolg van NASA's andere grote vaardigheid: hun grote deskundigheid op het gebied van 'public relations' en het succes dat ze hadden met de verhulling van het probleem. Tegen het midden van 1974 kwam er voor het publiek iets wat veel dichter bij huis was om zich zorgen over te maken en tegen 1975 was de spuitbus-'oorlog' op volle gang.

Literatuur

Gribbin, J. "Supersonic planes threaten ozone layer", New Scientist , p.24 (June 1990)
Hofmann,, D.J. "Aircraft sulphur emissions", *Nature 349*, p.659 (1991)
Johnston, H.S. "Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxyd catalyst from supersonic transport" *Science 173*, 517-522 (1971)
Johnston, H.S et al "Nitrogen oxydes from high-altitude aircraft: an update of potential effects on ozone", *J.Geoph.Res.*, 94, D13, 16351-16363 (1989)
Zurer, P.S. "NASA paving way for development of new supersonic plane", *U.S. Government C&EN*, 15-16 (Jan 1990)

Hoofdstuk 3

3.1 De spuitbusoorlog

Tot aan de ontdekking van het gat boven Antarctica was de 'oorlog' tussen de milieubeschermers en de producenten van verstuivers in het midden van de jaren zeventig wel het meest kenmerkende aspect van de debatten over de ozonlaag. Het was een propagandaoorlog die met woorden en chemische vergelijkingen werd gevoerd, maar waarbij de gevoelens soms even hoog opliepen als in een echte oorlog. De producenten hadden grote investeringen en markten te beschermen; de milieubeschermers waren er van overtuigd dat het welzijn van de hele planeet op het spel stond. Daar ergens tussenin bevonden zich de wetenschappers die probeerden de werkelijke omvang van het probleem vast te stellen, maar die in veel gevallen geneigd waren om naar de kant van de milieubeschermers over te hellen. Tenslotte zijn verstuivers, in de meeste gevallen, een luxe. Het zou ons niet wezenlijk schaden wanneer we het zonder die verstuivers zouden moeten doen, zelfs als de bedreiging voor de ozonlaag niet zo groot zou blijken te zijn.

Een verstuiver heet zo omdat hij z'n inhoud uitspuit als een fijne mist van kleine druppeltjes, en wordt aerosol genoemd. (Voor een wetenschapper vormen de deeltjes de aerosol). Aerosoldeeltjes komen van nature in allerlei vormen voor in de hele atmosfeer met inbegrip van de stratosfeer. Voor een leek is een aerosol synoniem met een spuitbus en niet met de fijne mist van deeltjes die uit het spuitstuk van de spuitbus komt. Bovendien hebben de meeste leken er geen idee van dat het woord aerosol ook zou kunnen worden gebruikt om een vluchtige wolk aan te geven van laten we zeggen salpeterzuurdruppeltjes die een groot aantal kilometers boven het aardopper-vlak zweeft. Daarom is het misschien het beste om hier de term maar helemaal te vermijden en alleen maar het meer prozaïsche woord 'spuitbus' te gebruiken.

In 1974 werden er in de Verenigde Staten grote zaken in spuitbussen gedaan. In het voorafgaande jaar werden in Noord-Amerika 2,9 miljard bussen, de helft van het wereldtotaal, gevuld met allerlei produkten; van haarlakken, okseldeodoranten, verven, lakken tot insekticiden en ontsmettingsmiddelen toe. In ongeveer de helft van deze spuitbussen werden scheikundige verbindingen, bekend als chloorfluorkoolwaterstoffen of CFK's gebruikt om de businhoud te verstuiven; als je op het spuitstuk drukt spuit het drijfgas door de kleine opening naar buiten waarbij het de actieve stof als een fijne nevel meevoert.

Tientallen jaren lang had de chemische industrie de CFK's als een wondermiddel beschouwd. Hun buitengewone eigenschappen werden tegen het einde van de jaren twintig min of meer toevallig ontdekt toen ze oorspronkelijk als een kringloopvloeistof voor koelkasten werden ontwikkeld. Ze leken ideaal geschikt voor hun taak omdat

ze kookten tussen de -40 °C en 0 °C en ze onbrandbaar en niet giftig waren, en verder goedkoop in de produktie, gemakkelijk op te slaan en chemisch stabiel waren. Het is inderdaad precies omdat CFK's zeer stabiele verbindingen zijn, dat ze niet met zuurstof reageren en dus niet verbranden en ook niet met levende organismen reageren en die dus ook niet vergiftigen. Ze leken perfect voor de toepassing als drijfgassen in spuitbussen en in 1950 kwam het eerste produkt van dit soort CFK-toepassing op de markt. Ze bleken ook zeer bruikbaar als oplosmiddel, geschikt voor het schoonmaken van kwetsbare halfgeleiderschakelingen zonder de plastic basis aan te tasten waarop de chips en schakelingen zijn gemonteerd en ook voor het blazen van schuim van allerlei soorten, van brandblusschuim tot schuimisolatie in de muren van sommige huizen en de harde schuimplastic voor weggooibekers en -schaaltjes voor hamburgers. Daarover later meer. In 1974 en de paar daaropvolgende jaren waren het de CFK's in spuitbussen die de krantekoppen haalden.

3.2 De vergissing van Lovelock

CFK's leken te mooi om waar te zijn en dat is ook gebleken. Een grote hoeveelheid van deze chemische stoffen kwam in het milieu terecht en begon zich daar op te hopen; 75 procent van de uitstoot naar de lucht was van spuitbussen afkomstig die op grond van hun functie die drijfgassen loslieten; ongeveer 15 procent kwam voort uit lekke koel- en luchtbehandelingssystemen, speciaal de air-conditioners in auto's. CFK's zijn zo stabiel dat ze zeer lang in de atmosfeer aanwezig blijven. In de troposfeer is er niets dat ze kan aantasten en hun chemische structuur kan afbreken. Jim Lovelock was de eerste wetenschapper die de verdeling van CFK's rondom de aarde bestudeerde. Hij deed dat, omdat hij geïnteresseerd was in luchtstromingen. Hij kwam tot de ontdekking dat CFK's zo stabiel zijn dat ze prachtig als merkstof dienst konden doen, waaruit dan de beweging van de luchtmassa's was af te leiden. Tenminste, dat was de 'officiële' reden die hij in zijn wetenschappelijke publikaties vermeldde; in werkelijkheid had Lovelock er eenvoudig plezier in om zijn wetenschappelijk vernuft met de natuur te meten door instrumenten te ontwerpen en te bouwen die gevoelig genoeg waren om een spoortje van CFK's in de lucht op te snuiven vanaf het dek van een schip in het midden van de oceaan.

Lovelock lijkt meer op een natuurfilosoof uit vroegere eeuwen dan op een wetenschapper van het einde van de twintigste eeuw. Hij heeft niet alleen een onafhankelijke geest maar hij is ook in letterlijke zin een onafhankelijke wetenschapper, die opereert vanuit zijn eigen laboratorium in zijn huis aan de rand van Dartmoor in Zuidwest Engeland. Maar zijn deskundigheid als ontwerper van instrumenten en zijn reputatie in de wetenschappelijke wereld zijn wel zo groot dat de instrumentenfabriek Hewlett-Packard hem van geld voorziet omdat hij ook een bijdrage leverde aan de experimenten waarvoor de Viking de opnameapparatuur op het oppervlak van Mars deponeerde, en hij werd benoemd tot Fellow van de Royal Society. Tegenwoordig is hij nog het bekendst als degene die het Gaia-denkbeeld naar voren heeft gebracht waarin alle levende systemen van de aarde als delen van één organisme, Gaia (de Griekse 'Moeder Aarde') worden beschouwd, een organisme dat in de loop van miljoenen jaren door de werking van natuurlijke terugkoppelin-

gen een stabiel milieu heeft gehandhaafd dat geschikt is voor het leven. Lovelock vergelijkt deze terugkoppelingen met de manier waarop het menselijk lichaam zijn temperatuur constant houdt zelfs bij een sterk veranderende luchttemperatuur.
De ontwikkeling van dit Gaia-denkbeeld is zeer van toepassing bij de huidige gedachtenvorming over de schade die de mens aan het atmosferisch milieu zou kunnen berokkenen en over de vermoedelijke gevolgen daarvan voor het leven op aarde. In het begin van de jaren zeventig waren het echter de CFK's die de aandacht van Lovelock hadden. Nadat hij thuis (toen in Wiltshire) een CFK 'snuiver' had gebouwd en getest, wist hij een plaatsje op het onderzoeksvaartuig de Shackelton te bemachtigen en voer hij in 1971 en 1972 mee van Engeland naar Antarctica en terug waarbij hij over de hele heen- en terugreis de concentraties van CFK's in de lucht opnam. Dat was zeker geen kleinigheid en zijn collega's spreken bewonderend over de 'voortreffelijke gevoeligheid' van Lovelock's instrumenten die de hoeveelheden opmaten in eenheden per triljoen (delen per 10^{12}, ppt, parts per trillion). In begin zeventig varieerden de CFK-concentraties tussen een paar en enkele tientallen van deze eenheden en Lovelock slaagde er niet alleen in om die aan te tonen maar hij kon bovendien vertellen hoe de concentratie van elk van de twee belangrijkste CFK's vanaf het noorden van de Atlantische Oceaan tot aan het zuiden van de Stille Zuidzee verliep. In het begin van 1973 publiceerde hij de resultaten van zijn metingen in het tijdschrift Nature en beging daarbij een vergissing die hem nog steeds vol berouw z'n hoofd doet schudden wanneer die weer eens onder zijn aandacht wordt gebracht (zoals onlangs tijdens de Dahlem conferentie). Nadat hij op de mogelijkheid had gewezen om de CFK's te gebruiken om de beweging van luchtmassa's te volgen, zei Lovelock in dat artikel: "de aanwezigheid van deze stoffen *bij dergelijke lage concentratie-niveaus* brengt geen enkel denkbaar gevaar met zich mee".
Lovelock is nooit wat men een 'doemdenker' noemt geweest en hij was er op uit om geen onnodig alarm te veroorzaken. Hij geeft nu toe dat hij in zijn artikel in Nature had moeten zeggen dat de inerte, niet-giftige CFK's in de concentraties die door hem waren gemeten, geen denkbare bedreiging voor de troposfeer konden vormen. Maar de toenemende hoeveelheden CFK's die zich onverbiddelijk ophoopten en dan naar boven in de stratosfeer werden gebracht zouden wel degelijk een reële bedreiging gaan vormen*. Maar niemand, ook Lovelock niet, besefte dit al in 1973. Wel hebben Lovelock's uiterst nauwkeurige metingen en zijn dogmatische uitspraken (bijna een rode lap voor een aantal heethoofdige wetenschappers) er toe bijgedragen dat de zaken in beweging werden gezet.
De moeilijkheden met CFK's liggen in het feit dat ze chloor bevatten. Inderdaad geeft de volledige naam van deze groep verbindingen, chloorfluorkoolwaterstoffen, aan dat ze bestaan uit atomen chloor, fluor, koolstof en eventueel waterstof. Du Pont, de grootste fabrikant van CFK's gaf aan de eigen produkten de handelsnaam Freon en ontwikkelde een naamsysteem dat aan ingewijden laat zien hoeveel atomen

* Ze vormen ook een bedreiging door hun aanwezigheid in de troposfeer en wel door hun bijdrage aan het broeikaseffect, dat later zal worden behandeld.

van iedere soort in een bepaald type Freon aanwezig zijn. Dit systeem wordt nu algemeen voor alle CFK's gebruikt; er heeft zich een soort stenosysteem ontwikkeld waarin de twee meest gebruikte CFK's worden aangeduid met F-11 en F-12**, hun volledige chemische namen zijn trichloorfluormethaan ($C\ Cl_3F$) en dichloordifluormethaan ($C\ Cl_2F_2$). Andere verbindingen die voor de huidige gedachtenwisseling van belang zijn, zijn F-22 ($CH\ Cl\ F_2$) en F-113 ($C_2Cl_3F_3$). Men schat nu dat F-11 gemiddeld zo'n 75 jaar lang in stand blijft voordat het in de atmosfeer wordt afgebroken, en F-12 110 jaar. Dat wil zeggen dat een vervuiling die nu, aan het eind van de jaren tachtig door de uitstoot van deze produkten wordt veroorzaakt, aan het eind van de eenentwintigste eeuw nog steeds onze planeet zal beïnvloeden, zelfs als die uitstoot morgen zou worden stopgezet.
Het waren dit soort van besef en de plompverloren bewering van Lovelock dat de CFK's 'geen enkel denkbaar gevaar' konden opleveren, die een aantal wetenschappers aan het denken zetten. Eén daarvan was Charles Kolb, een in Boston gestationeerde chemicus, die besefte dat de verbindingen op den duur chloor moesten loslaten, al wist hij in het begin nog niet dat chloor ozon kan opruimen. Pas in september 1973, toen Mike McElroy hem vertelde over de discussies op de Kyoto-conferentie over chloor in de stratosfeer, zag hij plotseling het verband. Maar voordat Kolb in ernst aan het probleem kon gaan werken, had de wetenschappelijke hoofdpersoon in de spuitbusoorlog, Sherry Rowland, al van zich laten horen.
Lovelock's onafhankelijke geest heeft hem ook onlangs tot sterk controversiële uitspraken over het ozonprobleem gebracht. Zo rapporteert Fred Pearce (New Scientist 23 sept. 1989, p.64) dat Lovelock niet gelooft aan de schuld van CFK's aan het ozongat bij de Zuidpool. Hij schrijft dit gat in hoofdzaak toe aan de enorme hoeveelheden vulkanische stof die in 1982 door de uitbarsting van El Chichon (Mexico) de atmosfeer in werden geslingerd. Daarom meende hij ook dat de teruggang die de afmetingen van het ozongat in de winter van 1988 vertoonden,

---

** Het laatste cijfer in het getal geeft aan hoeveel fluoratomen (F) in ieder molecuul aanwezig zijn, het tweede is het aantal waterstofatomen (H) plus 1, het eerste is het aantal koolstofatomen (C) minus 1 en het wordt weggelaten als dat gelijk is aan nul. Alle andere atomen die er volgens de regels van de chemie in zitten, moeten dan chlooratomen zijn.
In F-22 komt naast de chloor, fluor-, en koolstofatomen ook nog een waterstofatoom voor. Men spreekt dan ook over HCFK-22. Het H-atoom is er de oorzaak van dat deze stof een kortere levensduur heeft omdat de hydroxyl-radicaal (OH) in de troposfeer daar vat op heeft en zo de HCFK zal aantasten. Deze kortere levensduur heeft weer het gevolg dat een kleiner gedeelte van deze chloorverbinding in de stratosfeer belandt en daar een gevaar voor de ozon oplevert.
Gribbin maakt hier geen onderscheid tussen CFK's en deze HCFK's, maar wij ontkomen daar niet aan zodra de vervanging van de gangbare CFK's zal worden behandeld. We zullen dan ook spreken over de HFK's. Dit zijn de fluorkoolwaterstoffen die dus geen chloor bevatten en daarom geen gevaar voor de ozon in de stratosfeer opleveren.
Uit de verklaring van het stenosysteem voor de Freons valt af te leiden dat wanneer er sprake is van een HCFK het aantal tientallen groter is dan één (b.v. F-22 = HCFK-22) en er kan sprake zijn van een HFK indien de som van de eenheden, tientallen en honderdtallen acht bedraagt (b.v. F-134a of HFK-134a).

vergeleken met die in de winter van 1987, zich ook in 1989 zou voortzetten. Al spoedig bleek deze voorspelling van Lovelock niet uit te komen: de ozonafbraak bij de Zuidpool was in oktober 1989 vergelijkbaar met die van 1987. De recente afwisseling tussen minder krachtige afbraak op even jaren met de krachtige afbraak op oneven jaren, wordt toegeschreven aan een atmosferische schommeling die als de 'Quasi Biannual Oscillation' bekend staat (P.A. Mayewski & M.L. Legrand in Nature 19 July 1990, p.258-260). Maar de jongste berichten van NASA over het zuidelijk ozongat van 1990 wekken al weer twijfel aan zo'n overheersende invloed van de QBO. Het gat was even groot en diep als dat van 1989 (zie fig. 3). Hiermee is niet bewezen dat de QBO geen invloed zou kunnen hebben. De periode van de QBO is quasi-periodisch rondom een gemiddelde van 28 maanden. Dit betekent dan ook dat de QBO-winden niet exact dezelfde fase hebben ten tijde van het zuidpool-voorjaar, zodat dit mogelijke effect niet precies met een periode van 2 jaar het zuidpoolgat kan versterken.

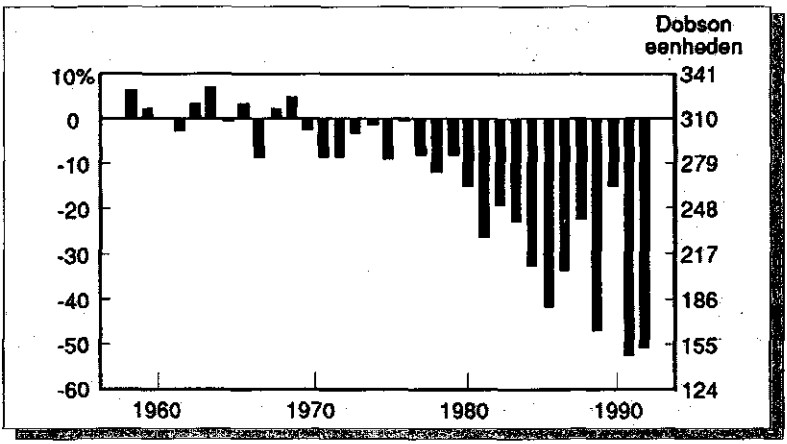


Fig. 3 De ozonkolom boven Halley Bay in oktober
(Bron: 'De rol van CFK's bij ozonlaag afbraak en broeikaseffect', Congres Alternatieven voor CFK's, WTC Amsterdam, 31 jan. 1991, H. v.d. Woerd)

3.3 Rowland brengt het probleem ter sprake

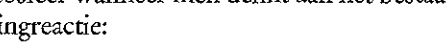
In 1972 was Sherry Rowland al een wetenschapper die naam had gemaakt als chemicus die zich in de studie van radioactieve isotopen had gespecialiseerd. Zijn basis was de University of California te Irvine, maar hij bezocht veel wetenschappelijke conferenties en vergaderingen die met zijn werk te maken hadden -en soms ook bijeenkomsten die niet helemaal betrekking hadden op zijn hoofdonderwerp maar die er naar uitzagen dat ze interessant zouden kunnen zijn. Het was dan ook uit algemene wetenschappelijke nieuwsgierigheid dat hij een bijeenkomst bijwoonde die in januari 1972 in Florida werd gehouden, en die, hoewel georganiseerd door de U.S. Atomic Energy Commission, betrekking had op atmosferische chemie,

iets wat toen niet Rowland's hoofdonderwerp was. De officiële voordrachten op die bijeenkomst maakten niet veel indruk op de bezoeker uit Californië maar het was in één van de pauzes tussen deze voordrachten dat een gespreks-onderwerp zijn nieuwsgierigheid wekte en in zijn hoofd bleef hangen.
Iets eerder, in 1971 bezocht Lester Machta, die bij de U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) werkte, een andere conferentie waar de atmosferische chemie werd besproken en daar waren ook Jim Lovelock en Ray McCarthy van Du Pont aanwezig. Ze raakten met z'n drieën in gesprek over Lovelock's eerste werk met de CFK-'snuiver' (voordat hij zijn reis naar Antarctica en terug maakte en lang voordat er enig detail over die wereldwijde studie was gepubliceerd). Lovelock vroeg toen aan McCarthy, die de leiding van Du Pont's Freonlaboratorium had, welke hoeveelheden van de verschillende soorten Freon sinds het begin van de produktie waren vervaardigd en in de atmosfeer waren losgelaten. De ruwe schatting van McCarthy bleek heel dicht te liggen bij de totale CFK-vracht in de atmosfeer zoals die uit Lovelock's metingen kon worden afgeleid. Geen van de drie wetenschappers beschouwde dit als meer dan een interessant stukje informatie. Maar toen Machta het op de Florida-bijeenkomst aan Rowland vertelde, zette dit nieuwtje ergens in zijn hoofd iets aan de gang. Als Lovelock's metingen aantoonden dat alle ooit losgelaten CFK's zich nog steeds in de troposfeer bevonden, betekende dat dat ze door niets in de onderste laag van de atmosfeer werden afgebroken. Maar ze moesten ergens naar toe en de enige weg die ze konden gaan was naar boven, de stratosfeer in. Sterke ultraviolette straling doet elk molecuul uiteenvallen, en als de CFK's hoog genoeg in de stratosfeer zouden komen, zouden ze ook worden afgebroken. Rowland herinnert zich dat hij toen tegen Machta heeft gezegd: "Maar natuurlijk zullen ze altijd door ultraviolet worden afgebroken"*. Dit was echter een toevallige gedachte en een terloopse opmerking; Rowland had er op dat moment nog geen idee van dat CFK's een gevaar voor het milieu zouden kunnen opleveren en het zou nog achttien maanden duren voordat deze toevallige gedachte wat verder zou zijn uitgewerkt.
In de zomer van 1973 waren de gedetailleerde resultaten van Lovelocks lange reis in Nature gepubliceerd en Rowland stelde zijn onderzoeksplannen op voor het komende academische jaar. De Atomic Energy Commission die vanaf 1956 zijn onderzoek had betaald, gaf hem toestemming om de weg van de bestudering van CFK's in te slaan. De bedoeling van het onderzoek was een aantal grondslagen te ontwikkelen opdat de atmosferische wetenschappers, indien en wanneer ze zouden ingaan op het voorstel van Lovelock om de gassen te gebruiken ter bepaling van de beweging van luchtmassa's om de aarde, ten minste iets zouden weten over de manier waarop deze verbindingen zich in het atmosferische milieu gedragen. Rowland was op de hoogte van de ozon-discussies die zich toen rondom de SST-kwestie afspeelden, en had die met Harold Johnston besproken. Maar hij had nog niet direct het verband gelegd tussen het doordringen van CFK's in de stratosfeer en de afbraak

* aangehaald door Dotto en Schiff p.12

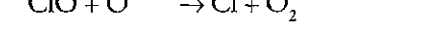
daarvan door ultraviolette straling waardoor ze een bedreiging voor de ozonlaag zouden worden.
In het najaar van 1973 kwam een jonge onderzoeker die net zijn PhD had gehaald in Berkeley, University of California, bij Rowland in Irvine werken. Mario Molina (geboren in Mexico) wist niets van atmosferische chemie, hij had tot die tijd aan chemische lasers gewerkt. Maar toen het CFK-verhaal eenmaal aan hem was verteld, met de cijfers van Lovelock die aantoonden dat alle CFK's die ooit waren losgelaten nog steeds in de troposfeer ronddreven, werd hij even nieuwsgierig als Rowland naar het uiteindelijke lot van deze uitzonderlijke stoffen. En zo gingen die twee samen aan het werk om voor eens en altijd vast te stellen wat er werkelijk met de CFK's in de atmosfeer gebeurde. Rowland wees de weg en, zoals nu eenmaal het lot van alle beginnende onderzoekers is, Molina deed het zware werk.
Het kostte Molina vrijwel geen tijd om vast te stellen dat er in de troposfeer inderdaad niets met CFK's gebeurde. CFK's reageren niet met levende máterie, ze lossen niet in de oceanen op, ze worden niet door regen uit de lucht gespoeld; ze doen niets anders dan ronddrijven en zich langzaam naar boven bewegen om ten slotte in de stratosfeer terecht te komen. Toen het november 1973 was geworden (toen Charles Kolb, ver weg in Boston, in dezelfde richting begon te denken) wisten Rowland en Molina dat CFK's de stratosfeer zouden bereiken. En toen ging het eenvoudig om de kennis van de chemische leerboeken om daaruit af te leiden dat de CFK's door ultraviolette straling zouden worden afgebroken waarbij dan chlooratomen zouden vrijkomen. Nu leek het niet nodig om zich zorgen te maken over een paar chlooratomen in de stratosfeer, totdat Molina er eens voor ging zitten om de katalytische kettingreacties uit te werken (die natuurlijk al bij andere wetenschappers bekend waren) waardoor een enkel chlooratoom vele duizenden ozonmoleculen zou kunnen opruimen en vernietigen.
De Kyoto bijeenkomst was in september 1973 gehouden en terwijl Rowland en Molina onafhankelijk daarvan aan hun probleem zaten te werken om tot de conclusie te komen dat chloor afkomstig van de afbraak van CFK's de ozonlaag zou kunnen beschadigen, waren zowel het team in Michigan als het team in Harvard bezig aan hun wetenschappelijke artikelen die het 'nieuws moesten brengen' dat chloor afkomstig van de ruimtevaartuigen een bedreiging voor de stratosferische ozonlaag vormde. Maar daar wisten Rowland en Molina niets van toen ze bij het uitvoeren van hun berekeningen aannamen dat de uitstoot van CFK's op een niveau van ongeveer 800.000 ton per jaar zou worden voortgezet (de uitstoot van 1972), en tot de conclusie kwamen dat dientengevolge binnen dertig jaar een half miljoen ton chloor in de stratosfeer aanwezig zou zijn, waardoor 20 tot 40 procent van het ozonschild zou worden vernietigd.
De chemische basisprocessen, die sindsdien tot in bijzonderheden zijn bestudeerd en waarover geen twijfel meer bestaat (hoewel sommige getallen van de reactiesnelheden zijn bijgesteld, zijn de reacties zelf bekend), zijn inderdaad zeer eenvoudig. F-11, F-12 en F-113 absorberen geen straling met golflengten groter dan 240 nm en daarom worden ze in de troposfeer tegen vernietiging door straling beschermd door de aanwezigheid van de daarboven liggende ozonlaag. Maar als de

CFK's eenmaal tot hoogten boven 20 km zijn doorgedrongen worden ze blootgesteld aan ultraviolette straling met golflengten van 200 tot 220 nm. Wanneer we de twee meest voorkomende CFK's (F-11, CCl_3F en F-12, CCl_2F_2) als voorbeelden nemen dan kunnen we zien wat er gebeurt wanneer ze uiteenvallen:



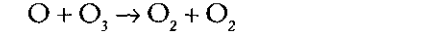
$$CCl_3F + UV \rightarrow Cl + CCl_2F$$
$$CCl_2F_2 + UV \rightarrow Cl + CClF_2$$

De aanwezigheid van het vrije chloor is duidelijk een gevaar voor de ozon in de stratosfeer wanneer men denkt aan het bestaan van de door chloor gekatalyseerde kettingreactie:



$$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$$
$$ClO + O \rightarrow Cl + O_2$$

met als netto resultaat:



$$O + O_3 \rightarrow O_2 + O_2$$

maar dit is niet de enige bedreiging want de overblijvende fragmenten van CFK's, de CCl_2F en de $CClF_2$, zijn ook chemisch actief en zullen snel met andere atmosferische moleculen reageren. De onderliggende chemische aanleiding voor deze activiteit is dat deze fragmenten in totaal een oneven aantal elektronen bevatten. Het is een fundamentele regel in de natuur dat elektronen bij voorkeur paren vormen zodat moleculen en atomen die een even aantal elektronen bevatten stabieler - minder snel reagerend- zijn dan die welke een oneven aantal elektronen bevatten. Alle in de lucht meest voorkomende gassen, zoals stikstof (N_2), zuurstof (O_2), argon (Ar) koolstofdioxide (CO_2) en water (H_2O) hebben een even aantal elektronen. Dat geldt ook zeker voor de zeer stabiele CFK's. Maar chlooratomen (Cl) hebben een oneven aantal elektronen, en dat is een reden waarom ze de neiging hebben om zich als paren tot chloormoleculen (Cl_2) te vormen. Maar als ze geen andere chlooratomen kunnen vinden om zich aan te verbinden dan zullen ze een elektron proberen af te pakken van ieder geschikt molecuul waar ze tegenaan botsen. Omdat het atoom waartoe het elektron 'behoort' daaraan vastzit, moet dat atoom ook mee komen wanneer het chlooratoom het elektron vastgrijpt. Dat is de reden waarom in ClO het zuurstofatoom aan het chlooratoom vastzit -maar wanneer er andere vrije zuurstofatomen in de buurt zijn waarmee het zuurstofatoom in de ClO een paar kan vormen, zal het dat ook doen omdat de aantrekkingskracht tussen twee zuurstofatomen zelfs nog sterker is dan de aantrekkingskracht tussen een chlooratoom en een zuurstofatoom. Zo raakt het Cl-atoom weer los en gaat opnieuw op zoek naar een partner en breekt dan weer een volgend ozonmolecuul af.
Door een chlooratoom (met een oneven aantal elektronen) van een CFK af te splitsen laat de ultraviolette straling een fragment achter dat ook een oneven aantal elektronen heeft en dat zal ook een reactie trachten aan te gaan ten einde weer

evenwichtige paren van elektronen te vormen. De fragmenten, bekend als vrije radicalen, doorlopen een reeks reacties waarbij zuurstof is betrokken en laten ten slotte opnieuw chlooratomen los in de stratosfeer, waardoor het ozonprobleem nog wordt verergerd.
Toen Rowland en Molina voor de eerste keer hadden uitgerekend hoe groot het probleem wel zou zijn, geloofden ze hun getallen niet. Overtuigd als ze waren dat ze een fout hadden gemaakt, haalde Rowland Harold Johnston erbij om ook zijn oordeel te horen en die vertelde hem toen over het werk aan de kettingreactie van chloor in de stratosfeer waartoe de ruimtevaartstudies aanleiding hadden gegeven. Overtuigd dat ze inderdaad geen stomme fouten in hun scheikunde of in hun berekeningen hadden gemaakt, schreef het Irvine team een rapport over hun werk en zond het naar Nature, dat het in juni 1974 publiceerde. In dezelfde uitgave van Nature verscheen een commentaar dat de aandacht vestigde op het belang van deze publikatie en dat duidelijk maakte dat "Indien de conclusies van Molina en Rowland juist zijn, de gevolgen van de afbraak van CF_2Cl_2 en $CFCl_3$ door straling in de stratosfeer niet onmiddellijk konden worden stopgezet, zelfs wanneer er geen nieuwe Freons meer bij het aardoppervlak zouden worden losgelaten"*. Maar zeker in Engeland werd dit beschouwd als interessant nieuws voor wetenschappers echter niet voor het algemene publiek en als er al gevaren waren, zag men die als ver verwijderde problemen voor de toekomst. In die tijd behoorde ik tot de staf van Nature waar ik verantwoordelijk was voor de Nature-Times News Service, waar voor de Times de dagelijkse rapporten over onderwerpen met een brede wetenschappelijke betekenis werden opgesteld. Maar ik heb volkomen over het hoofd gezien wat een belangrijk 'nieuws' het werk van Rowland en Molina zou worden en ik heb het nooit de krantekoppen en de uitvoerige verslaggeving bezorgd die het - uit 1987 terug kijkend- zo duidelijk verdiende. Datzelfde gold voor mijn collega's en concurrenten in het Verenigd Koninkrijk. Het was in de Verenigde Staten dat het verhaal de aandacht begon te trekken. Maar zelfs daar kwam het pas een paar maanden later in de krantekoppen van de nationale bladen, toen door andere teams berekeningen werden gepubliceerd die de realiteit bevestigden van de bedreiging die door de Irvine-onderzoekers aan het daglicht was gebracht.

3.4 De boodschap wordt uitgedragen

In september kwam de zaak in beweging toen Rowland over zijn werk met Molina verslag uitbracht op een bijeenkomst van de American Chemical Society die in Atlantic City plaats vond. Dit verslag werd uitvoerig in de kranten over het hele land behandeld maar nog in een vrij gematigde toon vergeleken met wat er daarna zou komen. Op 26 september 1974 kwam het CFK-ozon verhaal op de voorpagina van de New York Times, in een artikel van Walter Sullivan waarin hij de berekeningen

* Nature 249 (juni 28, 1974) p.797: De algemene toon van het commentaar -het tweede op de redactionele pagina's na een verhandeling over werk aan carcinogene stoffen, zoals asbest en PVC- was zo voorzichtig dat die bijna verontschuldigend aandeed.

beschreef die door Mike McElroy's groep in Harvard waren uitgevoerd. Rowland en Molina werden terloops genoemd. Op de volgende dag verscheen in het nummer van 27 september van Science, een artikel van Stolarski en Cicerone te Michigan, waarin zij hun berekeningen over het gevolg van de CFK's op de ozon in de stratosfeer presenteerden. De toevallige opeenvolging van Sullivans rapport en het verschijnen van hun eigen artikel in Science -als het al een toeval was- deed niet veel goeds aan de waardering van het Michigan team voor de Harvard-groep. Het formele wetenschappelijke artikel van de Harvard-groep waarin het werk dat ze naar Sullivan hadden laten uitlekken, werd behandeld, was drie dagen nadat het verhaal in de New York Times verschenen was, nog niet eens bij Science ontvangen. Het werd niet vóór februari 1975 gepubliceerd.
Maar als er dan al een paar betrokken wetenschappers warm onder hun boordje begonnen te worden over wat zij als een onfatsoenlijke publiciteitsstunt van een paar vakgenoten beschouwden (en eerlijkheidshalve moet hier worden vermeld dat, hoewel Nature wat publiciteitswaarde betreft nauwelijks met de voorpagina van de New York Times is te vergelijken, het werk van Stolarski en Cicerone al terloops was vermeld in een commentaar van Nature in juni, drie maanden voordat het officieel werd gepubliceerd) was dat allemaal niets vergeleken met de reactie van de industrie. Tegen het einde van 1974 was het verhaal al breeduit in de gedrukte media verschenen en was het al tot de nationale televisie doorgedrongen. De chemiereuzen die bij de produktie van CFK's waren betrokken, reageerden snel. Ze vroegen zich af wat de nauwkeurigheid was van de beweringen die niet alleen door Rowland en Molina maar ook door de Harvard- en Michigan-teams waren gedaan en ze trachtten aannemelijk te maken dat de CFK-industrie een te grote bijdrage aan de werkgelegenheid en de economie leverde om die in gevaar te brengen op grond van een paar berekeningen die door een stelletje academische wetenschappers waren gemaakt.
De spuitbusoorlog ging door in de rest van 1975 tot in 1976 en is tot in het kleinste detail in het boeiende boek van Dotto en Schiff beschreven. Deze geschiedenis werd op schrift gesteld net nadat de zaak in Amerika culmineerde in de eerste wetgeving die de bescherming van het aardse milieu tegen schade door CFK's ten doel had. Het standpunt dat gedurende het hele debat door de industrie werd ingenomen, was dat vooruitzichten die door Rowland, Molina en de anderen waren opgesteld alleen maar op 'een of andere theorie' berustten en nog niet door waarnemingen aan de werkelijke atmosfeer waren bevestigd. De redenering luidde verder dat het beter was om een paar jaar te wachten en gegevens te verzamelen dan, terwille van een paar speculaties, mensen op straat te zetten en een miljarden dollar-industrie in gevaar te brengen. Aan de andere kant van de lijn betoogden de wetenschappers (aangevoerd door Rowland die zich naarmate de strijd vorderde meer en meer tot een politiek dier ontwikkelde, en door Ralph Cicerone) dat spuitbussen in het bijzonder een luxe waren die we best zouden kunnen missen en dat een onmiddellijk verbod van het gebruik van CFK's als verstuivingsmiddelen noodzakelijk was. Tenslotte kon men ook andere stoffen als drijfgas gebruiken, zelfs als ze daarvoor niet helemaal zo geschikt waren als de CFK's. En de uitzonderlijke stabiliteit van CFK's in de troposfeer maakte een afwachtende benadering onhoudbaar -tegen de tijd dat we

werkelijk de door die verbindingen veroorzaakte afname van ozon zouden kunnen meten, zouden er al zoveel CFK-moleculen rondvliegen dat de gevolgen daarvan nog tientallen jaren zouden toenemen, zelfs als de produktie en de uitstoot onmiddellijk zouden worden gestaakt. (Dit punt sloeg met grote kracht in toen in de jaren tachtig het gat boven Antarctica werd ontdekt.) De milieulobby betoogde dat de Verenigde Staten, in medio jaren zeventig veruit het belangrijkste land wat de produktie en uitstoot van CFK's betreft, nu ook de leiding bij de beheersing van de uitstoot van deze stoffen moest nemen. Dan zou Amerika, zo hoopten de lobbyisten, vanuit een moreel sterke positie ook een voortrekkersrol tegenover andere landen kunnen spelen.

De twee auteurs, Dotto en Schiff, bevonden zich allebei in een ideale positie om het verhaal van de furieuze strijd, die zich in de jaren zeventig tussen de twee tegenstanders afspeelde, te kunnen vertellen. Dotto, een journaliste met haar basis in Toronto had de 'geschiedenis' van de ozon al bijna van het begin af aan verslagen en in februari 1974 had ze in het NASA-hoofdkwartier in Washington bijna een paniek veroorzaakt door haar vragen over de problemen betreffende het chloor dat van de raketten van de space shuttles afkomstig is. In die tijd meende men dat die problemen nog een geheim waren waarvan alleen de NASA-wetenschappers op de hoogte waren. Schiff, een hoogleraar chemie aan de York University in Toronto, was de eerste die de reactiesnelheid van stikstofoxide met ozon had gemeten en hij was de redacteur van een speciaal nummer van de Canadian Journal of Chemistry waarin de verslagen van de Kyoto-bijeenkomst waren opgenomen, met inbegrip van die kleine extraatjes van de Harvard- en Michigan-teams.

Als deskundige waarnemers uit de werelden van wetenschap en pers, beide betrokken bij de ozondebatten medio jaren zeventig, beschrijven Dotto en Schiff de gebeurtenissen van eind 1974 en het grootste gedeelte van 1975 als 'the Incredible Stratospheric Travelling Road Show and Debating Society' die uitvoeringen gaf in Washington D.C. en in de hoofdsteden van alle staten waar de wetgevende vergaderingen om een vertoning vroegen. Maar er kwam niets nieuws uit deze woordenstrijd voort. Het standpunt van de industrie dat maar 'eerst moest worden afgewacht' werd gedeeltelijk ondersteund door het plan van de industrie om zelf een onderzoeksproject van 5 miljoen dollar op te zetten dat dan in 'slechts' twee of drie jaar klaar zou moeten zijn. Het was speciaal Rowland die deze suggestie verwierp door er op te wijzen dat de regering van de VS al veel meer aan het Climatic Impact Assessment Program had uitgegeven en dat het geen zin had om te wachten totdat ditzelfde werk nog eens, en dan minder goed, zou zijn overgedaan.

De manier waarop een groot deel van de strijd werd gevoerd, kan worden geïllustreerd door een voorbeeld dat door de auteurs uit Toronto wordt vermeld. Een artikel in het vakblad Aerosol Age gaf commentaar op het feit dat een van de ambtenaren op een van de vele hoorzittingen een blanke huid en rood haar had. Nu zijn blanke, roodharige mensen natuurlijk gevoeliger voor zonnebrand en huidkanker dan donkere mensen en de stilzwijgende gevolgtrekking van het commentaar was dat zulke lui probeerden om hun minderheidsstandpunten aan de rest van de bevolking op te leggen.

Maar de wetenschappers waren ook niet immuun voor laster. Even voordat het hele stratosferische circus op gang kwam had de Amerikaanse chemische industrie tot haar grote vreugde een Britse wetenschapper, Richard Scorer, ontdekt die er geen bezwaar tegen had om de hele CIAP-studie als 'zwaarwichtige bombast' aan de kaak te stellen. Dotto en Schiff vertellen hoe Scorer prompt naar de VS werd overgevlogen waar hij het hele continent afreisde om overal zijn boodschap te brengen dat het idee van een relatie tussen CFK's en het verval van ozon 'volkomen onzin' was.
Alleen een voortzetting van het onderzoek zou de ammunitie kunnen leveren om de oorlog uit te vechten. Vroeg in 1975 bood NASA met succes aan om als leidend instituut bij dit onderzoek op te treden en begon het met een nieuw georganiseerde reeks metingen aan de stratosfeer. Al in december 1974 dienden de congresleden Paul Rogers van Florida en Marvin Esch van Michigan een wetsontwerp in waarbij aan de NAS (National Academy of Sciences) werd opgedragen het probleem te bestuderen en de EPA (Environmental Protection Agency) werd gemachtigd om de CFK's zonodig te verbieden. Er werd met de hoorzittingen begonnen maar de zittingsperiode van het Congress eindigde een paar dagen later en daarmee verdween ook het wetsontwerp. Tijdens de volgende zitting van het Congress, in 1975, werden nog meer wetsontwerpen ingediend en er werd een commissie opgericht met de naam IMOS (een gedeeltelijk letterwoord voor een verwrongen naam waarin de woorden Inadvertent Modification of the Stratosphere voorkwamen). Toen het juni geworden was rapporteerde IMOS dat er een 'gegronde aanleiding tot bezorgdheid' was. Maar toen was de NAS juist bezig aan een meer gedetailleerde studie van CFK's en hun vermoedelijke effecten op de stratosfeer en iedereen werd dringend verzocht om van actie af te zien totdat het NAS rapport verschenen zou zijn. Indien de NAS-studie volgens plan zou verschijnen, waren, volgens IMOS, de voorschriften vroeg in 1978 te verwachten. De commissie adviseerde om spuitbussen die CFK's bevatten van een merk te voorzien, zodat het publiek zou weten wat het voor zich had en de voor het milieu onschadelijke spuitbussen die dus andere drijfgassen bevatten, niet te lijden zouden hebben onder de slechte naam die de bus bij de klant begon te krijgen. Zowel de industrie als het publiek vatten dit op als een uitspraak: "Schuldig, totdat het tegendeel is bewezen" en dat was weer aanleiding tot een heftige propaganda-activiteit in de maanden die aan het NAS-rapport vooraf gingen. Iedereen die geen belangen bij de CFK-fabricage heeft vond (en vindt nog) deze uitspraak nogal redelijk -gewoon een logische toepassing van het principe dat nieuwe geneesmiddelen niet in de praktijk worden beproefd door ze door de gebruikers te laten slikken en dan te kijken of er doden vallen, maar dat ze eerst uitputtend op schadelijke effecten moeten worden onderzocht met het uitgangspunt dat ze niet deugen totdat bewezen is dat ze goed voor je zijn. Maar de industrie zag het zo niet en ging door met haar terrein te verdedigen terwijl men op het rapport van de NAS-groep wachtte.
De NAS-groep kwam in april 1975 voor het eerst bijeen en had oorspronkelijk de opdracht om in begin april 1976 rapport uit te brengen. Harold Schiff van York University, Toronto was lid van deze groep en het boek dat hij samen met Lydia Dotto schreef geeft een goed inzicht in alle moeilijkheden en beproevingen in deze

periode van wetenschappelijk onderzoek, dat in volle openheid voor de publieke belangstelling werd uitgevoerd. Om verschillende redenen werden de beraadslagingen in de groep langer voortgezet. Er werden andere chemische stoffen, in het bijzonder chloornitraat, ter discussie gesteld en hun effect moest worden berekend. Bovendien werd nog een nieuw probleem aangedragen door Paul Crutzen die besefte dat de vernietiging van ozon in de stratosfeer de warmtebalans van de atmosfeer zou veranderen en daardoor een wijziging van het klimaat van onze planeet tot gevolg kon hebben. (Crutzen heeft er altijd een griezelig handje van gehad om nieuwe problemen te formuleren die met de uitputting van de ozon in de stratosfeer verband houden; en dit probleem wordt nu bijzonder klemmend in het licht van de veranderingen die zich onlangs in het zuidelijk halfrond hebben afgespeeld.) Het NAS-rapport kwam in feite uit in september 1976 met een voor de tegenstanders toentertijd onaanvaardbare vertraging. Met het perspectief waarmee we nu over een tiental jaren kunnen terugkijken lijkt het er toch op dat er, ondanks al het getier en geblaas van de propagandaoorlog, door de wetenschappelijke en politieke gemeenschappen met een prijzenswaardige snelheid is opgetreden. Daarbij is de ware aard van het probleem goed onderkend en zijn er ook prompt stappen genomen om het te verzachten. Helaas bleek dat die stappen te klein en te laat waren.

3.5 Hoe staan de zaken nu?

Op grond van het NAS-rapport werden er in de VS maatregelen genomen om de uitstoot van CFK's in het milieu te beperken. De later verbeterde berekeningen waarbij nog betere scheikunde en nog betere computermodellen zijn gebruikt, hebben deze maatregelen ten volle gerechtvaardigd. Het NAS-rapport kwam tot de conclusie dat, zelfs wanneer de uitstoot van CFK's op de niveaus van 1973 zou worden vastgehouden, er een verlaging van 6 tot 7,5 procent van de ozonconcentratie in de stratosfeer zou optreden, waarvan het gevolg zou zijn dat 12 tot 15 procent meer ultraviolette straling het aardoppervlak zou bereiken. In mei 1977 werd in een gezamenlijke verklaring van de Food and Drug Administration (FDA), de EPA en de Consumer Product Safety Commission (CPSC) een tijdschema opgesteld voor het doen verdwijnen van CFK's uit spuitbussen en in maart 1978 waren de benodigde wetten uitgevaardigd. Met deze wetten werd per oktober 1978 de vervaardiging van CFK's voor toepassing als drijfgas in de VS verboden. Twee maanden later moesten de bedrijven ophouden met het gebruik van bestaande CFK voorraden bij de vervaardiging van spuitbussen en in april 1979 zou het bij de wet verboden zijn om spuitbussen die CFK-drijfgassen bevatten van de ene staat naar de andere te vervoeren. Door kleine achterdeurtjes in de wet bleef het toegestaan om CFK's als actief middel in spuiten te gebruiken, bijvoorbeeld als reiniger in de elektronische industrie, en in 'essentiële' toepassingen waaronder een paar medische gevallen zoals het opspuiten van pijnstillers zonder dat de beschadigde huid wordt aangeraakt. Hoewel in die tijd de VS verantwoordelijk was voor iets minder dan de helft van de jaarlijkse totale uitstoot van CFK's in de wereld en er al een steeds kleiner aandeel in spuitbussen was verwerkt sinds de angst in 1973 om zich heen greep, was dit toch een belangrijke stap wat de bescherming van het wereldmilieu betreft. De

gehele werelduitstoot van CFK's ging daardoor een aantal jaren omlaag. Maar in de jaren tachtig, toen de andere toepassingen van CFK's bleven toenemen en andere landen doorgingen met het gebruik van CFK's in spuitbussen, begonnen de totale emissies weer te stijgen. In 1978 begon de Chemical Manufacturers Association met een netwerk van meetstations, voortbouwend op het pionierswerk van Lovelock, om daarmee het CFK-gehalte van de atmosfeer te volgen. De producenten hoopten het bewijs te vinden dat deze verbindingen in werkelijkheid in de troposfeer worden vernietigd en daardoor de ozonlaag niet in de voorspelde hoeveelheden zouden bereiken. Maar ze werden teleurgesteld. Het meetprogramma, ALE of Atmospheric Lifetime Experiment genoemd, laat zien dat de concentraties van F-11 en F-12 in de atmosfeer nu respectievelijk 230 ppt (part per trillion) en 400 ppt bedragen. *De huidige concentraties in 1991 bedragen 280 ppt voor F-11 en 480 ppt voor F-12.* ALE is sindsdien opgevolgd door het Global Atmospheric Gases Experiment (GAGE), dat hoofdzakelijk wordt betaald door NASA en de National Oceanographic and Atmospheric Administration met een bijdrage van de Chemical Manufacturers Association. GAGE beheert vier automatische waarnemingsstations, in Oregon, Barbados, Samoa en Tasmanië. De metingen geven nog steeds aan, precies zoals Lovelock al in het begin van de jaren zeventig had opgemerkt, dat in wezen alle CFK's die in het milieu zijn losgelaten zich nog altijd in de atmosfeer bevinden. En de concentraties nemen met ongeveer 4 procent per jaar toe.

Die concentraties lijken nog klein. Maar in 1987 schatte Sherry Rowland dat één enkel chlooratoom dat in de stratosfeer wordt losgelaten daar 100.000 ozonmoleculen zal vernietigen voordat dat atoom zelf in een of andere minder reactieve vorm wordt opgesloten (misschien als Cl_2) en weg zal zakken naar de troposfeer. Bij de huidige uitstootsnelheden worden F-11 en F-12 zes maal sneller in de atmosfeer gebracht dan ze door ultraviolette straling in de stratosfeer worden afgebroken en dat is de reden waarom de concentraties van deze stoffen, zowel in de troposfeer als in de stratosfeer, toenemen. Inderdaad zijn de concentraties in de atmosfeer blijven toenemen, ook toen van 1974 tot 1980 de emissies in feite wat terugliepen -een bevestiging van de lange levensduur van die verbindingen in de atmosfeer. Omdat maar een zesde deel van de CFK's die het milieu binnenkomen, wordt vernietigd zou men de huidige emissies tot maar één zesde (15 procent) van hun tegenwoordige niveaus moeten terugbrengen om alleen maar te voorkomen dat de concentraties die nu optreden, nog hoger zullen worden -en die huidige concentraties doen al ernstige schade aan de ozonlaag boven Antarctica. Om de CFK-concentraties in de lucht te verlagen is het nodig om de emissies zelfs verder omlaag te brengen, bij voorkeur helemaal tot nul. Maar zelfs dan zouden de CFK's in aanzienlijke hoeveelheden blijven ronddrijven tot in de tweede helft van de 21e eeuw. Pogingen in 1987 om het probleem aan te pakken hadden ten doel de emissies op korte termijn tot 85 procent van de huidige niveaus omlaag te brengen -lachwekkend ontoereikend wanneer aan de ophoping van CFK's een eind moet worden gemaakt.

In aansluiting op het succes van de eerste wetten tegen de spuitbusgassen stelde de Environmental Protection Agency in 1980 voorstellen op om de gehele CFK-produktie in de VS, met inbegrip van andere toepassingen zoals koeling, tot de toen

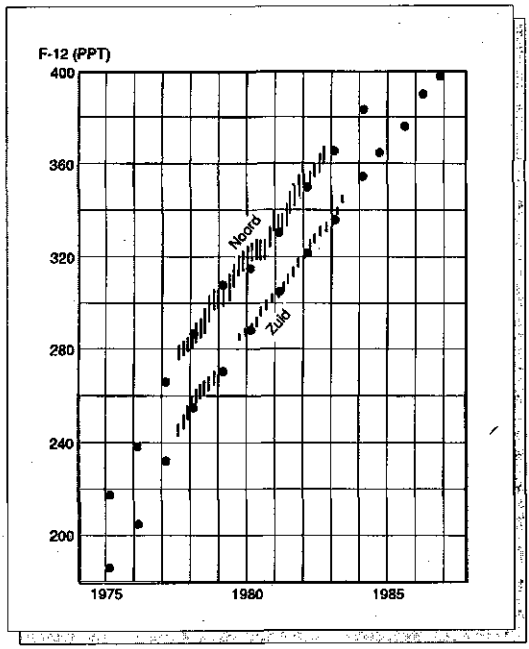


Fig. 4 Gemeten concentraties van CFK-12 op het noordelijk halfrond (Oregon) en het zuidelijk halfrond (Zuidpool)
(Bron: The Hole in the Sky - Gribbin)

optredende niveaus te beperken. Maar de regeringswisseling van 1981 maakte al snel een einde aan deze plannen. Het milieu was een politiek programmapunt dat min of meer paste in de filosofie van de Carter-regering, maar dat kon niet van de Reagan-regering worden gezegd. Die werd door een president geleid die eens bij een in het oog lopende gelegenheid zei tegen een lobbyist die zich zorgen maakte over de verwoesting van de Californische bossen: "Als je één redwood hebt gezien dan heb je ze allemaal gezien". Maar terwijl het politieke klimaat in de VS tegen de milieulobby in verschoof, leidde in de jaren tachtig een langzaam verlopend proces van internationale politieke besprekingen onder auspiciën van de United Nations Environmental Program (UNEP) tot een overeenkomst die bekend is als de Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer. De overeenkomst werd in maart 1985 getekend en in werking gesteld door de conferentie van Montreal waarvan het tijdstip in 1987 op een slecht moment was gekozen.
Het onderzoek dat voor de Weense conventie was verricht, leverde de meest recente en beste maatstaf op waartegen de risico's voor de stratosfeer kunnen worden afgemeten. Modellenbouwers uit verschillende landen kwamen in april 1987 in Würzburg, West-Duitsland bijelkaar en concludeerden dat zelfs een onmiddellijke, wereldwijde beëindiging van de toename in CFK-uitstoot toch nog in 2050 een

verlaging van 1 procent in de wereldwijde stratosferische ozonconcentratie tot gevolg zou hebben. Bij een toename van de CFK-uitstoot van 3 procent per jaar treedt de 1 procent afname van de ozonconcentratie al in het jaar 2000 op en die afname bereikt dan de 4 procent tegen het jaar 2040. Maar hoe betrouwbaar zijn die modellen? De gegevens uit een experiment aan boord van de Nimbus 7 satelliet duiden er op dat de ozon op noordelijke breedtegraden onlangs vier tot zes maal sneller is verdwenen dan de modellen aangeven; de metingen geven de indruk dat de totale ozonhoeveelheid al met zo'n drie procent is afgenomen *(fig. 12)*. En dit alles verbleekte totaal toen in het voorjaar van 1987 de ontdekkingen in Antarctica werden gedaan door de Punta Arenas expeditie in het zuidelijk halfrond. Geen enkel model had zelfs maar een zwakke aanwijzing opgeleverd voor de soort van ozonafbraak die nu ieder jaar boven Antarctica te zien is.
De milieulobby heeft in de jaren zeventig de spuitbusoorlog in de Verenigde Staten gewonnen. Maar toen kwamen de lobbyisten tot de ontdekking dat dit nog lang niet de hele oorlog was maar alleen maar een eerste gevecht in een veel grotere veldtocht -een veldtocht waarin in andere landen nog steeds het gebruik van CFK's in spuitbussen aan de orde is, maar waarin misschien ook kunstmest en auto-uitlaatgassen *(speciaal auto's met een 3-weg katalysator!)* zijn betrokken. En ook CFK's en andere chloorbevattende verbindingen die tot nu toe aan regulering zijn ontsnapt, plus natuurlijke invloeden zoals vulkanische uitbarstingen. Toen het Antarctische ozongat was ontdekt leek het er op dat ongeveer alles wat in de atmosfeer terechtkomt en de stratosfeer kan bereiken het natuurlijke evenwicht van de ozon in de stratosfeer wel eens zou kunnen verstoren.

Literatuur

Dotto, L., H. Schiff "*The Ozone War*" New York, Doubleday (1978)
Lovelock, J.E., L. Margulis "Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: The Gaia hypothesis", *Tellus* 26, 2-10 (1974)
Lovelock, J.E. et al "Halogeneated hydrocarbons in and over the Atlantic", *Nature* 241, 194-196 (1973)
Molina, M, F.S. Rowland "Stratospheric sink for chlorofluormethanes-chlorine atomic-atalysed destruction of ozone", *Nature* 249, 810-812 (1974)
McElroy, M.E. et al, *Rev.Geoph.Space*, Pl. 14, 143 (1976)
Stolarski, R.S., R.J. Cicerone, *Can.J.Chem.* 52, 1610 (1974)

Hoofdstukvier

4.1 Ozon-eters en de biosfeer

Hoewel het SST-probleem in de jaren zeventig nooit een echte bedreiging voor de ozonlaag is geweest, eenvoudig omdat er maar zo weinig SST's de lucht in gingen, bleef de vraag over het verband tussen NO_x en de stratosfeer de geesten van de milieuchemici bezig houden. Stikstofoxides komen van nature in de atmosfeer voor en bereiken van daar uit de stratosfeer, waar ze betrokken zijn bij het chemisch evenwicht waardoor boven ons hoofd een ozonlaag in stand wordt gehouden. Pas aan het eind van de jaren zestig begon men in te zien hoe belangrijk NOx is bij de handhaving van dit dynamisch evenwicht waarbij ozon enerzijds voortdurend door een aantal fotochemische processen wordt vernietigd, maar anderzijds door andere processen weer wordt aangevuld. Voordien hadden de chemici geprobeerd een balans op te stellen zonder daarbij NO_x te betrekken. Hun berekeningen wezen uit dat er tweemaal zo veel ozon zou worden geproduceerd als er zou worden vernietigd -dat was duidelijke onzin, omdat metingen uitwezen dat de concentratie van ozon in de stratosfeer niet dramatisch toenam. Het was Paul Crutzen die er op wees dat de van nature in het milieu voorkomende NO_x een belangrijke aanleiding tot het verdwijnen van ozon uit de stratosfeer zou kunnen opleveren. In een artikel dat in 1971 werd gepubliceerd, slaagde hij er in om de chemische balans kloppend te maken. Dit was de directe aanleiding tot zijn belangstelling voor het SST-debat en zijn voortdurend aandeel in de ozonstudies tot en met de huidige pogingen om het gat boven Antarctica te verklaren.

Het feit dat NO_x, in tegenstelling tot CFK's, tot het natuurlijk milieu behoort, betekent nog niet dat het 'veilig' is of dat het niet door invloeden van de mens ontregeld zou kunnen worden, dat hadden de beschouwingen over de SST en de space shuttle al wel aangetoond. Toen tegen 1974 de eerste schoten in de spuitbusoorlog vielen had Crutzen ook een andere bron van NO_x-vervuiling aangewezen die hij noemde in een artikel waarin hij een opsomming gaf van een aantal mogelijke oorzaken, zowel natuurlijke als antropogene, die aanleiding konden zijn tot veranderingen van de ozonconcentratie in de stratosfeer. In zekere zin was deze nieuwe suggestie nog alarmerender dan de CFK-bedreiging want het leek er nu op dat de in de landbouw gebruikte kunstmeststoffen de vernietiging van ozon in de stratosfeer op een significante manier zouden kunnen versnellen. Misschien dat we het dan zonder spuitbussen kunnen doen, maar zouden we het in een wereld met een snel groeiende bevolking ook zonder stikstofkunstmest kunnen stellen?

De laatste berekeningen geven de indruk dat, wanneer het gebruik van kunstmest al invloed op de stratosfeer zou hebben, die waarschijnlijk toch betrekkelijk klein zou zijn in vergelijking tot het gevolg van andere vervuilingen, en die invloed zou dan nog

maar langzaam op gang komen -maar men moet wel bedenken dat de som van 'betrekkelijk kleine invloeden' wel eens wat zorgwekkends kan opleveren. Maar een goed inzicht in de manier waarop deze mogelijke bedreiging kan ontstaan is speciaal van belang voor het hele debat over de relaties tussen mens en milieu, omdat het, beter dan elk ander aspect van het ozondebat, duidelijk maakt hoe nauw het fysieke milieu en de levende organismen op aarde met elkaar samenhangen. Als je de stikstofcyclus aan het werk ziet, zie je hoe Gaia functioneert.

4.2 Biologische kringlopen

Er zijn op aarde 92 natuurlijk voorkomende chemische elementen gevonden maar daarvan zijn er maar 27 essentieel voor het leven en dan zijn de meeste moleculen van levende organismen nog maar uit een verbazingwekkend klein aantal van deze bouwelementen samengesteld. Het belangrijkste element in de moleculen van levende organismen -organische stof- is koolstof dat het bijzondere vermogen heeft om zich aan een viertal andere atomen te binden, waaronder ook koolstofatomen die zelf al aan andere atomen gebonden zijn, enzovoort, zodat dan ingewikkelde moleculen worden gevormd. Koolstof is voor het leven zo belangrijk dat de studie van koolstofverbindingen op zichzelf bekend is onder de naam 'organische chemie'. Als men water, dat meer dan drie kwart van het menselijk lichaamsgewicht uitmaakt, buiten beschouwing laat, bestaat meer dan de helft van het droge gewicht (de rest) van het menselijk lichaam uit koolstof. Een kwart van het droge gewicht is zuurstof en ongeveer tien procent is stikstof.

Stikstof is een essentiële bouwstof voor de vele verschillende soorten van eiwitten waaruit een levend lichaam is opgebouwd. De stikstof komt meestal voor in een eenheid die is afgeleid van ammoniak (NH_3). Door een van z'n waterstofatomen los te laten kan het stikstofatoom in dit molecuul zich hechten aan een koolstofatoom om zodoende een aminogroep, CNH_2 te vormen. Zo'n aminogroep zwerft niet vrij rond in uw lichaam of waar dan ook, omdat het koolstofatoom zich met drie andere atomen kan verbinden (die dan zelf ook weer aan andere atomen kunnen zijn gebonden, enz.) en zo deel zal uitmaken van een veel ingewikkelder molecuul. Maar de amine heeft karakteristieke chemische eigenschappen, zelfs als onderdeel van een groter molecuul, en het geeft daarom zijn naam aan een speciale groep van organische moleculen, de aminozuren, die essentieel zijn voor het leven.

Alle aminozuren zijn opgebouwd uit meerdere koolstof- en waterstofatomen, een aantal zuurstofatomen en tenminste één amine, en die zijn dan op verschillende manieren gerangschikt. Eiwitten bestaan uit aan elkaar gevoegde ketens van aminozuren en er zijn precies twintig verschillende aminozuren nodig om daaruit alle eiwitten van het menselijk lichaam samen te stellen. De manier waarop aminozuren elkaar in die eiwitten vasthouden hangt af van de aantrekkingskracht die de koolstof- en stikstof-atomen voor elkaar hebben. Wanneer twee aminozuren samenkomen zal de aminogroep in het ene aminozuur nog één van z'n waterstofatomen loslaten en een koolstofatoom in het andere aminozuur laat een OH-groep los. De losgelaten H en OH vormen dan samen water en de twee aminozuren worden door een koolstof-stikstofverbinding aan elkaar gevoegd. Deze koolstof-stikstofverbindingen

zijn de essentiële schakels die de eiwitten instandhouden. Alsof zij daarmee nog geen voldoende belangrijke rol in de levensprocessen zouden spelen, zijn stikstofatomen ook nog belangrijke bouwstenen voor nucleïnezuren, DNA- en RNA, dragers van de genetische code, waarvan de structuur als de 'double helix' bekend staat.
Levende organismen hebben dus stikstof nodig. Waar halen ze die vandaan? Omdat de atmosfeer van onze planeet voor zo'n groot gedeelte uit vrije stikstof bestaat denkt u misschien dat dit geen probleem kan opleveren. Maar bijna alle atmosferische stikstof is aanwezig als een twee-atomig molecuul (N_2) dat uitermate stabiel is en heel moeilijk te splitsen. Deze ongesplitste stikstofmoleculen zijn niet beschikbaar voor reacties met andere stoffen; daarvoor moeten de moleculen eerst in de individuele atomen worden gesplitst en daar is energie voor nodig. Het feit dat aminozuren zo belangrijk zijn voor het leven is er een aanwijzing voor dat de vroege vormen van leven op aarde hun stikstof van de ammoniak zelf kregen. Het is nog altijd een onderwerp van discussie hoeveel ammoniak er nu wel in de vroege atmosfeer van de aarde aanwezig kan zijn geweest, maar er was ongetwijfeld meer dan er tegenwoordig is en het moet zeker één van de ingrediënten van de 'oersoep' zijn geweest. Maar naarmate het leven zich verder ontwikkelde moet de voorraad ammoniak uitgeput zijn geraakt en een aantal levende organismen moest 'leren' hoe ze de stikstof aan de lucht zelf konden onttrekken om daarmee levende moleculen op te bouwen -dat is een proces dat stikstofbinding heet- wat in feite neerkomt op het gebruik van atmosferische stikstof voor het maken van ammoniak.
Een plant die geen stikstof kan binden is als een dorstige man op een reddingsvlot midden in de oceaan. Hij is omgeven door water maar kan het niet drinken; de plant is ondergedompeld in stikstof en kan het niet gebruiken. Dieren kennen dat probleem niet omdat ze hun aminozuren binnenkrijgen door planten te eten, of andere dieren die zelf planten hebben gegeten. Het is zelfs zo dat planten geen moleculair stikstof (N_2) binden, maar dat ze het in de vorm van nitraten aan de bodem onttrekken. Aan de basis hangt al het aardse leven af van bepaalde levensvormen die toch ergens dat karwei van stikstofbinding uit de atmosfeer uitvoeren en die in de eerste plaats voor de aanwezigheid van die nitraten in de bodem verantwoordelijk zijn.
Zeer vroeg in de geschiedenis van de aarde moet de noodzaak om op één of andere manier stikstof te binden zwaar op het leven hebben gedrukt. Er zijn tegenwoordig bacteriën bekend die hun energie alleen maar uit fermentatie verkrijgen, dat is een primitiever proces dat al eerder dan de fotosynthese bestond, maar dat toch het vermogen had om de ingewikkelder truc van de stikstofbinding uit te voeren. De voorouders van deze bacteriën zijn blijkbaar nooit gedwongen om de fotosynthese te ontwikkelen maar ze hadden de stikstofbinding nodig om te overleven. Tot op heden is het nog altijd niet helemaal duidelijk hoe nu precies stikstof door biologische organismen, waaronder deze klaarblijkelijk primitieve bacterievormen, wordt gebonden. Stikstof bindende organismen gebruiken energie om watermoleculen te splitsen, daarbij komt waterstof vrij dat ze dan met stikstof verbinden tot ammoniak. Deze truc vereist veel energie en voltrekt zich met behulp van een katalysator, een enzym met de naam nitrogenase, dat op één of andere manier de chemische reacties

mogelijk maakt. De zeer intensieve pogingen om de daarbij betrokken chemie te begrijpen en te reproduceren, zijn tot nog toe zonder succes gebleven; wanneer men daarin zou slagen zou men over de middelen beschikken om stikstof min of meer naar believen te binden en daarmee een enorme zet aan de landbouw te geven. Maar misschien zou dat, zoals we straks zullen zien, een twijfelachtige zegen betekenen. Men kan de opmerkelijke eigenschappen van nitrogenase onderkennen door de werkzaamheid van dit enzym te vergelijken met andere processen waardoor stikstof aan de lucht onttrokken wordt en waardoor moleculen ontstaan die door planten kunnen worden benut. De bliksem, die de lucht op zijn weg tot 10.000 °C verhit, verschaft de energie om stikstofmoleculen in atomen te splitsen en bevordert zo de vorming van salpeterzuur doordat die atomen reageren met zuurstof en water in de lucht (later gaat dat salpeterzuur over in nitraten). De industriële processen voor de stikstofbinding behelzen reacties onder hoge temperatuur en druk in gesloten vaten. Maar de bacteriën voeren die truc routinematig uit onder alledaagse omstandigheden wat temperatuur en druk betreft. Toch zouden er 20.000 bacteriën voor nodig zijn om, mannetje aan mannetje, een afstand van iets meer dan acht millimeter te overspannen en men schat dat de totale hoeveelheid nitrogenase, waar al het leven in de wereld van afhangt, niet meer dan een paar pond bedraagt.

Stikstofbindende bacteriën komen in de hele levende wereld voor. Regen die op bomen valt, bevat boven in de bomen meer opgeloste stikstof dan onderaan omdat er op de bladeren en takken van de boom organismen leven die stikstof opnemen* terwijl het water er overheen druipt. Maar de meeste stikstof wordt vastgelegd door bacteriën die in een zeer hechte symbiotische gemeenschap met bepaalde plantesoorten leven. De bekendste van deze soorten behoren tot de vlinderbloemigen zoals erwten, bonen, klaver, sojabonen en aardnoten, maar ook andere leguminozen en bijvoorbeeld elzenbomen bezitten die mogelijkheid. Daarbij gaat het dan om knolletjesbacteriën die in of bij de wortels van de plant leven. Die planten verschaffen de bacteriën de energie om zich te ontwikkelen en de stikstofverbindingen die de bacteriën produceren komen de gastplant ten goede, en blijven dan na het verteren van de wortels en de knolletjes, in de bodem achter. Dit proces ligt ten grondslag aan de praktijk van de vruchtwisseling die de boeren al lang hadden uitgevonden voordat ze iets van stikstof en bacteriën af wisten. De grond waarin de stikstof door andere gewassen is uitgeput en die daardoor slechte oogsten zou opbrengen, kan weer tot leven gebracht worden door er een vlinderbloemig gewas op te verbouwen als onderdeel van de vruchtwisselingscyclus. Een van de doelen die de biologen zich tegenwoordig hebben gesteld is ofwel de knolletjesbacteriën er toe te brengen zich in de wortels van graangewassen te nestelen, ofwel genetische manipulatie toe te passen om de genen van de knolletjesbacteriën in de cellen van de granen te introduceren.

Tegenwoordig hoeven planten de benodigde stikstof niet in de vorm van ammoniak

* Niet alleen bacteriën, maar ook andere 'primitieve' levensvormen, zoals bepaalde algen en korstmossen kunnen dit kunstje uitvoeren. Maar bacteriën spelen de belangrijkste rol.

op te nemen. Naarmate de zuurstofatmosfeer van de aarde zich ontwikkelde kwamen er in de bodem steeds meer nitraten voor, dat zijn verbindingen die stikstof en zuurstof bevatten, gebonden aan andere elementen, deels ten gevolge van de bliksem in de atmosfeer maar in hoofdzaak omdat de ammoniak die door vertering van wortels en knolletjes vrijkomt door nitrificerende bacteriën in nitraat wordt omgezet. De planten nemen de nitraten op en gebruiken die om ammoniak te produceren waarbij dan koolstofdioxide als bijprodukt vrijkomt.
Dit alles lijkt misschien erg ver van de ozonlaag in de stratosfeer af te liggen. Maar hier verschijnt een ander soort bacterie op het toneel. Omdat planten nitraten gebruiken is er meestal niet erg veel nitraat in de bodem aanwezig. Maar er is altijd wel iets, onder andere de nitraten die afkomstig zijn uit de overblijfselen van afgestorven organismen, en levende organismen vinden in het algemeen wel een manier om van elke beschikbare bron gebruik te maken. Sommige bacteriën die doorgaans hun energie door ademhaling opdoen (door zuurstof uit de lucht op te nemen en die met koolstof te 'verbranden' net zoals wij dat doen) hebben ook het vermogen ontwikkeld om hun zuurstof aan nitraten te onttrekken. Dat vermogen vertegenwoordigt dus een indrukwekkende veelzijdigheid, maar de in nitraten aanwezige zuurstof is niet zo gemakkelijk beschikbaar als de zuurstof in de lucht zodat de nitraat-ademhaling een soort van laatste redmiddel voor deze 'stikstof onttrekkende' bacteriën is. Als er helemaal geen vrije zuurstof beschikbaar is, in het water onder het bodemoppervlak of op een andere van de lucht afgesloten plek, dan zullen ze alle zuurstof uit de nitraten halen, waarbij de stikstof weer in het milieu vrijkomt als stabiele, twee-atomige moleculen (N_2). Maar wanneer er een beetje vrije zuurstof in hun omgeving is te vinden, maar niet genoeg om van te leven zullen ze alleen wat ze te kort komen aan de nitraten onttrekken. In dat geval zal het afvalprodukt dat ze loslaten nog enige zuurstof bevatten. Dat is dan distikstofoxide, N_2O, ook bekend als lachgas.
Op dit punt aangeland is de biologische kringloop compleet. De stikstof is weer in de atmosfeer terug en kan opnieuw gebonden worden door toekomstige generaties van levende organismen (de energie die de kringloop aandrijft is tenslotte natuurlijk afkomstig uit het zonlicht). Maar onderweg is er net een beetje distikstofoxide geproduceerd. En daar is het dat biologische processen van invloed zijn op de ozon.

4.3 Lachgas is niet zo grappig

Distikstofoxide heeft verdovende eigenschappen en in kleine hoeveelheden veroorzaakt het symptomen die op dronkenschap lijken, vandaar de populaire naam. Maar afgezien van deze belangwekkende eigenschap is het een zeer inert gas. Er zijn in de troposfeer geen natuurlijke chemische reacties bekend die het kunnen vernietigen of het in andere chemische vormen kunnen vastleggen, en als het eenmaal is losgelaten zweeft het rond en hoopt het zich op, om op een gegeven moment z'n weg omhoog naar de stratosfeer te vinden. Het verhaal komt ons bekend voor en dat geldt ook voor de gevolgen. In de stratosfeer veroorzaakt de ultraviolette straling reacties die de distikstofoxide afbreken tot andere vormen van NO_x, in het bijzonder NO, dat met ozon reageert. Dit is een natuurlijk proces dat, zoals we hebben gezien, helpt om

het huidige ozonevenwicht in de stratosfeer te handhaven. De terugkoppeling met het leven is dubbel fascinerend, omdat de zuurstof in de lucht, waaruit de ozon afkomstig is, zelf weer door levende organismen wordt geproduceerd. Als de Gaia-hypothese van Lovelock juist is, moet de hoeveelheid N_2O, en daarmee ook de hoeveelheid NO die op natuurlijke wijze is geproduceerd, het evenwicht onderhouden waarbij de ozonconcentratie in de stratosfeer net de juiste waarde heeft om het aardoppervlak te beschermen tegen schade door ultraviolette straling, terwijl ook net voldoende straling wordt doorgelaten om de omstandigheden te handhaven die het leven mogelijk maken. Het probleem waar Crutzen in 1974 op wees, betreft de nitraatbemesting van de bodem (niet alleen in bouwland maar ook in onze parken en, speciaal in Amerika, de golfbanen die daar 10 procent van de kunstmest van de Verenigde Staten opslokken). Daarmee verschaffen we de grondstof waar de stikstofonttrekkende bacteriën zich aan vergasten en daarmee vergroten we de lading N_2O in de troposfeer en NO in de stratosfeer.
Dit geval illustreert duidelijk wat de potentiële gevaren zijn die aan een ondoordachte ingreep in het milieu verbonden zijn, zelfs wanneer de doelstelling -opvoeren van de voedselproduktie- goed is. Maar het is erg moeilijk om aan deze bijzondere bedreiging voor de ozonlaag cijfers te verbinden. De hoeveelheid NO die de stratosfeer bereikt, hangt af van de hoeveelheid N_2O die door de stikstofonttrekkende bacteriën wordt geproduceerd en het is zeker niet duidelijk dat bijvoorbeeld een verdubbeling van de hoeveelheid nitraten ook hun activiteit zou verdubbelen. Zij voeren dat stikstofonttrekkings-kunstje alleen maar uit wanneer ze een zuurstoftekort hebben, in het bijzonder in natte bodems en zelfs dan hebben ze meestal zo'n sterk zuurstoftekort dat ze het allemaal aan de nitraten onttrekken en daarmee hoofdzakelijk het onschadelijke stikstofgas losmaken. Dan komt daar nog de vraag bij hoe snel de nitraten die aan de bodem worden toegevoegd, door de bacteriën worden verwerkt. De bedoeling van de toevoeging van kunstmest is om de groei van gewassen te bevorderen; die gewassen worden opgegeten en zo komt de stikstof weer terecht in de biologische kringloop. Een overmaat aan nitraten die van de velden wordt afgespoeld, zal dan misschien de groei van de bomen in de aangrenzende bossen bevorderen of misschien de micro-organismen in rivieren, meren en zeeën. Het kan misschien een hele tijd duren voordat er veel stikstof voor de stikstofonttrekkende bacteriën beschikbaar is, zelfs als ze die willen of moeten gebruiken. Maar de getallen van de menselijke nitraatproduktie zijn schrikwekkend. Men heeft geschat dat er door natuurlijke processen ongeveer 300 miljoen ton stikstof per jaar gebonden wordt. In het midden van de jaren zeventig, toen Crutzen op het probleem wees, werd daaraan door menselijke activiteiten nog 15 procent toegevoegd. Het gebruik van kunstmest is sindsdien snel toegenomen, niettegenstaande de stijgingen in de energieprijs (het maken van nitraatkunstmest vergt heel veel energie) en volgens sommige schattingen zouden we in het begin van de 21e eeuw al evenveel nitraat aan de bodem toevoegen als alle natuurlijke processen samen. Dat betekent dan zo'n dramatische verandering van het natuurlijk evenwicht dat het praktisch onmogelijk is om te voorspellen wat daarvan de gevolgen zullen zijn, niet alleen voor de ozonlaag maar ook voor de andere componenten van het

ecosysteem. Distikstofoxide wordt ook door verbranding aan de atmosfeer toegevoegd, elke keer wanneer er steenkool of olie in de lucht wordt verbrand. De hitte van het vuur splitst enige stikstofmoleculen in de atmosfeer en een paar daarvan binden zich met zuurstof tot N_2O.
Deze niet-biologische distikstofoxide volgt precies dezelfde atmosferische kringloop als het lachgas dat door stikstofonttrekking vrij komt. De schattingen betreffende de gecombineerde gevolgen van kunstmeststoffen, en de NO_x door verbranding, voor de ozon in de stratosfeer, lopen sterk uiteen en het zijn ook niet veel meer dan 'educated guesses'. Maar er worden nu wel metingen van de N_2O in de troposfeer gedaan. De hoeveelheid in 1984 was 304 ppb (part per billion) en die stijgt jaarlijks met een snelheid van 0,7 ppb (dus een kwart procent per jaar). *Op dit moment wordt de totale toename van N_2O boven de natuurlijk achtergrond op zo'n 10% geschat. Het N_2O-niveau in 1990 bedroeg 310 ppb.* Een kleine bijdrage tot de distikstofoxide in de troposfeer (en daarom ook tot de NO_x-last in de stratosfeer) komt ook uit de spuitbussen. Verschillende van mijn vrienden die dachten dat ze juist handelden door spuitbussen met CFK's te weigeren, schrokken erg toen ik hen wees op de mogelijke gevaren van distikstofoxide,. dat ook als drijfgas wordt gebruikt, vooral herkenbaar bij spuitbusjes voor slagroom. Natuurlijk is het voor niemand echt 'noodzakelijk' om z'n slagroom te spuiten, maar het is bijzonder schokkend voor iemand die het etiket zorgvuldig heeft gelezen en dan opgewekt het artikel koopt in de veilige wetenschap dat er geen CFK's inzitten, om dan te merken dat N_2O zo mogelijk ook net zo slecht is. *Onthutsend zijn ook de berichten dat auto's voorzien van een driewegkatalysator wel minder NO_x en koolwaterstoffen uitstoten, maar meer N_2O!*
Wat dan ook de oorsprong van het gas mag zijn, het is net zoals bij de CFK's de lange levensduur van N_2O in de troposfeer die betekent dat de gevolgen van jaar op jaar en van decennium op decennium groter worden, zodat deze voor het jaar 2000 al meer dan 1 procent boven het vergelijkingsjaar 1984 zullen uitstijgen. Als dezelfde verhouding aan 'extra' NO in de stratosfeer terechtkomt dan zal lachgas heel duidelijk moeten worden betrokken in de discussie over wát we zullen moeten verlagen en wanneer, om de bedreiging van de ozonlaag te verkleinen. Het is echter niet zeker dat een toename van 1 of 2 procent van de uitstoot van distikstofoxide ook 1 of 2 procent aan de NO_x-belasting van de stratosfeer zal toevoegen. Hoewel op dit moment elk jaar enige honderden miljoenen tonnen N_2O in de troposfeer worden uitgestoten (wat de nauwkeurige getallen betreft verschillen de schattingen) komen er maar enige tientallen miljoenen tonnen in de stratosfeer terecht (ook hier lopen de schattingen wat de details betreft uiteen). De meeste distikstofoxide, in tegenstelling tot de CFK's, gaat ergens anders naartoe, en we weten niet waar. Op het eerste gezicht lijkt dat geruststellend. Maar als dat natuurlijke onttrekkingsmechanisme door menselijke activiteiten wordt verstoord en dat lijkt, gezien de inbreuk op het milieu door die activiteiten, maar al te waarschijnlijk, of wanneer dat onttrekkingsmechanisme die extra belasting met N_2O door menselijke activiteiten niet meer kan verwerken, dan zouden we plotseling met een zeer sterke stijging van de toevoer van N_2O naar de stratosfeer kunnen worden geconfronteerd. En helaas

is distikstofoxide niet de enige bijkomende factor die naast de CFK's in de beschouwing moet worden betrokken.

4.4 Dinosaurussen en scenario's voor de ondergang

Er is een aantal mogelijke problemen met betrekking tot de chemie van de stratosfeer die zich buiten het bereik van de mens afspelen, maar die toch betrekking hebben op een gebied van menselijke activiteiten dat buiten de invloedssfeer van de meesten van ons ligt -de mogelijkheid van een kernoorlog. Een aantal wetenschappers heeft zich afgevraagd of het mogelijk is dat de ondergang van de dinosaurussen zo'n 65 miljoen jaar geleden, verband kon hebben gehad met een catastrofale uitputting van de ozon in de stratosfeer. Die zou dan weer zijn veroorzaakt door de gevolgen op aarde van een nabije explosie van een supernova of door een uitbarsting van zonneactiviteit op een moment dat het magnetisch veld dat de aarde beschermt, juist zwak was.
Er was zeker iets dat een plotseling einde maakte aan de dinosaurussen en aan vele andere diersoorten, en dat 'iets' kwam vermoedelijk van boven, want het vóórkomen van fossielen laat zien dat de in zee levende wezens over het algemeen niet door de catastrofe zijn getroffen. Weliswaar wijzen de paleontologen er op dat de dinosaurussen al enige tijd voor die afsluitende ramp in verval waren, maar dat duidt er alleen maar op dat andere milieuveranderingen hen kwetsbaar hadden gemaakt voor een 'laatste druppel' effect. In de afgelopen jaren is de meest gangbare verklaring voor de dood van de dinosaurussen geweest, dat er klimaatsveranderingen zouden zijn opgetreden door de inslag op aarde van een grote meteoriet die stof ver in de atmosfeer omhoog zou hebben geslingerd en een sterke temperatuurdaling zou hebben veroorzaakt. Ideeën die verband hielden met veranderingen in de ozonlaag zijn wat uit de mode geraakt maar ze zijn niet minder bespreekbaar dan toen ze voor het eerst in de jaren zeventig naar voren werden gebracht.
De twee varianten op het eerste thema werken beide volgens hetzelfde mechanisme. Protonen (waterstofkernen) die uit de ruimte de aarde bereiken als kosmische stralen, maken door reacties met de bovenste lagen van de atmosfeer stikstofatomen los, die vervolgens geleidelijk door de mesosfeer en de stratosfeer omlaag komen en daarbij NO_x-moleculen vormen die de kettingreacties ter vernietiging van de ozon op gang brengen. Zulke kosmische stralen komen altijd uit de ruimte de atmosfeer van de aarde binnen, maar doorgaans is het effect daarvan zeer klein. Gedeeltelijk is dit het gevolg van het feit dat ze maar in betrekkelijk kleine aantallen aankomen en gedeeltelijk omdat ze een elektrische lading dragen (een proton is gewoon een waterstofatoom waaraan het elektron ontbreekt), en geladen deeltjes kunnen niet door het magnetisch veld van de aarde heen dringen. De enige plaats waar ze een merkbaar effect zouden kunnen hebben is bij de polen waar ze door de magnetische krachtlijnen worden samengedreven; maar er zijn geen overtuigende aanwijzingen voor hun betrokkenheid bij de vorming van het ozongat bij Antarctica.
Er zijn twee manieren om het effect van kosmische stralen op de stratosfeer te vergroten: maak de kosmische stralen sterker of verzwak het magnetische veld van de aarde -of allebei. Iosef Shklovski, een Sovjet astronoom en Martin Ruderman, in de Verenigde Staten, ontwikkelden oorspronkelijk het eerste scenario waarbij werd

voorgesteld dat een ster, een supernova die in de buurt van het zonnestelsel explodeerde, zo'n vloed van kosmische straling zou produceren dat daardoor 50 procent van de ozonlaag of meer zou worden vernietigd. Als dat vandaag zou gebeuren zou dat net zo'n catastrofe voor de huidige vormen van leven zijn als de ramp van 65 miljoen jaar geleden, die de dinosaurussen heeft getroffen. Ernstige zonnebrand, met huidblaren binnen tien minuten en blindheid zouden deel uitmaken van de onmiddellijke gevolgen voor mens en dier. Aangezien de planten onder de vloed van ultraviolette straling zouden verschrompelen zouden we dan te maken krijgen met het langere-termijn-probleem om wat te eten te vinden. De kans is zeer klein -astronomen berekenen dat in een willekeurige periode van 20 miljoen jaar een kans van één op honderd is voor een supernova die zo dichtbij is, dat hij zo'n schade kan aanrichten. Maar dan zijn catastrofes als de ondergang van de dinosaurussen ook zeldzame gebeurtenissen.

Het andere scenario koppelt de vernietiging van het ozonschild aan veranderingen in het aardmagnetisme en aan de zonneactiviteit. Het komt voor dat het magnetisch veld van de aarde dat wordt opgewekt door dwarrelende stromen van magnetisch materiaal in het vloeibare binnenste van de aarde, zelf aan verandering onderhevig is. Soms sterft het helemaal weg en dan herneemt het z'n intensiteit, hetzij in de zelfde richting (met de noord- en zuidpool in dezelfde positie als tevoren), hetzij in de tegengestelde richting waarbij de magnetische polen zijn verwisseld. Uit fossielen is op te maken dat zulke omkeringen van het magnetisch veld dikwijls gepaard gaan met een kleinschalig verdwijnen van diersoorten, maar zelden op zo'n schaal als de dood van de dinosaurussen. Maar de sporen van magnetisme in oude stenen onthullen dat er ten tijde van het uitsterven van de dinosaurussen inderdaad veranderingen in het magnetisch veld van de aarde optraden.

De zonneactiviteit verandert eveneens, niet alleen volgens een cyclus met een periode van ongeveer 11 jaar (de cyclus van de zonnevlekken) maar er zijn ook zo nu en dan grotere uitbarstingen van een heftige activiteit waarbij stromen van protonen door de ruimte naar de aarde worden gestuurd. Indien juist op het moment dat het magnetisch veld van de aarde zwak was, de zon een uitbarsting van protonen zou vertonen, dan zouden die door de atmosfeer heen kunnen gaan en schade aan het ozonschild toebrengen. Een van de pioniers van deze gedachte was de alom tegenwoordige Paul Crutzen die toen met Ivar Isaksen en George Reid samenwerkte. Hun berekeningen die in 1975 werden gepubliceerd, waren niet alleen van betekenis voor degenen die de ondergang van de dinosaurussen bestudeerden. Zelfs zonder dat het magnetisch veld van de aarde uitgesproken zwak is, kan een zonnevlam van voldoende intensiteit ten minste enige schade aan de stratosfeer toebrengen. Zo is er in augustus 1972 een bijzonder grote uitbarsting van zonneactiviteit geweest. In 1975 berekenden Crutzen en zijn collega's dat, indien hun model goed was, zo'n uitbarsting een teruggang van de ozonconcentratie van 15 tot 20 procent bij de noordpool teweeg zou hebben gebracht omdat het aardmagnetisch veld daar de van de zon afkomstige protonen geconcentreerd zou hebben. Na deze berekeningen hebben Donald Heath en Arlin Kreuger van NASA wat oude gegevens opgedolven die door de weersatelliet Nimbus 4 waren opgeno-

men maar die eerder nog nooit op een manier waren geanalyseerd om ozonfluctuaties te laten zien. Zij vonden dat de satelliet na de zonnevlam van 1972 een vermindering van 16 procent van de ozon bij de noordpool had waargenomen. Dit was de meest dramatische korte-termijn-verandering van het ozongehalte in de stratosfeer die ooit voor de ontdekking van het Antarctische gat is waargenomen. Niemand heeft nog kunnen uitrekenen wat nu boven Antarctica de uitwerking van een dergelijke uitbarsting van zonneactiviteit zou zijn terwijl het gat juist zijn grootste seizoensuitbreiding zou vertonen. Hoewel het idee van een verband tussen verandering in de ozonlaag en de dood van de dinosaurussen tegenwoordig uit de mode is, heeft het ook voor vandaag nog belangrijke aspecten en de gebeurtenissen van 1972 bevestigen de nauwkeurigheid van de modellen die voor de berekening van de ozonveranderingen werden gebruikt.

Zo'n bevestiging van de nauwkeurigheid van de modellen versterkt ook ons vertrouwen in de berekeningen van andere beïnvloedingen van de ozon, met inbegrip van de invloed van de CFK's. Redelijke mensen behoeven er niet aan te worden herinnerd dat een kernoorlog een slechte zaak zou zijn, maar hoe slecht die wel zou zijn, werd nog eens in het midden van de jaren zeventig aan het licht gebracht toen John Hampson, die baanbrekend werk aan de rol van HO_x in de stratosfeer had gedaan, zich ging bekommeren over de gevolgen van NO_x na kernexplosies. Nadat Hampson dit onderwerp in een artikel van 1974 in Nature had aangesneden*, kwam men in januari 1975 op een symposium van de National Academy of Sciences tot de conclusie dat een oorlog waarin de helft van de wereldvoorraad van 1974 aan kernwapens tot explosie zou worden gebracht - 10.000 megaton - de ozonconcentratie boven het noordelijk halfrond (waar de meeste kernkoppen zouden ontploffen) met 30 tot 70 procent zou verminderen en boven het zuidelijk halfrond met 20 tot 40 procent. Dit lijkt erg veel op de soort van cijfers die volgens sommige studies bij de uitroeiing van de dinosaurussen betrokken waren en die heel waarschijnlijk een soortgelijk effect op de menselijke soort en andere soorten zouden hebben.

Er is geen direct bewijs dat nucleaire explosies in de atmosfeer de ozon in de stratosfeer vernietigen, omdat niemand de nodige gedetailleerde metingen in de jaren vijftig en begin van de jaren zestig heeft uitgevoerd toen atmosferische kernproeven normaal waren. Maar de beschikbare totaalmetingen tonen wel aan dat de hoeveelheid ozon van de stratosfeer in de jaren volgend op 1963, toen de atmosferische proeven door de grote kernmachten waren uitgebannen, ondanks enige schommelingen, in zijn geheel is toegenomen. Dat zou dus in overeenstemming zijn met een atmosfeer die zich herstelt van de gevolgen van de kernproeven die voordien hadden plaatsgevonden. Wie gek genoeg is om aan een kernoorlog te beginnen zal daarvan zeker niet worden weerhouden door het besef dat er schade aan de ozonlaag kan worden aangericht of door het vooruitzicht op klimaatsveranderingen. (De dreiging van een 'nucleaire winter' is nu door verbeterde berekeningen teruggebracht tot een 'nucleaire herfst', maar die zou nog wel zo erg

* In een artikel van Johnston, Whitten en Birks uit 1973 wordt dit onderwerp ook al aangesneden.

zijn dat er een ernstige teruggang in de opbrengst van gewassen zou optreden, zelfs in de delen van de wereld die aan de kernkoppen zelf zouden zijn ontsnapt.) Maar dit werk moet er toe dienen, evenals de studies over de mogelijke doodsoorzaken van de dinosaurussen, om ons er opnieuw aan te herinneren dat het ozonschild niet onverwoestbaar is en dat het zeker kan worden beschadigd, zowel door gebeurtenissen in de natuur als door menselijke activiteiten. Er is nog een aantal rampen mogelijk, die weliswaar minder apocalyptisch zijn, maar waarvan de waarschijnlijkheid dat ze in de nabije toekomst zullen voorkomen, groter is. Behalve dat is er ook nog een bijprodukt van de discussies over chloor en dat heeft te maken met de soort van waanzin die door het idee van een kernoorlog wordt gekenmerkt.

4.5 Kleine dingen kunnen van grote betekenis zijn

Een van de waanzinnigste gedachten die in het midden van de jaren zeventig tijdens de soms dolle discussies over de gevolgen van de CFK's op de stratosfeer naar voren kwamen, was een suggestie van Mike McElroy dat men in een oorlog broom wel eens als wapen zou kunnen gebruiken om kunstmatig dezelfde omstandigheden te creëren waaronder misschien de dinosaurussen aan hun eind waren gekomen. Broom behoort tot dezelfde chemische familie als chloor, de halogenen, en heeft daarmee veel eigenschappen gemeen. Het is zelfs zo dat het nog heftiger met ozon reageert. Het was in 1975 volkomen redelijk dat McElroy de aandacht vestigde op het mogelijk gevaar voor de ozonlaag dat gelegen was in het wijdverbreide gebruik van methylbromide (CH_3Br) in de landbouw als een verstuivingsmiddel tegen insekten en knaagdieren, zowel in voedingsgewassen als in tabak. Hoewel broommethaan in de troposfeer niet de ongebruikelijke stabiliteit van de CFK's vertoont en het in zekere mate wordt afgebroken voordat het de stratosfeer bereikt, is het toch aannemelijk dat er ook hierdoor een klein extra effect op de ozon zal optreden. En per slot is het best mogelijk dat al deze kleine effecten samen een belangrijk gevaar zullen opleveren.

In datzelfde jaar wezen Steve Wofsy en zijn collega's op een andere mogelijke bijdrage en wel door een familie van scheikundige stoffen die veel dichter met de CFK's verwant zijn, namelijk de gebromeerde chloorkoolstoffen. Deze worden bij het blussen van branden gebruikt. Wat aantasting van ozon betreft zijn de beide genoemde bronnen van broom, *door hun geringe hoeveelheid*, lang niet zo gevaarlijk als de CFK-familie. Maar McElroy bereikte de krantenkoppen door te stellen dat broom dat met opzet in de stratosfeer zou zijn losgelaten als een wapen zou kunnen worden gebruikt doordat het boven vijandelijk gebied een groot gat in de ozonlaag zou maken en daardoor onbeschermde mensen buiten gevecht zou stellen en de oogst zou vernietigen. Het feit dat dit effect, als het al reëel is, zich al heel gauw over de hele wereld zou verspreiden en evenveel schade zou toebrengen aan de natie die de 'broombom' had afgevuurd (zodat het wel een wanhoops- en zelfmoordwapen zou zijn) maakte het alleen maar aantrekkelijker voor schrijvers in bladen zoals de National Enquirer. Veel van McElroy's collega's waren razend over de daaruit voortkomende publiciteit, omdat ze van mening waren dat er een rookgordijn voor de veel ernstiger besprekingen van de CFK's werd gelegd. Dit

'doomsday weapon' scenario kan wel buiten beschouwing gelaten worden. Maar dat betekent niet dat we ons er niet van bewust moeten zijn dat er door menselijke activiteit broom in de atmosfeer terecht komt en dat dit ook tot de afbraak van stratosferische ozon kan bijdragen.
Wat kan er verder nog tot die afbraak bijdragen? Er zijn natuurlijke bronnen van chloor en die moeten zeker ook in rekening worden gebracht. Vulkanische uitbarstingen brengen zo nu en dan grote hoeveelheden chloorverbindingen in de atmosfeer en die kunnen een dramatisch, zij het kortdurend, effect hebben. In het jaar dat op de uitbarsting van El Chichon in 1982 volgde, vertoonde een waarnemingsstation in Arosa, Zwitserland, de laagste waarde van de ozonkolom die ooit gemeten was. Maar de grootste natuurlijke bron van chloor, die min of meer constant is, bestaat in de vorm van methylchloride (CH_3Cl). Een klein gedeelte daarvan komt uit industriële processen maar een groot gedeelte schijnt uit de verbranding van

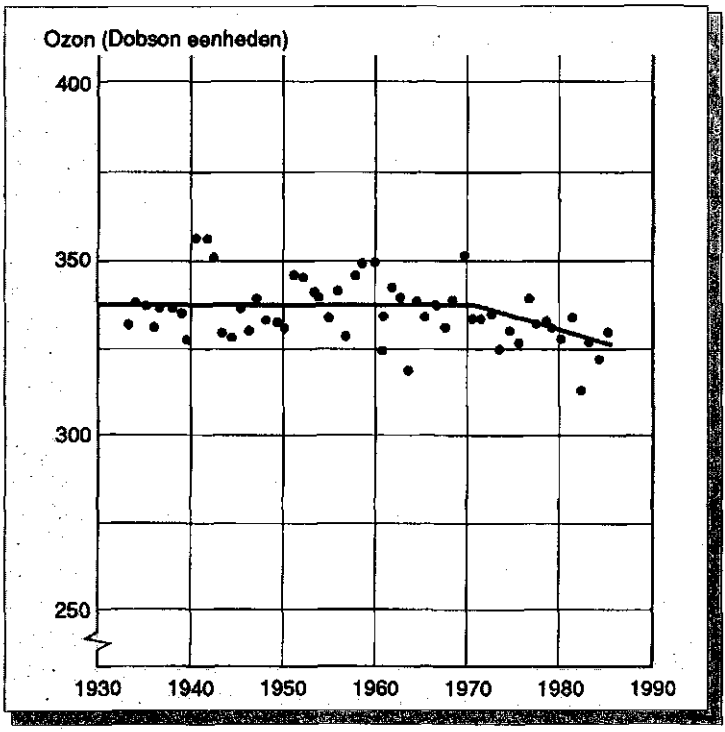


Fig. 5 Metingen van de jaargemiddelde ozonkolom boven Arosa, Zwitserland
(Bron: The Hole in the Sky - Gribbin)

plantaardig materiaal voort te komen. Dat kan dan zijn bij natuurlijke bosbranden of bij het verbranden van bos om daar een voedselgewas te verbouwen. Daarom is men het er niet altijd over eens in hoeverre de huidige hoeveelheid chloormethaan in de atmosfeer (een paar ppb's) natuurlijk is en welk deel daarvan aan menselijke activiteiten te wijten is. Wat dan ook de oorsprong ervan mag zijn, ongeveer 90 procent van de chloormethaan wordt door chemische reacties uit de troposfeer verwijderd en maar ongeveer 10 procent of minder bereikt de stratosfeer. Maar toch duiden berekeningen die halverwege de jaren zeventig zijn gemaakt, erop dat chloormethaan evenveel invloed op de ozonvernietiging kan hebben gehad als de CFK's.

Net zoals de natuurlijke achtergrond van NO_x door de stikstof-onttrekking, is chloormethaan ook een deel van de natuurlijke kringloop die de ozonconcentratie in de stratosfeer instandhoudt; waar het om gaat is dat menselijke activiteiten het evenwicht kunnen verstoren en de snelheid waarmee de ozon wordt afgebroken kunnen veranderen. Niemand kan ook maar bij benadering zeggen hoe de chloormethaanbalans in de komende paar decennia zou kunnen veranderen.

De menselijke beïnvloeding is duidelijker aanwezig bij de ophoping van methylchloroform (ook bekend als trichloorethaan) in de atmosfeer. Hierbij is er wat geks aan de hand. Trichlooretheen, een verbinding die lijkt op methylchloroform, werd alom gebruikt als een ontvettingsvloeistof, in het bijzonder om metaaloppervlakken schoon te maken en ook bij de chemische reinigings-industrie. Deze verbinding wordt zeer snel in de atmosfeer afgebroken en vormt daarom geen bedreiging voor de stratosfeer. Maar omdat die reacties dicht bij het aardoppervlak plaatsvinden leveren zij ook een bijdrage aan de reacties die de fotochemische 'smog' veroorzaken. Daarom heeft de Environmental Protection Agency, in haar wijsheid besloten om het gebruik van trichlooretheen in de Verenigde Staten tegen te gaan en heeft aanbevolen om dit door methylchloroform te vervangen. Deze stof draagt niet bij tot het smogprobleem omdat -u raadt het al- dit maar langzaam in de troposfeer reageert. En dat betekent natuurlijk dat aanzienlijke hoeveelheden de stratosfeer bereiken, waar de ultraviolette straling de stof afbreekt en daarbij chlooratomen losmaakt die bij de afbraak van ozon worden betrokken. Door te trachten één probleem op te lossen heeft de EPA een ander probleem verergerd. Het gebruik van methylchloroform neemt nu snel toe, met ongeveer 7 procent per jaar, en in 1987 was de concentratie in de troposfeer ongeveer 130 ppt (parts per trillion). Gelukkig heeft methylchloroform maar een levensduur van iets meer dan 6 jaar zodat het de ozonlaag minder dan de CFK's bedreigt; maar sommige berekeningen geven de indruk dat het tegen het midden van de volgende eeuw toch nog 1 à 2 procent zal bijdragen aan de totale achteruitgang van de ozonconcentraties in de stratosfeer.

Wanneer het gaat over vloeistoffen voor chemische reiniging moeten veel mensen aan tetrachloorkoolstof denken, het aloude chemische reinigingsmiddel. In feite is het gebruik van tetrachloorkoolstof vanwege zijn giftige eigenschappen al enige tijd in Europa en Noord-Amerika beperkt. Het heeft zeker het vermogen om ozon aan te tasten omdat het chloor bevat en in de atmosfeer een levensduur van ongeveer 50 jaar heeft; inderdaad is de hoeveelheid die de stratosfeer bereikt niet de verwaarlozen.

In de jaren zeventig zag het er naar uit dat deze bijzondere bijdrage tot het probleem misschien zou verdwijnen omdat de hoeveelheid tetrachloorkoolstof in het milieu enigszins aan het afnemen was. Maar sindsdien is het gebruik van tetrachloorkoolstof weer wat toegenomen en nu stijgt de concentratie in de atmosfeer met ongeveer 1 procent per jaar van af het 1987-niveau van 125 ppt. Deze toename wordt gedeeltelijk veroorzaakt door de industriële ontwikkeling in de Derde Wereld-landen, maar is ook deels het gevolg van een toename in de industrieel ontwikkelde landen. Tetrachloorkoolstof wordt nu in brandblussers toegepast en het wordt net als broommethaan in bestrijdingsmiddelen gebruikt. Het wordt ook gebruikt als een tussenprodukt voor de vervaardiging van dichloordifluormethaan ($C\ Cl_2F_2$) een verbinding die we al zijn tegengekomen en die wordt gebruikt als koelmiddel en als drijfgas in spuitbussen, ook wel bekend als F-12.
Nog een ander soort probleem ontstaat door de ophoping van methaan in de atmosfeer. Uit onderzoek aan de luchtbelletjes die in het ijs van gletsjers zitten opgesloten is gebleken dat het methaangehalte van de atmosfeer in de achttiende eeuw is gaan stijgen vanaf een niveau van 700 ppb (waarop het zich ten minste duizend jaren had bevonden). Het ligt nu op ongeveer 1650 ppb en het neemt toe met een snelheid van ongeveer 1 à 2 procent per jaar. Het is vrijwel zeker dat de toename van methaan gekoppeld is aan de wereldwijde toename van de landbouw en aan de explosieve groei van de menselijke bevolking. Methaan wordt door bacteriën gemaakt op plaatsen waar weinig zuurstof aanwezig is -in moerassen (vandaar dat het als moerasgas bekend staat), in de ingewanden van dieren en in termietenheuvels. Naarmate de bevolking groeide nam ook het veebestand toe om die bevolking te voeden -en de bekken van koeien zijn een notoire bron van methaan. Een nog grotere bijdrage wordt geleverd door de sawahs, *de rijstvelden*, die in feite kunstmatige moerassen zijn.
Van welke bronnen het gas ook afkomstig mag zijn, het methaan hoopt zich op in de stratosfeer en ook in het bijzonder in de bovenste lagen van de troposfeer. Een van de gevolgen die het op de atmosferische chemie heeft, is een toename van de ozonhoeveelheid *in de hogere troposfeer doordat het methaan zorgt voor reductie van NO, wat tot een toename van ozon in de troposfeer leidt. Tevens is het mogelijk dat methaan* reageert met chloor en dan chloorwaterstof vormt (onder andere) en dat valt als zure regen uit de lucht. *Dit zelfde proces van Cl-afname kan worden veroorzaakt door een reactie van NO met Cl.* En wanneer er op die manier minder chloor aanwezig is zal er meer ozon in de lagere stratosfeer zitten. Het slechte nieuws is nu dat dit de afname van ozon op grotere hoogte kan hebben gemaskeerd.
In 1984 rapporteerde de Consultative Committee on the Ozone Layer van de UNO (een van de groepen die bijdragen aan de Weense conferentie heeft geleverd) dat er sinds 1970 een 3 procent afname van de ozon in de stratosfeer had plaatsgevonden. Het probleem is nu dat deze gegevens waren verkregen door vanaf de grond verticaal door de hele atmosfeer omhoog te kijken -dus ozonkolomgegevens. Rekening houdende met het methaaneffect, komt die 3 procent afname overeen met een afname van 14 procent in de hoge stratosfeer en een daarmee overeenstemmende toename bij de tropopauze. De Committee zei, dat als deze afname zo door zou gaan,

de totale ozonkolom tegen het jaar 2000 maar met 5 procent zou zijn afgenomen, maar dan zou de afname op ongeveer 40 km hoogte wel ten naastebij 40 procent bedragen. Dat is betrekkelijk goed nieuws als men zich in hoofdzaak zorgen maakt over huidkanker; minder goed nieuws als men de gevolgen voor het klimaat bekijkt. Zulke simplistische voorspellingen zouden best te naïef kunnen zijn. Om te beginnen zijn ze gebaseerd op de veronderstelling dat de zaken geleidelijk blijven veranderen naarmate de belasting door CFK's en andere ozon-eters toeneemt. Maar al jaren hebben een paar wetenschappers gewaarschuwd dat de atmosferische systemen wel eens niet-lineair zouden kunnen reageren. Dat betekent dat ze plotseling in een totaal andere toestand kunnen overgaan, als eenmaal een zekere kritische drempel is bereikt. U kunt dit inzien door zich een naïeve wetenschapper voor te stellen die een blok ijs waarneemt dat langzaam vanaf -4 °C wordt opgewarmd. Als de temperatuur -1 °C heeft bereikt, voorspelt de wetenschapper op basis van zijn waarnemingen tot nu toe, dat verdere verhoging van de temperatuur met 3 °C geen betekenend effect op het ijsblok zal hebben. Maar zodra de temperatuur tot boven 0 °C zal zijn gestegen ligt zijn voorspelling aan stukken. De recente gebeurtenissen boven Antarctica duiden er op dat daar zoiets heeft plaatsgevonden.

Alsof die niet-lineariteit al niet genoeg problemen met zich mee zou brengen, leveren andere effecten van gassen zoals methaan (en inderdaad de CFK's) ook nog andere problemen voor het aardse milieu op. Een verlaging van het ozongehalte van de stratosfeer zal verandering brengen in de warmtebalans van de aarde doordat er meer straling naar het aardoppervlak kan doordringen en de troposfeer dus iets warmer kan worden terwijl de stratosfeer afkoelt. Zo zal ook iedere andere oorzaak die de warmtebalans van de aarde verandert, een ingrijpend gevolg voor de ozonlaag hebben omdat de snelheid van de chemische reacties die met ozon te maken hebben, van de temperatuur afhankelijk is. Hier ligt, heel duidelijk, de mogelijkheid voor een terugkoppeling waarbij de ozonuitputting de temperatuur verandert en die temperatuurverandering veroorzaakt een verdere ozonuitputting enz. Maar er doet zich nu nog een andere invloed op de wereldtemperaturen gelden.

Een groot aantal gassen die door menselijke activiteiten in de atmosfeer terechtkomen, waaronder methaan, N_2O, O_3 *in de troposfeer* en CFK's, maar vooral ook koolstofdioxide, draagt bij aan het broeikaseffect dat de aarde warm houdt. Omdat deze gassen zich in de atmosfeer ophopen verwachten de klimatologen dat over de komende tientallen jaren de troposfeer aanzienlijk warmer zal worden terwijl de stratosfeer afkoelt. Omdat de weerpatronen zullen veranderen is het best mogelijk dat het broeikaseffect een groter milieuprobleem zal worden dan de afbraak van de ozonlaag. Ondertussen kan de afkoeling van de stratosfeer al zijn begonnen en zou daardoor kunnen bijdragen tot de ontwikkeling van het Antarctische gat -waarbij de CFK's die na koolstofdioxide en methaan de derde plaats innemen bij het door de mens veroorzaakte broeikaseffect, dan hun aandeel hebben in nog weer eens een andere terugkoppeling. *De eerste trendbepalingen over de periode 1980-1990 geven een afname van de temperatuur in de stratosfeer te zien van 0.1 tot 0.14% per jaar op 55 km hoogte. Dit is in overeenstemming met modellen van het broeikaseffect, die*

de grootste temperatuurveranderingen voorspellen in de hoge stratosfeer (Aiken e.a., Journal Geophysical Research Letters 18, 416-419, 1991).

Literatuur

Crutzen, P.J., "Estimates of possible variations in total ozone due to natural causes and human activities", *Ambio* 3, 201 (1974)

Crutzen, P.J., I.S.A. Isaksen, G.C. Reid, "Solar proton events: Stratospheric sources of nitric oxide", *Science 189*, 457 (1975)

Johnston, H.S., G. Whitten, J. Birks, "Effect of nuclear explosions on stratospheric nitric oxide and ozone", *J.Geoph.Res.* 78, 6107 (1973)

Hoofdstuk vijf

5.1 Broeikasgassen

Het broeikaseffect is een belangrijk onderdeel van het systeem van wisselwerkingen dat er voor zorgt dat het leven op aarde mogelijk is. De luchtdeken om de aarde houdt niet alleen de warmte vast die anders naar de ruimte zou ontsnappen, hij verdeelt ook de warmte gelijkmatiger dan anders het geval zou zijn van de door de zon beschenen dag-kant van de aarde naar de donkere nacht-kant en van de evenaar naar de polen. U kunt zich een idee vormen hoe belangrijk dat is door eens naar de maan te kijken die in feite net zo ver van de zon verwijderd is als de aarde. Door gebrek aan een dampkring om de maan stijgt de temperatuur daar onder de volle gloed van de zon tot het kookpunt van water, 100 °C, om dan 's nachts tot een ijzige -150 °C omlaag te gaan. Die uitersten moeten gedeeltelijk worden toegeschreven aan de langzame rotatie van de maan, waar een 'dag' gelijk is aan vier van onze weken. Het oppervlak heeft dan overdag volop de tijd om warmer te worden en dat geldt 's nachts ook voor de afkoeling. Als de aarde geen luchtdeken zou hebben, maar toch eenmaal in de vierentwintig uur om zijn as zou draaien, zou hij geen tijd hebben om overdag zo warm te worden of 's nachts zo ver af te koelen. Maar de gemiddelde temperatuur van een aarde zonder lucht zou sterk lijken op de gemiddelde temperatuur van de luchtloze maan, ongeveer -25 °C (volgens iets meer verfijnde berekeningen zou die temperatuur een paar graden hoger liggen maar dan nog flink laag). Aangezien de huidige over de hele aarde gemiddelde temperatuur van de lucht, net boven de grond en het zeeoppervlak, ongeveer 15 °C bedraagt, moet dus de luchtdeken een algemene temperatuurverhoging van 40 °C opleveren (als de verfijnde berekeningen juist zijn is dat dus iets minder). Zelfs als de aarde wel een atmosfeer zou hebben maar als die alleen uit stikstof en zuurstof zou bestaan, die heel weinig infrarode straling absorberen, dan zou de oppervlaktetemperatuur bijna -20 °C zijn. De huidige aangename warmte van de aarde is te danken aan de machtige invloed van betrekkelijk kleine hoeveelheden sporegassen in de atmosfeer, in hoofdzaak koolstofdioxide en waterdamp. Dus, hoewel de menselijke activiteit tot nu toe nog weinig gevolgen heeft gehad voor de algemene samenstelling van de atmosfeer, die in hoofdzaak uit stikstof en zuurstof bestaat, heeft die wel een belangrijke verandering teweeggebracht in het evenwicht tussen de sporegassen die het meeste tot het broeikaseffect bijdragen. Er is geen twijfel aan dat daardoor de aarde warmer zal worden en enkele metingen geven de indruk dat die verwarming al is begonnen.

U zult zich herinneren dat de energie die hier van de zon binnen komt in hoofdzaak tot het zichtbare deel van het spectrum behoort en dat wordt niet door de atmosfeer geabsorbeerd. Er wordt wel wat ultraviolette straling in de stratosfeer geabsorbeerd en er wordt wat binnenkomende zonne-energie door de wolken teruggekaatst, of

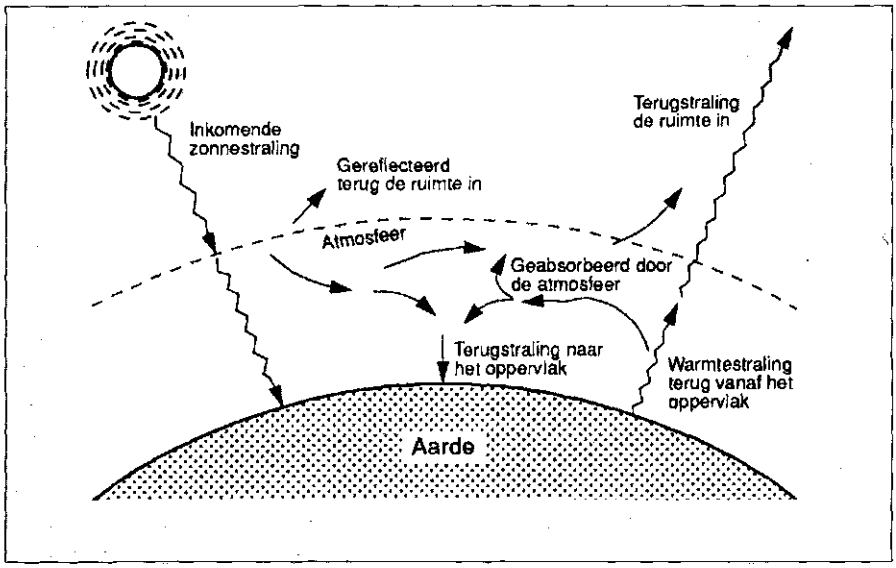


Fig. 6 Het broeikaseffect
(Bron: The hole in the Sky - Gribbin)

zelfs door het aardoppervlak (speciaal waar woestijnen en sneeuwvelden de weerspiegeling door het aardoppervlak vergroten). Maar de rest van de inkomende zonne-energie zorgt voor de verwarming van het oppervlak van het land of de zee. Dit verwarmde oppervlak straalt dan weer warmte uit in het infrarode gedeelte van het spectrum hoofdzakelijk in het golflengtebereik van 4 tot 100 micrometer*.
Een deel van deze uitgaande infrarode straling, in de band tussen 13 en 100 micrometer, wordt sterk door waterdamp en koolstofdioxide geabsorbeerd. Waterdamp absorbeert ook sterk tussen 4 en 7 micrometer maar er is een 'venster' tussen 7 en 13 micrometer waardoor de straling tamelijk vrij naar de ruimte kan ontsnappen (fig. 2). Nu beginnen de van menselijke activiteiten afkomstige hoeveelheden CFK's, methaan en lachgas een invloed uit te oefenen die dit venster begint af te sluiten. Maar toen de klimatologen zich voor het eerst zorgen gingen maken over de mogelijkheid

* Een micrometer, een miljoenste van een meter is 1000 maal zo groot als een nanometer. Wanneer we met ultraviolette straling te maken hebben, die een veel kortere golflengte heeft dan infrarode straling, is de nanometer (nm) de meest geschikte eenheid. Maar wanneer we het over infrarode straling hebben dan zouden we bij het gebruik van nanometers lange rijen nullen moeten schrijven, dan zijn micrometers de aangewezen eenheid. Als u de cijfers over de infrarode straling met de al eerder genoemde cijfers over de ultra violette straling wilt vergelijken, moet u ze dus met 1000 vermenigvuldigen om weer nanometers te krijgen.

van een menselijke bijdrage aan het broeikaseffect die nog aan het natuurlijk proces zou worden toegevoegd en die daardoor de temperatuur van de aarde op zou voeren tot een hoogte die sinds lang voor het verschijnen van de Homo Sapiens niet meer was voorgekomen, dachten ze niet zo zeer aan de invloed van deze sporegassen. De grootste bijdrage tot de door de mens veroorzaakte opwarming van de aarde werd en wordt in de eerste plaats door koolstofdioxide geleverd.
Het broeikaseffect van koolstofdioxide is geen nieuwe ontdekking. Atmosferische wetenschappers waren zich in de jaren zestig van de vorige eeuw bepaald al bewust van de rol die sporegassen bij het onderhouden van een aangename temperatuur op aarde spelen, en in Engeland beschreef John Tyndall in een publikatie in de Philosophical Magazine in 1863 de rol van waterdamp als wat we nu een 'broeikasgas' zouden noemen. Voor het einde van de negentiende eeuw had de Zweed Svante Arrhenius in een publikatie van 1896 de aandacht gevestigd op de veranderingen die vermoedelijk het gevolg zouden zijn van de toenemende hoeveelheden koolstofdioxide die door de verbranding van steenkool de lucht in gingen en de Amerikaan P.C. Chamberlain schreef in 1899 over hetzelfde vraagstuk. In de loop van de eerste driekwart van deze eeuw kwamen verschillende klimatologen op dit onderwerp terug en leverden hun eigen bijdragen aan het debat over het broeikaseffect. Men werd het er ten slotte over eens dat het een wezenlijk effect was, omdat het de aarde warmer zou maken. Maar het was pas in 1975 dat het vooruitzicht van de broeikasopwarming van de aarde de algemene aandacht begon te krijgen en dat men het ging onderkennen als een probleem dat zeker voor onze generatie al praktische gevolgen zou kunnen hebben. Dit was natuurlijk ook in dezelfde tijd dat de mensen begrip begonnen te krijgen voor de ernstige gevolgen die de CFK's waarschijnlijk voor de ozonlaag zouden hebben. Tot op zekere hoogte is dit een toevallige samenloop, maar het levert zeker een beeld van het groeiende besef, zowel bij de wetenschappers als bij het brede publiek, dat in het laatste kwart van de twintigste eeuw de menselijke invloed op het milieu niet langer kan worden veronachtzaamd.

5.2 Het broeikaseffect van koolstofdioxide

Een van de redenen waarom klimatologen zich in de loop van de jaren zestig steeds sterker van het koolstofdioxideprobleem bewust werden, was dat in de voorafgaande tien jaren een meetstation, dat op de top van de Mauna Loa in Hawaii was gevestigd, het verloop van dit gas in de gaten had gehouden. Die plaats was voor dit koolstofdioxidemeetstation gekozen omdat het boven op een berg was midden in de oceaan, waar de metingen niet door industriële vervuiling konden worden beïnvloed. Om dergelijke redenen is er ook een meetstation aan de zuidpool ingericht. Beide stations vertoonden een voortgaande verhoging van de concentratie van koolstofdioxide in de atmosfeer en bevestigden de ongerustheid die voortkwam uit de berekeningen van de hoeveelheden steenkool en olie die over de hele wereld werden opgestookt. In 1957 was de concentratie van koolstofdioxide in de atmosfeer ongeveer 315 parts per million (ppm). Die ligt nu, in 1987, boven de 345 ppm (of, als u dat wilt, 0,034 procent) en men schat, op grond van de koolstofanalyse in de jaarringen van bomen, dat met de verbreiding van de industriële revolutie deze

concentratie sinds 1850 over de hele wereld omhoog is gegaan vanaf een basisniveau van 270 ppm. *Het CO_2-niveau in 1990 bedroeg 353 ppm.*
De deskundigen zijn het er nog niet over eens welk deel van de toename van de koolstofdioxide direct het gevolg is van het verbranden van steenkool en olie en welk deel aan de ontbossing zou moeten worden toegeschreven. Het kappen van bomen op grote schaal, zoals dat gebeurde toen in de negentiende eeuw de pioniers over Noord-Amerika naar het westen uitzwermden, en zoals dat vandaag in de wouden van Zuid-Amerika plaats heeft, draagt direct tot de verhoging van het koolstofdioxidegehalte bij wanneer de bomen worden verbrand of wanneer ze verrotten; en dan heeft het nog het gevolg dat er minder bomen zijn die voor hun groei koolstofdioxide aan de lucht onttrekken. Men schijnt het er tegenwoordig over eens te zijn dat het boseffect min of meer in evenwicht is hoewel het aan het eind van de negentiende eeuw wel een belangrijke bijdrage aan de toename van de koolstofdioxide kan hebben geleverd*. Sinds de nauwkeurige meting van de koolstofdioxide in de jaren vijftig is begonnen, is ongeveer de helft van alle koolstofdioxide, afkomstig van het opstoken van brandstof, in de atmosfeer achtergebleven. De rest verdwijnt in verschillende onttrekkingsprocessen, waaronder de oceanen die een zekere hoeveelheid opnemen en ook de krachtiger plantengroei die het gevolg is van meer beschikbare koolstofdioxide. Of deze onttrekkingsprocessen in de toekomst onveranderd werkzaam zullen blijven wanneer er steeds meer koolstofdioxide komt, kan niemand vertellen. De enige redelijke schatting is dat ongeveer de helft van de koolstofdioxide die van menselijke activiteiten afkomstig is, blijvend in de atmosfeer aanwezig zal zijn. Omdat het energieverbuik in de hele wereld toeneemt, zal niet alleen de koolstofdioxideconcentratie blijven toenemen maar ze zal dat in de nabije toekomst steeds sneller doen.
Afhankelijk van de veronderstellingen die de theoretici in hun berekeningen gebruikten, liepen in de jaren zestig (en daarvoor) de schattingen van de grootte van het effect dat de toename van koolstofdioxide op de temperatuur zou hebben, sterk uiteen. Stephen Schneider van het National Center for Atmospheric Research deed een poging om een einde te maken aan de verwarring door na te gaan welke veronderstellingen door de verschillende groepen van onderzoekers waren gebruikt en hoe ze van het begin tot het einde hun berekeningen in hun modellen hadden uitgevoerd. Omdat koolstofdioxide maar zo'n klein onderdeel van de atmosfeer uitmaakt kon geen enkel model voorspellingen maken van de veranderingen die het gevolg zouden zijn van wijzigingen in het koolstofdioxidegehalte die kleiner zouden zijn dan een verdubbeling (of een halvering) van de concentratie. Zelfs dan varieerden de schattingen van de temperatuurtoename ten gevolge van een verdubbeling van de koolstofdioxideconcentratie tussen een laagste waarde van 0,7 °C en een hoogste van 9,6 °C. Toen Schneider alle modellen tot in alle bijzonderheden had

* In het in september 1990 verschenen rapport Climate Change, waaraan honderden wetenschappers hebben meegewerkt, wordt geschat dat bijna 25% van de totale toename van de hoeveelheid CO2 te wijten is aan ontbossing d.m.v. verbranding.

nagegaan en ze met andere modellen en met de in werkelijkheid opgetreden temperatuurpatronen had vergeleken, was hij in staat deze spreiding te verkleinen en de onderlinge afwijkingen op te lossen. Hij kon toen met enig vertrouwen verklaren dat een verdubbeling van de koolstofdioxideconcentratie een stijging van de gemiddelde wereldtemperaturen van 1,5 tot 7,7 °C ten gevolge zou hebben. In hetzelfde jaar publiceerden Syukuro Manabe en Richard Wetherald van Princeton University de resultaten van nieuwe berekeningen die verkregen waren met behulp van wat toen een van de meest complete computermodellen van de atmosfeer was, die ooit gemaakt waren. Ook zij kwamen naar voren met een temperatuurstijging van ongeveer 2 °C bij een verdubbeling van de koolstofdioxide in de atmosfeer.
Men werd het erover eens dat men als vuistregel kan aanhouden dat verdubbeling van het koolstofdioxidegehalte vanaf het achtergrondsniveau van 270 ppm de gemiddelde temperatuur op de wereld met 2 °C zal verhogen en die regel kon in de afgelopen 15 jaar worden gehandhaafd toen verbeterde computermodellen de berekeningen nog hadden verfijnd*. In 1975 werd deze vuistregel met meer geluk dan wijsheid onder de aandacht van een groot publiek gebracht door een artikel in Science, geschreven door Wallace Broecker van de Lamont-Doherty Geological Observatory.
Broecker was geïnteresseerd geraakt in het broeikaseffect en hij had een paar globale berekeningen gemaakt met gebruikmaking van één van de oudere computermodellen dat een temperatuurstijging van ongeveer 2,2 °C voorspelde bij een verdubbeling van de koolstofdioxideconcentratie. Het geluk speelde een rol bij zijn keuze van het computermodel, hoewel Broecker liever zou zeggen dat die aan zijn wijsheid te danken was. Door aan te nemen dat iedere 10 procent toename van de koolstofdioxideconcentratie daarom ook een toename van 0,14 °C tot gevolg zou hebben (dat is dan ook een gok omdat zelfs vandaag de dag geen enkel computermodel ons kan vertellen welk effect zo'n kleine verandering in de concentratie van koolstofdioxide kan hebben), kwam hij met de volgende voorspelling. Door de exponentiële groei van de hoeveelheid koolstofdioxide in de atmosfeer tegen het einde van de twintigste eeuw zullen de temperaturen hoger worden dan ze in de afgelopen ten minste duizend jaren zijn geweest. De geest van het koolstofdioxideprobleem was uit de fles en is sindsdien zonder onderbreking onderwerp van een groeiende belangstelling van de kant van de klimatologen. Alleen hebben ze daarbij nu meer dan alleen koolstofdioxide aan hun hoofd.

5.3 Andere broeikasgassen

De klimaatonderzoeker aan wie algemeen wordt toegeschreven dat hij als eerste alarm heeft geslagen bij de CFK's als broeikasgassen, is Veerhabadrhan Ramanathan die in 1975 bij het NASA-Langley Research Center werkte en nu aan de University of Chicago is verbonden. In een artikel van Time Magazine van 19 oktober 1987 wordt bijvoorbeeld gezegd dat Ramanathan 'tot zijn verbazing' in 1975 ontdekte dat

* Het al eerder genoemde rapport Climate Change geeft nog steeds dezelfde geschatte stijging aan.

CFK's in sterke mate infrarood absorberen. Op grond van zijn werk vermeldde het rapport van de National Academy of Sciences over CFK's onder meer het broeikaseffect en constateerde dat, wanneer de CFK-uitstoot op de niveaus van 1973 zou blijven, hun bijdrage tot de verwarming van de wereld tegen het jaar 2000 iets kleiner zou zijn dan de helft van de temperatuurtoename ten gevolge van het verhoogde koolstofdioxidegehalte. Maar, wanneer de uitstoot van CFK's met tien procent per jaar zou toenemen dan zou hun invloed vóór het eind van deze eeuw al groter zijn geworden dan die van de door menselijke activiteiten geproduceerde koolstofdioxide. Het rapport zei, dat op de lange termijn een toenemende uitstoot van CFK's in de atmosfeer, zelfs wanneer die toename maar een paar procent per jaar is, tot klimaatveranderingen van "drastische afmetingen" zou leiden.
Misschien zou Ramanathan wat minder verbaasd zijn geweest als hij het rapport had gelezen van de International Conference on the Ecology and Toxicology of Fluorocarbons, een bijeenkomst die in november 1973 in Andover, Maine werd gehouden. Daar had Jim Lovelock toegegeven dat het denkbaar was dat CFK's een gevaar voor het wereldmilieu konden worden. Hij wees er op dat indien en wanneer de concentratie van CFK's in de atmosfeer zou toenemen tot een tienvoud van het niveau in de vroege jaren zeventig, die concentratie een merkbare bijdrage aan het broeikaseffect zou leveren (het heeft nu deze concentratie bereikt). Hij schijnt de eerste wetenschapper te zijn geweest die de CFK's als een mogelijk gevaarlijk broeikasgas heeft aangewezen en hij suggereerde dat dit een nog veel belangrijker probleem zou kunnen opleveren dan de schade die aan de ozonlaag zou kunnen worden aangebracht -en, niettegenstaande de recente gebeurtenissen boven Antarctica, zou hij nog best gelijk kunnen hebben.
Aan het eind van de jaren tachtig ziet het broeikaseffect er al veel verontrustender uit dan Broecker het aan het einde van de jaren zeventig zag. In de technisch ontwikkelde wereld neemt de behoefte aan energie niet meer toe nu de bevolkingstoename kleiner is geworden en de mensen een overvloedige, energierijke levensstijl hebben bereikt. Maar in de Derde Wereld is economische groei de enige manier voor de mensen om die overvloedige 'westerse' levensstijl, die men nu zo aantrekkelijk vindt, te bereiken, en economische groei betekent het gebruik van toenemende hoeveelheden brandstof, in hoofdzaak fossiele brandstof in de vorm van steenkool. Het totale resultaat is dat het wereldgebruik van fossiele brandstof met een snelheid van ongeveer 4 procent per jaar toeneemt en dat betekent over een periode van zestien jaren een verdubbeling van de jaarlijkse hoeveelheid opgestookte brandstof.
Er zijn in de bodem enorme hoeveelheden steenkool beschikbaar, zodat deze dramatische toename van energieverbruik zeker mogelijk is. Bij het huidige verbruik kunnen de reserves aan steenkool het nog meer dan duizend jaren uithouden; zelfs bij een onbeperkte groei van het verbruik (maar aannemende dat de groei terugloopt naarmate de Derde Wereld de rijke landen inhaalt) zou de jaarlijks verstookte hoeveelheid pas in de twee en twintigste eeuw zijn top bereiken op een niveau van vijf maal het huidige verbruik, voordat er sprake zou zijn van een afname doordat de reserves zouden opraken. (Het is misschien interessant om hier op te merken dat zelfs zo'n dolle verbranding van steenkool nog geen bedreiging van het zuurstofgehalte

van de atmosfeer zou betekenen. Er is zoveel zuurstof in de lucht dat zelfs de verbranding van alle fossiele brandstoffen tot koolstofdioxide de concentratie van zuurstof met maar 1 à 2 procent zou verkleinen.) Op deze manier zouden de concentraties aan koolstofdioxide tegen het jaar 2030 gemakkelijk de dubbele waarde van het pre-industriële tijdperk kunnen bereiken. Maar wanneer we de jaren van 1990 ingaan is er waarschijnlijk al een even grote bijdrage aan het door de mens veroorzaakte broeikaseffect van de kant van de andere sporegassen als die we van de huidige overmaat aan koolstofdioxide hebben te verwachten; dit alles berekend ten opzichte van het niveau in het pre-industriële tijdperk. Dit betekent dat het waarschijnlijk is dat er voor het jaar 2000 nog aanzienlijke veranderingen in het klimaat moeten worden verwacht.

Omdat koolstofdioxide nog altijd de grootste bijdrage tot het antropogene broeikaseffect levert en omdat het het eerste gas is dat als zodanig werd onderkend, drukken de deskundigen het broeikaseffect van andere sporegassen uit in termen van hun koolstofdioxide-equivalent. Dat maakt het ook gemakkelijker om de schattingen van toekomstige klimaatsveranderingen te beschrijven en bij te stellen in termen van alleen maar het koolstofdioxide-effect door eenvoudig de passende extra hoeveelheid koolstofdioxide in rekening te brengen. Het grootste afzonderlijke effect, na dat van de koolstofdioxide, komt van methaan, dat op het ogenblik ongeveer net zoveel effect heeft als 36 procent van het huidige teveel aan koolstofdioxide. Als men vervolgens bij elkaar telt wat het effect is van de ozon in de troposfeer, van de CFK's behalve de F-11 en F-12, en van de extra waterdamp die afkomstig is van de broeikasverwarming van de oceanen, dan kan voor de berekeningen worden aangehouden dat ze ongeveer 29 procent van het koolstofdioxide-effect veroorzaken en voor lachgas is dat ongeveer 9 procent. Telt men deze getallen op dan is de extra opwarming van de wereld gevolg van toename van de hoeveelheid van deze sporegassen waarschijnlijk al ongeveer 3 procent groter dan de toename van de temperaturen die door de concentratieverhoging van koolstofdioxide (van 270 ppm tot boven 340 ppm) wordt veroorzaakt. In datzelfde stuk in Time Magazine haalde men Stephen Schneider aan om z'n passende samenvatting van de situatie: "Dat zijn de kleintjes, maar al die kleinigheidjes bij elkaar leveren nog 50 procent van het probleem op". En James Hansen van het NASA-Goddard Institute for Space Studies heeft op basis van een Goddard-klimaatmodel, dat meer dan andere computersimulaties rekening houdt met de sporegassen, berekend dat de opwarming van de wereld binnen de komende twintig jaren een paar graden boven het pre-industriële niveau zal komen. Daardoor zal die temperatuur niet alleen hoger komen dan ooit in de afgelopen duizend jaar is voorgekomen, maar zelfs hoger dan ooit in de afgelopen honderdduizend jaar is opgetreden. In een speciale uitgave van Chemical & Engineering News (24 november 1986), dat speciaal aan de veranderende atmosfeer is gewijd, worden de volgende woorden van Hansen aangehaald: "Over tien jaar zal iedereen beginnen te vragen wat er gedaan kan worden". Waarom is het waarschijnlijk dat ze zich zorgen maken? Wat zou precies een schijnbaar bescheiden toename van de wereldtemperatuur van maar zo'n paar graden te betekenen hebben voor het wereldklimaat?

In het rapport Climate Change wordt beschreven dat bij ongewijzigd beleid de gemiddelde temperatuur op aarde de komende eeuw zal stijgen met ongeveer 0.3 °C per tien jaar, met een onzekerheidsmarge van 0.2 °C tot 0.5 °C. Voor deze stijging is op dit moment naar schatting CO_2 verantwoordelijk voor ongeveer 60%, methaan voor ca. 15%, lachgas voor zo'n 5%, CFK's en HCFL-22 voor 11% en ozon voor ca. 9%.

5.4 Het vooruitzicht op lange termijn

Een manier om er een indruk van te krijgen hoe dramatisch zo'n verandering zal zijn, is terug te gaan in het verleden en na te gaan hoe lang het geleden is dat er in de wereld zulke warme omstandigheden zijn geweest als we nu waarschijnlijk in de 21e eeuw zullen meemaken. De omstandigheden die zich in de afgelopen paar miljoen jaren (ruwweg over de hele duur van de evolutie van de mensachtigen) hebben voorgedaan, zijn niet 'normaal' als ze in het langere termijn perspectief van honderden miljoenen jaren worden bekeken.

Uit geologisch bewijsmateriaal is gebleken dat de aarde gedurende het grootste deel van haar geschiedenis niet eens een permanente ijskap gedurende het hele jaar heeft gehad, laat staan twee. IJskappen vormen zich gewoonlijk alleen maar wanneer er zich land in de nabijheid van de ene of de andere pool bevindt waarop sneeuw kan blijven liggen en zich tot ijsvelden kan ophopen. De bevroren Noordpool-zee is een speciaal geval omdat die door land omgeven is en voldoende koud is voor ijsvorming, omdat het warme water van de tropen niet in de poolzee kan doordringen. Terwijl de continenten langzaam over de aardbol schuiven, met elkaar botsend en zich opsplitsend in nieuwe geografische patronen, komt het om de zoveel honderd miljoen jaren voor dat de omstandigheden geschikt zijn voor de vorming van een ijskap en dan begint de wereld aan een nieuw ijstijdperk. In zo'n ijstijdperk kunnen zich weer tussenperioden van bijzonder ernstige koude voordoen, de echte ijstijden, of er zijn tijdelijke onderbrekingen, waarin het ijs zich in zijn poolbolwerk terugtrekt. Zo'n korte warme onderbreking wordt een tussenijstijd genoemd en wij leven nu in zo'n tussenijstijd die zo ongeveer 10.000 jaar geleden begon.

Het is onmogelijk om nauwkeurige cijfers te verbinden aan de temperaturen die heersten voordat het huidige ijstijdperk begon, maar de ijskap aan de noordpool heeft al meer dan 2 miljoen jaren bestaan en volgens een studie die door Hermann Flohn werd uitgevoerd voor het International Institute for Applied System Analysis in Oostenrijk, kan in al die tijd de wereldtemperatuur niet meer dan 2,5 °C boven die van vandaag zijn gestegen. De geologische waarnemingsreeksen geven in ruwe lijnen aan dat de periode van 100 miljoen jaren geleden tot 65 miljoen jaren geleden (het laatste gedeelte van het Mesozoïcum) aanzienlijk warmer was dan vandaag. Dinosaurussen en een tropische vegetatie floreerden zelfs op hogere breedtegraden, met inbegrip van Canada en Siberië. Maar omstreeks 55 miljoen jaren geleden kwam het klimaat weer in verval, toen de wereld afkoelde, waarschijnlijk ten gevolge van geografische veranderingen die met het verschuiven van de continenten samenhingen. Omstreeks 10 miljoen jaren geleden ontwikkelde zich het ijs op de zuidpool en zo'n 4 miljoen jaren geleden had het zich tot zijn huidige afmetingen uitgebreid.

Volgens sommige definities moet dat het begin van het huidige ijstijdperk zijn geweest, hoewel continentale ijsvelden zich pas 3 miljoen jaren geleden op het noordelijk halfrond hebben vertoond.
In de loop van het ijstijdperk gaan de overgangen van een ijstijd naar een tussenijstijd gepaard met veranderingen van de gemiddelde wereldtemperatuur van slechts ca. 5°C. Dat betekent dus dat de temperaturen gedurende de ijstijd, die ongeveer 10.000 jaar geleden eindigde, gemiddeld maar 5 °C lager waren dan de huidige wereldtemperatuur. De warmste tussenijstijd van de hele duur van het lopende ijstijdperk- en dat is zeker het warmste interval in ten minste de laatste 2 miljoen jaren- was de tussenijstijd die aan het onze voorafging, ongeveer 120.000 jaar geleden. Toen liepen de temperaturen op tot een gemiddelde dat ongeveer 2,5 °C hoger lag dan de gemiddelde aardtemperaturen van vandaag. In die tijd leefden er nijlpaarden, leeuwen en bosolifanten in Zuid-Engeland. Maar in de loop van de laatste 2 miljoen jaren of meer zijn er maar weinig tussenijstijden geweest; dat waren dan perioden van om en nabij 10.000 jaren die ingesloten waren tussen echte ijstijden die zo ongeveer 100.000 jaren lang waren. Tegen de tijd dat het door de mens veroorzaakte broeikaseffect de wereld met ongeveer 3 °C zal hebben opgewarmd, en het ziet er naar uit dat dit ergens in de eenentwintigste eeuw zal gebeuren, zal de wereld warmer zijn dan hij ooit in de afgelopen 2 of 3 miljoen jaren is geweest en weer hard op weg zijn naar de omstandigheden die de dinosaurussen zo plezierig hebben gevonden.
In bepaalde opzichten zou het erop kunnen lijken dat zo'n warme wereld een aangenamere plaats is om in te leven -zeker te verkiezen boven een terugkeer van volledige ijstijdcondities. Maar de overgang van de wereld waaraan we nu gewend zijn naar een warmere wereld zou erg moeilijk kunnen zijn, en zeker wanneer de ijskappen gaan smelten.

5.5 Wonen in een warmere wereld

Hoewel we allemaal aan temperatuursveranderingen van een paar graden of meer gewend zijn, is dat toch heel wat anders dan de gevolgen van een algemene stijging van 1 à 2 graden van de wereldtemperaturen. In de eerste plaats tonen de computerberekeningen en de vergelijking van de opgetreden warme en koude jaren dat als de wereld warmer wordt, de hogere breedtegraden de meeste opwarming vertonen en de omgeving van de equator de minste. Dus een over de hele wereld gemiddelde temperatuurverhoging van 1 °C kan betekenen dat de temperaturen bij de polen en bijvoorbeeld op de breedten van Noord-Amerika en Europa, veel verder toenemen. In de tweede plaats brengen temperatuursveranderingen ook veranderingen in de regenval en in de windpatronen teweeg. Wanneer de wereld warmer wordt, zullen bepaalde gebieden in de wereld natter worden en andere droger; betrouwbare winden die de moessonregens brengen kunnen hun loop gaan verleggen, en er zijn studies die voorspellen dat er meer stormen zullen optreden. Merkwaardig genoeg geven verschillende studies ook aan dat in sommige streken de winters strenger kunnen worden wanneer de temperatuur op aarde omhoog gaat. Een beperkte stijging van de gemiddelde jaartemperatuur kan het samengaan van een

grotere temperatuurstijging in de zomer en een lagere temperatuur in de winter verhullen.
De computermodellen zijn niet in staat om dit soort verfijningen weer te geven. De computers maken hun berekeningen op basis van een netwerk van punten dat de hele aarde bedekt. Daarbij kan één knooppunt van dat netwerk de gemiddelde omstandigheden van een gebied van een van de staten van de VS of een Europees land vertegenwoordigen. In de computer zijn dan eigenschappen zoals de temperatuur en de bewolkingsgraad alleen maar per knooppunt gedefinieerd. Wat de computer betreft, zal dan de temperatuur boven de hele staat Colorado dezelfde zijn, terwijl de bewolking boven Engeland bestaat uit een uniforme bedekking of helemaal geen wolken (sommige modellen zijn niet eens in staat om een detail zoals de aanwezigheid van de Britse eilanden weer te geven). Dan is er nog het probleem van de oceanen. Ongeveer 70 procent van de aarde wordt door water bedekt en de oceanen houden warmte vast -ze 'herinneren' zich voorafgaande omstandigheden, zodat ze zowel langzamer opwarmen als ook langzamer afkoelen dan de continenten. Dat is de reden waarom het klimaat in Engeland zo veel van het continentale Europese klimaat verschilt. Maar er is tot nu toe nog geen enkel model ontworpen dat die oceanen op een bevredigende manier kan behandelen. Hoewel de computermodellen van nut zijn om de algemene situatie ruw te schetsen kan men de manier waarop de wereld meer in detail zal reageren op verwarming ten gevolge van het broeikaseffect, beter nagaan door te kijken hoe het in werkelijkheid bij warme en koude jaren in het verleden is toegegaan.
Deze benadering is met groot succes toegepast door een team van de University of East Anglia in Engeland. Er zijn pas sinds 1925 nauwkeurige temperatuur- en regenwaarnemingen gedaan op het grootste deel van het vaste land van het noordelijk halfrond. Daarom heeft het team zich allereerst geconcentreerd op die periode na 1925 en de vijf warmste en de vijf koudste jaren uit de waarnemingsreeksen gehaald om de gegevens van die extremen te combineren tot een 'warme aarde' en een 'koude aarde'-scenario. Voor de vijftig jaren van 1925 t/m 1974 waren de koudste jaren 1964, 1965, 1966, 1968 en 1972. De vijf warmste jaren waren 1937, 1938, 1943, 1944 en 1953. Wanneer iedere verzameling van vijf jaren wordt gemiddeld en wanneer de aldus samengestelde 'jaren' met elkaar worden vergeleken, en wel gebiedsgewijze, dan vertonen ze precies dezelfde variatie van temperatuurspreiding over de breedtegraden als de computermodellen ook aangeven. Ze geven echter meer detail wat betreft de regionale verschillen. Het gemiddelde temperatuurverschil tussen warme en koude samengestelde 'jaren' is ongeveer 0,5 °C maar het gebied boven de 65° NB graad was iets minder dan 3 °C warmer in de warme verzameling jaren dan in de koude samengestelde reeks van jaren. In de tropen was nauwelijks sprake van enige temperatuursverandering.
Bekijkt men de hele wereldomtrek dan ziet men uit de vergelijking dat in een gebied dat zich van Finland over de Sovjet-Unie in oostelijke richting uitstrekt tot 90°oosterlengte, de temperatuur meer dan 3 °C hoger is terwijl de Verenigde Staten maar 1,5 à 2 °C warmer worden en bepaalde delen van de wereld, waaronder Japan, India, Turkije en Spanje, zelfs een kleine daling van de temperatuur vertonen.

Hoewel het warme samengestelde 'jaar' boven het land bijna 2 procent meer regen laat zien dan het koude samengestelde 'jaar' (precies wat men zou verwachten wanneer er in een warmere wereld meer water uit de zeeën verdampt) is de verdeling van dat regenverschil weer zeer onregelmatig, zulks in overeenstemming met de onregelmatigheden in de temperatuursverschillen. India en het Nabije Oosten ondergaan een meer dan gemiddelde toename terwijl de Verenigde Staten, Europa en het graanareaal van de Sovjet-Unie, alle te kampen hebben met een afname van de regenval naast een stijging van de temperatuur.
Als datzelfde patroon zou opgaan wanneer het broeikaseffect z'n invloed begint te tonen dan zou dat een noodlottige ontwikkeling kunnen betekenen. Een combinatie van hogere temperaturen en minder regen leidt tot verdroging en misschien tot stofwoestijn('dustbowl')omstandigheden, speciaal in gebieden zoals de 'great plains' in Noord-Amerika die zich nu toch al op het randje van 'verwoestijning' bevinden. Het lijkt er op dat de aanhoudende verdroging aan de rand van de Sahara (Sahel) en door Afrika oostwaarts tot in Ethiopië, wel eens met precies dit soort van verandering te maken kan hebben die dan het gevolg van het zich ontwikkelend broeikaseffect zou kunnen zijn.
Het succes dat het team van de University of East Anglia had met hun methode om de verbanden uit te beelden die zich voordeden tussen de veranderingen van de, over het geheel gemiddelde, temperaturen en de veranderingen in de regionale regenval en temperatuurpatronen, bracht hen er toe om ook na te gaan wat ze konden afleiden uit de vergelijking van een werkelijke warme reeks van jaren met een soortgelijke reeks van koude jaren. Voor tenminste Europa en Noord-Amerika waren door naar het begin van deze eeuw terug te gaan voldoende nauwkeurige waarnemingsreeksen te vinden. Daaruit bleek dat de koudste reeks van twintig achtereenvolgende jaren van 1901 t/m 1920 duurde en de warmste reeks van opeenvolgende jaren liep van 1934 t/m 1953. In deze studie die geografisch beperkter was maar wetenschappelijk beter gefundeerd, vonden zij dat zich, zelfs al zijn in de warme decennia het voorjaar, de zomer en de herfst in Europa allemaal warmer, over geheel Centraal-Europa meer koude winters voordeden in een band die zich 10° ter weerszijden van 50° NB uitstrekte. Zij konden ook de oorzaken van deze verandering vaststellen die te maken hebben met veranderingen in de luchtcirculatie waarbij hardnekkige hogedruk-systemen, bekend als 'blokkerend hoog', gewoonlijk optreden. Zo'n 'blokkerend hoog' maakt het de warme westenwinden onmogelijk om vanuit de Atlantische Oceaan in het vaste land van Europa door te dringen.
De conclusies van het team van de University of East Anglia, waaronder ook de voorspelling dat een verwarming door het broeikaseffect strengere winters in Europa zou veroorzaken, werden in 1984 gepubliceerd. Prompt daarop werden Engeland en andere delen van Europa getroffen door drie gemene winters achter elkaar: 1984/85, 1985/86 en 1986/87. Wat was de oorzaak? Hardnekkige 'blokkerend hoog' systemen die zich boven Noordwest-Europa vestigden!
Door de hele periode sinds 1850 te nemen en zo goed mogelijk gebruik te maken van de beperkte temperatuurwaarnemingen van de jaren voor 1925, concludeerde het team dat de gemiddelde temperatuur op de wereld met ongeveer 0,5 °C is gestegen.

Deze langzame stijging van de gemiddelde temperatuur is op geen stukken na zo groot als de grillige schommelingen van jaar tot jaar en van decennium tot decennium, maar hij is vrijwel precies in overeenstemming met de berekeningen die op de toename van het koolstofdioxidebroeikaseffect zijn gebaseerd. Andere factoren die nog van invloed kunnen zijn en die een aantal van die schommelingen kunnen hebben veroorzaakt, zouden vulkanische uitbarstingen kunnen zijn. Door de uitbarstingen wordt stof opgeworpen in de atmosfeer dat daar maanden of jaren kan blijven hangen om als een tijdelijke zonwering dienst te doen die de aarde daaronder kan laten afkoelen, en dan zijn er nog veranderingen in de zon zelf. Maar in 1987 lijkt het er op dat het broeikaseffect zich heeft afgetekend. Vijf van de negen warmste jaren die ooit zijn geregistreerd tot aan 1987 hebben sinds 1978 plaatsgevonden en 1980, 1981 en 1983 komen naar voren als de drie warmste jaren die ooit zijn waargenomen. *Ook 1987 was wereldwijd warmer dan alle voorgaande jaren en dit gold ook weer voor 1988 en 1990 (fig. 7).*

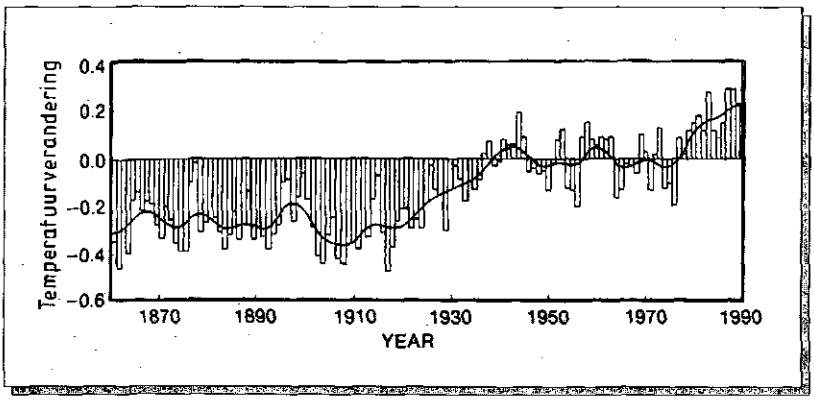


Fig. 7 Wereldwijd gemiddelde temperatuur, gecombineerd voor land-lucht en zeeoppervlak, relatief ten opzichte van het gemiddelde over 1951-1980
(Bron: Climate Change, IPCC-Rep WMO-Unep, Sept. 1990)

Daarom houdt men nu ernstiger dan ooit tevoren rekening met het broeikaseffect. De waarschijnlijkheid dat gassen zoals de CFK's samen nog eens een verdubbeling van het door de mens veroorzaakte koolstofdioxide-effect zullen opleveren, maakt de groeiende discussie nog noodzakelijker. Een probleem waar in de laatste tijd in het bijzonder aandacht aan is besteed, is de stijging van de zeeniveaus die in de loop van de twintigste eeuw is opgetreden en die zich in de komende decennia waarschijnlijk versneld zal voortzetten. Een deel van die stijging wordt veroorzaakt doordat er

in de oceanen water bij komt doordat gletsjers en ijskappen in een warmere wereld enigszins afsmelten; een ander deel is eenvoudig het gevolg van de uitzetting van de oppervlaktelagen als de oceanen warmer beginnen te worden. Tussen 1880 en 1985 stegen de zeeniveaus tussen de 10 en 15 cm. Tegen het einde van de 21e eeuw, bij gemiddelde wereldtemperaturen die misschien 5 °C hoger liggen dan nu, zou de stijging van de zeeniveaus wel zo'n 90 cm kunnen bedragen. Het is niet te verwonderen dat het laaggelegen Nederland nu de leiding neemt bij de pogingen om de Europese gemeenschap in actie te doen komen bij het onderzoek naar het broeikaseffect en bij het zoeken naar mogelijkheden om de gevolgen zo klein mogelijk te houden.
Tot dusver zijn de voorspellingen natuurlijk gebaseerd op de veronderstelling dat de atmosferische condities geleidelijk zullen veranderen naarmate het broeikaseffect aan kracht wint. Ik heb al eerder vermeld dat het meest verontrustende aspect van de ontdekking van een gat in de ozonlaag boven Antarctica de daarin vervatte boodschap is, dat de atmosfeer in feite op ten minste een aantal verstoringen op een niet-lineaire manier reageert. Er wordt nu een geweldige druk op de klimatologen uitgeoefend om ten minste een of andere waarschuwing te laten horen wanneer zich soortgelijke dramatische veranderingen van het klimaat in bepaalde gebieden zullen voordoen en die het gevolg kunnen zijn van het feit dat de concentratie aan koolstofdioxide en andere broeikasgassen in de atmosfeer een kritisch niveau bereikt. Maar dat ligt allemaal buiten de opzet van dit boek. Wat hier wel aan de orde is en dat in sterke mate, is het belang van het broeikaseffect voor de condities in de stratosfeer.

5.6 De invloeden op de ozon

De stratosfeer is warmer dan de troposfeer omdat de ozon in de stratosfeer ultraviolette straling van de zon absorbeert (ozon is bijzonder wat zijn bijdrage tot de warmtebalans van de aarde betreft; in tegenstelling tot andere sporegassen absorbeert het zowel infrarode als ultraviolette straling). Zoals we in hoofdstuk 4 hebben gezien veroorzaken reacties waarbij CFK's en andere verbindingen zijn betrokken, op grote hoogte, ongeveer 40 km boven de grond, afbraak van de ozon, maar in sommige delen van de wereld veroorzaken reacties waarbij in het bijzonder NO_x, methaan en CO zijn betrokken, op geringere hoogte in de vrije troposfeer een toename van de aanwezige hoeveelheid ozon.
Deze toename is ook gedeeltelijk het gevolg van een proces dat 'zelfherstel' wordt genoemd. Wanneer hoog in de stratosfeer de ozon wordt uitgedund zal meer ultraviolet zonlicht tot geringere hoogten kunnen doordringen om daar weer ozon uit zuurstof te laten ontstaan. Dit 'zelfherstel' is het sterkste boven de evenaar waar het zonlicht het sterkst is. Wanneer het gaat om de bescherming van het leven op de grond tegen de schadelijke gevolgen van de ultraviolette straling zelf dan zou men dit effect -in overeenstemming met de naam- geruststellend kunnen noemen, alhoewel het op de hogere breedtegraden tamelijk klein is en daar de meeste aanleiding is om bezorgd te zijn over het toenemende risico van huidkanker. Maar wanneer het gaat over de klimaatsveranderingen die nu, in verband met het

broeikaseffect, optreden in de atmosfeer, kan deze herverdeling van de ozon even verontrustend zijn als de rechtstreekse afname van het ozongehalte in de hele stratosfeer.
In een lezing van 11 maart 1987 aan de University of North Carolina te Chapel Hill gaf Sherry Rowland wat getallen voor deze berekeningen; de lezing werd gepubliceerd in de 'Carolina Environmental Essay Series'. Zoals Rowland het toen zei: "Het broeikaseffect en de afbraak van de stratosferische ozon zullen zich in dezelfde atmosfeer afspelen en hun gevolgen zullen niet alleen onderling verweven zijn maar ze zullen elkaar ook ontregelen". Uitgaande van de schatting dat tegen het midden van de 21e eeuw ten gevolge van het broeikaseffect de verhoging van de temperatuur op zeeniveau gemiddeld over de wereld zo'n 3 °C zal bedragen, komt Rowland tot een 10 °C temperatuurdaling in de hoge stratosfeer. Maar er is nog iets anders gaande. "Het belangrijkste directe fysische effect van de ozonafbraak op de stratosfeer", aldus Rowland, "zal daar de geringere bijdrage van de binnenkomende ultraviolette straling zijn". Dit is de energiebijdrage die de laag van de stratosfeer tussen hoogten van 40 en 48 km warmer maakt dan de atmosfeer direct daarboven en direct daaronder absorptie van ultraviolette straling door ozon is verantwoordelijk voor de instandhouding van de stratosfeer als een afzonderlijke laag in de atmosfeer. Op die hoogte heeft iedere verandering van de energieabsorptie een onmiddellijk effect op de temperatuuropbouw van de atmosfeer. Op de lange duur gerekend met dezelfde tijdschaal die Rowland voor zijn berekeningen van de verstoring door het broeikaseffect gebruikt, zal een ongewijzigde uitstoot van CFK's een afname van het ozongehalte met ten minste 50 procent veroorzaken op een hoogte van ongeveer 40 km. Dat zal een temperatuurdaling van ongeveer 20 °C in deze kritieke laag van de atmosfeer tot gevolg hebben. Het gecombineerde effect van de ozonuitdunning en het broeikaseffect zal daarom een totale temperatuurdaling van 30 °C in de bovenste stratosfeer tot gevolg hebben en dat noemt Rowland "een zeer aanzienlijke verandering".
Tegelijkertijd zullen uiteraard als gevolg van het broeikaseffect de lagere delen van de atmosfeer warmer worden en op sommige hoogten en op sommige breedtegraden ook nog door het zelfherstelproces. Het is op het ogenblik totaal onmogelijk om te berekenen welke gevolgen deze veranderingen voor weerpatronen op de wereld zullen hebben, maar het is zeker dat zo'n enorme storing in de weermachine gevolgen voor de werking daarvan moet hebben.
Het enige straaltje hoop was nog de suggestie dat, door een afkoeling van de stratosfeer, het broeikaseffect de snelheid van de chemische reacties van de ozonafbraak zou kunnen vertragen. Dat kan misschien voor een groot gedeelte van de wereld opgaan. Maar een van de basisconclusies die uit de Dahlem-conferentie van november 1987 te voorschijn kwamen, was dat het optreden van zeer koude condities in de stratosfeer boven Antarctica juist nauw verbonden was met de bijzondere chemische processen waarvan men nu aanneemt dat ze verantwoordelijk zijn voor de plotselinge vorming van het ozongat in ieder voorjaar. Hoewel de temperatuurveranderingen ten gevolge van de ozonafbraak nergens nog bij benadering zo groot zijn als de veranderingen die Rowland voorziet voor het midden van de

volgende eeuw, is het zeer wel mogelijk dat het broeikaseffect al een rol gespeeld heeft bij het omslaan van de condities in de atmosfeer boven Antarctica naar een toestand die gunstig is voor het groter worden van het 'gat in de ozonlaag'.

Literatuur

Broecker, W.S. 'Climatic change: Are we on the brink of a pronounced global warming', *Science* 189, 460-463 (1975)

Climate Change, the EPCC Scientific Assessment - *WMO en UNEP*, Cambridge U.P., (1990)

Flohn, H. '*Possible climate consequences of a manmade global warming*', Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis (1980)

Houghton, J.T., G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (eds.) 'Climate change, the IPCC scientific assessment', *Cambridge University Press*, 365pp, ISBN 0-521-40720-6 (1990)

Lovelock, J.E. '*The ages of Gaia: a biography of our living earth*' New York, W.W. Norton & Cy (1988)

Lovelock, J.E., Verslag van '*International conference on the ecology and toxology of fluorocarbons*', Andover (1989)

Ramanathan, V. 'Greenhouse effect due to chlorofluorocarbons: Climate implications', *Science* 190, 50-52 (1975)

Ramanathan, V., R.J. Cicerone, H.B. Singh and J.T. Kiehl 'Trace gas trends and their potential role in climate change' *J.Geoph.Res.* 90, 5647-5663 (1985)

Rowland, S. hield op 11 maart 1987 een lezing die gepubliceerd is in 'Carolina Environmental Essay Series'

Schneider, S.H. '*Global warming: are we entering the greenhouse century?*' Sierra Club Books, San Francisco, 317pp, ISBN 0-87156-693-1 (1989)

Hoofdstuk zes

6.1 Het gat boven de Zuidpool

De eersten die het gat in de ozonlaag hebben opgemerkt is een groep onderzoekers van de British Antarctic Survey, die in 1982 bij Halley Bay aan de zuidpool aan het werk waren. Op die plek zijn sinds 1957 elk jaar in de periode van oktober tot en met maart regelmatig metingen gedaan. In 1957, het Internationaal Geofysisch Jaar, is er een gecoördineerde internationale wetenschappelijke inspanning geleverd om het milieu op onze planeet te onderzoeken. Deze onderneming had zoveel succes dat het 'Jaar' feitelijk twee jaar duurde en dat had onder meer tot gevolg dat zowel in de Verenigde Staten als in de Sovjet-Unie een satellietprogramma werd opgezet en dat door teams van verschillende naties de wetenschappelijke onderzoekingen van het zuidpoolgebied in de atmosfeer boven dat zuidelijkste continent werden voortgezet.

De ontdekkingen die nu met instrumenten op de grond, in de lucht en vanuit satellieten zijn gedaan, geven een duidelijke aanwijzing dat er zo'n groot opgezette internationale wetenschappelijke inspanning nodig is om vast te stellen wat er tegenwoordig in de stratosfeer aan de gang is.

Toen Joe Farman en zijn collega's voor het eerst de vreemde verlaging van het ozongehalte van de lucht boven de zuidpool opmerkten, gebruikten ze een oud instrument dat al geruime tijd dienst had gedaan. Dit soort instrument, een spectrofotometer, meet de ozonconcentratie in een kolom van de atmosfeer door de spectroscopische 'vingerafdruk' van ozon te nemen. Wanneer zonlicht door de atmosfeer valt absorberen alle moleculen in de lucht precies vastgestelde karakteristieke golflengten van dit licht (verschillend voor de verschillende moleculen).

Het instrument registreert de intensiteit van de lijnen in het spectrum van het zichtbare licht die te maken hebben met, in dit geval, de ozonmoleculen, en zo bepaalt het instrument hoeveel ozon zich bevindt tussen de spectrofotometer op de grond en de bovenkant van de atmosfeer. Omdat zonlicht nodig is om het spectrum te kunnen meten kan dit bepaalde type instrument nog niets vertellen over de ozonconcentraties gedurende de lange poolwinternacht. Maar wat het Halley Bay team wel uit kon opmaken over de ozonconcentraties in het voorjaar (in september en oktober op het Zuidelijk halfrond) was voor hen schokkend genoeg om afstand te nemen en nog eens zorgvuldig te kijken voordat ze ook maar een enkele sensationele aankondiging in de wetenschappelijke pers zouden doen.

6.2 Het gat verschijnt

Farman en zijn collega's hadden geen aanleiding om hun oude instrument ervan te verdenken dat het plotseling van de kook was geraakt, maar er was net een nieuw,

zorgvuldig in Engeland gecalibreerd instrument op komst en ze gaven er de voorkeur aan om daarop te wachten en hun waarnemingen met die nieuwe spectrofotometer nog eens zorgvuldig te controleren. Bovendien wisten ze dat de Amerikanen twee onderzoeken hadden lopen waarbij vanuit de weersatelliet Nimbus 7 het ozongehalte in de stratosfeer werd opgenomen. De satelliet was al sinds 1978 in zijn baan en de instrumenten (de Total Ozone Mapping Spectrometer, of TOMS, en de Solar Backscatter Ultraviolet, of SBUV) zouden een dergelijke dramatische val in het ozongehalte, zoals zij in het voorjaar vanuit Halley Bay hadden gemeten, met gemak hebben kunnen ontdekken. Maar geen enkel van de gepubliceerde satellietgegevens gaf ook maar een aanwijzing dat er een voorjaars 'gat' in de ozonlaag boven het zuidpoolgebied zou zijn, ook zelfs niet toen de waarnemingen van Halley Bay in 1982 te zien gaven dat er in de maand oktober meer dan 20 procent van de ozon uit de bovenliggende lucht was verdwenen. Er was dus alle aanleiding om voorzichtig te zijn.
Maar in oktober 1984 was het British Antarctic Survey team zeker van zijn zaak. Het

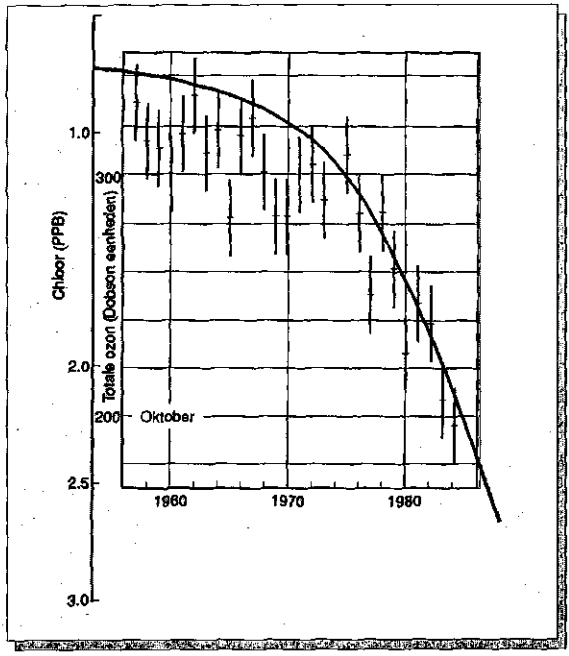


Fig. 8 De ozonkolom boven Halley Bay in oktober, de lengte van de verticale strepen geeft de spreiding in de metingen aan. De getrokken lijn geeft - van lage naar hoge concentraties - het verloop van de gemeten chloor concentraties boven Halley Bay
(Bron: The Hole in the Sky - Gribbin)

nieuwe instrument bevestigde het verloop en het gaf aan dat in oktober 1984 de verlaging van het ozongehalte boven Halley Bay meer dan 30 procent bedroeg.
In dezelfde tijd meldde een ander grondstation, duizend mijl naar het Noorden, ook een ozonverlies uit de stratosfeer. Het was dus niet alleen maar een plaatselijk verschijnsel boven het Halley Bay Station. De waarnemingen in 1983 en 1984 waren daarom nog van bijzonder belang omdat in alle metingen van dit soort steeds een bepaalde mate van onzekerheid aanwezig is -zelden zetten wetenschappers zo'n waarnemingspunt in een grafiek, zoals in figuur 8, zonder daar een betrouwbaarheidsinterval bij aan te geven dat de mate van onzekerheid in de metingen weergeeft. In 1982 waren de meetwaarden laag, maar ze lagen nog niet zo vreselijk ver onder de benedengrens van het betrouwbaarheidsinterval dat bij de voorafgaande metingen hoorde; de metingen in 1983 en 1984 waren zo laag dat het eenvoudig uitgesloten was dat ze door meetonnauwkeurigheden zouden zijn ontstaan.
Het ingezette verloop zette zich voort. In 1985 was de concentratie nog lager en hoewel de met deze en andere technieken gemeten ozonconcentraties in het voorjaar van 1986 niet helemaal zo laag waren als in 1985, hadden ze in oktober 1987 de laagste ooit in het zuidpool gebied gemeten waarden bereikt. Daarbij was in het voorjaar meer dan 50 procent van de ozon in de stratosfeer vernietigd voordat zich met de komst van de Antarctische zomer weer een herstel, of ten minste een gedeeltelijk herstel, aftekende. Men kan een beter inzicht in de betekenis van deze percentages krijgen door te kijken naar de eenheden waarin deze instrumenten hun meetwaarden uitdrukken. Dit zijn Dobson-eenheden, genoemd naar de professor in Oxford die de spectroscoop-techniek voor de meting van stratosferische ozon ontwikkeld heeft. Een manier om deze metingen te interpreteren is deze uit te drukken in termen van de dikte die de ozonlaag zou hebben, wanneer daar alle ozon boven ons zou zijn samengebracht onder een standaardtemperatuur van 0 °C en een druk die met dat op zeeniveau overeenkomt. Een Dobson-eenheid is dan equivalent met een duizendste centimeter ozon. Tussen 1957 en het midden van 1970 was de ozonconcentratie boven Halley Bay in oktober, aan het eind van de zuidpoolwinter, altijd ongeveer 300 Dobson-eenheden, overeenkomend met een dikte van circa 3,0 mm bij standaardtemperatuur en druk. In oktober 1987 was het vergelijkbare getal 125 Dobson-eenheden, overeenkomend met een dikte op zeeniveau van net 1,25 mm. Dit is wat de onderzoekers bedoelen wanneer ze zeggen dat meer dan de helft van de ozonlaag is vernietigd (maar men moet wel beseffen dat de ozonlaag boven het zuidpoolgebied zich wel degelijk herstelt gedurende de zomer, al is het dan niet geheel tot de niveaus van de jaren zeventig).
Hoe is het dan toch mogelijk dat de instrumenten van de Nimbus 7 er niet in slaagden de verandering te ontdekken die in het begin van de jaren tachtig in de stratosfeer plaatsvond? Toen Farman en zijn collega's in een wetenschappelijke publikatie hun ontdekking, van wat bekend werd als het ozongat, bekend maakten (het artikel bereikte het kantoor van Nature op kerstavond 1984 en het verscheen in de uitgave van 16 mei 1985) veroorzaakten zij een storm van activiteit in het Goddard Space Flight Center, dat verantwoordelijk was voor de TOMS- en SBUV-experimenten.

Al spoedig bleek waarom het Goddard-team niet als eerste het gat had kunnen ontdekken. Richard Stolarski, van NASA, herinnert zich hoe het team te veel vertrouwen in de historische reeksen van ozonmetingen had gesteld en te weinig vertrouwen hadden geschonken aan de eigen instrumenten.
Hij vertelde me dat in de tijd dat de satelliet werd gelanceerd, laat in 1978, nog nooit iemand stratosferische ozonconcentraties had gemeten die onder de 200 Dobson-eenheden lagen. De gegevens die van de satelliet in Goddard binnenkwamen werden automatisch door computers bewerkt voordat een mens ze aanraakte (of te zien kreeg) en de computers die de gegevens bewerkten waren zo geprogrammeerd dat ze alle meetwaarden lager dan 180 Dobson-eenheden verwierpen en als fouten behandelden. Bij de bewerking gaven die programma's zo'n meetwaarde als een fout aan en vervingen die, met het oog op de berekeningen, door een waarde van 180 Dobson-eenheden. Maar, achteraf gezien gelukkig, ze bewaarden de originele 'foute' meet-waarden wel zonder die verder te bewerken. De bedoeling was om op een later tijdstip al die lage meetwaarden aan een nader onderzoek te onderwerpen, maar om de een of andere reden waren de onderzoekers daar nog niet aan toe gekomen op het ogenblik dat het nieuws van Halley Bay los kwam. Een van de redenen was, aldus Stolarski, dat de waarnemingen die door andere Amerikaanse onderzoekers in het begin van de jaren tachtig aan de zuidpool waren verricht niet zulke lage ozonconcentraties hadden opgeleverd; er was geen overeenstemming tussen de gegevens van de Zuidpool en van de satelliet en een latere inspectie wees uit dat de fout bij de pool lag. Maar in die tijd gaf deze afwijking steun aan de veronderstelling van het Goddard-team dat satellietmetingen onder circa 200 Dobson-eenheden buiten beschouwing konden worden gelaten. Hoewel zelfs zeer lage waarden, 180 Dobson-eenheden, in de bewerkte gegevens te voorschijn konden komen werden ze als 'fout' gemerkt en daardoor besteedde geen van de onderzoekers er veel aandacht aan. Dit verhaal is belangrijk, en niet alleen maar vanwege het plezier bij de buitenstaanders omdat de Goddard-onderzoekers zichzelf zo te pakken hadden genomen. Het was even gemakkelijk voor hen geweest om hun computers zo te programmeren dat er bij meetwaarden onder 180 Dobson-eenheden bellen gingen rinkelen of lichten gingen flikkeren om hen te waarschuwen dat er iets bijzonders aan de hand was. Het belangrijkste punt is dat de onderzoekers van de atmosfeer aan het eind van de jaren zeventig en begin jaren tachtig, er in toenemende mate van overtuigd waren dat ze wel ongeveer begrepen wat zich in de atmosfeer afspeelde. Zowel de scheikundige processen als de dynamica van de luchtbeweging werden in meer detail dan ooit tevoren geanalyseerd en er was een samenhangend beeld ontstaan. Maar nergens in dat samenhangende beeld was er ook maar een enkele aanwijzing dat zich een dramatische verandering, zoals de ontwikkeling van een enorm gat in de ozonlaag kon afspelen. De les die de schok van deze ontdekking heeft opgeleverd, moet in de hele wereld van de wetenschap doorklinken -verwacht altijd het onverwachte, stel nooit een blind vertrouwen in je modellen. Toen de betekenis van de Britse waarnemingen tot hen doordrong konden de NASA-wetenschappers naar de oorspronkelijke gegevens teruggaan. Ze instrueerden hun computers om die te aanvaarden zoals ze waren. Toen ze dat deden toonden

de beide ozonmeetinstrumenten niet alleen dat er in het voorjaar een ozongat bestond, maar ook dat het zich over het gehele Antarctische vasteland uitstrekte. Het werd snel duidelijk dat het uitdunnen van de ozon zich in hoofdzaak voordeed tussen 10 en 24 km hoogte met wat minder ozonuitdunning op ongeveer 40 km. Het 'gat in de dampkring' is eigenlijk meer een plak uit de atmosfeer, een pannekoek die het Zuidpoolgebied bedekt -een 'gat' zo diep als de Mount Everest hoog is, en dat een gebied bestrijkt dat zo groot is als het vasteland van de Verenigde Staten. Het is zichtbaar op de beelden die de computer heeft gemaakt (en nu op de goede manier) uit de TOMS-metingen, zoals er één op de voorkant van dit boek staat.

6.3 Chemische aspecten

Dat artikel in Nature gooide ook de knuppel in het chemische hoenderhok. Sinds het begin van de jaren zeventig hadden de onderzoekers van Halley Bay ook de concentraties van CFK's in de atmosfeer gemeten. Deze waren opvallend toegenomen en het lag voor de hand dat het team zich ging afvragen of er wellicht een verband bestond tussen de toename van de CFK-concentraties en de afname van de ozonconcentraties in het voorjaar. Op de grafiek van de ozonafname die zij in Nature hadden gepubliceerd was ook het verloop van de F-11- en F-12-concentraties aangegeven zoals dat op dezelfde meetplaats was waargenomen en wel zo dat de concentratie onderaan de grafiek groter is (in wezen dezelfde als in fig. 8 is aangegeven). De twee krommen kwamen goed overeen -of, als de CFK-concentratie op de gebruikelijke manier wordt uitgezet, naar boven toenemend, dan zijn de twee krommen elkaars spiegelbeeld. Dit bewees nog niet dat er een oorzaak - gevolgrelatie bestond maar, zoals het team dit in zijn artikel uitdrukte: "het verschil tussen de huidige atmosfeer en die van de voorgaande tientallen jaren zit vooral in de hogere concentraties van halogeen koolwaterstoffen". Zij opperden dat de uiterst lage temperatuur boven Antarctica, tussen het midden van de winter en het vroege voorjaar, de atmosfeer aldaar "uitzonderlijk gevoelig maakte voor het ontstaan van anorganisch chloor". Dit is een taxatie die thans na twee en een half jaar van intensief onderzoek is bevestigd. De aanleidingen voor al die koortsachtige activiteit worden door Farman kort samengevat in een artikel in de New Scientist van 12 november 1987. "Vóór 1985", zei hij, "dachten alle atmosferische chemici dat ze al aardig wisten hoe het met de ozon zat. Waarnemingen en modellen kwamen met elkaar overeen. De waargenomen en voorspelde veranderingen lagen onder één procent per tien jaren. Niettemin is de afname boven het zuidpoolgebied nu meer dan 50 procent en dat gebeurt jaarlijks over een tijdsverloop van tussen 30 en 40 dagen".
De theoretici waren de eersten om het probleem aan te pakken, omdat het in mei 1985 al te laat was om voor het komende zuidelijke voorjaar nog een grote wetenschappelijke expeditie naar het Zuidpoolgebied te organiseren. In de rest van 1985 en in het begin van 1986 werd de aanval op drie fronten ingezet. Een aantal onderzoekers concentreerde zich op de chemie van de stratosfeer boven Antarctica om manieren te vinden waarop de ongewoon koude wintercondities aldaar de omstandigheden zouden kunnen scheppen waarbij de zon, bij zijn terugkeer in het voorjaar, een uitbarsting van fotochemische activiteit teweeg zou kunnen brengen,

die dan ozon aan de stratosfeer zou onttrekken. Anderen brachten de gedachte naar voren dat het probleem wellicht niet in het verdwijnen van de ozon zat maar in de herverdeling daarvan. Er zou dan in het voorjaar lucht met een laag ozongehalte, afkomstig van geringere hoogten en lagere breedtegraden in het Zuidpoolgebied binnendringen en door opstijging in de stratosfeer aldaar de ozonlaag verplaatsen. Al deze 'dynamische' theorieën brachten de veranderingen in de ozon van de Zuidpool in verband met gelijktijdige veranderingen in de atmosferische circulatie op het zuidelijk halfrond.

Dan was er nog een minderheid die de veranderingen in de ozon aan de Zuidpool in verband bracht met de veranderde activiteit van de zon. Die had een piek bereikt in 1979 en was aan het afnemen in de periode waarin de dramatische groei van het ozongat optrad. Dit is in wezen een uitgave op kleine schaal (gecompliceerd door de noodzaak om een vertraging in te bouwen tussen de piek van de zonne-activiteit en het maximum ozonverval) van het scenario voor de 'dood van de dinosaurussen', zoals dat door Crutzen en zijn collega's was geopperd; daarin speelt NO_x een sleutelrol in het ozonvernietigingsproces.

Onder de vele wetenschappelijke publikaties die zich in 1985 en 1986 met deze onderwerpen bezighielden moeten er, achteraf gezien, een paar speciaal worden genoemd. Toen in de Verenigde Staten de plannen werden gemaakt voor een National Ozone Expedition (NOZE) die naar McMurdo Station in het Zuidpoolgebied moest reizen om daar waarnemingen te doen in het zuidelijk voorjaar van 1986, nodigde het tijdschrift Geophysical Research Letters wetenschappers uit om bijdragen te leveren voor een speciaal supplement. Daarin zouden de stand van zaken betreffende theoretische ideeën over het onderwerp en de tot dan toe verrichte waarnemingen worden samengevat als achtergrondinformatie voor de expeditie. Dit supplement verscheen in november 1986 en er komen een paar ideeën in voor waarvan de onjuistheid zelfs al was aangetoond voordat het tijdschrift ter perse ging, maar ook andere die de toets van de tijd hebben doorstaan. Behalve verschillende andere teams vroegen Patrick Hamill, Brian Toon en Richard Turco uit Californië, in hun bijdrage aan het supplement van 1986 aandacht voor een mogelijk verband tussen de wolken op grote hoogte boven Antarctica en het ontstaan van het ozongat. Deze wolken, Polar Stratospheric Clouds (PSC's) genoemd, vormen gedurende de wintermaanden een ijl waas in de lagere stratosfeer boven Antarctica. De wolken lossen op in het voorjaar, precies in dezelfde tijd en op dezelfde plaats waar het gat ontstaat. Het uit Californië afkomstige team kwam met de gedachte dat gedurende de wintermaanden een reeks van chemische reacties op het oppervlak van de deeltjes in die wolken zou plaatsvinden die water- en stikstofverbindingen zouden vastleggen en chloor in een actieve vorm zouden vrijmaken, dat dan met de ozon zou reageren zodra het zonlicht terugkwam.

Eerder in dat jaar hadden twee andere teams hun eigen chemische ideeën in Nature naar voren gebracht. Beide betrokken ook de PSC's in hun beschouwingen, maar gaven de voorkeur aan anders opgebouwde chemische modellen. Mike McElroy en zijn collega's kwamen met de gedachte dat broomverbindingen erbij betrokken zouden zijn; Susan Solomon van de National Oceanographic and Atmospheric

Administration en verschillende collega's, waaronder Sherry Rowland, gaven speciale aandacht aan reacties waarin chloor- en stikstofverbindingen betrokken waren. En in de laatste uitgave van Nature in 1986 kwamen Paul Crutzen en Frank Arnold, toen werkzaam in Duitsland, onafhankelijk van de anderen met nog een andere suggestie die een iets ander stel chemische reacties behelsde, maar die ook de PSC's betrok in de processen die in de winter de stratosfeer van de Zuidpool in een toestand brachten die ozonafbraak in het voorjaar mogelijk maakte. Zij kwamen tot de conclusie dat zich "gedurende de winter en het voorjaar in de lagere stratosfeer van Antarctica onstabiele fotochemische condities kunnen ontwikkelen die leiden tot een drastische vermindering van ozon".
Al deze activiteit onder de theoretici hing van twee zaken af -de aanwezigheid van PSC's en van de extreme koude van de Antarctische stratosfeer. Of beter, ze hing af van de extreme koude, want de PSC's zelf ontstaan alleen wanneer de stratosfeer koud genoeg is.
In hun bijdrage aan het supplement van de Geophysical Research Letters rapporteerden Paul Newman van de Applied Research Corporation in Landover, Maryland, en Mark Schroeberl van NASA-Goddard, dat de oktobermetingen van de luchttemperatuur boven Antarctica, verkregen met behulp van instrumenten in onbemande ballonnen en satellieten, tussen oktober 1979 en oktober 1985 een afkoeling aangaven van 18 °C op ongeveer 24 km hoogte. Tegen het einde van 1986 maakte een aaneenschakeling van extreme koude, de vorming van PSC's, chemische reacties op het oppervlak van wolkendeeltjes en tenslotte de vernietiging van ozon, de beste kansen in de wedloop om de verklaring van het ozongat.
Dit alles was het resultaat van een paar maanden intensieve arbeid van de chemici - en ik heb op geen stukken na al hun activiteiten in die periode genoemd. Veel namen zijn al bekend uit het ozondebat van de jaren zeventig; ervaren wetenschappers die diep verontrust waren over de mogelijke schadelijke effecten van de CFK's.
Zij hadden geen nieuwe uitgangspunten, behalve de waarneming dat er een gat bij de Zuidpool bestond en ze hadden dezelfde berekeningen al eerder kunnen maken -zeker maanden eerder, als het geen jaren eerder was. Maar er was die ene waarneming voor nodig om hen op te schrikken uit de zelfvoldaanheid die door Farman in zijn artikel in de New Scientist was aangeduid en die gekenmerkt wordt door de aanname van de Goddard-onderzoekers dat meetwaarden van ozonconcentraties onder de 180 Dobson-eenheden op meetfouten moesten berusten. Nu pas gingen ze in nieuwe richtingen denken. Ondanks hun snelle vooruitgang naar een nieuw begrip van de ozonlaag boven Antarctica (toen de waarnemingen hen eenmaal in de juiste richting hadden gewezen) maakten concurrerende theorieën aan het eind van 1986 nog steeds opgang. Maar toen de gegevens van het National Ozon Expedition geheel waren verwerkt was er weinig twijfel meer over dat de chemie inderdaad de schuldige was.

6.4 Een proces van eliminatie

De onderzoekers die in augustus 1986 voor de National Ozone Expedition naar het McMurdo Station reisden, namen de stratosfeer waar met behulp van omhoog

gerichte instrumenten op de grond en met instrumenten die aan ballonnen werden opgelaten. Natuurlijk beschikten ze ook over de continue waarnemingen van de TOMS en de SBUV in de Nimbus 7, die ze met hun eigen waarnemingen konden vergelijken. De waarnemingen die ze deden moesten de drie belangrijke theorieën toetsen (en om het nog ingewikkelder te maken ook nog variaties op ieder thema) en men begon al gauw orde te scheppen in de wildgroei van verklaringen die was ontstaan sinds het British Antarctic Survey team het bestaan van het gat had bekend gemaakt.
De eerste kandidaat die het moest afleggen was het model dat het ozonverval bij de Zuidpool koppelde aan de zonne-activiteit.
In het gebied met verlaagd ozongehalte vond NOZE in plaats van verhoogde NO_x-concentraties juist zeer geringe hoeveelheden -en wel speciaal de laagste atmosferische NO_2-concentraties die ooit ergens ter wereld waren gemeten. Waarnemingen uit Nieuw-Zeeland bevestigden deze tendens; juist wanneer ozon werd vernietigd was er weinig NO_2 in het zuidelijkste deel van dit halfrond. De theoretici die het zonnemodel aanhingen, in het bijzonder Linwood Callis van het NASA-Langley Research Center, probeerden nog wat steun te vinden in het feit dat het ozongat in 1986 wat minder geprononceerd was dan in 1985. Misschien was 1985 net het laagste punt van een cyclus die met de zonne-activiteit verbonden was en was de ozon zich net aan het herstellen juist omdat de NO_x-concentraties laag waren? Maar hun laatste beetje hoop werd de bodem ingeslagen toen het gat in 1987 dieper bleek dan ooit tevoren, en daarbij was er nog geen spoor van de vereiste stikstofverbindingen. En, zoals al veel mensen hebben opgemerkt, er was geen enkele aanwijzing voor zo'n ozongat geweest na de zonnemaxima aan het eind van de jaren vijftig en zestig.
De dynamische theorieën betreffende de luchtbeweging waren moeilijker te weerleggen. NOZE vond geen enkele aanwijzing voor de opwaartse luchtstroming die volgens dit model nodig was om de ozon te verdrijven. Maar tenslotte werden de waarnemingen maar op één plaats, op de rand van het Antarctische vasteland, verricht. Er was de grote expeditie van 1987 voor nodig om ook onder dit model een streep te zetten door de ontdekking dat, als er al sprake was van beweging in het gebied van de ozonuitputting, die beweging een daling was van de lucht vanuit de zeer hoge atmosfeer. (Overigens betekent dit dat het fotochemische proces van de ozonvernietiging, wat het dan ook mag zijn, nog efficiënter is dan oorspronkelijk werd gevreesd, aangezien deze dalende lucht verse ozon aanvoert naar het gebied waarin het wordt vernietigd.) Het idee dat de dynamica van de luchtbeweging de belangrijkste drijvende kracht zou kunnen zijn bij de vernietiging van de ozon, was na NOZE zeker op de terugtocht; maar de verdenking begon toch te groeien dat de dynamica kon zijn betrokken -ja moest zijn betrokken- bij het tot stand komen van de juiste omstandigheden voor de ongebruikelijke chemische reacties, die mensen als McElroy, Susan Solomon, Crutzen en vele anderen als de onmiddellijke oorzaak van de ozonvernietiging beschouwden.
Jerry Mahlman van Princeton University, is speciaal geïnteresseerd in het verband tussen veranderingen in de atmosferische circulatie en de afkoeling boven het Zuidpoolgebied. Hij werkt met computersimulaties van de atmosfeer, dat zijn

modellen die laten zien hoe de windpatronen onder verschillende omstandigheden veranderen. Onder 'normale' omstandigheden, dat zijn de omstandigheden die vóór ongeveer 1979 op het Zuidelijk halfrond heersten, komen er vanuit de troposfeer op lagere breedten atmosferische golven omhoog die zuidwaarts bewegen om weer in de richting van het poolgebied uit te vloeien. Die neerwaartse beweging verwarmt de lucht (dalende lucht wordt warmer naarmate de druk toeneemt, zoals de lucht in een fietspomp door het pompen wordt verhit) en brengt bovendien ozon in de lagere stratosfeer. Maar Mahlman vond dat -volgens het computermodel- dit normale patroon nauwelijks stabiel is. Het model slaat gemakkelijk om naar een andere stabiele toestand waarbij de luchttongen niet meer zo krachtig zuidwaarts uitvloeien. Als dit in werkelijkheid gebeurt en deze golven zijn zwakker, dan blazen de winden in een meer gesloten cirkelpatroon om het Zuidpoolgebied heen en het verwarmende effect neemt af. Er zou dan ook minder ozon aanwezig zijn in de Antarctische atmosfeer. Men ziet nu in dat de directe invloed hiervan op de ozon te klein is om het gat te verklaren. Maar de veranderingen in het circulatiepatroon kunnen een essentiële bijdrage aan de groei van het gat leveren, omdat de circulatie om het Zuidpoolgebied wordt versterkt. Hierbij ontstaat een sterke wervel waardoor de stratosfeer boven dit continent verder afkoelt dan het geval was in de jaren zeventig. De veranderingen in de dynamica van de atmosfeer zouden een winterpatroon kunnen teweegbrengen, waarbij stille, koude lucht boven Antarctica zo van de buitenwereld zou zijn afgesloten dat deze net zo goed binnen de wanden van een chemisch reactievat zou kunnen zijn ingesloten.
Onderzoekers van de National Oceanographic and Atmospheric Administration hebben aangetoond dat de soort golfactiviteit die Mahlman beschrijft, inderdaad in de jaren tachtig is afgenomen, maar niemand weet waarom.
Terwijl andere theorieën werden geëlimineerd leverde een aantal NOZE-waarnemingen de bewijzen dat er chemische processen aan het werk waren die de ozon vernietigen. Ballonnen die van McMurdo werden opgelaten, lieten zien dat het ozonverval beperkt was tot een laag van de atmosfeer tussen ongeveer 12 en 20 km hoogte en dat het totale verval binnen die laag ongeveer 35 procent bedroeg. Maar tussen 13 en 18,5 km verloor de stratosfeer meer dan 70 procent van zijn ozon vergeleken met de hoogste waarden die in augustus waren waargenomen en bij één gelegenheid in oktober 1986 zagen de waarnemers dat 90 procent van de ozon was verdwenen uit een laag van 1,5 tot 5 km dik -dus het hart dat uit de ozonlaag was gerukt.
Op hoogten van ongeveer 24 tot 29 km traden in feite toenames van de ozonhoeveelheid op die te maken hadden met golfbewegingen in de atmosfeer. De metingen van de kolomtotalen vanaf de grond leidden dus tot een onderschatting van de ernst van het verval op geringere hoogten. Op dezelfde ballonvlucht die de meest dramatische verlagingen van ozonconcentraties vertoonde, bleek uit andere instrumenten geen spoor van andere veranderingen. Zo zou men bijvoorbeeld een verandering van de zwevende deeltjes verwachten wanneer de lucht met verlaagd gehalte aan ozon en andere bestanddelen op één of andere manier in het gebied was binnengedrongen, maar de zwevende deeltjes in de laag met verlaagd ozongehalte

waren precies gelijk aan die zich in de boven- en onderliggende lagen bevonden. Het mag dan voor de scheikunde moeilijk zijn om de dramatische kleinschalige veranderingen te verklaren, maar het is onmogelijk om ze met behulp van dynamica te verklaren. Andere waarnemingen wezen met stelligheid op chloorverbindingen. Het team van Susan Solomon mat in het gat hoge concentraties van een vorm van chloordioxide OClO (waarin het chloor zich tussen twee zuurstofatomen bevindt). Er was twintig- tot vijftigmaal zoveel chloordioxide als was verwacht en deze bijzondere vorm van chloordioxide (dat ook voorkomt als molecuul met het chlooratoom aan het ene eind, ClOO) was in de atmosfeer nog nooit eerder ontdekt, waar ook ter wereld.

Dit was niet het enige oxide van chloor dat in verrassende hoeveelheden aanwezig was; Philip Solomon en zijn collega's van de State University of New York (SUNY) gebruikten een fraaie techniek die ontleend was aan de radio-astronomie om in het ozongat hoge concentraties van chloormonoxide, ClO, te meten.

De soort van spectrofotometer die door Farman en zijn collega's werd gebruikt om de ozon in de stratosfeer te meten, is gebaseerd op de neiging van de moleculen in de atmosfeer om bepaalde golflengten van het doorvallend zonlicht te blokkeren. Dit soort technieken is zelfs gevoelig genoeg om bij maanlicht te worden gebruikt. Maar, in tegenstelling hiermee, maten de SUNY onderzoekers in feite de straling die door de roterende chloormonoxide-moleculen in de lucht boven hen werd opgewekt. Bij ClO-moleculen wordt deze straling uitgezonden in de microgolfband, op een golflengte van iets meer dan 1 millimeter. Zowel de microgolfemissie als de microgolfabsorptie (het radio-equivalent van de standaard ozonspectroscooptechniek) worden door radio-astronomen gebruikt om in de ruimte de chemische samenstelling te bepalen van wolken die zich op een afstand van miljoenen lichtjaren van de aarde bevinden. Het meten van ClO in de stratosfeer mag in vergelijking daarmee eenvoudig lijken, maar dat wordt moeilijk gemaakt door de radioruis afkomstig van andere invloeden. Toch kan het worden gedaan. De precieze vorm van het microgolfsignaal hangt af van de druk in de omgeving van de moleculen en daarmee meldt deze techniek niet alleen de aanwezigheid van ClO, maar het vertelt de onderzoekers ook op welke hoogte het is geconcentreerd. Tenslotte onthult de kracht van het signaal nog hoeveel ClO er is. Solomon en zijn collega's vonden hoge concentraties van chloormonoxide in de lagere stratosfeer, op ongeveer 20 km hoogte waar het meeste ozonverlies optrad. De hoeveelheden waren het grootst tussen begin en midden september, toen de concentraties tot 0,5 à 2 parts per billion (ppb) opliepen en de ozon snel werd vernietigd, maar zakte tegen eind september, totdat in begin oktober de ClO niet langer kon worden aangetoond, ongeveer op dezelfde tijd dat de afbraak van de ozon ophield. Ter vergelijking: op 14 tot 19 km boven Noord-Amerika heerst een typisch ClO-gehalte van 0,01 ppb. Om het geheel nog te completeren gaven de SUNY-waarnemingen aan dat de hoeveelheid ClO boven Antarctica opliep gedurende de morgen, midden op de dag z'n piek bereikte, in de avond weer terugliep en dan 's nachts niet meer waarneembaar was, precies zo als men zou verwachten als het wordt geproduceerd door chemische reacties waarbij ozon betrokken is en die door zonlicht worden gestimu-

leerd. De voor de hand liggende wijze waarop het ClO gedurende de nacht zou zijn ondergebracht is dan in de vorm van chloordioxide -precies de stof die de groep van Susan Solomon in zulke grote hoeveelheden had ontdekt.
Maar niet alles verliep voor de chemici van een leien dakje. Het team van Philip Solomon vond ook verrassend lage concentraties stikstofoxide in de atmosfeer boven Antarctica -werkelijk zo laag dat ze die in het grootste deel van september en oktober 1986 niet konden meten. Toen hij in mei 1987 tijdens de voorjaarsbijeenkomst van de American Geophysical Union in Baltimore (Maryland) hun resultaten presenteerde, wees Solomon erop dat tot dan toe alle chemische modellen van Antarctica uitgingen van 'normale' concentraties van stikstofdioxide (en van alle chemische stoffen) en dat daarom "geen van de modellen van Antarctica werkelijk goed is". Ondanks al deze aanwijzingen dat er ieder voorjaar in de Antarctische stratosfeer, chemisch gesproken, iets heel vreemds aan de hand is, weigerden enige hardnekkige lieden te accepteren dat de chemie werkelijk de drijvende kracht achter de ozonvernietiging was. Dat is dan misschien wel de reden waarom het SUNY-team, toen het zijn resultaten in de uitgave van Nature van juli 1987 publiceerde, in hun laatste zin er de nadruk op vestigde dat deze waarnemingen "weinig twijfel overlaten dat de chloorchemie een belangrijk aspect is van de ontwikkeling van het ozongat in het Zuidpoolgebied". Dit commentaar verscheen op 30 juli 1987; wat er aan 'weinig twijfel' over was zou binnen de volgende twee maanden worden opgeruimd.

6.5 Ten zuiden van Punta Arenas

Punta Arenas op het zuidelijkste puntje van Zuid-Amerika is de zuidelijkste stad ter wereld. Een van haar belangrijkste contacten met de buitenwereld, behalve de paar toeristen die door de ruige omgeving worden aangetrokken, bestaat in haar rol van basis voor vluchten in het Zuidpoolgebied ter ondersteuning van de wetenschappelijke bases die daar zijn ingericht. Er is een grote luchthaven met drie grote startbanen, maar de stad van 100.000 mensen had nog nooit zoiets meegemaakt als de toevloed van wetenschapsmensen in augustus 1987. Door snel werk was NASA er in geslaagd een internationale missie samen te stellen die het ozongat moest onderzoeken: -het Airborne Antarctic Ozone Experiment. Hoewel NASA de leiding nam bij de organisatie en het bestuur van het project (een direct gevolg van haar betrokkenheid bij de CFK-controverse van de jaren zeventig) waren ook de National Science Foundation, de National Oceanographic and Atmospheric Administration en de U.S. Chemical Manufacturers Association in belangrijke mate bij het project betrokken. Universiteiten en onderzoeksinstellingen van de overheden van de Verenigde Staten, Groot-Brittannië, Argentinië, Chili en Frankrijk brachten deskundigheid en personeel in, terwijl Argentinië, Chili (waar Punta Arenas in ligt) en Nieuw-Zeeland ondersteunende faciliteiten verleenden.
De directe kosten van het experiment lagen tussen 10 en 20 miljoen dollar, de ontwikkelingskosten van de instrumenten niet meegerekend. Alles speelde zich af rondom twee vliegtuigen die in 1987, in het voorjaar van het zuidelijk halfrond, beladen met wetenschappelijke instrumenten (in totaal eenentwintig experimenten)

keer op keer naar het zuiden vertrokken om daar op twee verschillende hoogten verkenningen uit te voeren in het gat boven Antarctica.

Het ene vliegtuig, een omgebouwd DC-8 lijntoestel, vervoerde een team van wetenschappers met hun instrumenten (tot veertig mensen, de bemanning inbegrepen) op een reeks vluchten op 12 km hoogte bij de onderkant van de ozonlaag. Maar het was het andere vliegtuig dat vooral tot de verbeelding van het publiek sprak en de meeste aandacht kreeg in de publiciteit rondom het Airborne Antarctic Ozone Experiment. Dat was de ER-2, een onderzoeksversie van het beroemde U-2 spionagevliegtuig van Lockheed. Hoewel het ontwerp uit de jaren vijftig stamt, is de gemoderniseerde versie van de U-2 nog steeds één van de beste toestellen die er zijn wanneer het gaat om het uitvoeren van zeer hoge vluchten, maar het is een éénmansvliegtuig, met één motor en oorspronkelijk niet voor belading ontworpen. Op de ER-2 vluchten, die om en om door drie piloten werden uitgevoerd, werden de wetenschappelijke instrumenten vervoerd in twee lasten, één onder iedere vleugel. Nadat de piloot ze had ingeschakeld voerden ze automatisch hun metingen uit. Het toestel vloog op een hoogte van 20 km rechtstreeks naar het hart van het gebied waar bij de ballonvluchten de grootste afbraak van ozon was waargenomen. Dit is eigenlijk de hoogste grens die door straalvliegtuigen kan worden bereikt, om nog hoger te komen is raketaandrijving nodig. Door de dunne lucht en de extreme koude op deze hoogten was er een flink risico aan deze vluchten verbonden, speciaal in een éénmansvliegtuig, waar één ding dat fout gaat al fataal kan zijn. Zowel de wetenschappers als de piloten van deze missie geven er de voorkeur aan die risico's niet al te zwaar voor te stellen. Er moest een karwei worden uitgevoerd en dus deden de piloten dat. Toch mag hun bijdrage tot het succes van het Airborne Experiment hier nog wel eens speciaal worden erkend.
Terwijl de ER-2 instrumenten hun metingen alleen maar aan lucht-monsters uit de directe omgeving van het vliegtuig uitvoerden, tastten een paar door mensen bediende DC-8 instrumenten omhoog tot in de hoge stratosfeer, daarbij gebruik makend van remote-sensingtechnieken die in grondstations worden toegepast.
De instrumenten aan boord van de ER-2 maten de ozonconcentraties, zwevende deeltjes (aerosolen), water, chloormonoxide, broommonoxide, stikstofoxides en salpeterzuur in de naaste omgeving van het vliegtuig op hoogten van 12 tot meer dan 17,5 km. Instrumenten aan boord van de DC-8 maten ook ozon, zwevende deeltjes en water vlakbij het vliegtuig, de verdeling van de ozon in de 10 km boven het vliegtuig en bovendien de totale ozonhoeveelheid in de kolom boven het vliegtuig; andere DC-8 instrumenten registreerden de totale hoeveelheden boven het vliegtuig aan chloornitraat ($ClONO_2$), chloordioxide (OClO), broommonoxide, NO en NO_2, chloorwaterstof en salpeterzuur en nog andere stoffen. Uiteraard verschaften beide vliegtuigen meetwaarden van de temperaturen in de stratosfeer.
Alles bij elkaar maakte de ER-2 twaalf vluchten tot ongeveer 72° zuiderbreedte, de grens van zijn 5600 km bereik, met een vliegtijd van zes tot acht uren op iedere missie. De DC-8 maakte twaalf retourvluchten tot veel verder boven Antarctica en eindigde de expeditie door dwars over het Zuidpoolcontinent en verder te vliegen naar

Nieuw-Zeeland, daarbij continu metingen verrichtend. Thuis, in het NASA-Goddard Space Flight Center, lieten de wetenschappers, zolang deze missies duurden, alle andere zaken liggen om de experimenten bijna zo snel als ze binnenkwamen, dus in real-time, te verwerken, in plaats van, zoals gebruikelijk was, er maanden voor te nemen om de gegevens te analyseren. Ook andere satellieten, zowel Europese als Amerikaanse, voerden gelijktijdig met het Airborne Experiment waarnemingen uit. Maar met hun onmiddellijke beelden van het ozongat was het TOMS-team in staat de ploeg in Punta Arenas te vertellen waar ze de twee vliegtuigen naar toe moesten sturen om de beste metingen van het ozonverval te kunnen maken.

Ook de wetenschappers op de grond waren actief gedurende augustus en september 1987 en verder tot in oktober. Een tweede expeditie naar McMurdo, NOZE II, verrichtte vervolgstudies aansluitend op die van het voorgaande jaar en regelde de grondwaarnemingen zo, dat ze aansloten op de gegevens van de vliegtuigen. Ook de waarnemingen te Halley Bay, op de Zuidpool en op andere onderzoeksstations gingen door. In Punta Arenas waren met de onderzoekers ook theoretici meegekomen, zodat ze direct bij binnenkomst van de gegevens daarmee aan het werk konden gaan om ter plaatse hun kennis van het mechanisme van het ozonverval te verbeteren.

Normaal kost het bij dit soort groot wetenschappelijk onderzoek maanden om alle gegevens te analyseren, en de wetenschappelijke publikaties die de op de waarnemingen gebaseerde conclusies rapporteren, verschijnen pas een jaar na afloop, of nog later.
Maar Bob Watson van NASA, de leider van de missie was zich wel bewust van het belang van de nieuwe waarnemingen voor de politieke besluitvorming en van de brede publieke belangstelling voor en betrokkenheid bij het gat boven Antarctica. Hoewel er nog luchtmonsters waren die nog voor nadere analyse naar laboratoria in de Verenigde Staten en elders moesten worden gebracht, en er nog wat meer tijd nodig was voor de gedetailleerde interpretatie van andere gegevens, hielden de organisatoren van de expeditie een persconferentie op 30 september 1987 te Washington -slechts een paar dagen na het gereedkomen van de missie- waar ze hun belangrijkste directe resultaten bekend maakten. Zij beloofden ook dat er na zes maanden, in april 1988, een volledig rapport zou worden uitgebracht. Maar omdat de analyse van eind september 1987 noodzakelijkerwijze nog maar een allereerste benadering van het probleem kon zijn, stonden de wetenschappers er op dat toen alleen maar een ruwe schets en globale conclusies zouden worden gepresenteerd en dat gedetailleerde specificaties met nauwkeurige getallen pas in het rapport van april 1988 zouden worden opgenomen. Tot het zover zou zijn, zouden alleen wetenschappers die bij de missie waren betrokken, toegang tot de gegevens hebben. Wetenschappers die bij één bepaald experiment betrokken waren, konden, als ze dat wilden, hun eigen gegevens voor zichzelf houden, zelfs zonder ze te delen met collega's die betrokken waren bij andere experimenten die tijdens dezelfde vluchten waren uitgevoerd, totdat ze alles nog eens hadden geverifieerd en zeker waren van

hun conclusies. Zelfs met deze begrijpelijke restricties was er na de bekendmaking van 30 september geen twijfel meer mogelijk over de rol die door chloor uit CFK's wordt gespeeld bij de vernietiging van ozon boven het zuidpoolgebied. Nog nooit waren uit een wetenschappelijke inspanning op deze schaal, en vermoedelijk ook niet op kleinere schaal, zo snel conclusies getrokken en publiek gemaakt. Omdat het wetenschappelijke bewijsmateriaal ondubbelzinnig is, is er nu geen enkel excuus meer voor politieke traagheid en uitstel.
De resultaten van het zes weken vliegen over een totale afstand van meer dan 175.000 km werden door Bob Watson aan het eind van september samengevat. Het gebied van het ozongat is uiterst arm aan water (gedehydreerd) en aan stikstofverbindingen (gedenitrificeerd), terwijl bijna elke chemische stof die verwacht werd betrokken te zijn bij de vernietiging van ozon in abnormale concentraties aanwezig was -of veel te hoog, of veel te laag vergeleken met metingen die op geringere breedten waren gedaan. Wat chloormonoxide betreft was de Punta Arenas-groep bereid een paar getallen in hun voorlopig rapport te vermelden. Zij bevestigden de metingen die Phil Solomon in 1986 van de grond af had verricht en die in het gat concentraties van een paar ppb hadden opgeleverd. Chloorwaterstof, dat belangrijk is omdat chloor dat in dit zuur is opgesloten niet beschikbaar is om met ozon te reageren, was alleen maar in 'zeer lage' concentraties aanwezig terwijl de concentraties van stikstofoxides binnen het gat tussen 0,5 en 4 ppb lagen, tegenover 8 tot 12 ppb buiten het gat. Broommonoxide werd gevonden, maar slechts in concentraties van enkele delen per triljoen (ppt), wat aangaf dat dit geen belangrijke oorzaak van ozonvermindering was. Maar de ER-2 piloten rapporteerden dat ze door een uitgestrekt wolkendek vlogen zelfs op een hoogte van 18,5 à 20 km. PSC's waren niet alleen aanwezig, ze strekten zich over de hele hemel uit, terwijl de stratosfeer op die hoogten niet warmer was (zoals hij zou moeten zijn wanneer ozon aanwezig was om ultraviolette straling te absorberen) maar op 20 km hoogte temperaturen vertoonde van -90 °C: zo laag dat het vliegtuig niet hoger kon komen, omdat dan de brandstof dreigde te bevriezen. Dit alles moest worden bekeken tegen de achtergrond van satelliet- en grondwaarnemingen, plus ballongegevens, die alle lieten zien dat in het voorjaar van 1987 de vernietiging van ozon boven het Zuidpoolgebied meer uitgesproken was dan ooit tevoren, het 'gat' was nog nooit zo diep geweest. Tussen 70° en 80° zuiderbreedte waren de totale kolomhoeveelheden van ozon ongeveer 15 procent lager dan in 1985, dat toen de laagste waarden vertoonde, en meer dan de helft van de ozon was vernietigd. Op de kritieke hoogten was het verval veel erger. Net nadat het Airborne Experiment was afgelopen, toonden ballonvluchten te Halley Bay, op 76° zuiderbreedte, dat op 7 oktober 97,5 procent van de ozon die nog op 15 augustus op 16,5 km hoogte aanwezig was, was verdwenen (zie fig. 9). Farman zei in zijn artikel in de New Scientist dat "op die hoogte ozon praktisch niet meer was te vinden". De gegevens van de Punta Arenas-expeditie maakten duidelijk wat er met de ozon was gebeurd.

Speciaal de ER-2 vluchten lieten zien dat de gedehydreerde en gedenitrificeerde lucht in een scherp begrensd gebied wordt vastgehouden, in wat Watson beschreef

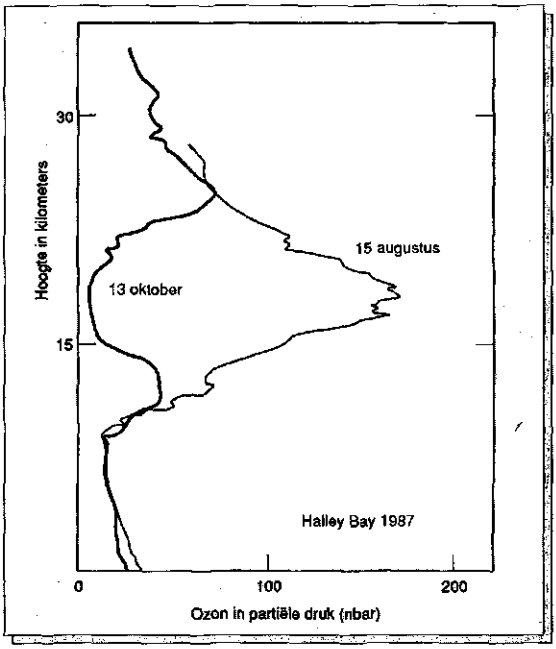


Fig. 9 Het ozongat
(Bron: 'Menschliche Einflüsse auf die Chemie der globalen Atmosphäre', Paul J. Crutzen, 1989)

als een "soort van vat" en dat er binnen dit gebied zeer lage waarden van F-11, F-12, CH_3, CCl_3 en N_2O werden gevonden. Dit betekent dat lucht op grote hoogte in dit gebied langdurig aan ultraviolette zonnestraling was blootgesteld, mogelijk op zelfs grotere hoogten, omdat die lucht van lagere breedten naar de pool was verplaatst, zodat de van de mens afkomstige chloorverbindingen afgebroken zijn. In zekere zin is het zeer 'oude' lucht. Die zou daar gedurende de poolnacht aanwezig geweest zijn, zonder zonlicht dat de fotochemische reacties zou kunnen starten, terwijl het water en de stikstofverbindingen in de PSC's waren opgesloten, daarmee het chloor vrij latend om zijn fotochemisch werk te doen als de zon terug zou komen.
De belangrijkste waarneming die Watson bij zijn persconferentie rapporteerde, is dat er een zeer sterke correlatie (beter gezegd een anticorrelatie) bestaat tussen de gemeten concentraties van ozon en chloormonoxide.
Ozon verkeerde in een minimum als chloormonoxide in een maximum was en er was op ongeveer 18 km hoogte genoeg ClO om het waargenomen ozonverval volledig te verklaren. Bij de persconferentie werden geen getallen aan die correlatie toegekend; maar het was een onderwerp waar Watson, met nauwelijks meer gedetailleerde informatie, een paar weken later bij de Dahlem-conferentie op terug zou komen.

6.6 Het Dahlem-overleg

De Dahlem-conferentie, die in de eerste week van november te Berlijn plaatsvond, bracht een paar bekende namen uit de ozongeschiedenis bij elkaar. Daar waren Lovelock, Rowland en Crutzen die er al van de eerste dag af, in de jaren zeventig, bij waren; Farman, Philip Solomon en Watson, alle drie betrokken bij het onderzoek van het gat boven het Zuidpoolgebied; en nog een aantal anderen. De atmosfeer op de conferentie was de meest wetenschappelijk stimulerende die ik ooit heb meegemaakt. Maar één andere gelegenheid in mijn leven is er een beetje mee te vergelijken. Twintig jaar geleden was ik een aankomend onderzoeker in het Institute of Astronomy te Cambridge, toen collega's in de radio-astronomie de pulsars ontdekten. In die tijd was er in de astronomische gemeenschap maar één onderwerp van gesprek, bij de koffie, tijdens de lunch of 's avonds naar huis rijdend. Er werd wetenschappelijke geschiedenis gemaakt, dat wist iedereen die er mee te maken had. Veel oudere collega's zeiden wat een geluksvogel ik was dat ik zo'n gebeurtenis, die je maar één keer in je leven overkomt, mocht meemaken en dat heel wat onderzoekers zoiets opwindends in hun hele leven niet meemaakten. En hier maak ik dan, zij het maar als waarnemer, voor de tweede keer zo'n 'eens-in-je-leven' wetenschappelijke gebeurtenis mee, met daarbij nog het besef dat het onderwerp dit keer niet iets van abstracte betekenis voor astronomen en fysici was, maar een probleem dat op letterlijk ieder levend wezen op het aardoppervlak van invloed was. Hoewel zij dat niet met woorden zeiden voelden alle deelnemers aan de conferentie de aanwezige drang tot spoed. Het was een gelegenheid waarbij jasjes werden uitgetrokken en hemdsmouwen opgerold. Zo was bijvoorbeeld de eerste morgen van de bijeenkomst uitgetrokken voor het definiëren van elk probleem door de groep specialisten die daarvoor waren aangewezen, en om een werkplan voor de rest van de week op te stellen. Daar had het ozonteam maar tien minuten voor nodig en toen viel de groep meteen aan op onderwerp nummer één. Toen aan het eind van de morgen alle conferentiedeelnemers in plenaire zitting bijeen kwamen om hun tijdschema's te bespreken was er al een stevige ochtend werk aan de stratosferische ozon klaargekomen.

Het tempo dat er bij de eerste ochtend was ingezet werd de hele week volgehouden. Afwijkende wetenschappelijke opinies werden uitgesproken en geliefkoosde theorieën werden tot het uiterste getoetst aan de nieuwe gegevens van het Airborne Experiment, voordat ze ten slotte werden verworpen. De vervaardigers van atmosferische modellen die de rol van de dynamica bij de vorming van het ozongat hadden bepleit, zochten naar elke mogelijke uitweg om die modellen overeind te houden. Maar dat was dan niet in de geest van "mijn theorie, of hij goed is of niet!" maar juist dat de experts er veel aan gelegen was om er zeker van te zijn dat iedere andere mogelijkheid werd uitgeschakeld voordat men zou verklaren dat de chemie, in het bijzonder de chemie van het aan CFK's gebonden chloor, de oorzaak was van het groter worden van het gat in de ozonlaag. De betekenis van deze voorzorg was dat de uiteindelijk door het team bereikte conclusies veel meer gewicht hebben dan wanneer ze niet door de felle strijd van het debat waren heengegaan. In dezelfde geest werden soms wilde ideeën geventileerd: zou het misschien kunnen zijn dat er nog een

oorzaak is die totaal nieuw is en waar nog nooit iemand aan gedacht had? Naarmate de week vorderde werden bij de discussies tussen deze experts uit verschillende wetenschapsdisciplines alle andere mogelijkheden geëlimineerd.
Hun discussies waren levendig en de resultaten waren tenslotte dwingend. Hoewel het duidelijk was dat er nog veel bijzonderheden van de betrokken mechanismen verder zouden moeten worden uitgewerkt en dat zowel chemici als dynamici daar nog maanden en jaren druk mee bezig zouden zijn, werd tegen het einde van de week de conclusie bereikt dat chloor afkomstig uit industriële produkten, speciaal CFK's, in hoofdzaak schuldig is aan de vernietiging van ozon in het Antarctische voorjaar. Alleen al deze conclusie rechtvaardigt de inspanning en de kosten van de recente missies naar het Zuidpoolgebied en levert een basis voor actie. Hoewel er nog veel meer onderzoek aan de betrokken gedetailleerde mechanismen nodig is, lijkt het ook terecht om hier een schets te geven van de huidige inzichten in de betrokken dynamica en chemie, met het voorbehoud dat dit zeker niet het laatste woord zal zijn.

Als leider van het Airborne Experiment had vooral Bob Watson een schat aan gegevens gezien die op de vluchten vanuit Punta Arenas waren verzameld. Hij was

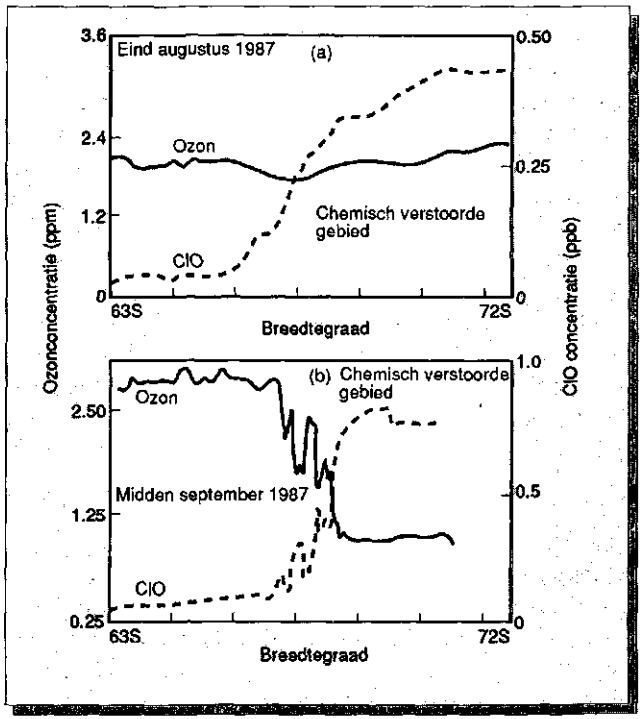


Fig. 10 De samenhang tussen ozon en ClO. 'het rokende pistool'
(Bron: 'Menschliche Einflüsse auf die Chemie der globalen Atmosphäre', Paul J. Crutzen, 1989)

moreel gebonden om geen enkel detail bekend te maken dat niet op de persconferentie van 30 september naar voren was gekomen, zelfs niet aan de wetenschappers die aan de studie van het ozongat bezig waren; maar het was hem toegestaan om aan degenen die in Berlijn bijeen waren één bewijsstuk te laten zien dat op zichzelf al de verbinding tussen de ozon-uitputting en de CFK's vastlegt. Metingen die op een hoogte van 18,5 km door de ER-2 waren gedaan toen deze de grens van het gebied van de ozonvernietiging passeerde -de rand van het 'chemische reactievat'- vertonen een scherpe stijging in de concentratie van ClO, van een niveau dat tien keer zo hoog is als op lagere breedten wordt gevonden, tot concentraties die 500 tot 1000 maal zo groot zijn als die van lagere breedten. Over precies dezelfde paar kilometers die het vliegtuig had afgelegd werd de ozonconcentratie gehalveerd. Jim Anderson, de onderzoeker die deze waarnemingen had gedaan (maar die niet op de conferentie van Berlijn aanwezig was) had goed gevonden dat Watson een aantal grafieken meebracht die de veranderingen van de concentraties aan ozon en chloormonoxide lieten zien terwijl het vliegtuig naar het zuiden vloog. *Wij kunnen die nu laten zien (fig. 10).* De twee curven zijn elkaars nauwkeurig spiegelbeeld, met een stijgende ClO waar de O_3 daalt. Toen Watson de tweede grafiek liet zien die details over een kleinere afstand weergaf (in wezen een vergroting van het interessantste gedeelte van de eerste grafiek), konden we zien dat praktisch ieder klein golfje in de ene lijn werd afgespiegeld in een corresponderend golfje in de andere lijn.

Er zijn mensen die zeggen dat 'het rokend pistool' dat de CFK's als schuldige aanwijst, is gevonden. Dat is dan meer in termen van een getekende bekentenis met getuigen. Wat het dan ook was dat de ozon uit de atmosfeer wegnam het had te maken met chloormonoxide in de juiste hoeveelheden en op dezelfde plaats en op dezelfde tijd.

Bij alle vluchten was de correlatie duidelijk, hoewel soms de overgang over de rand van het reactievat minder scherp was afgetekend dan bij andere vluchten. Uit Andersons gegevens was echter wel te zien dat, hoewel de rand van de wervel om de pool -het cirkelvormige windpatroon dat Antarctica in de winter en het voorjaar van de buitenwereld afsluit- op ongeveer 60° zuiderbreedte lag, de rand van het chemisch verstoorde gebied -het reactievat- tussen 65° en 68° ZB lag. Het ozongat is dus kleiner dan de wervel om de pool en veel nauwer gekoppeld, tenminste in 1987, aan de grenzen van het Zuidpool-continent. Dat is iets voor de theoretici om over te puzzelen wanneer ze de details van het mechanisme dat de ozon in het gebied uitput, gaan aanpakken, maar het is geen ontdekking die ook maar enige twijfel oproept over het verband tussen ClO en de ozonuitputting.
Gewapend met alle beschikbare gegevens uit 1987 en met de gegevens uit 1986 en voorafgaande jaren, kon de in Berlijn samengekomen groep een goeie gooi doen naar de verklaring hoe het mechanisme werkt.
Het ozongat zelf ligt binnen de wervel om de pool, maar er zijn kleine veranderingen in de stratosferische ozon die zich tot ongeveer 45° ZB uitstrekken. De in 1987 gemeten vernietiging van ozon vond in hoofdzaak plaats tussen de hoogten van 14,5

en 24 km. Dit overlapte het traject dat in 1986 was aangetast, maar het lag iets hoger. Tot nu toe weet niemand of dit een significante verandering is of dat de metingen van 1986 misschien wat onnauwkeurig waren. Zowel in het voorjaar als in andere seizoenen zijn er veranderingen, zodat de totale hoeveelheid ozon in de stratosfeer van de pool, gemiddeld over het hele jaar, sinds 1979 aan het afnemen is. *Ook de metingen sinds 1987 laten zien dat het chemische reactievat, de 'chemical perturbed region' kleiner is dan de afmeting van de vortex. De rand van de vortex (60°) heeft het dynamisch geïsoleerde gebied aan. De rand van het chemisch verstoorde gebied (65-68°) wordt bepaald doordat daarbinnen de gemiddelde temperatuur onder de -75 °C ligt, voldoende laag voor een continue vorming van PSC's.*
Hoewel het grote gat in de ozonlaag min of meer op de Zuidpool is gecentreerd, deden zich in augustus 1987 even buiten het gebied kleinere verschijnselen voor die 'minigaten' worden genoemd. Ieder minigat was er een paar dagen en verdween dan weer, maar tegen midden september verscheen tegelijkertijd een aantal gaten die zich toen samenvoegden tot een groter gebied waarin het ozongehalte laag was. Er is nog veel werk te doen om er achter te komen wat er precies in het zuidelijk halfrond gaande is. Maar wanneer het er om gaat de mechanismen te omschrijven die binnen de wervel om de pool aan het werk zijn, beginnen de modellen al een goede samenhang te vertonen. *Recente heranalyses tonen niet langer de aanwezigheid van minigaten, naar alle waarschijnlijkheid waren deze het kunstmatige gevolg van de data-analyse en interpretatie van TOMS-beelden.*

De aanwijzing voor wat Watson "ongelofelijk lage" concentraties noemt van F-11 en F-12 in de stratosferische lucht binnen het 'chemische reactievat" helpen ons om vast te stellen dat deze lucht zeer oud is en aankomt uit grote hoogte na langdurig aan ultraviolet zonlicht te zijn blootgesteld. Dat helpt ons weer om de mogelijkheid uit te sluiten dat het gat gevormd zou zijn door de dynamische invloed van opstijgende luchtmassa's die de ozon uit het gebied zouden hebben weggedrukt. Het feit dat de CFK's zijn afgebroken levert al een zekere bron op voor het chloor dat bij de chemische processen van de ozonvernietiging betrokken is. Dit doet echter ook bij iedereen die niet bekend is met de verfijningen van de fotochemie, de vraag rijzen waarom die vernietiging tot het Antarctische voorjaar moet wachten. Als er volop chloor aanwezig is waarom werkt het dan niet overal en de hele tijd?
De reden daarvoor is, dat onder de normale omstandigheden die meestal in het grootste deel van de stratosfeer heersen, heel wat chloor in andere verbindingen is vastgelegd. Chloor reageert met andere stoffen in de lucht, waaronder water en verschillende stikstofverbindingen, en het wordt opgesloten in 'reservoirs', zoals HCl en $ClONO_2$. Speciaal chloormonoxide zal door oxides van stikstof snel worden omgezet in chloornitraat ($ClONO_2$). Zit chloor eenmaal in deze verbindingen dan is het misschien niet zo veilig opgesloten als in CFK's, maar dan is het toch niet onmiddellijk beschikbaar voor de reactie met ozon. Er is inderdaad enig chloor beschikbaar om ozon op te ruimen. Daarmee wordt ook rekening gehouden bij de standaardberekeningen van de invloed die de CFK's in de wereld op de stratosfeer hebben, maar -en dat is een griezelige gedachte in het licht van wat onlangs boven het

Zuidpoolgebied heeft plaatsgevonden- er is potentieel veel meer chloor beschikbaar wanneer het uit deze andere verbindingen kan worden vrijgemaakt. Het probleem boven Antarctica schijnt te zijn dat, in de loop van de lange poolnacht, chemische processen die voor zover we weten nergens anders in de wereld optreden, chlooratomen uit deze 'reservoirs' losmaken en ze loslaten. Dan hebben ze nog weinig effect op de ozon tot aan het voorjaar, als de zon terug komt en fotochemische processen beginnen.
De grondoorzaak van dit loskomen van chloor uit reservoirmoleculen is de zeer lage temperatuur in de winterstratosfeer van Antarctica die het mogelijk maakt dat zich 'polar stratospheric clouds' vormen. Deze wolken werden PSC's genoemd en ze werden pas in het satelliettijdperk voorwerp van onderzoek. Maar als we teruggaan naar ontdekkingsreizigers van het begin van deze eeuw dan zien we dat die ook al melding maakten van hoge wolken, die nog door de zon werden beschenen zelfs nadat de lange winternacht was ingegaan; dus het is zeker dat er al PSC's waren, lang voordat we satellieten hadden om ze te bestuderen. Het is evenwel mogelijk dat, tenminste in het Zuidpoolgebied, de aard van deze wolken wegens afkoeling van de stratosfeer in de laatste tijd veranderd is.

Enige recente berekeningen, waaronder die van Crutzen en Arnold, wijzen erop dat de deeltjes in de PSC's uit salpeterzuur en water bestaan en niet uit water alleen. Bij een temperatuur van -78 °C (dat is 195° boven het absolute nulpunt, of 195 K) bestaan de wolken uit een waas van vloeibare druppeltjes. Als de temperatuur beneden deze waarde daalt vormen zich kleine ijsdeeltjes en bij temperaturen beneden -83 °C (190 K), het 'vriespunt', zijn de wolken-deeltjes groter, het zijn ijsmengsels van bevroren water en salpeterzuur*. Dit heeft twee gevolgen. In de eerste plaats vormt het oppervlak van de deeltjes een geschikte plaats voor chemische reacties die chloor vrijmaken. In de tweede plaats vormen zich bij de lagere temperaturen grotere deeltjes -misschien wel met een doorsnee van 0,0075 mm- en die kunnen door de stratosfeer naar beneden vallen met een snelheid van ongeveer 2 km per week en aldus water en salpeterzuur afvoeren. Gedetailleerde berekeningen tonen aan dat deze gevolgen niet alleen kritisch door de temperatuur worden bepaald (dat verklaart waarom eind jaren zeventig de ozonvernietiging plotseling op gang werd gebracht), maar ze beperken ook de activiteit tot een laag van de atmosfeer tussen de hoogten van 10 en 24 km, precies zo als is waargenomen.

Voor al dit bevriezen en het in een bepaalde toestand brengen van de stratosfeer zijn zowel tijd als lage temperaturen nodig. In het noordpoolgebied komen de temperaturen niet zo laag en de wervel om de pool is minder geprononceerd, dus er is geen langdurig stabiel gebied van stille lucht waarin deze processen zich zouden kunnen afspelen. De speciale omstandigheden boven het Zuidpoolgebied vormen net de

* Vanwege de lage druk in de atmosfeer treedt de bevriezing van water bij lage temperaturen op en niet bij 0°C (273 K).

goede condities voor een goede voorbereiding op het chemische proces in de stratosfeer. Het is zeker mogelijk dat van het broeikaseffect, dat de warmte dicht bij de grond vasthoudt, een essentiële bijdrage afkomstig is aan de afkoeling van de Antarctische stratosfeer die dit proces aan de gang gebracht heeft.
Bij deze chemische voorbereiding zijn mengsels betrokken van gassen, vloeistoffen en vaste stoffen, en de snelheden waarmee de reacties onder zulke 'heterogene' omstandigheden verlopen worden nog in laboratoria over de hele wereld onderzocht. Het is veel moeilijker om inzicht in deze reacties te krijgen dan wanneer alle verbindingen in een homogeen mengsel van gassen aanwezig zijn. Een verdere complicatie is nog dat, net zoals stoffen zich in vloeistoffen verdelen tot oplossingen, sommige van de betrokken verbindingen zich in de vaste deeltjes van waterijs of salpeterzuurijs hebben vermengd tot 'vaste oplossingen'.
Studies die door Mario Molina zijn verricht, laten zien dat onder polaire stratosferische omstandigheden een vaste oplossing van chloorwaterstof (HCl) in waterijs, bijvoorbeeld, een paar procent HCl-moleculen kan bevatten die verdeeld zijn door de kristalstructuur van het ijs. Scheikundigen als Molina zijn nog maar net begonnen met in het laboratorium de snelheden te bepalen waarmee de onderhavige reacties zich bij de onderhavige temperaturen op het oppervlak van echte ijsdeeltjes voltrekken, maar ze hebben al sterke aanwijzingen dat zich in de winter in de bevroren stratosferische poolwolken (PSC's) boven Antarctica twee sleutelprocessen afspelen:

$$ClONO_2 \text{ (oppervlak)} + HCl \text{ (vaste oplossing)} \rightarrow Cl_2 \text{ (gas)} + HNO_3 \text{ (oppervlak)}$$

$$ClONO_2 \text{ (oppervlak)} + H_2O \text{ (ijs)} \rightarrow HOCl \text{ (gas)} + HNO_3 \text{ (oppervlak)}$$

Men veronderstelt dat ook andere soortgelijke reacties (waaronder enige waarbij broom betrokken is) zich voltrekken aan het oppervlak van ijsachtige kristallen in de PSC's, maar dit moet voldoende zijn om u een algemeen beeld te geven. *Onderzoekers van SRI International te Menlo Park en van het NASA Jet Propulsion Laboratory te Pasadena, hebben in 1987 in hun laboratoria in afgesloten vaten de condities nagebootst die in de winter in de PSC's van de lagere antarctische stratosfeer aanwezig zijn. Zij mengden chloornitraat en water met de ingrediënten van PSC's -ijs gemengd met salpeterzuur en zwavelzuur. Tot de verbindingen, die door de daaropvolgende chemische reacties ontstonden, behoorden COCl en druppeltjes salpeterzuur, evenals chloormonoxide. De reacties verliepen in een paar duizendsten van een seconde.* Het eenvoudig verwijderen van salpeterzuur (HNO_3) uit de gassen in de atmosfeer, door het te bevriezen, zal ook direct van invloed zijn op het vrijkomen van chloor uit chloorwaterstof. Moleculen van salpeterzuur zijn zeer effectief bij het verwijderen van OH (hydroxyl) uit de stratosfeer, maar als het salpeterzuur eruit gevroren is kan de hoeveelheid OH toenemen. Wanneer dat gebeurt reageert het met chloorwaterstof, waarbij chloor vrijkomt,

$$OH + HCl \rightarrow H_2O + Cl$$

Metingen in het gebied van ozonverval laten inderdaad zeer lage concentraties HCl zien.
Wat ook precies zijn herkomst mag zijn, als actief chloor eenmaal is losgemaakt uit de reservoirs, zoals $ClONO_2$ en HCl, die in de lagere stratosfeer in andere delen van de wereld de overvloedigste opslagplaatsen van chloor zijn, zal zodra het zonlicht terugkomt de opruiming van ozon zeer efficiënt kunnen geschieden. In één cyclus bijvoorbeeld:

$$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$$
$$OH + O_3 \rightarrow HO_2 + O_2$$
$$ClO + HO_2 \rightarrow HOCl + O_2$$
$$HOCl + UV \rightarrow OH + Cl$$

De eerste stappen verlopen zelfs zonder zonlicht. ClO en HOCl nemen in de loop van de Antarctische winter toe, maar de belangrijke stap is de inwerking van het ultraviolette zonlicht. Dit brengt de OH en Cl terug om weer nieuwe ozonmoleculen op te ruimen. Het netto-resultaat van deze cyclus is:

$$2O_3 \rightarrow 3O_2$$

en elk chlooratoom kan de cyclus tienduizenden keren doorlopen. Deze cyclus alleen kan het hele verval van de ozon in het voorjaar niet verklaren, maar het is ook niet de enige. Een andere krachtige ozon 'etende' cyclus begint ook met de bekende eenvoudige reactie:

$$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$$

Elke twee ClO-moleculen die op deze manier ontstaan kunnen samen reageren, in de aanwezigheid van één of ander molecuul M:

$$ClO + ClO + M \rightarrow Cl_2O_2 + M$$
$$Cl_2O_2 + UV \rightarrow Cl + ClOO$$
$$ClOO + M \rightarrow Cl + O_2 + M$$

Opnieuw is het totaaleffect:

$$2O_3 \rightarrow 3O_2$$

en het chloor is weer terug om het proces te herhalen. De vorm waarin chloordioxide in deze reactie verschijnt is niet dezelfde als OClO.
De hele cyclus verloopt alleen efficiënt wanneer er genoeg ClO in de buurt is, maar de metingen die door het team van Phil Solomon zijn verricht vertonen op 20 km zo veel ClO (ongeveer 1 ppb) dat dit mechanisme het gehele ozonverval op dat niveau voor zijn rekening zou kunnen nemen. Niemand zou nog kunnen beweren dat hij

alle antwoorden op het ozonuitputtingsproces kan geven, maar het is nu wel duidelijk dat het geen moeilijkheid oplevert om de ozonuitputting te verklaren wanneer Cl en ClO eenmaal aanwezig zijn en de zon boven de horizon staat.
McElroys poging om broom weer op de voorgrond te brengen schijnt niet te zijn geslaagd. Hoewel ook de volgende cyclus bestaat:

$$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$$
$$Br + O_3 \rightarrow BrO + O_2$$
$$BrO + ClO \rightarrow Br + Cl + O_2$$

met het netto-resultaat:

$$2O_3 \rightarrow 3O_2$$

De gemeten hoeveelheden BrO, maar een paar delen per triljoen (ppt) op 18,5 km hoogte, laten zien dat dit maar aan ongeveer 10 procent van de totale vernietiging van de ozon in het gat aan de Zuidpool kan bijdragen. *De huidige inschatting is dat de gekoppelde BrO-, ClO-cyclus ongeveer 20% bijdraagt aan de afbraak. Deze schatting volgt uit de waargenomen concentraties van het OClO-molecuul dat alleen via deze gekoppelde cyclus aangemaakt kan worden.*
Alles hangt met elkaar samen wat inhoudt dat chloor en ClO werkzaam zijn bij de ontwikkeling van het gat (hoewel er erg weinig ClO beneden het niveau van 16 km voorkomt; er zullen meer studies van de chemie en de dynamica van de lagere stratosfeer nodig zijn om uit te leggen wat daar aan de hand is). Dynamische veranderingen (misschien, maar niet zeker verbonden met het broeikaseffect) hebben een koude wervelstroom teweeggebracht boven Antarctica waar zich in de winter bevroren PSC's vormen; vervolgens doet de chemie de rest. Ozon wordt ieder jaar aan het eind van augustus en het begin van september chemisch vernietigd en dan herstelt zich de toestand weer, te beginnen met oktober (maar niet weer tot de concentraties van medio jaren zeventig) als de PSC's verdampen en de chemische omstandigheden weer terugkeren naar de normale toestand van de stratosfeer, zoals die elders in de wereld heerst. En hoewel een dynamische verandering wellicht de speciale condities heeft geschapen waardoor de chemie aan het werk kan gaan, zouden de gevolgen voor de Antarctische ozon op geen stukken na zo groot zijn geweest als er niet een grote en toenemende hoeveelheid chloor in de stratosfeer terecht gekomen was tengevolge van menselijke activiteiten, speciaal het loslaten van CFK's in de atmosfeer. Het is mogelijk dat zich in voorafgaande tientallen jaren wanneer de winters bijzonder koud uitvielen, al herhaaldelijk een koud en windstil 'reactorvat', voorzien van bevroren PSC's, gevormd heeft; maar nog nooit eerder waren daar dan door de mens geproduceerde chloorverbindingen in voldoende mate voorhanden die van deze condities gebruik konden maken. Zo lang Antarctica het enige aangetaste gebied is zou dit slechts een aanleiding kunnen zijn voor een matige bezorgdheid. Maar zal Antarctica het enige aangetaste gebied blijven?
Het verslag van de Dahlem-Conferentie is te vinden in het 'Group Report, Changes

in Antarctica Ozone' geschreven door G.P. Brasseur en zijn teamgenoten in 'The Changing Atmosphere' eds. Rowland and Isaksen, 1988, p.235-256, John Wiley & Sons.

Het 'rokende pistool' dat de schuld van de agressieve chloorverbinding ClO voor de winterse ozonafbraak aan de Zuidpool onweerlegbaar bewees, is in fig. 10 weergegeven. Deze figuur is ontleend aan een lezing van Paul J. Crutzen 'Menschliche Einflüsse auf die Chemie der globalen Atmosphäre' en geeft de O_3- en ClO-waarden aan die in 1987 door het ER-2 vliegtuig op 18 km hoogte werden gemeten bij het passeren van de wand van het 'chemisch reactievat' binnen de poolnachtstraalstroom (polar night jet) en wel respectievelijk in eind augustus, dus nog in de Zuidpoolnacht en in midden september, toen de voorjaarszon weer verschenen was en het fotochemische ozonafbraakproces dus was begonnen.

Literatuur

Crutzen, P.J., F. Arnold "Nitric acid cloud formation in the cold Antarctic stratosphere: a major cause for the springtime ozone hole" *Nature* 324, 651-655 (1986)

Farman, J.C. "What hope for the ozone layer now?", *New Scientist* 116, 50-54 (1987)

Farman, J.C., B.G. Gardiner and J.D. Shanklin "Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction" *Nature* 315, 207 (1985a)

Hamill, P., B. Toom and R.P. Turco "Characteristics of polar stratospheric clouds during the formation of the Antarctic ozone hole" *Geoph.Res.Lett.* 13, 1288 (1986)

McElroy, M.B., R.J. Salawitch, S.C. Wofsy and J.A. Logan "Antarctic ozone: reductions due to synergistic interactions of chlorine and bromine" *Nature* 321, 759 (1986a)

Newman, P.A., M.R. Schroeberl "October Antarctic temperature and total ozone trends from 1979 to 1985" *Geoph.Res.Lett.* 13, 1207 (1986)

Solomon, P.M., B. Connor, R.L. de Zafra, A. Parrish, J. Barrett and M. Jaramillo "High concentrations of chlorine monoxide at low altitudes in the Antarctic spring stratosphere: secular variation" *Nature* 328, 411 (1987)

Solomon, S., R.R. Garcia, F.S. Rowland and D.J. Wuebbles "On the depletion of Antarctic Ozone" *Nature* 321, 755 (1986)

Hoofdstuk zeven

7.1 De gevolgen voor de hele aarde

Dat het ozongat bij de Zuidpool niet alleen maar een plaatselijk verschijnsel is, wordt duidelijk uit de uitbreiding die het ozonverval op het zuidelijk halfrond in de laatste jaren heeft laten zien. De gegevens van TOMS en andere metingen geven aan dat er een reductie van het ozongehalte is voorgekomen tot aan 45° zuiderbreedte, dus bij de zuidelijke punten van Zuid-Amerika, Australië en Nieuw-Zeeland. In de afgelopen paar jaren lieten de voorjaarsmetingen van stratosferische ozon op de breedte van zuidelijk Nieuw-Zeeland reducties zien die gingen tot 20 procent onder de waarden die vóór 1979 werden gemeten. Dit is dus ver buiten het 'reactievat' dat de begrenzing van het eigenlijke gat markeert en wekt het vermoeden dat andere invloeden, die verband houden met de veranderde dynamica van de luchtstromen op het zuidelijk halfrond en de afkoeling van de stratosfeer, buiten het 'gat' aan het werk zijn.

7.2 De dynamica van de verdunning

Het gat zelf zou kunnen bijdragen tot het verval van de ozonconcentraties over het zuidelijk halfrond. De totale 'levensduur' van ozon in de lagere stratosfeer is ongeveer een jaar en dat betekent dat iedere verstoring van de ozonconcentraties, een toename of een afname, ongeveer zo lang doorwerkt. Ieder jaar als de wervel om de pool zich in de vroege zomer heeft opgelost, kunnen grote hoeveelheden lucht met zeer lage ozongehalten uit Antarctica wegvloeien en zich mengen in de algemene circulatie van de winden over het zuidelijk halfrond. Als het meer dan een jaar duurt voordat de ozon die verloren is gegaan, weer opnieuw door fotochemische processen op lagere breedten is gevormd, dan zal er een van jaar tot jaar cumulerend overdrachts-effect optreden, totdat er weer een nieuw evenwicht is bereikt met de snelheid waarmee de ozon wordt geproduceerd.

Het lijkt wat op een bad dat door water uit een kraan wordt gevuld en tegelijkertijd leeg loopt door een opening in de bodem. Hoe hoger het water in het bad is hoe harder het water door de opening wegstroomt, en wel vanwege de overdruk; dus het niveau van het badwater zal naar een constant peil gaan waarbij de toevoer en de afvoer met elkaar in evenwicht zijn. Maar als het gat in de bodem een beetje groter wordt gemaakt dan zal het peil van het bad eerst naar beneden gaan omdat de afvoer is toegenomen. Maar dan neemt de druk ook weer af en daardoor wordt de afvoer weer minder totdat die opnieuw in evenwicht is met de toevoer. Het peil is dus omlaag gegaan naar een nieuw niveau, zelfs zonder dat de toevoer is veranderd. Volgens Mahlman zal, als het Antarctische gat een permanent voorjaarsverschijnsel wordt, dit verdunningseffect een algemene teruggang van 3 à 4 procent in de

ozonconcentraties van het zuidelijk halfrond tot gevolg kunnen hebben.
Dat is op zichzelf nog geen rampzalige teruggang in de ozonconcentratie maar die zou dan nog komen bij een of andere lange-termijn-afbraak, die op de lagere breedten veroorzaakt zou worden door de chloorfluorkoolwaterstoffen (CFK's) en andere chloorverbindingen (en dan ook nog zou komen bij mogelijke NO_x-effecten door SST's of andere oorzaken).
Om een indruk te krijgen van de grootte van deze teruggang in de ozon: die is ongeveer even groot als het effect van de pogingen die in de Montreal overeenkomst zijn opgenomen om de uitworp van CFK omlaag te brengen, als die overeenkomst al volledig zou worden uitgevoerd. Het gat boven Antarctica zou dus het nut van de Montreal-overeenkomst volledig teniet kunnen doen.
R.J. Atkinson et al. rapporteren in hun publikatie 'Evidence of the mid-latitude impact of Antarctic Ozone Depletion' (Nature 27 July 1989, p.290-294) over hun analyse van de meteorologische gegevens en de ozonwaarden betreffende de periode oktober-december 1987, afkomstig van de Nimbus 7 satelliet en van vijf stations in Australië en Nieuw-Zeeland. Zij melden dat omstreeks half december de snelle opvulling van het ozongat gepaard gaat met een eveneens snelle afname van de ozonkolom (TOMS)-waarden in de omgevende atmosfeer tot boven Nieuw-Zeeland en Zuid-Australië. Bestudering van de gelijktijdige dynamische processen aldaar doet hen concluderen dat deze teruggang van de ozonwaarden inderdaad het gevolg is van de uitstroming van polaire ozonarme lucht naar deze gebieden. Het gaat hier dus inderdaad om een verdunningsproces.
Maar alleen zo'n verdunningsproces, dat dus na de poolwinter optreedt, blijkt toch niet voldoende om de ozonafname, zoals die door de Ozone Trends Panel (1988) werd vastgesteld, volledig te verklaren. G.P. Brasseur geeft in Nature, 16 november 1984, p.225-226 aan dat er inderdaad aanwijzingen zijn voor een chemische ozonafbraak, zowel binnen als buiten de 'circumpolar vortex' en die dan ook nog optreedt voordat in het voorjaar de vorming van het eigenlijke ozongat binnen de vortex plaatsvindt. Deze vroegtijdige ozonafbraak zou zich noordwaarts tot ongeveer 50° ZB uitstrekken en zo een bijdrage leveren aan het ozonverlies, buiten het eigenlijke ozongat dat tot nu toe alleen aan de verdunning na de poolwinter werd toegeschreven. Brasseur vraagt zich ook nog af of men hier aan heterogene chemische processen op sulfaataerosolen zou moeten denken. Dit wordt ook bevestigd door Brasseur's recente berekeningen, Nature 348, pp.626-628, 1990.

7.3 De wereldwijde ozonuitputting

Als het niet om de ontdekking van het Antarctisch ozongat was geweest was er in 1986 en 1987 al genoeg geweest om ongerust over te worden. De metingen van het Solar Backscatter Ultraviolet instrument (SBUV) aan boord van Nimbus 7 tonen, volgens Donald Heath en zijn collega's te Goddard, een dramatische teruggang van de stratosferische ozonconcentratie over de gehele wereld. Deze totale ozonhoeveelheid die door de SBUV werd gemeten bleef vrijwel constant vanaf de lancering van de satelliet in 1978 tot aan 1982. Toen gingen de concentraties omlaag, herstelden zich weer iets, en daalden verder in 1984 en 1985. Over een periode van

zeven jaar nam het totale ozongehalte van de stratosfeer *gemiddeld over de hele aarde*, af met 4 procent, als men deze cijfers tenminste zonder meer mag aannemen. Is dat zo?

Alle satellietwaarnemingen hebben het bezwaar dat niemand daar boven kan gaan kijken of de instrumenten goed blijven functioneren. Als de instrumenten ouder worden en verslijten kunnen ze afwijkingen gaan vertonen en het is moeilijk om ze opnieuw te ijken (bijvoorbeeld, door ze te vergelijken met waarnemingen die op grondstations zijn uitgevoerd) zodat men zeker kan zijn van de getallen die ze produceren. Vreemd genoeg heeft men in de afgelopen jaren als bezuinigingsmaatregel een aantal grondstations die zaken als stratosferische ozon registreerden, opgeheven omdat de satellieten dat werk zoveel beter zouden kunnen doen en de grondstations dus niet langer nodig waren. Er zijn juist meer en niet minder grondstations nodig als we willen begrijpen waarom de ozonlaag zo snel verandert.

Ondertussen worden de SBUV-gegevens van Heath met de uiterste voorzichtigheid bekeken en ze worden nog niet als de laatste waarheid beschouwd. Maar wat ze ons schijnbaar te zeggen hebben is, dat de uitputting van de ozon in de stratosfeer in de laatste tijd twee maal zo snel is gegaan als kan worden verklaard door alle effecten van CFK's, stikstofoxides en zonneactiviteit mee te rekenen. Ten minste één stel grondgegevens (verzameld door James Angell van de National Oceanographic and Atmospheric Administration) bevestigt dit verloop: een afname van 4 procent in de totale ozonhoeveelheid tussen 1980 en 1985. Er mogen dan onzekerheden zijn over de grootte van het verloop, maar iedere beschikbare aanwijzing geeft aan dat de stratosferische ozon wereldwijd terugloopt en dat de snelheid waarmee dit gebeurt een half procent per jaar is.

Hiervan zou inderdaad iets aan de veranderingen van de zon kunnen worden toegeschreven. Als de zonneactiviteit in een maximum verkeert, zoals in 1979 het geval was, is er meer ultraviolette straling die de fotochemische produktie van ozon bevordert. Aangezien de zonneactiviteit nu (1988) net haar minimum is gepasseerd zou dit deel van het effect in de komende paar jaar in de andere richting moeten werken en dus de afname van de ozonconcentraties moeten vertragen of zelfs stoppen. Indien deze invloeden in de komende paar jaren inderdaad de andere kant op gaan werken, zou dit tijdelijk de schijn kunnen wekken dat de problemen met het gat boven het Zuidpoolgebied kleiner worden. Wanneer dat wetenschappers en politici tot de gedachte zou brengen dat de problemen verdwenen zouden zijn, zou dat erg ongelukkig zijn. De werkelijke betekenis zou dan zijn, dat in het midden van de jaren negentig, als de zonneactiviteit weer terugloopt en het 'reactorvat' zich weer volledig heeft gevormd, er een nog dramatischer groei van het ozongat zal optreden, vanwege alle extra chloor van de CFK's die tegen die tijd de zuidelijke stratosfeer zal hebben bereikt.

Het door SBUV gerapporteerde ozonverlies is niet gelijkmatig over de aardbol verdeeld, maar het is zowel in het voorjaar als in het najaar geconcentreerd op hoge noorder- en zuiderbreedten. Het vertoont zich ook op grotere hoogten dan waar het gat boven Antarctica zich ontwikkelt: tussen 1978 en 1984 zou, gemiddeld over de hele aardbol op een hoogte van 40 km, 12 procent van de ozon zijn verdwenen.

Dat zou veelbetekenend kunnen zijn. Hoewel er veel chloor vastligt in chloornitraat op hoogten tussen 12 en 32 km (behalve, zoals we hebben gezien gedurende de Antarctische winternacht binnen de wervel om de pool) wordt op een hoogte boven 32 km datzelfde chloornitraat weer door ultraviolet zonlicht ontleed, waarbij chloor en ClO vrijkomen. Dat is nu juist de hoogte waarop de door de mens veroorzaakte werking van CFK's en andere chloorverbindingen voor het eerst zouden kunnen worden opgemerkt -hoewel niemand heeft voorspeld dat die werking zo sterk en zo snel zou zijn.

7.4 Een noordelijk gat?

Maar de meest omstreden en beangstigende bewering van Heath is de ontdekking -als het dat werkelijk is- van een klein gat in de ozonlaag boven het noordpoolgebied. Normaal blijft de stratosfeer aan de Noordpool een kritieke 10° C of meer warmer dan de stratosfeer aan de Zuidpool en als het uitvriezen van salpeterzuur inderdaad een kritieke stap betekent in de vorming van het Antarctische gat, dan zou er niet zo'n noordelijke tegenhanger moeten zijn. Maar er zijn PSC's boven het noordpoolgebied, dus er wordt op z'n minst salpeterzuur in vloeibare vorm geproduceerd en daarop zouden de SBUV-waarnemingen van Heath betrekking kunnen hebben. Maar ook dan zijn er problemen. Omdat de dynamica voor de windpatronen op het noordelijk halfrond afwijkt van die van het zuidelijk halfrond is er een toename in de temperatuur boven het poolgebied aan het eind van de winter, als er warme lucht van de lagere breedten binnendringt. Er is geen sterke wervel om de pool om dit tegen te houden en dientengevolge verdampen de PSC's voordat de zon terugkomt. In dat geval zou de chemische toestand weer naar normaal terug moeten gaan en zou er geen ozonverval moeten optreden. Maar juist omdat die noordelijke winden zo veranderlijk zijn, zou het mogelijk kunnen zijn dat de zwakke noordelijke poolwervel, met PSC's en al, van de pool af zou worden geblazen om, voordat de wolken zijn verdampt, terecht te komen in een gebied waarin aan het eind van de winter de zon al schijnt. Dus zo is er misschien toch enige fotochemische uitputting van ozon mogelijk. Het zal zeker belangwekkend en leerzaam zijn om te onderzoeken of er ook kleine stille gebieden van koude lucht boven het noordpoolgebied zijn waar in de late winter ozonverlies optreedt. Misschien is dat het wat Heath ziet.

De afname van ozon die hij in de vroege jaren tachtig boven noordelijke poolgebieden mat, is kleiner dan de afname die in diezelfde jaren door dezelfde instrumenten bij de Zuidpool werd gemeten; die afname bestrijkt een minder dikke laag en strekt zich slechts uit over een derde van de oppervlakte van het gat aan de Zuidpool. Maar omdat het boven bevolkte streken van de aarde ligt, met inbegrip van het grootste gedeelte van Noorwegen, Zweden en Finland, zou het meer rechtstreekse gevolgen voor de mensheid kunnen hebben. Gedeeltelijk gevolg van deze metingen, maar ook om een aantal ideeën over het gat bij de Zuidpool te toetsen, reist een internationale expeditie naar het noorden van Noorwegen om daar in de winter en het voorjaar van 1988 waarnemingen te doen. Wanneer ze iets mochten vinden dat de beweringen van Heath zou bevestigen dan is het best mogelijk dat we in 1989 weer zo'n grootscheepse expeditie zullen meemaken als bij de recente onderzoekingen van het gat

boven het Zuidpoolgebied heeft plaats gehad. Misschien is zelfs de aanwezigheid van PSC's, met vloeibare zuurdruppels in plaats van ijskristallen, voldoende om de chemische processen, die leiden tot het verdrijven van ozon uit de stratosfeer, op gang te brengen. Als dat zo is dan zou dat gevolgen kunnen hebben voor de lagere breedten. De noordpoolexpeditie die nu voor de winter van 1988 op stapel is gezet, is maar een bescheiden zaak vergeleken met het Airborne Experiment, en wordt met een beperkt budget uitgevoerd. Het is een verkenningsoefening, een poging om te weten te komen of er iets aan de hand is dat de kosten van een grootscheepse expeditie in 1989 zou rechtvaardigen. Maar ook zelfs dan, zijn er al teams uit landen zoals Duitsland, Zweden en Frankrijk plus individuele onderzoekers uit andere landen naar de raketlanceringsbasis van de European Space Agency op een breedte van 68°N in Noord-Zweden gegaan, waar de zon op 15 januari opkomt. Sommige onderzoekers kwamen in november 1987 aan om waarnemingen te doen tijdens de donkerste winterweken, anderen hebben hun zaken opgezet voor de terugkeer van de zon zelf. Zij hebben metingen verricht vanuit raketten en ballonnen, maar ook vanaf de grond. Hun waarnemingen zijn te vergelijken met die van McMurdo in 1986 en niet zo zeer met het vliegtuigenproject van 1987 boven Antarctica.

De bestudering van de chemische processen die zich boven Arctica (het noordpoolgebied) afspelen, zal onmisbaar vergelijkingsmateriaal opleveren waarnaast de chemie van de Antarctische stratosfeer kan worden beschouwd om uit te maken of er sprake is van een voorjaarsgat boven Arctica. Zo neigen de arctische PSC's ertoe om zich op grotere hoogten te vormen dan die van Antarctica, namelijk op 20 tot 21 km, terwijl ze bovendien (vrijwel zeker) uit vloeibare druppeltjes en niet uit ijskristallen bestaan. De leden van de expeditie verwachten en hopen dat ze geen groot arctisch gat vinden waar ze zich zorgen over zouden moeten maken. Maar door chemische en dynamische processen te bestuderen die verschillen van de mechanismen waarvan men aanneemt dat ze zich in de Antarctische stratosfeer afspelen, zullen de onderzoekers in staat zijn zich enig idee te vormen over de mate waarin waarschijnlijk de ozon op lagere breedten, verder van de polen, wordt afgebroken. En als ze inderdaad iets verdachts vinden dan zou in 1989 een arctisch experiment moeten plaatsvinden dat niet zou onderdoen voor welke waarnemingen boven Antarctica dan ook.

Het is mogelijk, maar allerminst bewezen, dat zich in andere delen van de wereld soortgelijke processen kunnen afspelen. De chemie van heterogene systemen is, naar het schijnt, de sleutel tot het begrip van de wijze waarop de Antarctische stratosfeer in de loop van de poolwinter in een bepaalde conditie wordt gebracht. Praktisch alle berekeningen van de ozonuitputting op andere breedten zijn tot dusver alleen op de chemie van homogene systemen gebaseerd die er vanuit gaat dat alle betrokken chemische stoffen in gasvorm aanwezig zijn. Maar er bevinden zich deeltjes in de stratosfeer, speciaal in een gebied dat bekend staat als de Junge-laag, in de lagere stratosfeer. Hier bevinden zich kleine deeltjes van vulkanische stof en sulfaten en de totale hoeveelheid materiaal die op een bepaald ogenblik aanwezig is, hangt af van de hoeveelheid vulkanische activiteit die heeft plaatsgevonden. Over het grootste gedeelte van de aarde zijn de temperaturen in de Junge-laag (-59 °C) hoger dan in het

gebied waarin de Antarctische PSC's zich vormen (-83 °C). Er zijn dus kleine vloeistofdruppeltjes en geen bevroren kristallen in de Junge-laag, en die bestaan uit een mengsel van zwavelzuur en water. Richard Turco, die wees op de mogelijkheid van een verband met het ozonverval, legde er de nadruk op dat de situatie verre van identiek is met de bevroren salpeterzuur/waterdeeltjes van de Antarctische PSC's. Niettemin moet zich, speciaal na een flinke vulkaanuitbarsting, een aantal heterogene processen afspelen, die misschien de vernietiging van ozon versnellen.
Een mogelijkheid, die door Ralph Cicerone op de Dahlem-conferentie werd geopperd, is, dat sporen van metalen die tijdens een vulkanische uitbarsting zijn uitgeworpen (aluminiumoxide is één kandidaat), sommige heterogene reacties die zich op de vloeistofdeeltjes in de Junge-laag afspelen, kunnen bevorderen. De Mexicaanse vulkaan El Chichon barstte in 1982 uit, ongeveer toen het SBUV-instrument een wereldwijd verval van ozon in de stratosfeer begon aan te wijzen. Dit kan het verschijnsel veroorzaken maar enige troost levert dat niet. Het betekent namelijk dat, evenals boven Antarctica, een combinatie van natuurlijke verschijnselen met de aanwezigheid van de gebruikelijke hoge concentraties van chloorverbindingen in de stratosfeer een veel sterker verval van ozonconcentratie tot gevolg heeft dan het verval dat zonder menselijke invloeden zou optreden. Nogmaals, als dezelfde soort verstoring -in dit geval een grote vulkaanuitbarsting- in de jaren negentig optreedt, zal de inwerking daarvan nog krachtiger zijn. *Bij de recente uitbarsting van de Pinatubo op de Philippijnen op 15 juni 1991 is waarschijnlijk meer dan tweemaal zoveel zwaveldioxide in de stratosfeer geblazen als bij El Chichon in 1982. Dit maakt deze uitbarsting tot de grootste uitbarsting van deze eeuw. Het zal tenminste 8 tot 10 jaar duren voor deze aerosoldeeltjes uit de stratosfeer verwijderd zijn. Behalve een effect op het klimaat, gemiddeld een daling van temperatuur met 0.5 °C, lijken de mogelijke gevolgen voor de ozonlaag schrikwekkend. Door de grote toename van aerosolen in de stratosfeer, waaraan het oppervlak de heterogene chemie kan plaats vinden, tezamen met de steeds grotere Cl-belasting, zal de ozonafbraak versterkt worden. Eerste afschattingen liggen in de orde van 10% extra afbraak in het voorjaar op gematigde breedte. De gemiddelde afkoeling plus toename in aerosolen zal leiden tot nog meer PSC-vorming en daarmee uitbreiding en een langduriger optreden van het antarctisch ozongat.*
Nog niemand heeft een grondig onderzoek gedaan naar alles wat hieraan vastzit. Maar één onderzoek, door Malcolm Ko en zijn collega's van Atmospheric and Environmental Research inc. in Cambridge, Massachusetts, is op z'n minst verontrustend. Het team van Ko voerde een reeks van computersimulaties van de atmosferische chemie uit, waarbij standaard homogene reacties werden gebruikt en men vond heel weinig invloed van de sporegassen die afkomstig waren van menselijke activiteiten. Maar toen zij het model aanpasten zodat het ook rekening hield met niet-standaard chemische processen, kwam er uit dat tegen het jaar 2060 een verval van 16 procent in de ozonconcentraties zou zijn bereikt, de grootste verliezen zouden dan in de lagere stratosfeer optreden. Deze computersimulatie gebruikt een zeer eenvoudig model, van het soort dat als 'eendimensionaal' wordt beschreven omdat het alleen maar rekening houdt met de verticale verdeling van atmosferische

componenten en sporegassen, alsof de atmosfeer op alle geografische plaatsen dezelfde was. De ruimte die in de computer wordt bespaard door de berekening van de atmosferische circulatie en van geografische variaties buiten beschouwing te laten, kan worden gebruikt om de chemische reacties meer in detail te berekenen, en het is een afweging die afhangt van wat je precies wilt bestuderen, of je een ééndimensionaal model met goede chemie zult gebruiken, of een meer realistisch dynamisch model met een wat magere chemie. Niemand, ook Ko niet, beweert dat de resultaten van zijn onderzoekingen zo maar op zichzelf moeten worden aanvaard zoals ze zijn. Maar er is hier toch op z'n minst sprake van een aanwijzing, dat de standaardmodellen waarop de meest verbreide voorspellingen van de ozonafbraak in de wereld zijn gebaseerd, en die de grondslag hebben gevormd voor de conferentie in Montreal, veel te optimistisch zijn. Die aanwijzingen komen zowel van degenen die met computermodellen werken als van de kant van de waarnemingen van de veranderingen in de echte stratosfeer. Er is meer dan genoeg materiaal om scherpe beperkingen van het loslaten van CFK's en andere chloorhoudende verbindingen te rechtvaardigen. Zonder ons nog te buiten te gaan aan science fiction, is er nog een ander griezelig scenario dat hier moet worden genoemd, alleen maar voor het geval dat iemand nog zou betwijfelen of de menselijke activiteiten wel op zo'n schaal zijn dat ze de werking van de atmosfeer van onze planeet zouden kunnen veranderen. **(zie volgende paragraaf).**

De al door Gribbin, op p.108, vermelde plannen voor een internationale expeditie naar het noorden van Noorwegen zijn inderdaad uitgevoerd en de daarna naar buiten gebrachte resultaten bevestigden direct al het vermoeden dat ook in de noordpoolwinter heterogene chemische reacties zouden optreden. Begin maart 1988 meldde Jim Andersen van Harvard University al dat men met het ER-2 onderzoeksvliegtuig van NASA vlak langs de noordelijke 'polar vortex' had gevlogen en daar een chloormonoxideconcentratie had aangetroffen die 5 à 7 maal zo hoog was als even zuidelijker (New Scientist 24 maart 1988, p.22).

Op dezelfde bladzijde van de New Scientist wordt gemeld dat er ook juist een rapport was verschenen van de 'Ozone Trends Panel', een internationaal gezelschap van meer dan 100 wetenschappers. Onder voorzitterschap van Bob Watson van NASA had in 1986 het panel de taak op zich genomen alle ozongegevens van tientallen grondstations (Dobson netwerk), samen met de door de Nimbus 7 verzamelde gegevens uiterst kritisch te bekijken en daar vervolgens met geavanceerde statistische bewerkingen het meest waarschijnlijke verloop van de ozonconcentraties over de periode 1969 t/m 1986 uit af te leiden. Dit panel vond onder meer voor de zone tussen 53° en 64° NB een afname van het ozongehalte die zich vooral in de winter manifesteerde. Zo bleek daar in de januarimaanden van de beschouwde 18 jaren een daling van bijna 10% te zijn opgetreden. Uiteraard vroeg men zich toen af of dit verband kon houden met een regelmatig winters ozongat aan de noordpool. Watson vond dan ook dat de NASA daar in de volgende winter (1988/89) een onderzoek naar zou moeten instellen zoals men dat ook voordien aan de zuidpool had gedaan.

Vervolgens komt er een melding van Sylvia Dayton in de New Scientist van 9 juni 1988 waarin zij op p.47 verslag uitbrengt over de bevindingen van Wayne Evans

(Environment Canada), die onder meer te Alert Bay (82,6° NB) wekelijks ozonmetingen met ballonnen uitvoerde gedurende de periode van december t/m maart beginnende in de winter van 1985/86. Men vond toen een gat in de ozonlaag waarin de verdeling van de ozonconcentraties over de hoogte overeen bleek te stemmen met de verdeling die daar ook door de 'Total Ozone Mapping Spectrometer' (TOMS) van de Nimbus 7 was gemeten. De Nimbus-gegevens lieten verder nog zien dat zich in de winters van 1981/82 en 1983/84 ook een ozongat moet hebben voorgedaan.

Al met al dus volop aanleiding voor de door Bob Watson voorgestelde expeditie in de winter van 1988/89. Nu meldden zich daar ook de Russen voor aan en zo trok in begin januari 1989 opnieuw een internationale groep onderzoekers eropuit met de ER-2 en DC-8 vliegtuigen van de NASA, maar nu naar Stavanger, om daar de Airborne Arctic Stratosphere Expedition ten uitvoer te brengen. Ook nu weer met een brede financiële steun, o.a. van de US Chemical Manufacturers Association.

Meteen kwamen de Canadezen al met een melding van hun ballonmetingen te Alert Bay. Wayne Evans rapporteerde een 5% daling van de stratosferische ozon en het optreden van PSC's (Polar Stratospheric Clouds). Helaas beschikte men daar niet over apparatuur voor het meten van ClO-concentraties.

Na de aankomst van de AASE-groep in Stavanger had de ER-2 eerst moeite om de polar vortex te bereiken, maar dat lukte begin februari. Men vond er de PSC's en men trof er een ClO-gehalte aan dat zestien keer zo hoog was als buiten de vortex. Dit kwam overeen met de ClO-gehalten die men in en buiten de zuidpoolvortex was tegengekomen. In hun verslag in Nature van 23 februari 1989, p.677, meldden Joseph Palca en Philippa Lloyd echter ook dat men geen stratosferische dehydratie en denitrificatie had aangetroffen, terwijl men bij de zuidpool had aangenomen dat deze voor het ontstaan van actieve chloorverbindingen noodzakelijk waren. Blijkbaar was daar alleen het optreden van PSC's voor nodig. De heterogene chemische processen traden dus inderdaad op, maar het vluchtenprogramma werd beëindigd voordat de zon weer terugkwam, zodat men de ozonafbraak niet vanuit het vliegtuig kon vaststellen.

Dit laatste is echter wel gebeurd met behulp van ballonmetingen te Kiruna in Noord-Zweden (68° NB). De vortex die aanvankelijk bij de Noordpool was gesitueerd had zich namelijk tijdens de laatste week van januari naar het zuiden verplaatst en was in de buurt van Kiruna terechtgekomen. De daar optredende uitzonderlijke koude hield de vortex met de PSC's intact, ook toen er in die tijd op 21 km hoogte al weer ca. 8 uur zonlicht per dag optrad. In de eerste helft van februari kwam aan deze bijzondere toestand een eind toen de warmte opdrong en de polar vortex opbrak. De ballonmetingen van Kiruna, waarover in Nature vol. 340, 13 juli 1989, p.317-321 is gerapporteerd, tonen ook een begin van ozonafbraak in de ijle stratosfeer op ca. 21 km hoogte. Hoewel de ozonafbraak hier, vanwege de binnendringende warmte niet verder naar beneden kon doorzetten was dit verschijnsel identiek aan wat men te McMurdo, in het zuidpoolgebied, op diezelfde hoogte had waargenomen. In de totale ozonkolom was de afbraak vooralsnog zeer gering (3%) maar die zou ongetwijfeld zijn toegenomen indien dit koudegebied zich in februari of maart had

kunnen handhaven (Gribbin, New Scientist 14 april 1990, meldt nog dat de lidar in de DC-8 toch nog uitgestrekte ozonverliezen tot 17% heeft gemeten). Men had dus inderdaad het begin van een door chloormonoxide uit de PSC's veroorzaakt ozongat aan de Noordpool waargenomen en wel onder omstandigheden die al in 1988 door G.P. Brasseur et al. in het Group Report: 'Changes in Antarctic Ozone' op p.253 voor de winter op het noordelijk halfrond waren voorzien, namelijk een zich naar de zon verplaatsende polar vortex. De conclusie luidt dat bij de Noordpool de heterogene chemische processen weliswaar niet zo belangrijk zijn als bij de Zuidpool, maar die toch een reële en tot dusver niet onderkende rol spelen bij de vernietiging van ozon in de stratosfeer.

Het bericht van Palca en Lloyd dat actieve chloorverbindingen bij de Noordpool waren ontstaan zonder dat dehydratie en denitrificatie waren vastgesteld, zou al gauw op grond van nader onderzoek worden gecorrigeerd en aangevuld.

Een groep onderzoekers van Harvard, R.L. Salawitch et al., kwam op 15 juni 1989 met een artikel in Nature waarin zij stelden dat de snelle ozonafbraak boven de zuidpool inderdaad alleen kan optreden wanneer de hoeveelheid gasvormig salpeterzuur (HNO_3) zeer laag is. (Hieruit komt door fotolyse NO_2 voort, dat de reactieve chloorverbinding ClO bindt tot het niet reactieve $ClONO_2$). Maar nu bleek uit een nadere analyse van de gegevens van de Airborne Antarctic Ozone Experiment dat de daarvoor nodige denitrificatie al kon optreden voordat de temperatuur zo ver was gedaald dat zich ook verbindingen met grotere ijskristallen konden voordoen. Men nam voorheen aan dat dit noodzakelijk was om de stikstofverbindingen door uitzakken kwijt te raken. Dehydratie is dus geen voorwaarde; de door vrije, gasvormige ClO (en BrO) gekatalyseerde ozonafbraak is dus al mogelijk voordat de temperatuur tot onder 188 K is gedaald en zich ook ijskristallen kunnen vormen.

Deze vondst was zeer belangrijk met het oog op de ozonafbraak bij de Noordpool waar zulke lage temperaturen zeker niet algemeen worden verwacht; de noodzakelijke denitrificatie kan daar dus ook optreden.

De Harvard groep van Salawitch werkte nauw samen met Fahey van de NOAA en het zijn vervolgens twee groepen onderzoekers van diverse instituten die in Nature van 22 maart 1990, p.321 en 21 juni 1990, p.698 met Fahey als eerste rapporteur andere interessante aspecten van de stratosferische denitrificatie naar voren brengen. Zij analyseerden de gegevens die het ER-2 vliegtuig van NASA bij de zuidpool (winter van 1987) en bij de Noordpool (winter van 1989) verzamelde, en wel in het bijzonder de gegevens betreffende de groep stikstofverbindingen $NO_y = NO + NO_2 + NO_3 + HNO_3 + 2(N_2O_5) + HO_2NO_2 + ClONO_2$ en de gegevens betreffende het, ook in de lagere stratosfeer, inerte lachgas N_2O. Interessant is nu de gevonden relatie tussen NO_y en N_2O.

NO_y wordt op wat grotere hoogte en op lagere breedten (dus dichter bij de evenaar) door fotolytische processen uit N_2O gevormd en naar hogere breedten (poolwaarts) getransporteerd. Op grond hiervan zou men aldaar in de lagere stratosfeer een negatieve correlatie tussen de concentraties van NO_y en N_2O kunnen verwachten. En inderdaad vond het vliegtuig, zolang het zich buiten de 'circumpolar vortex'

bevond, deze negatieve correlatie, die opmerkelijk hoog was, en dat gold zowel voor de Zuidpool als voor de Noordpool. Maar zodra het vliegtuig de vortex was binnengedrongen ging deze hoge anti-correlatie verloren: de NO_y-concentraties zakten aanmerkelijk onder de concentraties die men, op grond van de gevonden correlatie, uit de aanwezige N_2O-concentraties zou afleiden. Het lag voor de hand om dit NO_y-'verlies' toe te schrijven aan de winterse denitrificatie in de PSC's boven de polen die daar de ozonaantasting door ClO (en BrO) mogelijk maakt.
In fig. 11 is de verticale stippellijn de rand van de 'polar vortex', resp. bij de zuidpool en bij de noordpool. Equatorwaarts van deze grenzen bestaat een lineair verband tussen de concentratie van de gezamenlijke stikstofverbindingen NO_y en de lachgasconcentratie N_2O:

$$NO_y = -0{,}07\,(N_2O) + 21\ ppbv = NO_y^*$$

Dit geldt voor N_2O-concentraties tussen 80 en 300 ppbv. Berekent men vervolgens voor de gebieden binnen de 'polar vortices' de NO_y^* uit de gemeten N_2O-concentraties dan ontstaat het verloop dat door de dunne lijnen is aangegeven. De gearceerde vlakken tussen deze dunne lijnen en het verloop van de gemeten NO_y geven dan het NO_y-verlies aan dat aan de denitrificatie wordt toegeschreven.
Een ander interessant aspect betrof de dehydratie. Uit het verloop van de H_2O-concentraties blijkt dat poolwaarts van de grens van de vortex bij de zuidpool (Antarctic) een duidelijke afname begint bij 67° ZB, maar bij de noordpool is pas sprake van een kleine afname (dehydratie) in de buurt van 78° NB. Dus inderdaad:

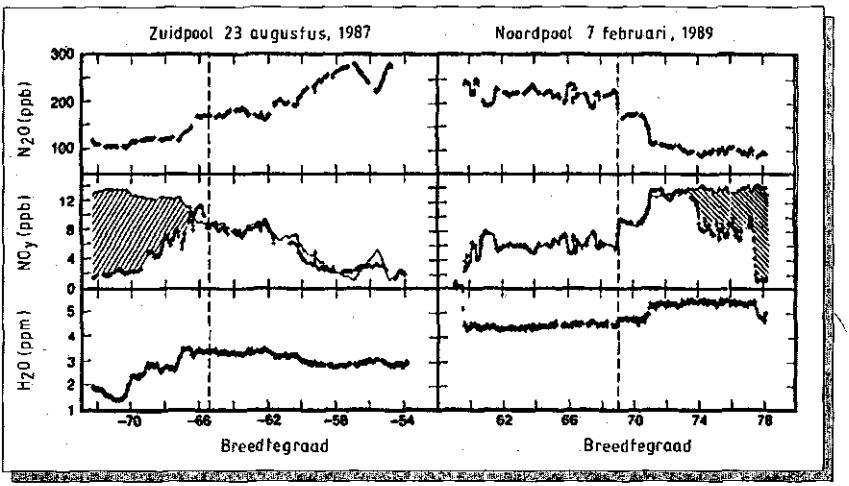


Fig. 11 Gemeten concentraties van N_2O, NO_y en H_2O, de stippellijn markeert de polaire vortex
(Bron: Observations of denitrification and dehydration in the winter polar stratosphere, D.W. Faley e.a., Nature, pg 322, 344, March 1990)

de heterogene chemische processen binnen de winterse circumpolar vortices gaan gepaard met denitrificatie, ook wanneer de temperatuur nog niet zo ver is gedaald dat ook dehydratie optreedt. De condensatie van NAT (nitric acid trihydrate $HNO_3 . 3H_2O$) moet dus deeltjes opleveren die voldoende groot zijn om tot verwijdering door wegzakken uit de stratosfeer te komen. Daartoe is het nodig dat de NAT condenseert op de reeds aanwezige grootste sulfaatdeeltjes. Maar over dit proces is nog niet genoeg bekend.

Opnieuw was gebleken dat er over het verloop van de heterogene chemische processen in de PSC's nog veel onzekerheden bestaan. Daarbij is dan ook nog sprake van een rol die zou kunnen worden gespeeld door deeltjes die op alle breedtegraden in de zgn. Junge-laag aanwezig zijn en die incidenteel door vulkaanuitbarstingen wordt versterkt. Daarin zou ook een mengsel van zwavelzuur en water een rol spelen. Duidelijk is dat het totale beeld nog ontbreekt. Gehoopt wordt dat de resultaten die verkregen zullen worden in het European Arctic Stratospheric Ozone Experiment (EASOE), een gezamenlijk Europees en Amerikaans experiment te houden van november 1991 t/m maart 1992, hierin meer duidelijkheid zullen brengen.

Bij de modelberekeningen die aan het protocol van Montreal ten grondslag lagen kon uiteraard met deze heterogene chemische processen geen rekening worden gehouden -ze waren nog niet opgemerkt. Nu wordt men zich in toenemende mate bewust van deze nog maar gedeeltelijk bekende bedreiging, die steeds verontrustender wordt naarmate het chloorgehalte van de atmosfeer toeneemt.

Toen Joe Farman, de ontdekker van het ozongat bij de Zuidpool, in maart 1988 door een Britse parlementaire commissie werd gehoord, zei hij: "We dachten dat de ozonafbraak wel langzaam zou voortgaan, maar wat we nu vinden verloopt verschrikkelijk niet-lineair; de zaak kan elk ogenblik op hol slaan" (New Scientist 24 maart 1988, p.23).

Toch leveren metingen op het noordelijk halfrond nog de nodige schijnbare tegenstrijdigheden op. In Nature van 11 januari 1990 komen de Noren Larsen en Henriksen op grond van Dobson-metingen te Tromsø (70° NB), Oslo (60° NB) en Spitsbergen (79° NB), tezamen over de periode 1935 t/m 1989, tot de conclusie dat er van 1983 tot en met 1989 zelfs sprake is van een ozontoename in het Arctische gebied. Wel werd in de laatste dagen van januari 1989 een 'minigat' in de ozonlaag boven Scandinavië geconstateerd, maar dit werd direct weer gevolgd door een hoogterecord in februari. Over de gehele waarnemingsperiode tot de zomer van 1989 zou echter geen sprake zijn van ozonafbraak ten gevolge van een door de mens veroorzaakte toename van atmosferische gassen zoals de CFK's. Dit is op z'n minst onverwacht gezien de al vermelde uitspraak van het Ozone Trends Panel dat in de aangrenzende zone tussen 53 en 64° NB over de periode 1969 t/m 1986, een ozonafname was opgetreden.

Wel in de lijn der verwachtingen ligt de melding van Blumthaler en Ambach in Science van 13 april 1990 dat metingen op wolkenloze dagen op een hoogte van 3576 m in Zwitserland (Jungfraujoch) over de periode 1981 t/m 1989, een significante stijging van het aandeel aan UV-straling in de totale zonnestraling te zien gaven. Dit

was in overeenstemming met de eveneens in Zwitserland, te Arosa (47° NB) geconstateerde 4% daling van de ozonhoeveelheid over de periode 1969 t/m 1988. Inmiddels lijkt het er op dat de gesignaleerde tegenstrijdigheid al weer is opgelost. In vol. 1 'Scientific Assessment of Stratospheric Ozone', 1989 van het WMO Report no. 20, zijn de individuele ozontrends over de periode 1970 t/m 1986 weergegeven zoals die zijn berekend voor 25 Dobson-stations op het noordelijk halfrond. De trends zijn allemaal negatief met uitzondering van 2 van de 4 stations in Japan en inderdaad, het noordelijkste station in Europa: het IJslandse Reykjavik (64° NB). Weliswaar worden in het WMO-rapport de door Larsen en Henrikson vermelde stations buiten beschouwing gelaten en vermelden die het station Reykjavik weer niet, maar toch lijkt er een verbinding met hun metingen te zijn gelegd. Maar dan moet daar tevens bij worden bedacht dat grote geografische verschillen er de oorzaak van kunnen zijn dat de trend in een bepaald gebied niet gelijk hoeft te zijn aan de gemiddelde trend die geldt voor de breedtezone waarin dat gebied ligt. De afbeelding van de desbetreffende satellietgegevens van het noordelijk halfrond maakt dit zeer duidelijk (fig. 12-A en 12-B).

Deze satellietgegevens relativeren ook de uitspraak van Susan Solomon in haar overzicht van 27 september 1990 in Nature, waarin ze stelt dat op het noordelijk halfrond de ozonafname met de breedtegraad toeneemt. Dat geldt alleen maar wanneer men eerst alle grondgegevens van elk van een drietal breedtezones middelt en dan alleen nog maar tot aan 64° NB. Het satellietbeeld toont daarentegen dat bijvoorbeeld midden boven de Stille Oceaan de ozonafname in noordelijke richting kleiner wordt. Er valt zeker niet uit af te leiden dat er een overheersende ozonafbraak in het Noordpoolgebied optreedt met uitstraling naar lagere breedten, zoals dat wel in het Zuidpoolgebied het geval is. Ook hoeft het door Larsen en Henriksen gemelde ozonverloop in hun deel van het Noordpoolgebied niet met dit satellietbeeld in tegenspraak te zijn. Kortom er valt over de ozonproblematiek op het noordelijk halfrond nog veel op te helderen, en daarbij zal ongetwijfeld veel aandacht worden besteed aan de mogelijkheid van een wereldwijde ozonafbraak door heterogene chemische processen op sulfaatdeeltjes, zoals die ook weer in het WMO-rapport nr. 20 wordt vermeld. De variabiliteit van de locale ozonmetingen is zeer groot op het noordelijk halfrond door het veel zwakker zijn van de polaire vortex. Al vroeg in het voorjaar wordt het centrum van de vortex van de pool gedrukt, verplaatst zich en breekt in 2 of meer stukken. Echter uit vrij recente analyses van de TOMS-gegevens blijkt duidelijk dat de ozonafbraak toeneemt met de breedtegraad. (fig. 12-C)

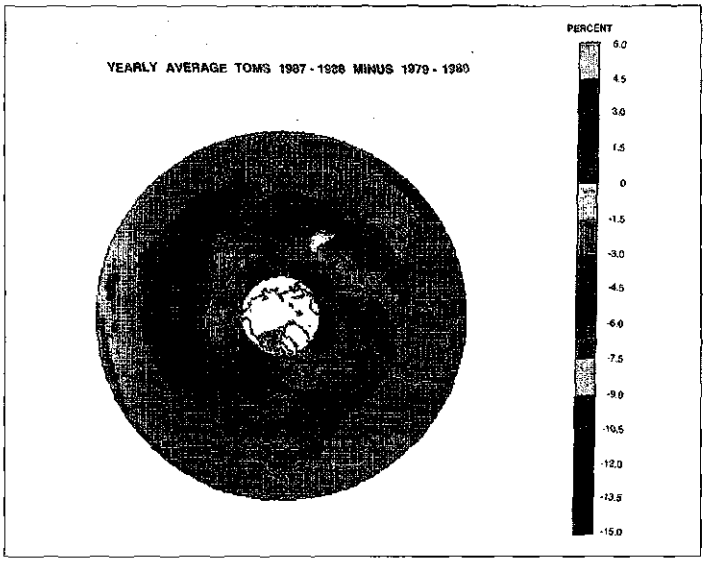


Fig. 12a Geografische structuur van veranderingen in totale ozonkolom, via de TOMS-satelliet Noordelijk halfrond
(Bron: WMO Globale Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 20 "Scientific Assessment of Stratospheric Ozone: 1989")

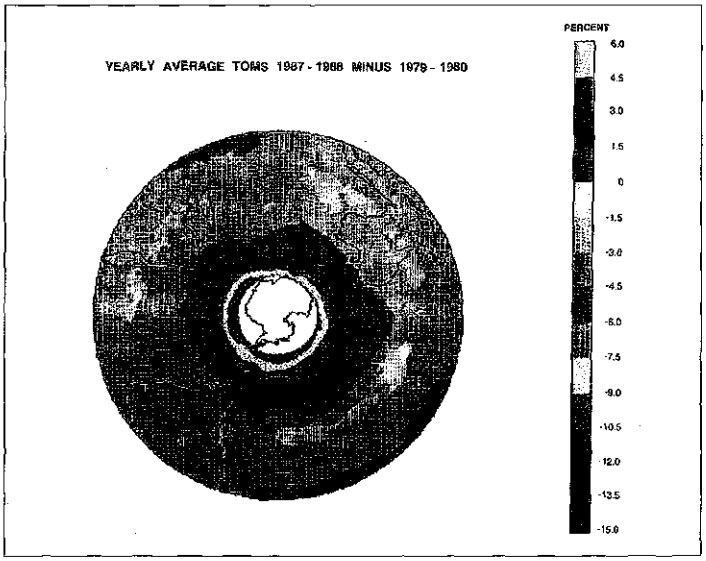


Fig. 12b Geografische structuur van veranderingen in totale ozonkolom, via de TOMS-satelliet Zuidelijk halfrond
(Bron: WMO Globale Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 20 "Scientific Assessment of Stratospheric Ozone: 1989")

Literatuur
S.H.H. Larsen, T. Henriksen - Persistent Arctic ozone layer - *Nature*, 343, 11, p.124 (Jan 1990)
M. Blumthaler, W. Ambach - Indication of increasing solar ultraviolet-B radiation flux in Alpine regions - *Science*, 248,, p.206-208 (13 April 1990)
Scientific assessment of stratospheric ozone: - *WMO Global Ozone Research and Monitoring Project-Report no. 20, vol. 1*, ISBN 92 807 12551 (1989)
Susan Solomon - Progress towards a quantitative understanding of Antarctic ozone depletion - *Nature*, 347,, p.347-352 (27 September 1990)
G.P. Brasseur et al - Group Report: Changes in Antarctic ozone - uit: The changing atmosphere. John Wiley (1988)
Sylvia Dayton - Canadians confirm ozone-hole in Arctic - *New Scientist* (9 June 1988)
D.J. Hofmann et al - Stratospheric clouds and ozone depletion in the Arctic during January 1989 - *Nature* (13 July 1989)
John Gribbin - Arctic ozone springs a leak as winter draws to a close - *New Scientist* (22 July 1989)
S.H.H. Larsen & T. Henriksen - Persistent arctic ozone layer - *Nature* , vol. 434,, p.206-208 (11 January 1990)
R.L. Jones - Bad news from the Arctic with signs of dry nitrogen removal - *Nature* (22 March 1990)
D.W. Fahey et al - Observations of denitrification and dehydration in the winter polar stratospheres - *Nature* (22 March 1990)
Scientific assessment of stratospheric ozone: introduction p.XXV, chapter 2, sub 2.6.3, p.128, chapter 3, p.58-59 (1989)
John Gribbin - Why Arctic ozone has survived-so far - *New Scientist* 14 April, p.23 (1990)

7.5 Een griezelig scenario

Het staat nu wel vast dat veranderingen van de circulatie in de atmosfeer boven het zuidelijk halfrond van invloed zijn bij het totstandkomen van de voorwaarden waaronder chloorverbindingen elk voorjaar een dramatische vermindering van het ozongehalte boven Antarctica teweegbrengen. Het 'ongunstigste' scenario dat hieruit zou volgen is dat het juist de afbraak van de ozon is die de omstandigheden in de atmosfeer versterkt die de vorming van het chemische reactievat tot gevolg hebben. Zo'n positieve terugkoppeling zou op z'n minst het klimaat van het zuidelijk halfrond en misschien wel op de hele wereld in een toestand kunnen brengen die de mensheid nog nooit heeft meegemaakt.
Zulke griezelverhalen zijn meestal aan doemdenkers voorbehouden en ze worden zelden ondersteund door betrouwbare wetenschappelijke berekeningen. Zo is het

merkwaardig om Jerry Mahlman, die evenmin als Lovelock het type van een doemdenker is, op de Berlijnse conferentie tot in bijzonderheden het geval van zo'n verandering in het zuidelijk klimaat uiteen te horen zetten. Dit wil niet zeggen dat die verandering zeker of zelfs maar waarschijnlijk zou zijn; maar nuchtere wetenschappers zijn nu wel zo bezorgd geworden over de schaal waarop de veranderingen in de atmosfeer boven Antarctica plaatsvinden, dat ze nu ook gevolgtrekkingen doorrekenen die nog geen vijf jaar geleden als 'science fiction' zouden zijn beschouwd.

Mahlman's griezelige scenario begint met het waargenomen feit dat er iets is -we weten niet wat- dat er de oorzaak van is geweest dat de stratosfeer op hoge breedtegraden is gaan afkoelen. In verband met deze afkoeling werd de wervel om de pool geprononceerder, waardoor in het winterseizoen de hoge lucht boven Antarctica van de rest van de atmosfeer afgesneden werd. Als gevolg hiervan verdwijnt de ozon in het voorjaar uit de Antarctische stratosfeer door de chemische processen die in hoofdstuk 6 zijn besproken en dan is er een nawerking van het ene jaar naar het volgende, zodat er in totaal over het hele jaar minder ozon is.

Eén gevolg van de teruggang van de ozonconcentratie op grote hoogte is dat de verwarmende invloed van de zon terugloopt, omdat er minder ultraviolet zonlicht wordt geabsorbeerd. Dus het is mogelijk dat de Antarctische stratosfeer zelfs nog extra afkoelt door het ozonverval. Het is ook mogelijk dat deze terugkoppeling de jaarlijkse groei van het gat heeft versterkt in die zin dat meer ozon is vernietigd. Maar hoe koud kan het kerngebied, het reactievat, worden? Er wordt nu ieder voorjaar zoveel ozon in het hart van het gat vernietigd dat dit effect daar zijn grens al kan hebben bereikt. Er is eenvoudigweg geen ozon meer over om vernietigd te worden, en de stratosfeer kan niet meer kouder worden. Misschien betekent dit dat het effect een natuurlijke grens heeft bereikt. Of misschien betekent dit, dat het effect zich nu waarschijnlijk naar buiten zal uitbreiden. Dus in plaats van dat het gat dieper wordt in die zin dat er meer ozon wordt vernietigd, kan het wijder worden en zich over een groter gebied uitstrekken naar lagere breedten.

Daling van de temperatuur boven het Zuidpoolgebied zelf versterkt de stabiliteit van de poolwervel en die versterkt zowel de doelmatigheid van de insluiting, als het wegdrukken van de om de pool waaiende winden naar de lagere breedten. Uiteraard moet het effect beperkt blijven door de afmeting van het gebied waar het in de poolwinter donker genoeg wordt om de chemische voorbereidingen te kunnen doen plaatsvinden. Maar het is zeer goed denkbaar, volgens Mahlman, dat het zuidelijk gebied van de hoge breedten 'omslaat' in wat bekend is als een toestand van zuiver stralingsevenwicht, waarbij de stabiele ronddraaiende winden de atmosferische stroming overheersen en er heel weinig luchtbeweging dwars op de breedtegraden optreedt -geen warme tongen die tot in Antarctica uitstromen.

Het beeld lijkt wat op het begin van een nieuwe ijstijd, tenminste op het zuidelijk halfrond. In de afgelopen jaren is de hoeveelheid ijs die zich vanuit het Zuidpoolgebied uitstrekt, groter geworden, hoewel nog niet in die mate dat iemand al geopperd zou hebben dat de wereld op weg is naar een nieuwe ijstijd. De meeste zorg over klimaatsverandering betreft tegenwoordig het broeikaseffect en het is wel onver-

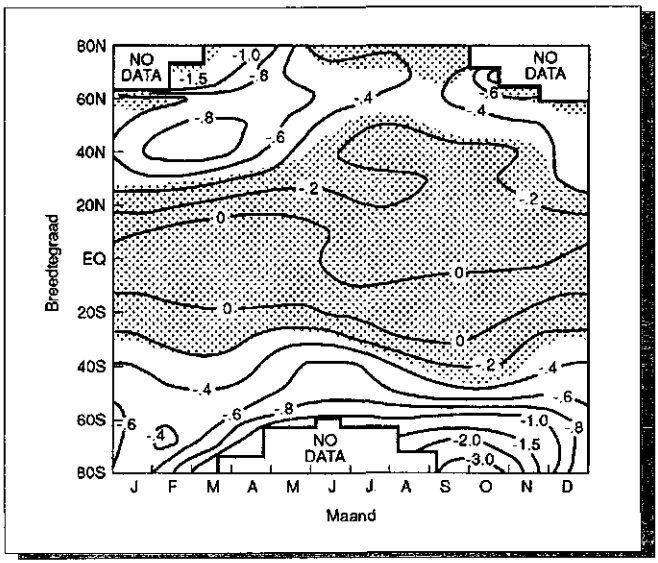


Fig. 12c Ozontrend in percentage per jaar, over de periode november 1978 - mei 1990, via de TOMS-satelliet
(Bron: Geophysical Research Letters, vol 18, no. 6, June 1991)

wacht dat door een afkoeling van de stratosfeer het broeikaseffect doende zou zijn om bij te dragen aan deze ver verwijderde, maar griezelige mogelijkheden waarvoor Mahlman onze aandacht vraagt. Het lijkt erop dat we op z'n minst aandacht zullen moeten besteden aan de mogelijkheid dat zelfs een broeikaseffect op het grootste deel van de aardbol gepaard kan gaan met circulatiepatronen op hoge zuiderbreedten, die in een ijstijd thuis horen. Omdat er nooit vergelijkbare omstandigheden zijn waargenomen, zijn de gevolgen hiervan op het wereldklimaat onvoorspelbaar. Zou dit effect, als het al een reële mogelijkheid is, zich tot op het noordelijk halfrond uitbreiden? Een afkoeling van maar 10 °C, misschien een beetje meer, van de stratosfeer boven Arctica, zou het mogelijk maken dat dezelfde soort van bevroren PSC's die zich nu alleen boven Antarctica vormen, ook in het noorden zou verschijnen en als dat zou gebeuren zouden er, op z'n allerminst, belangrijke veranderingen in de circulatiepatronen op het noordelijk halfrond ontstaan.
Maar dat moet zelfs vandaag waarschijnlijk tot science fiction worden gerekend. De kleine, maar reële, mogelijkheid bestaat dat er veranderingen in het zuiden zullen optreden. Als waarschuwingssignalen kan men denken aan een uitbreiding van het poolgebied dat 's winters door PSC's is bedekt, een toename van de tegenstelling tussen relatief hoge ozonconcentraties op lagere breedten en relatief lage concentraties op hogere breedten, van jaar tot jaar een afname van de gemiddelde ozonconcentratie op het zuidelijk halfrond en een toename in de sterkte van de

rondwaaiende winden die in nauw begrensde banden om de wereld waaien.
Niemand hoeft vooralsnog over dit scenario wakker te liggen. Er is geen aanwijzing voor dat het begin van dit effect is opgetreden. Maar evenmin moet men aannemen dat de atmosfeer van de aarde zo groot is en zo stabiel, dat niets wat we doen daar verandering in kan brengen. In tegendeel, het huidige denken over grootschalige natuurlijke veranderingen, zoals het begin van de ijstijden, duidt er op dat deze plotseling plaats hebben, wanneer de aarde een kritiek omslagpunt passeert gedurende een lang en langzaam proces van geleidelijke verandering.

7.6 Omslagpunten

Ter verduidelijking twee voorbeelden, één natuurlijk en één dat het gevolg is (kan zijn) van menselijke activiteiten. Het eerste betreft de manier waarop ijstijden op het noordelijk halfrond beginnen. Men dacht gewoonlijk dat dit een langdurig en langzaam proces was. Als de aarde begon af te koelen, zo redeneerde men dan, zouden grote ijsvelden vanuit de grote noordelijke uitgestrektheden naar beneden komen schuren en zouden voetje voor voetje gletsjers van de bergen omlaag schuiven. De sneeuw die op de nieuwe ijsvelden terechtkwam zou niet zo gauw smelten als de sneeuw die op het land of de zee viel, en zo zouden de ijsvelden van jaar op jaar dikker worden en het toenemend gewicht van het ijs zou de randen onverbiddelijk verder naar buiten drukken. Ten slotte -na zo'n vijftienduizend jaren- zou het ijs het grootste deel van een continent bedekken.
Maar er zijn tegenwoordig veel geologische aanwijzingen voor 'omschakelingen' naar ijstijden die veel sneller verlopen. Zo'n omschakeling zou dan niet meer tijd kosten dan een paar eeuwen, misschien minder dan honderd, of ten hoogste duizend jaren. De tijden van deze veranderingen, hoewel nog niet het precieze mechanisme daarvan, worden fraai verklaard uit de stand van de as van de aarde ten opzichte van het vlak waarin de aarde om de zon draait. Bij veranderingen van de stand van de aardas verandert ook de verdeling van de warmte over de seizoenen. Hoewel de gemiddelde hoeveelheid warmte die de hele aarde in de loop van een jaar van de zon ontvangt, altijd dezelfde is, zijn soms de winters koud terwijl de zomers warm zijn, terwijl in andere stadia van de cyclus de zomers koel zijn en de winters betrekkelijk zacht, maar toch nog zo koud dat er sneeuw valt op de breedten van Noord-Amerika en Europa. Uit de geologische geschiedenis is bekend dat koele zomers gunstig zijn voor het ontstaan van een ijstijd en dit wordt verklaard uit de nieuwe kijk die men op het ontstaan van ijstijden heeft. Men heeft nu de indruk dat een ijstijd aanbreekt wanneer de sneeuw die gedurende de winter op land gevallen is, door de volgende zomer heen blijft liggen. Sneeuwvelden glimmen en weerkaatsen de binnenkomende zonne-energie. Dat doet zelfs al een dun laagje. Het koelt de lucht erboven af en als het tot in de volgende winter blijft liggen, helpt het om te voorkomen dat de sneeuw die dan nog valt, gaat smelten. Volgens deze gedachtengang moet er, als het warmte-evenwicht van de seizoenen geleidelijk naar de koelere zomers verschuift, een moment komen waarop de sneeuwval van één jaar de balans van interglaciale- naar ijstijd-condities laat overslaan.
Dit is een extreme versie van de 'snowblitz'-theorie, zoals die wordt genoemd. Om

realistischer te blijven: De sneeuwval van één jaar die in de volgende zomer blijft liggen, zou het gebied dat permanent door ijs en sneeuw bedekt is, over enige tientallen kilometers in plaats van tientallen centimeters vanaf de gletsjers en ijsvelden (in het bijzonder in het noordelijk halfrond) kunnen uitbreiden. Deze uitbreiding zou dan gedurende een paar jaar kunnen worden vastgelegd voordat weer een volgende stap vooruit zou worden gemaakt. Een dozijn van zulke 'snowblitzes' in de loop van een eeuw en de nieuwe ijstijd is ingetreden!
Veranderingen in de andere richting, naar een warmer klimaat, zou net zulke dramatische gevolgen kunnen hebben. Van tijd tot tijd vermelden verhalen over de groei van het broeikaseffect de zorg van sommige wetenschappers dat er een 'ijstijd' vanuit Antarctica zou kunnen optreden. Het lijkt tegenstrijdig dat de verwarming van de wereld een uitbreiding van Antarctisch ijs over de oceanen tot gevolg zou hebben, maar het zou kunnen gebeuren. De reden hiervan is dat sommige ijsvelden rondom Antarctica zich over de oceaan uitstrekken. Drijvende ijsvelden zijn geen groot probleem. Maar op sommige plaatsen worden de ijsvelden die over de baaien van het Antarctisch continent heensteken, van onderen door eilanden gedragen: enorme ijsmassa's die helemaal niet drijven maar op rotseilanden vastzitten, zoals het dak van een grote kathedraal door enorme zuilen wordt ondersteund. Het gewicht van de ijslaag op het vasteland zelf, dat afloopt naar de zee, belast deze vastliggende velden van zeeijs en probeert ze vooruit te drukken. Maar door de wrijving op de eilandzuilen schuiven ze maar langzaam, stukje voor stukje, voorwaarts.
Wanneer de aarde warmer wordt, zoals nu misschien door het broeikas-effect, zullen veel gletsjers over de hele wereld beetje bij beetje smelten, maar de ijskap op het zuidpoolgebied wordt het laatst aangetast. Als er al iets gebeurt dan zou de Antarctische ijskap eerst dikker kunnen worden, omdat een warmere wereld een verhoogde verdamping op lagere breedten met zich meebrengt en dus meer waterdamp die in de lucht beschikbaar is om als sneeuw te vallen waar de aarde nog koud is, dus bij de polen. In dezelfde tijd zullen de oppervlaktelagen van de oceanen warmer worden en uitzetten. Als het ijs op lagere breedten smelt, komt er meer water in de zee; als de zee warmer wordt, zet het water dat er in zit, uit. Het totale effect daarvan is dat het zeeniveau omhoog komt (en de zee is inderdaad in de loop van de twintigste eeuw over de hele wereld gestegen). Wat betekent dit voor die vastliggende ijsvelden in de Antarctische baaien? Als de zee omhoog gaat, kan de druk van deze ijsvelden op de ondersteunende zuilen afnemen. Water kan doordringen tussen het ijs en de rotssteunpunten -en onder zulke omstandigheden is water een goed smeermiddel. Op een kritiek moment in de loop van die gestage stijging van de zeespiegel verdwijnt de kracht die het ijs tegenhoudt. Onder het gewicht van het ijs van het Antarctische continent kan het hele ijsveld naar voren schieten waarbij grote ijsbergen afbreken, het zeeniveau zal verder stijgen en het ijs zal smelten.
Er zijn enige aanwijzingen dat er op natuurlijke wijze zo'n soort ijsverplaatsing is opgetreden gedurende het interglaciaal van ca. 125.000 jaar geleden. Er is een mogelijkheid dat iets dergelijks door menselijke activiteiten zou kunnen worden veroorzaakt als het broeikaseffect zich verder ontwikkelt. De beide voorbeelden - de ijsverplaatsing en de 'snowblitz' - illustreren hoe, speciaal op hogere breedten van

beide halfronden, de omstandigheden op aarde als reactie op kleine veranderingen dramatisch kunnen veranderen wanneer een langzame, maar gestadiger verandering een bepaald kritisch omslagpunt bereikt heeft. Is dit te rijmen met het nogal troostrijke idee over de stabiliteit van het aardse ecosysteem dat door het begrip Gaia wordt vertegenwoordigd?

7.7 Vaarwel Gaia?

De troost die vele mensen ontlenen aan het beeld van Gaia, die een welwillende aardgodin zou zijn die haar best doet om de aardse omstandigheden precies goed voor de mens te laten zijn, berust in feite op een verkeerd begrip van de veronderstellingen waarvan Lovelock is uitgegaan. Zijn idee is dat de biosfeer een zelfregulerend systeem is dat het vermogen heeft om 'onze' planeet gezond te houden door een besturing van het chemisch en fysisch milieu. Wanneer Lovelock het over 'zij' heeft bedoelt hij daar niet mee dat Gaia een persoonlijkheid zou zijn, net zo min als dat, *in het Engels*, bij een schip het geval is. Men kan de manier waarop Gaia kan optreden het best vergelijken met wat wij onbewust doen, zonder ons verstand daarbij te gebruiken.

In deze context is de manier waarop wij onze lichaamstemperatuur min of meer op een plezierige 37 °C houden, het aardigste voorbeeld. Lovelock heeft er plezier in om te beschrijven hoe een combinatie van twee verschillende soorten van rillingen, zweten, de produktie van warmte door de verbranding van voedsel en de aanpassing van de bloedstroming door de vaten dichtbij het oppervlak van ons lichaam er voor zorgt dat de lichaamstemperatuur constant blijft, ook al varieert de buitentemperatuur van 0 °C tot boven 37 °C. Strikt genomen (en zoals het blijkt, terecht) geldt deze 'constante' lichaams-temperatuur alleen maar voor de kern van een menselijk wezen, de romp van het lichaam en het hoofd, waarin zich de vitale organen bevinden. De huid, de handen en voeten moeten zich maar zo goed mogelijk zien te redden over een veel grotere spreiding van temperaturen. En dat gebeurt allemaal vanzelf zonder dat we er ook maar een moment aan hoeven te denken.

Lovelock zegt dat Gaia met net zo'n gemengde verzameling van mechanismen werkt om de temperatuur van de aarde ruwweg stabiel te houden. Ik kies maar twee voorbeelden. Toen de aarde nog jong was en de zon koeler dan nu, was de atmosfeer dikker en het broeikaseffect sterker, zodat de oppervlaktetemperaturen nog hoog genoeg waren voor het bestaan van water en zo ontwikkelde zich leven in de plassen van vloeibaar water. Toen de zon warmer werd, verbreidde het leven zich en ontleende het koolstofdioxide aan de lucht. Het broeikaseffect nam af en de aardtemperatuur bleef vrijwel gelijk zonder tot het kookpunt van water op te lopen. Thans is er minder koolstofdioxide in de atmosfeer als tegenwicht voor de warmere zon. Als de zon nog warmer wordt dan is het mogelijk dat een toegenomen biologische activiteit, speciaal in de oceanen, de verbreiding van wolken kan versterken. Het is bekend dat micro-organismen in de bovenste lagen van de oceaan dimethylsulfide (DMS) produceren dat ontsnapt naar de atmosfeer. DMS in de lucht leidt tot het ontstaan van kleine deeltjes die de kerntjes of nucleï zijn voor de vorming van wolkendruppels. Meer zonne-energie betekent meer DMS en dat betekent weer

een groter wolkendek en minder zonne-energie die de zee bereikt, een stabiliserende, negatieve terugkoppeling, precies het omgekeerde van de soort van op hol slaande positieve terugkoppeling, die in Mahlman's griezelige scenario werd voorzien. En dat alles wordt gedaan zoals het lichaam zichzelf warm houdt, zonder enige bewuste gedachte. Zo kun je jezelf ook afvragen, als je net zo'n geest hebt als Lovelock, waarom de atmosfeer van onze planeet precies 21 procent zuurstof zou bevatten en niet 15 of 30 procent. Een eenvoudige rekensom lost deze puzzel op. De belangrijkste bron van de zuurstof in de lucht, zegt Lovelock, is het begraven van een klein gedeelte van de koolstof die ieder jaar door groene planten en algen (uit koolstofdioxide) wordt gebonden. Als al het oorspronkelijke materiaal zou vergaan dan zou alle koolstof weer in koolstofdioxide overgaan. Maar omdat ieder jaar een klein gedeelte van de organische koolstof wordt begraven, blijft er zuurstof over in de atmosfeer en dat bouwt zijn concentratie op naarmate de aeonen verstrijken. Maar dat kan niet eindeloos doorgaan. Zuurstof is chemisch gesproken een zeer gevaarlijk element. Het is alleen maar omdat we er zo aan gewend zijn, dat het ons niets kan schelen om te ademen in een atmosfeer die 21 procent zuurstof bevat. Als het spul net zou zijn uitgevonden, zouden er allerlei veiligheidsvoorschriften aan verbonden worden, en zo'n hoge concentratie (meer dan we nodig hebben om prettig adem te halen) zou zeker niet worden toegestaan.

De concentratie ligt inderdaad net op de voor leven veilige bovengrens. Zelfs een kleine toename -bijvoorbeeld tot 23 procent- zou zeker tot gevolg hebben dat door bliksem veroorzaakte bosbranden zich snel zouden uitbreiden tot loeiende vlammenzeeën die het grootste deel van de tegenwoordige landvegetatie zouden verzwelgen, zoals Lovelock het uitdrukt, van de tropische regenwouden tot de arctische toendra.

Wat zou het gevolg daarvan zijn? Wel, natuurlijk een reductie van de hoeveelheid vrije zuurstof in de lucht en een verhoging van het gehalte aan koolstofdioxide! In deze tijd vinden er inderdaad bosbranden plaats, maar niet op zo'n alles verslindende schaal. In feite net genoeg om te zorgen dat het zuurstofgehalte van de atmosfeer onder de kritieke waarde blijft en het leven op het aardoppervlak redelijk comfortabel kan doorgaan.

Er zijn meer voorbeelden, maar u hebt het nu wel begrepen. Gaia regelt de omstandigheden automatisch en onbewust. 'Ze' zorgt niet speciaal voor ons. De analogie van de temperatuur is vooral toepasselijk, want, net zo als het menselijk lichaam, heeft Gaia ook een kern -in de breedten van de tropen en de subtropen- waar het leven zich vermenigvuldigt en waar de condities in hoofdzaak dezelfde blijven, zelfs in ijstijden. Het zijn alleen de extremiteiten -in 'haar' geval de gematigde zones en de polen- die extreme veranderingen ondergaan.

De doemdenkers wijzen soms op de ozonlaag als de zwakste schakel in het overlevingssysteem van Gaia en ze hebben tot op zekere hoogte gelijk. Maar alleen tot op zekere hoogte. Als de hele ozonlaag zou worden weggenomen zou dat erg slecht nieuws voor ons zijn en voor de meeste levensvormen die het aardoppervlak bewonen. Maar het leven zou nog in de oceanen doorgaan en op den duur zou Gaia zich herstellen. Ze heeft zich tenslotte in het verleden van vergelijkbare catastrofes

hersteld, zoals de gebeurtenissen, wat die ook mogen zijn geweest, die 65 miljoen jaar geleden tot de dood van de dinosaurussen hebben geleid. Wij menen dat het een ramp zou zijn als het mensdom van de aarde zou worden weggevaagd. Maar bekijk het eens van de andere kant. Vandaag is de mensheid hard bezig om tropische wouden te vernielen die de kern van Gaia vormen; we veranderen het klimaat door het broeikaseffect; en we vernietigen ozon in grote hoeveelheden, ten minste boven Antarctica. Deze gevolgen vormen samen een ramp voor de andere levensvormen op aarde die even groot is als de uitroeiingen die 65 miljoen jaar geleden hebben plaatsgevonden. Vanuit het 'gezichtspunt' van Gaia zou de vernietiging van de mensheid wel eens een goed ding kunnen zijn.
Lovelock vatte zijn zienswijze heel rustig in Berlijn, bij een kopje koffie, voor me samen. Hij zei: "De houding van de mensen is soms dat Gaia wel voor ons zal zorgen. Maar dat is een misverstand. Als het begrip al enige inhoud heeft, dan betekent het dat Gaia voor zichzelf zal zorgen. En de beste manier voor haar om dat te doen zou wel eens kunnen zijn dat ze zich van ons zou ontdoen". Die gedachte is net zo griezelig als die waar Mahlman mee voor de dag kwam en die versterkt de conclusie, die in het licht van de bewijzen die in 1987 boven Antarctica zijn verzameld al onontkoombaar was, dat voor de bescherming van de ozonlaag de tijd van handelen is gekomen.

Literatuur

C.J.F. Böttcher - Het Gaia-systeem en de Gaia-hypothese - *Chemisch Weekblad* p.45-47 (Jan 1980)
F. Pearce - A hero for the greens? - *New Scientist*, pp.63-64 (23 Sept. 1989)
J.E. Lovelock - Hands up for the Gaia-hypothesis - *Nature*, p.100-102 (8 March 1990)
G.W. Kirchner - Gaia metaphor unfalsifiable - *Nature*, p.470 (7 June 1990)

Hoofdstuk acht

8.1 Strategieën voor actie

Tegen de herfst van 1987 was er geen reden meer om eraan te twijfelen dat het probleem van de ozonuitputting wezenlijk en urgent was en dat het grotendeels door de uitstoot van CFK's was veroorzaakt. Halverwege de jaren zeventig waren de meeste wetenschappers nog voorzichtig wat betreft de noodzaak van actie. Een verbod van het niet-noodzakelijke gebruik in spuitbussen leek een passend, voorzichtig antwoord op de vragen die door Rowland en Molina over de noodzaak van actie waren gesteld -per definitie zou het stoppen met niet noodzakelijke uitstoot niet al te veel last veroorzaken. Maar heel weinig mensen drongen aan op een volledig verbod van deze produkten, omdat er nog geen directe schade aan het milieu was geconstateerd. Maar toen die constatering er wel was, reageerden veel wetenschappers onmiddellijk en begrijpelijk, met oproepen tot een drastischer actie.

In één van een reeks interviews die door het tijdschrift Omni werden gemaakt net voor het Airborne Antarctic Ozone Experiment, en die werden gepubliceerd toen de onderzoekers nog in Punta Arenas waren, zei Jim Anderson van Harvard University (één van de wetenschappers die een experiment aan boord van de ER-2 onder zijn hoede had) "dat hij was geschokt over de manier waarop de politieke wereld op dit alles had gereageerd", en hij hekelde de politici omdat ze geen aandacht aan het probleem hadden besteed voordat het gat was ontdekt en vervolgens in complete paniek rondrenden nadat het gat was gevonden. Terugverwijzend naar de uitspraken die in de debatten van de jaren zeventig waren gedaan, toen de industrie had betoogd dat het aan de wetenschappers was om te bewijzen dat de CFK's schadelijk waren, zei hij verder: "Als lid van de mensheid is het mijn stellige mening dat chemische stoffen schuldig zijn totdat hun onschuld is bewezen". Het ging er uiteraard om, dat alles wat op het milieu wordt losgelaten, zou moeten worden onderworpen aan dezelfde strenge eisen, maar dan op milieugebied, als waaraan alle nieuwe geneesmiddelen worden getoetst voordat ze op de bevolking worden toegepast. We zullen er zeker van moeten zijn dat deze milieu 'middelen' geen verkeerde effecten op Gaia hebben

In dezelfde reeks van interviews gaf Bob Watson zijn mening: "Als we vinden dat de ozon in het Zuidpoolgebied aan het afnemen is en dat die afname een voorloper is van het ozonverval in de wereld, dan zullen we een manier moeten vinden om onmiddellijk van de CFK's af te komen en dat betreft al hun toepassingen behalve de meest essentiële, zoals koeling". En in de Observer van 6 september was het Joe Farman, de wetenschapper die het gat boven Antarctica had gevonden, die boos reageerde op de toon van een perscommuniqué dat was uitgegeven samen met een officieel UK-rapport over de ozonlaag, dat mede door hem was opgesteld. Dat

communiqué, dat door het ministerie van Milieu was opgesteld zonder daarbij de auteurs van het rapport te raadplegen, had gesuggereerd dat de CFK's niet zo'n ernstig probleem waren en dat was de aanleiding tot een kop boven een krantenverslag over het rapport, waarin stond: "Spuitbussen doen niet veel kwaad aan de ozonlaag". In zijn reactie wees Farman erop dat er in het rapport niets van dien aard te lezen was en dat er juist in werd geconcludeerd dat de ozonuitputting in de loop van twintig tot dertig jaar 'aanzienlijk' zou zijn. Maar in ieder geval -aldus Farman in de Observer- was het rapport al weer achterhaald door nieuwe bewijzen, waaronder het recente onderzoek in Antarctica, en hij riep op tot een zo snel mogelijke reductie van de CFK-uitstoot met 85 procent*. Mijn eigen exemplaar van het rapport was toen al doorgegeven aan een collega in de Verenigde Staten. Twee dagen nadat het commentaar van Farman in de Observer was verschenen, probeerde ik bij de uitgevers van het rapport, H.M. Stationery Office, nog een tweede exemplaar te bemachtigen. Het was uitverkocht. Het bleek dus dat het Britse publiek meer belangstelling had voor en bezorgd was over het probleem van het ozonverval, dan zijn eigen regering.
Dit alles ging vooraf aan de ontijdige Montreal-conferentie, maar toen het september 1987 werd, was het met de wetenschappelijke inbreng bij de besprekingen die uitliepen op de internationale overeenkomst over CFK-uitstoot, praktisch afgelopen. Toen waren de discussies geheel in handen van de politici en wat er uit die conferentie tevoorschijnkwam was, hoewel tenminste een stap in de goede richting (nou ja, bijna, een cynische commentator noemde het een 'pasje'), een meesterwerk van onduidelijkheid en compromissen, zo vol achterdeurtjes dat het moeilijk te schatten was wat voor effect het op de lange duur zou hebben.
We moeten terug naar de hondsdagen van het Carter-regime in Washington om te begrijpen hoe zo'n achterhaalde overeenkomst juist tot stand kon komen op het moment dat de wetenschappers al het bewijsmateriaal hadden bekeken en afgewogen, en toen hadden besloten dat een grootscheepse vermindering van de CFK-produktie noodzakelijk was.

8.2 Het broddelwerk van Montreal

Laat in de jaren zeventig leek het erop dat men het CFK-probleem onder controle had. De wetgeving in de Verenigde Staten had het gebruik van spuitbussen drastisch beperkt en er was een vrijwillige overeenkomst in de Europese Gemeenschap om het gebruik van spuitbussen met 30 procent vanaf het 1976-niveau omlaag te brengen. De uitstoot van CFK's naar de atmosfeer nam af -landen die aan de Chemical Manufacturers Association rapporteren (vrijwel de hele technisch ontwikkelde

* Niet alle kranten waren in die val gelopen. De Guardian van 7 augustus bracht zijn verslag onder de kop "Wetenschappers geven de aerosolen de schuld van het ozongat" (zij bedoelden spuitbussen, natuurlijk). Uit de mond van Farman, het voorbeeld van een voorzichtige en nuchtere wetenschapper, werd opgetekend: "We zullen behoorlijk snel met 85 procent omlaag moeten".

wereld behalve de Sovjet-Unie), vertoonden tussen 1974 en 1982 een terugloop van 26 procent in de produktie van F-11 en F-12. Maar ander gebruik bleef toenemen en milieumensen probeerden aan het eind van de jaren zeventig een actie op gang te brengen die moest voorkomen dat hierdoor weer alles werd teniet gedaan wat met de beperking van spuitbusuitstoot was bereikt. In oktober 1980 stelde de EPA een voorstel op om de produktie van CFK's in de Verenigde Staten op de toen aanwezige niveaus te bevriezen. Maar ten gevolge van de regeringswisseling in 1981 kwam daar toen niets van. In april 1980 had het United Nations Environment Program (UNEP) een beroep op de regeringen gedaan om het nationaal gebruik en de produktie van CFK's te verlagen. Naar dit beroep werd niet geluisterd, maar in mei 1981 bracht UNEP een groep van juridische en technische experts bijeen met de opdracht om een overeenkomst voor de bescherming van de ozonlaag op te stellen. Werkend met de voor zulke commissies gebruikelijke snelheid leidde dit toch tot de Weense Conventie, die in maart 1985 door twintig landen werd getekend. (Het artikel van Farman waarin hij de ontdekking van het ozongat meldde, was toen nog bij Nature en zou pas twee maanden daarna in druk verschijnen).

In de conventie die later nog door andere landen werd getekend, stond feitelijk niet veel, alleen maar een paar algemeenheden. Maar die waren zeer goed geformuleerd. In eenentwintig artikelen werd uitvoerig uiteengezet dat staten de verplichting hadden om die activiteiten in de hand te houden die "ongunstige gevolgen hebben of kunnen hebben" op de ozonlaag en dat zij behoorden samen te werken bij het wetenschappelijk onderzoek naar de problemen die waarschijnlijk door produkten zoals CFK's worden veroorzaakt. In twee technische bijlagen werd uiteengezet welke soort van onderzoek en informatie nodig zou zijn; een van de weinige onmiddellijk tastbare voordelen was dat de Sovjet-Unie voor het eerst cijfers over CFK-produktie bekend maakte.

Ondertussen werd er door twee groepen van landen steeds sterker op actie aangedrongen: Zweden, Noorwegen en Finland drongen samen aan op algemene beperking van CFK's en de Verenigde Staten, Canada en Zwitserland voerden een gezamenlijke actie om tot uitbanning van elk spuitbusgebruik te komen (de Zwitsers werden in de jaren tachtig steeds bezorgder omdat metingen vanaf de grond wezen op een verdunning van de ozonlaag boven hun land). Onder de paraplu van de UNEP ging in 1986 het werk van commissies en overleggroepen door tot in 1987. Aan de wetenschappelijke kant liepen deze uit op de conferentie van Würzburg in april 1987. Uit de computermodellen die op die conferentie werden behandeld, kon worden afgeleid dat tegen het jaar 2050 over de hele wereld een gemiddelde ozonreductie van minder dan 2 procent zou optreden, wanneer de uitstoot van chloor- en broomhoudende verbindingen op de voor 1990 verwachte niveaus zou worden gehandhaafd. Uiteraard zijn deze voorspellingen nu in schrille tegenstelling met de feitelijke metingen die door Heath en Angell zijn verricht en ze gaan volledig voorbij aan het Antarctische gat. Maar ze waren wel de uitgangspunten voor de politieke besprekingen.

Veel minder aandacht werd besteed aan de voorspellingen die op een heel ander en in sommige opzichten veel realistischer scenario waren gebaseerd. In 1987 schatte

men dat een kwart van alle CFK's door ontwikkelingslanden werd geproduceerd. De modelspecialisten in Würzburg maakten eerst een optimistische calculatie. Indien deze produktie van de ontwikkelingslanden met 2,5 procent per jaar zou toenemen, terwijl de technisch ontwikkelde wereld zijn produktie tot de helft zou terugbrengen, zou in 2060 in totaal dezelfde hoeveelheid CFK's worden geproduceerd en het ozonverval zou dan 6 procent bedragen. Als een realistischer geval (hun eigen woordkeus) behandelde men een wereld waarin slechts 80 procent van de geïndustrialiseerde landen zou zijn overeengekomen om de produktie van F-11 en F-12 op de niveaus van 1986 te bevriezen, terwijl in de rest van de wereld een onbeperkte toename zou optreden. Voor 2060 zou dit leiden tot een verlies van 16 procent van de ozonlaag. Al deze berekeningen zijn uitgevoerd met computermodellen die al of niet nauwkeurige uitbeeldingen van de werkelijkheid zijn, maar geen enkel model hield rekening met het optreden van niet-lineariteiten of van heterogene chemische processen.

Het politieke debat dat tegen het voorjaar van 1987 op gang kwam en dat op een scheldpartij begon te lijken, scheen zich van deze tamelijk sombere voorspellingen niet veel aan te trekken -hoewel de Verenigde Staten, in de persoon van Richard Benedick, een Deputy Assistant Secretary of the environment, tegen Engeland en Frankrijk uitvoer omdat ze "meer geïnteresseerd waren in voordeel op korte termijn dan in bescherming van het milieu voor de toekomstige generaties" (New Scientist, 5 maart 1987, p.17). Tegen die tijd liepen de Verenigde Staten, met name het enorme bedrijf Du Pont, voorop in de ontwikkeling van CFK vervangende stoffen. Dientengevolge luidde de tegenbeschuldiging dat al die zorg om het milieu alleen maar een rookgordijn was en dat Amerika in feite een verbod van CFK's wilde om met die vervangende middelen de volledige markt te kunnen veroveren. Maar binnen Europa werd Engeland steeds meer verweten dat het niet met de rest van de gemeenschap wenste op te trekken. Bij de onderhandelingen die moesten leiden tot de vaststelling van een protocol voor de beperking van CFK-uitstoot, onder de Weense Conventie, wilde de Europese Gemeenschap met één stem spreken, en verschillende landen van de Europese Gemeenschap gaven hun ergernis te kennen over de Engelse weigering om ook maar enige verlaging te sanctioneren. Eerst moesten de Europese landen onderling tot een compromis zien te komen voordat hun vertegenwoordigers aan de UNEP-bijeenkomsten konden deelnemen, waar dat compromis weer een uitgangspunt moest leveren voor de onderhandelingen over verdere compromissen met andere landen, waaronder de Verenigde Staten.

Toen de ondertekenaars van de Weense Conventie in begin mei 1987 te Genève bijeenkwamen om een ontwerp-protocol op te stellen zagen de vooruitzichten op een doeltreffende slotovereenkomst er nog slecht uit. Engeland bood nog steeds weerstand en hield daarmee ook de Europese Gemeenschap tegen (die in de onderhandelingen twaalf stemmen kan uitbrengen, maar die met één mening naar voren wil komen). Landen als India, Zuid-Korea en China namen helemaal niet aan de bijeenkomst deel. En het compromis waar de betrokken landen zo langzamerhand opaangingen, was een slap geval waarin voorzien werd in een omlaagbrengen van de CFK-produktie in twee stappen vanaf de niveaus van 1986 en dan alleen nog

maar wanneer genoeg landen het protocol zouden ondertekenen. De Europese Gemeenschap had bezwaar tegen de tweede stap en stemde voor een enkele reductie van 20 procent vanaf de niveaus van 1986 (terwijl een reductie van 85 procent nodig is om alleen maar te voorkomen dat de concentratie van CFK's in de atmosfeer nog zal toenemen). Het zag er twee maanden lang naar uit dat dit de rots zou zijn waarop de overeenkomst zou vastlopen; maar in juli veranderde Engeland plotseling haar houding en gaf haar steun aan de tweede ronde van reducties en stelde daarmee de Europese Gemeenschap in staat om zich daar ook achter te scharen.
Die verandering van het Engelse standpunt werd toentertijd voorgesteld als een overwinning voor de jonge milieuminister William Waldegrave, van wie bekend was dat hij persoonlijk bezorgd was over de bedreiging voor de ozonlaag. Meer cynische beoordelaars zijn van mening dat de Verenigde Staten en Duitsland Engeland met zware machtsmiddelen in beweging hadden gebracht, en dat de Engelse regering besefte dat er wel iets moest worden gedaan aan haar imago. Dat slechte imago was te wijten aan een vreselijke staat van dienst op milieugebied, zoals zure regen. Bovendien beseften de Engelsen dat het vrijwel niets zou kosten om het gebruik van CFK's te beperken, terwijl het omlaagbrengen van de uitstoot van zwaveldioxide door centrales miljarden zou kosten. En nu de verkiezingscampagne aan de gang was zou wat goeie milieupubliciteit toch ook geen kwaad kunnen, nietwaar?
Wat dan ook de redenen mochten zijn geweest, deels dankzij de Britse ommezwaai was er echt goede hoop bij de onderhandelingsdelegaties van de drieëndertig landen die op weg gingen naar Montreal om daar op 8 september 1987 aan een ronde van besprekingen te beginnen waar een beperking van de CFK-uitstoot moest worden overeengekomen. Zoals bekend vlogen op datzelfde moment de onderzoekingsteams vanuit Punta Arenas het zuidpoolgebied binnen. Na alle uitstel en tegenslag die aan de Montreal-conferentie voorafgingen is het totaal onbegrijpelijk voor de niet-ingewijde dat de conferentie niet een paar weken of maanden werd uitgesteld zodat ook met de nieuwe bevindingen rekening zou kunnen worden gehouden. Al bijna even onbegrijpelijk waren de opmerkingen van Donald Hodel Secretary van de U.S. Department of the Interior, die in de eerste week van september werden bekend gemaakt toen de Montreal-besprekingen net zouden beginnen. Hij zei dat de regering eerder de Amerikanen zou aanmoedigen om "hoeden en zonnebrillen te dragen en zonnecrème te gebruiken" dan dat men de industrie zou dwingen om over te gaan op vervangingsmiddelen voor de CFK's. Het is dat soort opmerking van zo'n soort politicus die je bijna tot de verdenking brengt dat er bepaalde deelnemers waren die er in september 1987 plotseling opuit waren er een krachteloze Montreal-overeenkomst doorheen te jagen, voordat de nieuwe gegevens uit Punta Arenas zouden binnenkomen en tot scherpere beperkingen zouden dwingen.
Het hoeft nauwelijks te worden gezegd dat er nog heel wat hindernissen moesten worden genomen voordat men het in Montreal over het verdrag eens was geworden. Ik zal u de details besparen. Waar men het ten slotte over eens werd en wat door de vertegenwoordigers van zevenentwintig landen werd ondertekend op 16 september (precies twee weken voordat Bob Watson en zijn collega's met hun eerste resultaten van het Airborne Experiment kwamen) voorzag ogenschijnlijk in een reductie van

50 procent in de uitstoothoeveelheid aan CFK's, uitgaande van de niveaus van 1986 (niet alleen F-11 en F-12 maar ook F-113, F-114 en F-115). Dat zag er dus goed uit in de eerste verslagen van de overeenkomst. En het gebruik van halonen die veel in blusapparaten worden toegepast, moet binnen vier jaar nadat de overeenkomst in 1989 van kracht geworden is, aan het bereikte maximum worden gebonden. Dat was allemaal goed nieuws. Maar als men de kleine lettertjes goed bekeek, dan bleef er nog heel wat te wensen over. In de eerste plaats moeten de beperkingen in drie stappen worden gerealiseerd. In 1990 moet het verbruik van CFK's door de ondertekenende landen op de niveaus van 1986 worden beperkt. In 1994 zal het verder met 20 procent worden teruggebracht, en nog later (misschien tegen 1999) zal er nog weer eens 30 procent van de getallen voor 1986 worden afgedaan. Maar volgens een van de compromissen die in Montreal werden gesloten mag de produktie van CFK's in 1990 tot 110 procent van de 1986 niveaus zijn gestegen, gevolgd door een daling tot 90 procent van die niveaus tegen 1994 en tot 65 procent tegen 1999. Deze extra produktie is voor export naar de ontwikkelingslanden, blijkbaar om de bouw van eigen CFK-fabrieken aldaar te ontmoedigen, want dat zou het probleem maar verergeren.

Het verdrag treedt op 1 januari 1989 in werking, aannemende dat tegen die tijd ten minste elf landen waarin gezamenlijk tenminste twee derde van het wereldverbruik van CFK's plaatsvindt, de overeenkomst zullen hebben bekrachtigd (als het u nu allemaal niet meer zo duidelijk is kunt u de schuld daarvan aan Ronald Reagan geven; in een ommezwaai die net zo merkwaardig is als die van Engeland, eiste de Verenigde Staten plotseling bij de voorbereiding van Montreal dat de landen die verantwoordelijk waren voor 90 procent van de uitstoot het verdrag moesten hebben getekend voordat het van kracht zou worden; die twee derde is weer een compromis). De werkelijk verbazingwekkende prestatie is dat zoveel landen het eens konden worden over een internationaal verdrag ter bescherming van het milieu -een historisch novum waar Mostafa Tolba, executive director van UNEP, terecht trots op is. Om met Dr. Johnson te spreken: "Het mirakel is niet dat het een goed verdrag is, maar dat het er is". De tragedie is dat de verwachtingen die we van het internationale politieke proces hebben zo laag zijn dat zo'n zwakke overeenkomst als een triomf wordt beschouwd, zoals een hondje dat op z'n achterpoten loopt. Maar er is toch één straaltje hoop en dat is dat het verdrag voorziet in een periodieke herwaardering van de situatie in het licht van nieuwe wetenschappelijke feiten. Dit zal waarschijnlijk voor het eerst plaatsvinden in 1990 (hoewel Tolba het recht heeft om een spoedbijeenkomst voor de herwaardering bijeen te roepen wanneer nieuwe feiten daar aanleiding toe geven; het zou zeker terecht zijn als hij dat deed zodra de gegevens van het Airborne Experiment officieel in april 1988 zullen zijn gepubliceerd). Men kan zich moeilijk indenken dat zo'n bijeenkomst de voorwaarden van de Montreal-overeenkomst niet aanmerkelijk zou aanscherpen. Maar wie er toezicht moet houden op de uitvoering van de overeenkomst, zelfs in zijn huidige vorm, en de mogelijke overtreders ter verantwoording moet roepen, is nog niet duidelijk. Onderwijl blijven CFK's de lucht instromen en de vernietiging van ozon gaat voort. Kan er ook iets in het meer persoonlijke vlak worden gedaan?

8.3 CFK's vandaag

Volgens het beginsel 'ken je vijand' is het eerste wat er nu gedaan moet worden: nagaan waar vandaag de CFK's het meeste worden gebruikt. Hoewel de Verenigde Staten, Canada en Zweden de meeste toepassingen van CFK's in spuitbussen hadden verboden, maakte deze toepassing in het midden van de jaren tachtig nog een derde van het wereldgebruik van F-11 en F-12 uit, ten minste wat de landen betreft die aan de Chemical Manufacturers Association rapporteren, en die vertegenwoordigen ongeveer 85 procent van de geschatte wereldproduktie. Samen zijn deze twee CFK's verantwoordelijk voor 70 procent van alle uitstoot en dan komt er nog eens 12 procent (en dat neemt snel toe) van F-113 bij dat alom wordt gebruikt als oplosmiddel voor de ontluikende microchip-industrieën van landen als Zuid-Korea. F-12 wordt in grote hoeveelheden in de Verenigde Staten en Japan gebruikt, als procesvloeistof in air-conditioners van auto's en de belangrijkste toepassing van F-11 ligt tegenwoordig in de produktie van schuim.

Verbazend grote hoeveelheden F-12 gaan bij de airconditioners van auto's verloren. In 1985 produceerde de Verenigde Staten 150.000 ton aan F-12, waarvan een derde voor deze systemen werd gebruikt. Dertig procent van de vloeistof in deze systemen gaat verloren door 'routinelekkages' en de helft ontsnapt tijdens onderhoudsbeurten. De rest komt vrij als de eenheden ten slotte worden gesloopt.

Zowel F-11 als F-12 worden in koelkasten gebruikt en behoren daarin ook veilig te zijn opgesloten en geen problemen te veroorzaken. Maar ook deze eenheden gaan aan het eind van hun nuttige leven naar de sloop (of wanneer ze de eigenaren gaan vervelen en die een ander model aanschaffen) en dan komen de CFK's dus vrij.

Hoewel de belletjes in uw styrofoam beker of hamburgerbakje ook uit F-11 kunnen bestaan is dat opgesloten gas geen belangrijk gevaar voor de ozonlaag, want daarvan ontsnapt maar heel weinig. Wat wel een probleem is, is de hoeveelheid F-11 die ontsnapt tijdens de produktie van schuimplastic. Dat verbruik van CFK's neemt snel toe. De helft van de 83.000 ton aan F-11 die in de late jaren tachtig elk jaar in de Verenigde Staten wordt geproduceerd, wordt verwerkt bij de produktie van stijve schuimplasticplaten en verpakkingen (samen met 11 procent van de F-12 produktie) en in Engeland verwachten de producenten van de zogenaamde geëxpandeerde plastics een toename van 10 procent in 1987.

Zoals deze voorbeelden laten zien zijn er enorme mogelijkheden om de hoeveelheid CFK's die in de atmosfeer terechtkomen te verkleinen eenvoudig door de bestaande gebruiksmethoden efficiënter te maken. Dat betekent beheersing van de uitstoot door fabrieken die schuimplastic maken, een betere afdichting van airconditioners en recycling van CFK's wanneer eenheden worden gesloopt. Helaas kunnen CFK's zo goedkoop worden gemaakt dat er in het verleden geen enkele aanleiding was om deze technieken te ontwikkelen. Een voor de hand liggende manier om zo'n aanleiding te creëren is om belasting op CFK's te heffen; dat zou nog een tweede voordeel hebben wanneer het zo verkregen geld aan de ontwikkeling van vervangende chemicaliën zou worden uitgegeven.

Een paar totaalcijfers (ontleend aan de publikatie 'Into the Void?' van de Friends of the Earth, maar oorspronkelijk afkomstig van de Chemical Manufacturers

Association) kunnen een beeld geven van de belasting van de atmosfeer door CFK's. In totaal werd in 1985 meer dan 700.000 ton aan F-11 en F-12 losgelaten in de atmosfeer. Op dat tijdstip had de totale geproduceerde maar nog niet losgelaten hoeveelheid ('geborgen' in schuim, koelkasten en airconditioners) ongeveer 1.600.000 ton bereikt, ruim twee maal de jaarlijkse uitstoot. Binnen de Europese Gemeenschap werden in 1985 370.576 ton aan CFK's geproduceerd. Jaarlijks zou nog de helft meer kunnen worden geproduceerd zonder dat er een extra fabriek zou hoeven te worden gebouwd -een reden waarom sommige leden van de Europese Gemeenschap er zo op waren gebrand dat er nog een toename van de produktie boven de 1986 niveaus zou worden toegelaten om de export naar andere delen van de wereld mogelijk te maken. Tweederde van deze produktie werd in 1985 binnen de Europese Gemeenschap verkocht, de rest werd geëxporteerd. In vergelijking met de snelheid waarmee de Verenigde Staten in de jaren zeventig hebben gehandeld is het wel opvallend dat 129.641 ton, bijna 35 procent, in spuitbussen ging. Hier is nog een terrein waar tegen geringe kosten en zonder iemand schade te doen, onmiddellijk en doeltreffend actie kan worden ondernomen.

Neemt men de Europese Gemeenschap als een geheel dan blijkt het jaarlijkse CFK-verbruik op 815 gram per persoon te liggen; in de Verenigde Staten is het vergelijkbare cijfer 900 gram en in de gehele wereld net 200 gram. Daar ligt voor de toekomst inderdaad de kern van het probleem. Naarmate andere landen zich economisch verder ontwikkelen zullen ze CFK's in toenemende hoeveelheden willen toepassen. Zo zijn bijvoorbeeld India en China, met hun enorme mensenaantallen, druk bezig met de ontwikkeling van hun koelkastenindustrie. In de poging om de behoefte aan een 'eerlijk aandeel' te erkennen betogen sommige mensen dat de technisch ontwikkelde landen hun hoofdelijk verbruik van CFK's moeten halveren, terwijl men de ontwikkelingslanden moet toestaan hun verbruik tot hetzelfde niveau op te voeren. (De overeenkomst van Montreal gaat halverwege in die richting; ze verplicht de ondertekenaars op den duur tot een verlaging van 50 procent, maar er is geen zeggenschap over de snelheid waarmee de niet-ondertekenaars hun eigen CFK-industrieën ontwikkelen.) Het is zeker niet 'eerlijk' dat tot nu toe maar een klein deel van de wereldbevolking de voordelen van CFK's heeft genoten, maar door iedereen een 'eerlijk aandeel' te gunnen zal de uitputting van de ozonlaag niet kunnen worden gestopt. Dat is alleen mogelijk bij een onmiddellijke en blijvende reductie van 85 procent. En dat zal niet gebeuren tenzij heel veel mensen veel meer lawaai over dit probleem gaan maken.

8.4 Lokale tactieken

In de Montreal-overeenkomst staat uitdrukkelijk dat niets de ondertekenaar weerhoudt desgewenst de verlaging van de CFK-uitstoot verder door de voeren dan de niveaus die door het protocol worden voorgeschreven. Voor de regering van welk land dan ook is de meest waarschijnlijke aanleiding tot zo'n actie de druk van de publieke opinie die tot uitdrukking kan komen in aantallen stemmen, in lobby-activiteit of, zoals in de jaren zeventig in de Verenigde Staten, doordat de mensen weigeren produkten te kopen die CFK's bevatten.

Het ligt voor de hand om met de spuitbussen te beginnen. De ervaring in de Verenigde Staten leert dat leven zonder de CFK-drijfgassen heel goed mogelijk is, en zoals in 1986 het rapport 'The sky is the limit' van het World Resources Institute het heeft uitgedrukt: "Iedere dollar die nu aan CFK's in spuitbussen wordt uitgegeven kan in de toekomst een dollar te weinig zijn voor veel belangrijker zaken". Ieder land zou onmiddellijk het Amerikaanse voorbeeld moeten volgen door alle spuitbussen met CFK's van een waarschuwing te voorzien en vervolgens het gebruik van CFK's als drijfgassen te verbieden. Onderwijl zijn de Friends of the Earth graag bereid om u uit hun kantoor in Londen (26-28 Underwood Street, London N1 7QT, United Kingdom) een gratis pamflet toe te sturen met een lijst van produkten die helemaal geen CFK's bevatten. *Ook de stichting Natuur en Milieu, Utrecht, en de vereniging Milieudefensie, Amsterdam, verstrekken dergelijke informatie.* Hoe meer mensen van zulke lijsten gebruik maken, hoe groter de economische druk zal worden op de producenten om daar gevolg aan te geven en nieuwe produkten op de markt te brengen. Nu de Verenigde Staten al voor zijn gegaan, is dat een volkomen pijnloze weg (maar laat men in de Verenigde Staten niet al te zelfvoldaan worden: de VS produceren nog steeds 30 procent van het wereldtotaal met inbegrip van de CFK's die worden uitgevoerd om elders in de wereld in spuitbussen te worden gebruikt).

Het is even belangrijk om waardering te tonen voor industrieën die in de goede richting gaan, als kritiek te hebben op degenen die dat niet doen. McDonalds', de 'fast-food chain', heeft in september 1987, ten tijde van de conferentie in Montreal een publiek succesje geboekt, door het besluit bekend te maken om hun schuimplastic verpakking, die met CFK's was gemaakt, ten minste in de Verenigde Staten, te vervangen door schuimplastic die er net zo uit ziet en die het voedsel net zo warm houdt, maar die met een ander gas is gemaakt. Die verandering moest in de loop van achttien maanden tot stand worden gebracht maar geldt dan nog niet voor de McDonald-restaurants buiten de Verenigde Staten. Misschien is het inderdaad in hoofdzaak een publiciteits-stunt maar het is zeker een stap in de goede richting. Van de elektronica-industrie kondigde Digital Equipment Corporation van Andover, Massachusetts en Salem, New Hampshire, in 1987 aan dat men al van een schoonmaakproces met CFK's was overgeschakeld naar een op water gebaseerd systeem. Over de bedreiging van de ozonlaag zei de woordvoerder: "We zijn van mening dat de gevolgen van een te zwakke reactie erger zijn dan de gevolgen van een overmatige reactie". Waarom kunnen anderen dat niet inzien en ook zo handelen? Zelfs binnen de Europese Gemeenschap wordt het scala van reacties getypeerd door de tegenstelling tussen het traineren van Engeland en de situatie in West-Duitsland waar spuitbusfabrikanten al zijn overeengekomen het gebruik van de schadelijkste stoffen, de volledige gehalogeneerde CFK's in 1988 met 75 procent en in 1989 nog eens met 10 procent van de niveaus van 1987 omlaag te brengen. De oorzaak is gewoon de druk van de publieke mening in een land waar milieupolitiek meetelt en de Groene Partij in de regering vertegenwoordigd is. Spuitbussen die geen CFK's bevatten, hebben in West-Duitsland al een etiket en het is gebleken dat dit de verkoop bevordert in vergelijking met andere merken.

In de landen waar het probleem wordt onderkend, verplaatst het zwaartepunt van de discussies over de beheersing en de beperking van CFK-emissies zich naar het overleg over de verschillende methoden om de produktie te beperken, en naar de vraag of bijvoorbeeld belastingen of vergunningen doeltreffender zijn. Zou een geleidelijke vermindering eerlijker (daar is dat woord weer) zijn tegenover de producenten dan een plotselinge beperking? Enzovoorts. Dat is alleen maar tijdverspilling. Waar het op aankomt is dat er gehandeld en wel snel gehandeld wordt. De industrie zal altijd klagen dat er nog vijf jaar voor nodig is om alternatieven te ontwikkelen. Dat heeft de industrie al sinds 1974 gezegd, terwijl men in stilte die alternatieven toch al ontwikkelde, voor het geval de regering tot actie zou besluiten. Twee nieuwe rapporten die na de Montreal-overeenkomst uitkwamen, illustreerden deze dubbelzinnige benadering. Kevin Fay, de directeur van de Alliance for Responsible CFC Policy, zei in Washington D.C.: "Dit gaat veel verder dan wat wij noodzakelijk achten" (nu kunt u wel raden wat voor een soort organisatie dat is en wat ze bedoelen met 'responsible'). Maar aan de andere kant kon u in de European Chemical News van 19 oktober 1987 een verhaal lezen dat op de omslag werd aangekondigd met de kop 'CFK -producenten kunnen met vervangende produkten aan de toenemende vraag voldoen'. In deze uitgave werd verteld hoe de producenten, met inbegrip van de twee reuzen, ICI in Engeland en Du Pont in de Verenigde Staten, plannen hadden ontwikkeld om hun produktie van HCFK-22, een verbinding die veel minder gevaar voor de ozonlaag oplevert dan F-11, F-12 of F-113, uit te breiden. Het verhaal ging verder met: "Du Pont heeft de mogelijkheden van HCFK-22 onderkend om als vervanger op te treden voor koeling, air-conditioning, drijfgas en schuimproduktie". Het is duurder dan F-11 en F-12, maar laat niemand u wijsmaken dat vervangingsmiddelen niet bestaan (overigens eindigde dit verhaal met de opmerking: "Andere vervangers die in aanmerking komen, zijn o.a. de HCFK 142-b en HFK 152-a, die op het ogenblik beide worden geproduceerd"). Op de werkelijk essentiële gebieden waar de CFK's zo nuttig zijn gebleken (bijvoorbeeld de koeling in ziekenhuizen en het schoonmaken van computerschakelingen) bestaan al goed toepasbare vervangingsmiddelen en die worden al voor de handel geproduceerd. Als alle niet essentiële toepassingen van de gevaarlijke CFK's met één klap worden verboden zou dat in feite niet meer dan een klein schokje voor een paar grote bedrijven betekenen, heel wat kleiner dan de slag die ze allemaal bij de beurskrach van 1987 te verduren kregen. En dat zou de technisch ontwikkelde landen een adempauze opleveren waarin ze de ontwikkelingslanden ervan zouden kunnen overtuigen (met verwijzing naar hun eigen reactie op het probleem) dat er werkelijk sprake is van een bedreiging van het wereldmilieu en waarbij men hun ook de vervangende produkten zou kunnen aanbieden. Du Pont en ICI zouden daar zelfs nog geld mee kunnen verdienen.

8.5 Morgen is het te laat

En laat niemand zich nog wijsmaken dat het probleem van de ozonuitputting er één is van een verhoogde kans op huidkanker voor mensen met een blanke huid. Dat is maar een ondergeschikt aspect van de zaak. Ik heb de omvangrijke gevolgen voor het

klimaat en het milieu al besproken. Als men alleen al naar het Antarctische gat kijkt, dan zijn de biologen steeds meer bezorgd over het lot van de fytoplankton onder de toenemende ultraviolette straling die daar het oceaanoppervlak bereikt. Sayed El-Sayed en zijn collega's van de Texas A&M University hebben ontdekt dat de activiteit van fytoplankton sterk afneemt bij een toenemende blootstelling aan ultraviolette straling. En natuurlijk hoor ik al iemand zeggen: "Als je één fytoplankton hebt gezien dan heb je ze toch allemaal gezien?" In werkelijkheid is fytoplankton het begin van de voedselketen waar vissen, schelpen en schaaldieren van afhangen. Maar wie kan nou eigenlijk de vissen (en de pinguïns) iets schelen? Mijn oog viel op een heel toepasselijke analogie in de Guardian van 27 november 1987: "Door de uitroeiing van de tsetse-vlieg, de veroorzaker van de slaapziekte, zijn in Afrikaanse landen moerasgebieden toegankelijk geworden voor ontginning en voor de veehouderij. Het wild dat immuun is voor die ziekte -antilopen, zebra's, buffels en vele andere- trekken zich in steeds kleiner wordende gebieden terug, terwijl hun vroegere gebieden door overbegrazing en door scherpe hoeven in snel tempo in woestijnen veranderen". "Dit is een van de verschrikkelijkste dingen die ooit in Afrika zijn gebeurd", zei Raoul du Toit van Zimbabwes Department of Park en Wildlife. Een ramp die zich ontwikkelt in het hart van Gaia, niet ver weg in de poolgebieden, en dat allemaal door een goed bedoelde poging om de tsetse-vlieg uit te roeien. Niemand kan voorspellen wat de gevolgen van schade aan de fytoplankton in Antarctica zullen zijn; maar die fytoplankton, aan het begin van de voedselketen in de oceanen, is voor Gaia veel belangrijker dan die vliegen.

De geschiedenis van het gat in de ozonlaag en zijn gevolgen voor de mensheid is nog lang niet afgesloten. Maar het lijkt passend om ten minste dit verslag van het proces te beëindigen met aanhalingen van twee van de belangrijkste deelnemers. Joe Farman, die het gat ontdekte, schreef in zijn artikel van 12 november 1987 in de New Scientist: "Niemand heeft dit ozonverval voorspeld. De les is duidelijk: het bestaande beleid ten aanzien van de produktie van CFK's is op een verkeerde veronderstelling gebaseerd en die is dat we de processen die de ozonlaag beheersen, zouden begrijpen. De laatste paar jaren hebben aangetoond dat we ze niet begrijpen". En Sherry Rowland wees er in zijn toespraak van 11 maart 1987 te Chapel Hill op dat "iedere overeenkomst die alleen maar betrekking zal hebben op Noord-Amerika, West-Europa en Japan al snel overvleugeld zal worden door het toenemend gebruik buiten deze gebieden. Als men zich inderdaad ten doel stelt te voorkomen dat de concentratie van de organische chloorverbindingen in de atmosfeer nog groter wordt dan die nu al het ozongat bij de Zuidpool heeft veroorzaakt, dan zal het bestaande verbruik, zonder enige uitzondering, met 95 procent omlaag moeten worden gebracht".

Farman wijst er op dat de overeenkomst van Montreal, als die al tot uitvoering wordt gebracht, ons vastlegt voor het jaar 2020 op een toename van chloor in de stratosfeer tot een niveau van drie maal het huidige gehalte en tien maal de concentraties van chloor die in de stratosfeer aanwezig waren voordat het gebruik van CFK's algemeen werd. Zelfs aannemende dat door een of ander wonder de uitstoot plotseling zou ophouden, dan komt Rowland nog tot de conclusie dat in de komende twintig jaren

de teruggang van de ozon nog steeds sterker zal worden en wel vanwege de grote levensduur van CFK's in de atmosfeer. Een levensduur van 120 jaar betekent dat 90 procent van de CFK-moleculen die zich in 1987 in de lucht bevinden, daar in het jaar 2000 nog aanwezig zullen zijn; in 2100 zal nog 39 procent over zijn en zelfs nog 7 procent in 2300. De schade aan de ozonlaag die we al hebben aangericht zal ons en onze kinderen en kleinkinderen vergezellen, door de 21e tot in de 23e eeuw.

Naschrift

Wanneer we nu, in augustus 1991 de jaren overzien die verstreken zijn nadat Gribbin zijn verhandeling afsloot, kunnen we gelukkig constateren dat dat 'ene straaltje hoop' dat Gribbin tussen de compromissen van Montreal kon ontwaren, namelijk het voorschrift van een periodieke herwaardering, alsnog tot een stevige ontwikkeling heeft geleid. In het jaar 1990 heeft de wereld niet alleen besloten tot een belangrijke aanscherping van het CFK-uitbanningsprogramma, maar ook hebben de geïndustrialiseerde landen hun verantwoordelijkheid aanvaard om de ontwikkelingslanden te helpen bij het opzetten van een koel- en isolatieindustrie die geen gevaar zal opleveren voor de dampkring. De nieuwe overeenkomst van Londen is in juni 1990 wereldwijd ondertekend en het is belangrijk dat ook de vertegenwoordigers van China en India hebben toegezegd dat ze hun regeringen zullen adviseren om de overeenkomst te ondertekenen (Herziening Protocol van Montreal, circulaire VROM en UNEP-Report of the second meeting of the parties to the Montreal Protocol).

Dat de wetenschappelijke herwaardering direct na Montreal zo krachtig is aangepakt is ongetwijfeld te danken aan de resultaten van het Antarctic Airborne Ozone Experiment, die aan alle betrokkenen hebben duidelijk gemaakt dat de ozonafbraak in de eerste plaats veroorzaakt wordt door chloor dat in de stratosfeer wordt losgemaakt uit door de mensen gefabriceerde gassen, vooral de CFK's. Bovendien vindt die ozonafbraak blijkbaar ook plaats in processen die geheel onverwacht en heftig kunnen optreden, zoals dat sinds het begin van de jaren tachtig bij de Zuidpool wordt gedemonstreerd.

De aanvankelijk afwerende houding van de CFK-producerende industrie zoals die tijdens de spuitbusoorlog tot uitdrukking was gekomen, was al eerder omgeslagen naar een actieve steun van de Chemical Manufacturers Association aan het gecoördineerd onderzoek, zoals bijvoorbeeld het Antarctic Airborne Ozone Experiment. Nu is dus iedereen het erover eens dat de reeds in de lucht opgehoopte hoeveelheid CFK's de 'reguliere' afbraak van ozon onvermijdelijk over een lang tijdvak zal doen voortduren en dat bovendien de CFK-concentratie al zo gevaarlijk hoog is opgelopen dat onverwachte calamiteiten zoals het ozongat kunnen optreden. De uitstoot van CFK's of liever gezegd, de uitstoot van potentiële leveranciers van chloor in de stratosfeer moet liefst onmiddellijk worden gestopt. Als vervangers mogen dan alleen stoffen worden toegelaten die de ozonlaag niet in gevaar brengen en die ook overigens onschadelijk zijn.

Zo gingen in 1987, in het kader van de door Montreal voorgeschreven wetenschappelijke herwaardering (scientific assessment) de internationale chemische industrieën gezamenlijk aan het werk en stichtten in december het PAFT (Program for Alternative

Fluorocarbon Toxicity Testing). Dit programma bundelt en stroomlijnt al het onderzoek aan mogelijke CFK-vervangers (voorzover dat chloorfluorkoolwaterstoffen zijn), dat door 15 maatschappijen, in 8 landen van Europa, Amerika en het Verre Oosten wordt verricht. Daar kwam een jaar later nog de AFEAS (Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study) bij die door middel van sponsoring het eigen onderzoek van de industrie versterkt met dat van universiteiten en andere onderzoeksinstellingen. Let wel: het gaat hier om 'alternative fluorocarbons' dat zijn geen CFK's maar wel HCFK's en HFK's. Zonder deze gehalogeneerde koolwaterstoffen blijkt het nog niet te gaan als men onverminderd wil blijven voldoen aan de behoefte aan 'veilige' koeling. Hierbij speelt ook een rol dat de vervaardiging van gehalogeneerde koolwaterstoffen een geïntegreerd onderdeel is van de totale chemische produktie (zo is HCFK-22 ook grondstof voor de produktie van polymeren). Maar wat de 'aanvaardbaarheid' betreft: het is bekend dat de C-Cl- en de C-F-verbindingen beide in het infrarode deel van de straling in het 'venster' (golflengten 800-1200 nm) actief zijn en hier komt dus ook het broeikaseffect om de hoek kijken. En inderdaad, de vraag zal dan meestal zijn: in welke mate zijn we bereid om met de vervangende 'fluorocarbons' de bezwaren die voor ons aanleiding zijn om de CFK's uit te bannen, toch, althans tijdelijk, te aanvaarden? Aannemende dat eerst de giftigheid, agressiviteit en brandbaarheid worden onderzocht, gaat het vervolgens om het in de vervangende 'fluorocarbon' aanwezige vermogen de ozonlaag aan te tasten en/of een bijdrage aan het broeikaseffect te leveren. Een en ander in verhouding tot de bezwaren die de te vervangen CFK in dit opzicht heeft. Als maatstaf neemt men daarbij CFK-11 (CCl_3F). Zo heeft HCFK-22 ($CHClF_2$) een ODP (Ozone Depletion Potential) van ≈ 0,05 en een HGWP (Halocarbon Global Warming Potential) van ≈ 0,35. Dit betekent dat een kilogram HCFK-22 het vermogen heeft om ≈ 0,05 maal zoveel ozon in de stratosfeer te vernietigen als een kilogram CFK-11 en dat de verhouding tussen de bijdragen tot het broeikaseffect ≈ 0,35 bedraagt. Aangezien HCFK-22 inderdaad als vervanger van CFK-11 wordt aangeboden is het daarbij duidelijk dat het vasthouden aan de technische voordelen van de (chloor)fluorkool-waterstoffen betekent dat er hier niet van een onschadelijke maar hoogstens van een aanvaardbare vervanger kan worden gesproken. Men zal dan ook nog moeten kijken naar mogelijke bijdragen van deze stof en zijn afbraakprodukten aan fotochemische smog, troposferische ozon of andere hinder. Vandaar dus deze aanvaardbaarheidsstudies die moeten leiden tot uitspraken van de overheden op grond waarvan de industrie vooruit kan met de voorbereiding en de uitvoering van de CFK-vervanging. Benadrukt moet worden dat het ODP wel een handig, maar ook een globaal getal is. Het geeft een ruwe indruk van de ozonafbrekende werking, gemiddeld over de aarde en gemiddeld over de seizoenen. Nog belangrijker is dat de ODP-waarde wordt afgeleid voor de evenwichtsconcentratie van de betreffende stof, dus als de emissie van die stof gelijk is aan zijn afbraak.

Het is te begrijpen dat bij die aanvaardbaarheidsstudies de overheden allereerst naar de milieuaspecten kijken, dus naar de ODP's en de HGWP's en dat de industrie daarbij vooral ook de nadruk legt op de realiseerbaarheid, de technische aspecten en

de gevaren die bij fabricage, gebruik en onderhoud uit brandbaarheid en giftigheid kunnen voortvloeien.
Algemeen heerst nu bij de overheden de opvatting dat de industrie als 'part of the solution' en niet als 'part of the problem' moet worden beschouwd. Men zoekt dus samen naar oplossingen maar daar kunnen vervolgens de meningen alsnog over verschillen vanwege die andere accenten die door overheid en industrie worden gelegd. De beoordeling van HCFK-22 is daar een voorbeeld van en daarom zal hier aan dit gas, in verhouding tot andere CFK-vervangers, wat meer aandacht worden besteed. Voor een uitvoerige behandeling, ook van de halonen en andere stoffen, wordt de lezer verwezen naar 'Scientific Assessment of Stratospheric Ozone: 1989, WMO Report no. 20, vol. I' en daarvan hoofdstuk 4 dat gedeeltelijk steunt op het AFEAS-onderzoek.
HCFK-22 bezit een waterstofatoom, dit in tegenstelling tot een CFK, en wordt daarom in de troposfeer aangetast door het hydroxylradicaal (OH), de schoonmaker van de atmosfeer. Dientengevolge zal de (gemiddelde) levensduur en daardoor ook de in de troposfeer opgehoopte hoeveelheid HCFK-22 beperkt zijn in vergelijking met bijv. CFK-11 en zal er een kleiner gedeelte van in de stratosfeer terechtkomen om daar onder invloed van kortgolvige UV-straling chloor af te staan dat dan vervolgens de ozonlaag zal aantasten. We hebben al gezien dat de ODP van HCFK-22 dan ook in de buurt van 0,05 ligt.
We zagen in hoofdstuk 8 dat dit HCFK-22 al ten tijde van Montreal door Du Pont werd geproduceerd en naar voren werd geschoven als een geschikte vervangende stof voor koeling, air-conditioning, drijfgas en schuimproduktie. Du Pont had dan ook het voornemen om HCFK-22 op grote schaal te gaan produceren. Op het eerste gezicht lijkt dit op grond van een ODP 0,05 ook aangewezen. Maar een nadere beschouwing van deze ODP leidt toch wel tot bezwaren.
In de eerste plaats gaat het bij deze ODP om de totale, cumulatieve ozonafbraak die het loslaten van een massaeenheid van respectievelijk HCFK-22 en CFK-11 tot gevolg zal hebben. Maar het is het verschil in het verloop in de tijd van die ozonafbraken waardoor in de eerste tientallen jaren na het inzetten van HCFK-22 een relatieve ozonafbraak ontstaat die aanmerkelijk hoger ligt dan die uiteindelijke, cumulatieve waarde van ≈ 0,05. Dat komt doordat de ozonafbraak al tijdens de betrekkelijk korte levensduur van een HCFK-massaeenheid wordt voltooid terwijl de ozonafbraak door de CFK-11 massaeenheid nog honderden jaren doorgaat. De verhouding tussen de opgetreden ozonafbraken, de relatieve ozonafbraak, zal dus geleidelijk afnemen tot de uiteindelijke ODP-waarde. Fig. 13 geeft de inschakelverschijnselen weer wanneer men plotseling een bepaalde uitstoot van CFK-11 vervangt door een gelijke uitstoot van een andere CFK of HCFK. We zien daar dat de relatieve ozonafbraak voor een aantal gassen inderdaad ver onder limiet kan liggen, maar nog wel aanzienlijk hoger dan wanneer tenslotte de evenwichtstoestand zal zijn bereikt.
Voor de vervanging van CFK-11 door HCFK-22 betekent dit dat de daarbij betrokken ozonafbraak in de eerste tientallen jaren nog ongeveer 15% zal bedragen en niet 5% zoals de ODP-waarde suggereert.

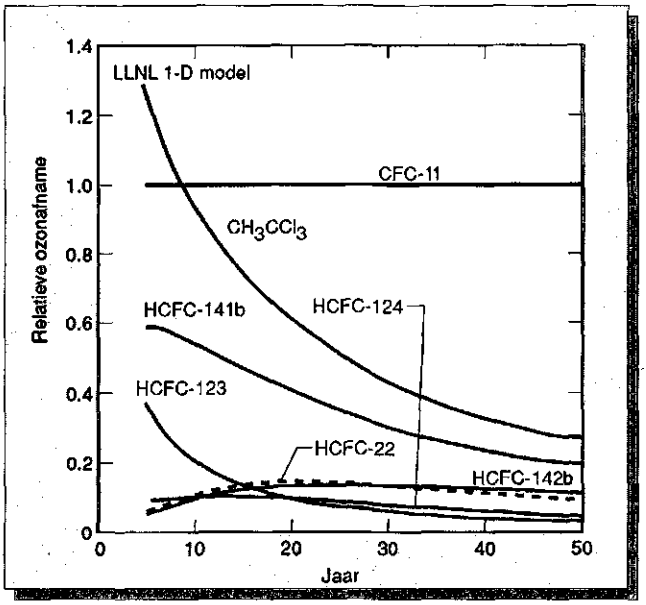


Fig. 13 Berekende tijdsafhankelijke verandering in ozonkolom afname, relatief ten opzichte van CFK-11, volgend op een stapsgewijze verandering in de emissie (berekend met het LLNL, Lawrence Livermore National Laboratory 1-D model).
(Bron: WMO Globale Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 20 "scientific Assessment of Stratospheric Ozone: 1989")

In de tweede plaats is er in de laatste jaren, naast die ODP-waarde, nog dat tweede criterium van de HGWP-waarde bijgekomen. Daarbij gaat het dus om het vermogen van het gas om de aarde te verwarmen door het tegenhouden van de infrarode uitstraling van de aarde naar de ruimte. Dat tegenhouden begint al, zodra het gas wordt losgelaten en zich in de troposfeer verspreidt en de fig. 14 laat dan ook zien dat de temperatuurverhoging na een plotselinge emissie inderdaad direct begint. Voor de HGWP-waarde gelden weer de totale gecumuleerde effecten, op de lange duur, maar de beginwaarden zijn veel groter. De HGWP-waarde van HCFK-22 ligt op ongeveer 0,34, maar de relatieve broeikaswerking ligt in het begin veel hoger en blijft de eerste tien jaren zelfs boven de 1. Dit komt doordat HCFK-22 een 36% sterker broeikasgas is dan CFK-11. Maar het wordt veel sneller afgebroken, zodat het gecumuleerde effect ten slotte op een HGWP-waarde van 0,34 uitkomt.
Met het oog op het broeikaseffect is HCFK-22, vooral op korte termijn, minder aantrekkelijk; hier komt HCFK-123 veel beter uit de bus. HKF-134a is wat zijn broeikaswerking betreft maar weinig gunstiger dan HCFK-22, maar het is als

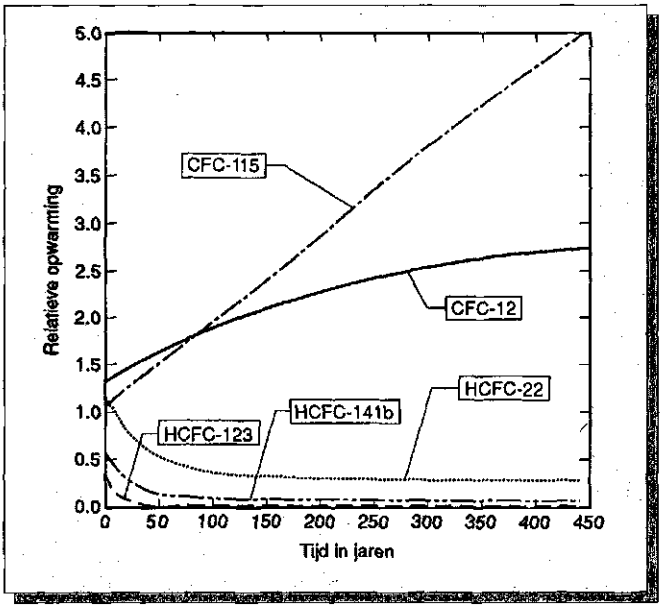


Fig. 14 Berekende tijdsafhankelijke opwarming, relatief ten opzichte van CFK-11, volgend op een stapsgewijze verandering in de emissie (berekend met het Dupont 1-D model). (Bron: WMO Globale Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 20 "Scientific Assessment of Stratospheric Ozone: 1989)

vervanger van CFK-12 ook in dit opzicht een belangrijke verbetering (zie Greenhouse Gases and Aerosols, 25 April 1990).
Net zoals het ozonverlies wordt ook de door een bepaald gas veroorzaakte verwarming berekend met behulp van computermodellen die de fysische en chemische processen in de dampkring zo goed mogelijk nabootsen (behalve naar het Scientific Assessment 1989 verwijzen we hiervoor ook naar het IPCC werkgroep I Rapport van 25 april 1990 'Greenhouse gases and Aerosols'). De processen in de atmosfeer zijn erg ingewikkeld en nog niet volledig bekend, daarom is de modellering daarvan ook nog gebrekkig. Daarbij komt nog dat de heterogene chemische processen, zoals die zich bij de polen voordoen, nog niet in de modellering zijn betrokken en daarom is de onzekerheid in de berekende waarden van zowel de ozonaantasting in de stratosfeer als van de broeikaswerking en de mogelijke terugkoppelmechanismen t.g.v. aerosolen nog groot. En dan worden bovendien de modelberekeningen per gas uitgevoerd, uitgaande van de huidige situatie. Op deze wijze worden interacties en de in de tijd veranderende concentraties in de atmosfeer niet in deze berekeningen

betrokken. Die onzekerheid in de berekende waarden wordt wat minder wanneer het gaat om de verhouding tussen deze effecten -en niet meer om de absolute waarden daarvan- zoals die wordt uitgedrukt in de ODP- en de HGWP-waarden, vooral wanneer het alleen over de gehalogeneerde koolwaterstoffen gaat. Dan zal een deel van de systematische fout in de modellen weg kunnen vallen. Uit de publikaties van de Du Pont-onderzoekers Fisher en Hales en enige anderen in Nature van 5 april 1990 blijkt dat de volgens een viertal modellen berekende levensduren van een bepaald gas dan nog wel met een factor 2 kunnen verschillen. Dat geldt dan ook voor de berekende waarden voor de ozonaantasting en de broeikaswerking, want die worden in hoge mate door de levensduur van het gas bepaald.

Om meer overeenstemming in de berekende waarden te brengen past M.J. Prather (NASA) hierop een kunstgreep toe. Hij gaat uit van de levensduur van methylchloroform (CH_3CCl_3), het gas waarover Gribbin al vertelde dat het indertijd door de EPA als vervanger van de ontvettingsvloeistof en tevens smogveroorzaker trichlooretheen was gepropageerd en waarvan de concentratie sindsdien met ongeveer 7 procent per jaar is toegenomen. De hoeveelheden en atmosferische lotgevallen van dit, nu als ozonaantaster beruchte, gas zijn relatief goed bekend en uit waarnemingen volgt een levensduur van ca. 6,3 jaar. Aannemende dat elk van de modellen bij de berekening van de levensduur van een gas steeds een bij dat model behorende systematische fout maakt, kijkt men vervolgens hoe de verhouding is tussen de 'ware' levensduur (6,3 jaren) van methylchloroform en die welke het model voor dit gas berekent. Met dit verhoudingsgetal corrigeert men dan de met dit model berekende levensduur van elk van de andere gassen. Inderdaad blijken de op grond van deze gecorrigeerde levensduren berekende ODP- en HGWP-waarden dan voor de vier door Fisher, Hales e.a. gebruikte modellen aardig dicht bij elkaar te liggen. Het wMO 'Scientific Assessment Report 1989' spreekt over "reasonably robust parameters" en het 'Overview of AFEAS' (september 1990) presenteert in fig. 15 de ODP's en HGWP's van de te vervangen CFK's en van de als potentiële vervangers onderzochte HCFK's en HFK's. De oppervlakten van de cirkels verhouden zich als de levensduren van de verschillende stoffen. De figuur suggereert een grote verbetering bij de voorgestelde vervangingen, maar daarbij moet steeds bedacht worden dat er aan de berekeningen toch nog veel ontbreekt en dat het gaat om de cumulatieve effecten op de (zeer) lange duur en dat de zaken er, vooral wat HCFK-22 betreft, de eerstvolgende tiental(len) jaren minder rooskleurig voorstaan.

Met dat al concluderen de toponderzoekers Watson (NASA), Prather (NASA) en Albritton (NOAA) in november 1989 dat: "Alle tot nu toe beschikbare informatie erop wijst dat de voorgestelde vervangingsstoffen duidelijk veel beter zijn dan de nu gebruikte CFK's wat betreft de bescherming van de ozonlaag. Ook de ODP's en HGWP's zijn veel kleiner dan die van de CFK's en zullen vermoedelijk niet bijdragen tot troposferische ozonvorming of zure depositie. Het is daarom wetenschappelijk verantwoord dat de industrie snel overgaat tot de produktie en verkoop van deze stoffen".

Inderdaad, dat is het groene licht waar de industrie op aan heeft gedrongen. Weliswaar voegen de drie onderzoekers daar nog aan toe dat er "een versneld

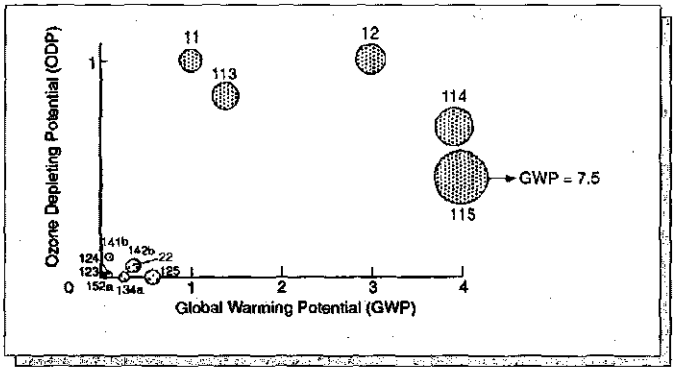


Fig. 15 Ozone Depletion Potential en Global Warming Potential van verschillende CFK's (beide t.o.v. CFK-11).
(Bron: WMO Globale Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 20 "Scientific Assessment of Stratospheric Ozone: 1989)

onderzoekprogramma moet worden uitgevoerd om de aanvaardbaarheid van de voorgestelde HCFK's en HFK's voor het milieu te waarborgen". Het is niet helemaal duidelijk hoe men zich dat 'waarborgen (ensure)' moet voorstellen en of de NASA- en NOAA-onderzoekers niet toch weer morrelen aan dat 'wetenschappelijk verantwoord'. Maar de AFEAS-sponsors hebben direct gereageerd met een 6 miljoen dollar kostende voortzetting van het onderzoekprogramma.
Hoe dan ook, de USA heeft besloten om toch maar met die aanvechtbare HCFK-22 in zee te gaan; het zal voor gebruik in nieuwe installaties tot 2020 zijn toegestaan en in oude installaties tot 2040 (RCC Koude & Luchtbehandeling, augustus 1990). Verder is men ervan overtuigd dat "door beter te doen wat nu al gedaan wordt", dus beter ontwerpen van installaties, zorgvuldiger produktie, onderhoud, opvang en regeling, al tussen de 30 en 50 procent reductie van het CFK-gebruik kan worden verkregen (Vermeulen, Koeltechniek, november 1988). De Amerikaanse producent Du Pont heeft al een ruime ervaring met HCFK-22 en men is van mening dat een te vroegtijdige uitbanning van dit gas de volgende overgang naar minder aanvechtbare vervangers, zoals HCFK-123 en HFK-134a, in gevaar zou brengen met name in de nieuwe industrialiserende landen, waar men nu al op flinke schaal begonnen is met de produktie van de traditionele, en goedkopere, CFK's. Daarbij komt nog dat het nu al enige jaren lopende PAFT-onderzoek naar de giftigheid van HCFK-123 (vervanger van CFK-11) en van HFK-134a (vervanger van CFK-12) nog niet geheel is afgesloten, hoewel de resultaten tot nu toe gunstig zijn (Informatiemap van AFEAS en PAFT bij de vergadering in Londen op 27-29 juni 1990). Zeer recent, Nature 252, p.98, 11 juli 1991, werd melding gemaakt van aanwijzingen dat CFK-123 in hoge doses goedaardige gezwellen kan verwekken.
Een veel gebruikt argument voor de tijdelijke invoering van de alternatieve CFK's

is dat men hoopt dat veel landen vooral de langlevende 'harde' CFK's zullen uitbannen omdat de kortlevende 'zachte' CFK's redelijke en niet te dure alternatieven zijn. Het voortgaan met lozen van harde CFK's zal de atmosfeer de komende eeuw veel meer belasten dan de tijdelijke invoering van zachte CFK's.
In tegenstelling tot de USA is Duitsland op 30 mei 1990 overgegaan tot een verbod van HCFK-22. Dit verbod zal in 1993 ingaan voor blaasgas in schuimplastic isolatie en in 2000 voor koelinstallaties en overige schuimfabricage (New Scientist 9 juni 1990 en Kunststoffe 80 no. 8, 1990). Men ziet daar HCFK-123 als een geschikte vervanger van CFK-11 en HFK-134a als vervanger van CFK-12. Aan dit verbod is o.a. voorafgegaan een onderzoek van het Max Planck Institut te Lindau dat erop wees dat HCFK-22 wel een ODP met een waarde 0,2 zou kunnen hebben, in plaats van de gebruikelijke 0,05 (Vermeulen Koeltechniek, november 1988). Ook Fisher, Hales e.a. verklaren in het AFEAS-rapport van 1989 dat de ODP van HCFK-22 aanzienlijk hoger kan uitkomen wanneer ook het transport in de hogere lagen van de stratosfeer en de heterogene chemische processen bij de polen in de computermodellen zullen worden opgenomen.
In Engeland heeft een andere chemiereus, ICI, zich vooral op het onderzoek en de produktie van HCFK-123 en HFK-134a geconcentreerd. Het verst is men met HFK-134a, dat in het begin van 1991 al te Runcorn, Cheshire, commercieel zal worden geproduceerd en in 1993 ook in de USA (Steven and Lindley in New Scientist, 16 juni 1990). ICI verwacht dat ook alle technische moeilijkheden bij de toepassing van deze nieuwe gassen spoedig zullen zijn opgelost.
Men krijgt de indruk dat ICI hier voorligt op Du Pont dat, volgens een bericht in het Financieel Dagblad van 23 juni 1990, het plan heeft om vier HFK-fabrieken (één in Dordrecht) te bouwen die in 1995 een totale produktie van 60.000 ton per jaar moeten hebben. Du Pont maakte ook bekend dat de gerezen twijfel aan de bruikbaarheid van HCFK's (HCFK-22?) voor het bedrijf aanleiding is om de nieuwe investeringen voor deze HCFK's uit te stellen. Op grond van het bestaande programma verwacht Du Pont de HFK-134a in 1993 in de handel te brengen.
In Nederland wordt, in overeenstemming met het streven van de Europese Commissie, het gebruik en de produktie van CFK's met ingang van 1998 verboden. In 1995 moet het gebruik al tot nul zijn gereduceerd. Wat de vervangende stoffen betreft gaat men uit van "het veel lagere ozonlaag-aantastende vermogen van HCFK-22 in vergelijking van dat van de CFK's" (Sprong, RCC Koude & Luchtbehandeling, april 1990) en men accepteert HCFK-22 als "slechts een stap in een ontwikkeling die uiteindelijk moet resulteren in de toepassingen van koudemiddelen die de ozonlaag niet aantasten". Het relatief ongunstige korte-termijn-effect van HCFK-22 wordt niet vermeld en men stelt bepaalde zorgvuldigheidseisen, maar ziet nog geen aanleiding tot een verbod van HCFK's. Men onderkent wel een "grote bijdrage aan het broeikaseffect" en de ontwikkelingen zullen "op basis van het CFK-actieprogramma nauwlettend worden gevolgd". Dit zal worden gedaan door middel van een, met de industrie overeengekomen, registratieverplichting, waarmee men de zorgvuldige omgang met deze stoffen wil bevorderen ten einde "enige controle uit te kunnen oefenen op het gebruik ervan". Fabrikanten van spuitbussen

voor de fabricage van plastic-isolatie moeten in 1992 naar HCFK-22 omschakelen. Weliswaar verwacht men omstreeks 1994/95 naar een nog minder schadelijk drijfgas te kunnen omschakelen. Na 1991 zal men voor nieuwe koel- en luchtbehandelingsinstallaties met grotere vermogens HCFK-22 toepassen, totdat ook daarvoor andere vervangers beschikbaar zijn (Nota van Toelichting). Men besteedt verder veel aandacht aan beperking van CFK-gebruik door bestrijding van lekkage en andere verliezen en door opvang en recycling.

Vermeulen wijst in Koeltechniek van juni 1988 op de toepassing van tracers voor lekdetectie bij bestaande koelsystemen en we vragen ons af of men wel eens heeft overwogen om aan deze gassen, net als bij aardgas, een penetrante geur toe te voegen, waarmee ook de installateurs zouden worden herinnerd aan de 'erecode' van de "correcte uitvoering en naleving van de gestelde voorschriften" waarvan in de Nota van Toelichting sprake is.

Nederland stelt zich dus nog terughoudend op wat betreft de verwachtingen aangaande de in ontwikkeling zijnde CFK-vervangers HCFK-123 en HFK-134a. Inmiddels heeft ICI dus al stevig geïnvesteerd in dit milieuvriendelijker HFK-134a dat geen chloor (of broom) bevat en dus een ODP nul heeft. Du Pont is ook bezig om het zwaartepunt in die richting te verleggen. In RCC Koude & Luchtbehandeling van juni 1990 beschrijven Eggert en Sørensen de doorwerking in de koelkassttechniek van de vervanging van CFK-12 door HFK-134a. Deze berichten komen uit de Duitse hoek waar men zich voorbereidt om te voldoen aan de strenge voorschriften van de overheid die ook HCFK-22 voor 2000 zal uitbannen. (zie ook Wiedermann und Heilig). Het hier getoonde vertrouwen in de gunstige resultaten van het PAFT-giftigheidsonderzoek komt overeen met de conclusies in de informatiemap van AFEAS/PAFT, juni 1990 die luiden: "There is nothing to preclude the use of HFK-134a (resp. HCFK-123) in general industrial uses, provided that recommended hygiene practices are observed". Wat die 'aanbevolen hygiëne-maatregelen' betreft is dit een voorbehoud dat in de lijn ligt van de door J. Hoffman (EPA) tegenover de koude-industrie verdedigde stelling dat de bescherming van het milieu prioriteit heeft ten opzichte van overdreven menselijke veiligheid (zie RCC Koude & Luchtbehandeling van augustus 1990). Het ging daarbij om de brandbaarheid van HFK-152a, een nog betere vervanger van CFK-12 wat zijn HGWP betreft (zie Figuur 15). Overigens vond men in Duitsland dat deze introductie van HFK-152a al twee jaar te laat kwam; men was kennelijk al volop bezig met HFK-134a.

Samenvattend kan men concluderen dat de overheden veelal de door de industrie verlangde duidelijke en tijdige aanwijzingen, zoals Du Pont die in zijn 'Fluorocarbon/ Ozone update' van september 1989 formuleerde, hebben gegeven. Over de noodzaak van een spoedige afschaffing van de CFK's is men het eens maar met name de standpunten van de USA en van Duitsland liepen uiteen over de vraag of daarbij een snelle wereldwijde afschaffing van de CFK's de tussenfase met HCFK-22 nodig maakte of dat ook deze problematische vervanger op korte termijn moest worden uitgebannen. Nederland schaarde zich met de overige Europese landen aan de kant van de USA, maar met het wat minder duidelijke voorbehoud dat het de HCFK's nauwlettend in het oog zal houden. HCFK-22 wordt dus als (tijdelijke) vervanger

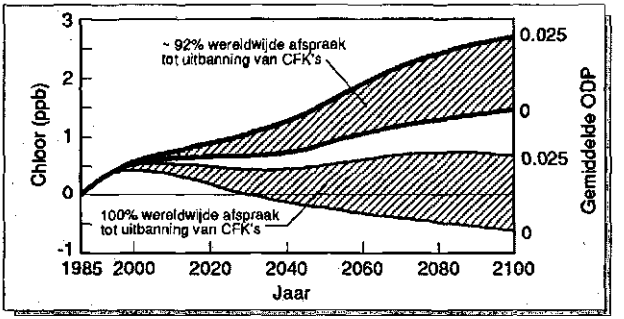


Fig. 16 Effecten van naleving van afspraken voor CFK's emissiereductie. De bandbreedte wordt veroorzaakt door substitutie met verschillende alternatieve CFK's.
(Bron: Future concentrations of stratospheric chlorine and bromine, EPA page 400/1-88/005, J.S. Hoffman en M.J. Gibbs, 1988)

geaccepteerd. Uit de gepubliceerde stukken krijgt men de indruk dat bij die beslissing de lange-termijn ODP- en GHWP-waarden (fig. 15) een overheersende rol hebben gespeeld en men de effecten op kortere termijn -de komende tientallen jaren- minder zwaar heeft laten wegen. Het gaat er uiteraard om hoe de aanvoer van chloor naar de stratosfeer zal verlopen en daarover zeggen Prather en Watson in Nature van 19 april 1990: "We must be prepared for the possibility of new thresholds of accelerated ozone loss in the Arctic as chlorine concentrations reach new record levels".*
Het is natuurlijk niet eenvoudig om zich een beeld te vormen van de wijze waarop de wereld in zijn totaliteit zal reageren op het nu in Londen aangescherpte Montreal-protocol en daarbij ook nog een raming te maken van de totale toename van het gebruik van gehalogeneerde koolwaterstoffen voor koeling, isolatie en andere doeleinden. De Amerikaanse auteurs J.S. Hoffman en M.J. Gibbs hebben voor EPA de bestaande schattingen op dit gebied verwerkt in een prognose van het chloorgehalte in de stratosfeer over de komende eeuw. Dat chloorgehalte is weer een maatstaf voor de ozonafbraak. Deze prognose werd door Du Pont in zijn Fluorocarbon/Ozone update van september 1989 in fig. 16 weergegeven. De onderste gearceerde strook geeft weer hoe het chloorgehalte zal verlopen onder de aanname dat men zich overal ter wereld aan het CFK-verbod zal houden. De bovenrand hoort dan bij een 'gemiddelde' CFK-vervanger met ODP 0,025 (HCFK-22 heeft ODP 0,05!) en de onderrand bij een ODP nul (bijv. HFK-134a). De bovenste gearceerde strook geeft het verloop weer voor het geval dat de reactie van de wereld neerkomt op 92% uitbanning van CFK's en dan weer als functie van de gemiddelde ODP-waarde van

* ("We moeten er op zijn voorbereid dat in het noordpoolgebied weer overgangen naar een versnelde ozonafbraak kunnen optreden wanneer de chloorconcentraties nieuwe recordhoogten bereiken")

de vervangers. En inderdaad: het Londense protocol van juni 1990 houdt weliswaar de uitbanning van CFK's in, maar het voorziet ook al weer in een beperkt uitstel voor de ontwikkelingslanden, waarbij bovendien het voldoen aan de overeengekomen voorschriften voor de CFK-uitbanning afhankelijk wordt gesteld van de financiële steun en de kennisoverdracht door de industrielanden onder 'fair and favourable conditions'. Verder is HCFK-22 geaccepteerd als overgangsstof (transitional substance) waaraan de beperking is opgelegd dat er zorgvuldig mee moet worden omgegaan en dat er voortdurend moet worden gestreefd naar vervanging door stoffen die de ozonlaag niet aantasten en ook overigens milieuvriendelijker zijn. Volgens de huidige inzichten zou die vervanging uiterlijk in 2040 en zo mogelijk niet later dan 2020 voltooid moeten zijn.

De chloorconcentratie zal dus, ondanks het nieuwe protocol, blijven toenemen en de door Prather en Watson in het vooruitzicht gestelde nieuwe versnelde processen bij de ozonafbraak worden mogelijk.

Die nieuwe versnelde processen zijn onlangs nader beschreven door Arnold e.a. (Nature 1 november 1990) en Brasseur e.a. (Nature 13 december 1990): De zwavelzuurdeeltjes in de Junge-laag (tussen 10 en 30 km hoogte) leveren ook buiten de poolgebieden de mogelijkheid voor het optreden van heterogene chemische processen waarbij, met de tussenkomst van salpeterzuur, ook weer actieve chloorverbindingen vrijkomen die dan de ozonlaag aantasten. Vulkanen leveren veel zwavelzuur op en de uitbarsting van El Chichon in 1982 heeft al zo'n extra aantasting van de ozonlaag te zien gegeven. Nu is het chloorgehalte van de atmosfeer al weer 30% hoger en het blijft toenemen. Daarom voorziet men dat toekomstige vulkanische uitbarstingen veel sterkere afbraak van ozon ten gevolge zullen hebben. Dit is een somber toekomstbeeld en we kunnen er alleen de conclusie uit trekken dat zo snel mogelijk moet worden overgegaan naar CFK-vervangers met een zo laag mogelijke ODP. We hebben gezien dat de industrie, althans ICI en Du Pont, volop in die richting bezig is. Dat de industrie desondanks voortgaat HCFK-22 als CFK-vervanger te verkopen is in de eerste plaats al te begrijpen omdat men nu eenmaal moet verdienen om in de produktie van nieuwe vervangers te kunnen investeren; de Du Pont-update is daar heel duidelijk over. Maar ook omdat de lopende HCFK-22-produktie de mogelijkheid tot een onmiddellijke grootscheepse vervanging biedt. Daarbij wordt dan betoogd dat de betere vervangers (HCFK-123 en HFK-134a en eventuele andere niet gehalogeneerde stoffen) te lang op zich zouden laten wachten, waardoor men, speciaal in de ontwikkelingslanden, in het CFK-gebruik zou volharden.

Het is aan de overheden om de juiste afwegingen te maken en daarbij ook het broeikaseffect te betrekken. De Nederlandse overheid is het dus niet eens met het Duitse standpunt en is kennelijk van mening dat de samenleving nog niet bestand is tegen een scherper beleid ten aanzien van HCFK-22. Dat levert die overheid dan wel de veroordeling van de Stichting Natuur en Milieu op, die bij monde van Reijnders (1991) spreekt van een 'te zachte heelmeesterij'.

Gelukkig biedt het CFK-Actieprogramma de gelegenheid dit meningsverschil verder te behandelen in het kader van de thans ingestelde CFK-Commissie. In die

Commissie is de Stichting Natuur en Milieu naast overheid en bedrijfsleven vertegenwoordigd.
De CFK-Commissie heeft tot taak jaarlijks te rapporteren over de nieuwste wetenschappelijke ontwikkelingen en ook over het gebruik van HCFK's en HFK's, dat daartoe nauwkeurig zal worden gevolgd. De CFK-Commissie zal zonodig ook voorstellen doen tot het bijstellen van het CFK-Actieprogramma.
Bij de discussie rond de optimale, of minst slechte, vervangers van de harde CFK's blijft de uitspraak van Jim Anderson (zie pag. 145) geldig dat "chemische stoffen schuldig zijn tot hun onschuld is bewezen". Met een voorzichtige blik op Gaia zouden we kunnen stellen dat alleen voor die stoffen die van nature in meer of mindere mate in de atmosfeer voorkomen, bewezen is dat zij in die concentraties onschuldig zijn; zo behoren ze immers tot de aardse atmosfeer en het ecosysteem? En wie kan voorspellen voor welke verrassingen andere, niet natuurlijke stoffen ons in de toekomst kunnen plaatsen?

Literatuur

1. AFEAS/PAFT 'Montreal Protocol Review Meeting', London (27-29 June 1990)
2. AFEAS 'Overview of AFEAS' (1 Sept. 1990)
3. Aktueel RCC Koude & Luchtbehandeling, jg.83, p.15 (aug. 1990)
4. Arnold, F., Th. Bührke, S. Qiu 'Evidence for stratospheric ozone-depleting heterogeneous chemistry on volcanic aerosols from El Chichon', Nature vol. 348, pp.49-50 (1 Nov. 1990)
5. Besluit Ozonlaag aantastende stoffen en preparaten
6. Brasseur, G.P., C. Granier, S. Walters 'Future changes in stratospheric ozone and the role of heterogeneous chemistry', Nature vol. 348, pp.626-628 (13 Dec. 1990)
7. CFK Actieprogramma, een samenwerkingsproject van Overheden en Bedrijfsleven, (21 juni 1990)
8. Du Pont 'Fluorocarbon/Ozone Update', (Sept. 1989)
9. Eggert, Sørensen 'R-134a als vervanger van R-12...', Koude & Luchtbehandeling 8, (3 juni 1990)
10. Fisher, A., C.H. Hales e.a. 'Model calculations of the relative effects of CFC's and their replacements on stratospheric ozone', Nature vol. 344, pp.508-512 (5 April 1990)
11. Fisher, A., C.H. Hales e.a. 'Model calculations of the relative effects of CFC's and their replacements on global warming', Nature vol. 344, pp.513-516 (5 April 1990)
12. Fisher, D.A., C.H. Hales e.a. 'Relative Effects on Stratospheric Ozone of Halogenated Methanes and Ethanes of Social and Industrial Interest', in: 'Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study', WMO report no. 20 vol. II, ...(AFEAS) (1989)
13. Milne, R. 'Clampdown cases pressure on the ozone layer', New Scientist, p.21 (7 July 1990)
14. Prather, J., R.T. Watson 'Stratospheric ozone depletion and future levels of atmospheric chlorine and bromine', Nature vol. 344, pp.729-734 (19 April 1990)
15. Reijnders, L. 'De visie van de milieubeweging op de CFK-problematiek' Congres

'Alternatieven voor CFK's', (30 januari 1991)
16. Shine, K. 'Effects of CFC substitutes', Nature vol. 344, pp.492-493 (5 April 1990)
17. Sprong, W.J.M. 'De stand van zaken met betrekking tot het inzamelen, regenereren en vernietigen van ozonlaag bedreigende stoffen', RCC Milieu & Wetgeving jrg. 83, pp.37-41 (April 1990)
18. Sprong, W.J.M. 'Herziening Protocol van Montreal', circulaire VROM (juli 1990)
19. Steven, H., A. Lindley 'The race to heat the ozone hole', New Scientist, pp.48-51 (16 June 1990)
20. Swager, J. 'Bescherming van de ozonlaag: een tussenstand', Lucht & Omgeving, pp.165-167 (dec. 1989)
21. Toro, T. '...As Germany brings forward ban on CFC's', New Scientist, p.24 (9 June 1990)
22. UNEP-Report of the second meeting of the parties to the Montreal Protocol on the substances that deplete the ozone layer. (29 June 1990)
23. Vermeulen, P.E.J. 'Conference on substitutes and alternatives to CFC's and Halons' (13-15 Jan 1988), Koeltechniek 81, pp.12-14 (juni 1988)
24. Vermeulen, P.E.J. 'Recente ontwikkelingen rond de CFK-problematiek in de koeltechniek', Koeltechniek 81, pp.11-13 (nov. 1988)
25. Vermeulen, P.E.J. 'Nieuws omtrent de CFK-problematiek', Koude & Klimaat 83, pp.14-17 (jan 1990)
26. Watson, e.a. 'Greenhouse Gases and Aerosols, Assessment for WG 1 Plenary', IPCC werkgroep 1, (24 april 1990)
27. Wiedermann, R., G. Heilig 'Alternative Blähmittel für PUR Hartschaumstoffe' Werkstofftechnik, Kunststoffe 80, 8 (1990)
28. WMO-Report no. 20 'Scientific Assessment of Stratospheric Ozone': vol. I (1989)

Uitgebreide Inhoudsopgave

Hfdst. 1

1.1 Zuurstof, ozon en het leven 5
In de onderste laag van de atmosfeer, de troposfeer wordt de schade lijke ozon, als deel van smog gevormd. Daarboven, in de stratosfeer bevindt zich de ozonlaag die ons tegen ultraviolette straling beschermt.

1.2 De huidige ozonlaag 7
Ozon in de stratosfeer ontstaat door inwerking van kortgolvige ultraviolette straling op zuurstof. De ozon wordt weer afgebroken door UV-straling met wat langere golflengte door tussenkomst van een katalysator. Als katalysatoren werken vooral stikstofmonoxide (NO) en chloor (Cl).

1.3 Zuurstof en leven 12
4,5 miljard jaren geleden ontstond het zonnestelsel. Koolstofdioxide (CO_2) was een belangrijk vulkanisch gas. Al 400 miljoen jaren breken levende organismen CO_2 af en laten O_2 los. Hierdoor werd de dierlijke ademhaling en energieopwekking door verbranding van koolwaterstoffen mogelijk. Ozon, uit O_2 gevormd, beschermde het leven tegen UV-straling.

1.4 Kanker, gewassen en vee 15
UV-B-straling veroorzaakt huidkanker, staar en schade aan planten en dieren. De beschermende ozonlaag is zeer kwetsbaar.

Hfdst. 2

2.1 Een supersonisch dwaalspoor? 21
De Concorde en de Tupulev zijn vooralsnog de enige hoogvliegende supersonische transportvliegtuigen (SST). Men besefte dat de stikstofoxides in de uitlaatgassen een bedreiging voor de ozonlaag konden vormen. Dit was aanleiding tot het eerste ozondebat.

2.2 We komen vliegend in moeilijkheden 21
SST's stoten met hun uitlaatgassen ook het hydroxyl-radicaal HO uit, dat ook als katalysator bij de ozonafbraak kan dienst doen. Hiertegen waarschuwde McDonald in 1970 en veroorzaakte daarmee een schrik reactie door er een toename van huidkanker aan te verbinden. Andere onderzoekers, waaronder Crutzen en Johnston, toonden in 1971 aan

dat het gevaar niet zo zeer in de HO_x zat als wel in de NO_x (met name NO). Omdat de SST's niet economisch waren, werden verdere plannen opgeborgen. Maar onlangs is men toch weer met plannen gekomen voor nog snellere SST's die hoger vliegen, en daarmee is het gevaar voor de ozonlaag weer aan de orde. Ook kan een verhoogd stratosferisch zwavelgehalte een gevaar voor de ozon opleveren.

2.3 Het ruimteveer brengt chloor in de stratosfeer 27
De SST's hadden de brede maatschappelijke discussie over schade aan de ozonlaag door menselijke activiteiten op gang gebracht. Men ging nu ook na welke rol de ruimteraketten daarbij spelen. Nu kwam ook de HCl-uitstoot van de vaste-brandstofraketten aan de orde. Johnston wees op het gevaar van deze chlooruitstoot en dit gevaar werd door een aantal groepen van onderzoekers geanalyseerd. Hoewel bij de huidige frequentie van de ruimtevluchten het chloorgevaar nog klein is zal men er bij vluchten boven de troposfeer steeds attent op moeten zijn. De NASA speelt daarbij een leidende rol.

Hfdst. 3

3.1 De spuitbusoorlog 33
In 1950 kwamen de eerste spuitbussen, met CFK's als drijfgas op de markt. Deze goedkope en inerte gassen met een laag kookpunt leken bovendien ideaal voor koelinstallaties, schuimplastic en brandblusschuim.

3.2 De vergissing van Lovelock 34
Lovelock bouwde uiterst nauwkeurige apparatuur waarmee hij in 1971 en 1972 tussen Engeland en Antarctica metingen deed aan de atmosferische concentraties van de 'onverwoestbare' CFK's die zich in de troposfeer ophoopten, en daar volgens Lovelock 'geen enkel denkbaar gevaar' met zich meebrachten. Maar deze CFK's bevatten chloor en andere wetenschappers beseften dat dit chloor de ozonlaag zou kunnen aantasten wanneer de CFK's in de stratosfeer doordringen en daar door UV-stralen worden afgebroken. Lovelock heeft zich ook later vergist toen hij meende dat de jaarlijkse ozonafbraak bij de zuidpool niet door de aanwezigheid van CFK's kon worden veroorzaakt.

3.3 Rowland brengt het probleem ter sprake 37
Een reeks toevallige gesprekken in wandelgangen bij congressen bracht Rowland ertoe om het lot van CFK's in de atmosfeer nader te bestuderen en in 1973 vond hij, samen met Molina, dat de door chloor gekatalyseerde reacties, bij een ongewijzigde CFK-uitstoot op het niveau van 1972, binnen 30 jaar 20 tot 40% van het ozonschild zouden vernietigen. Het belang van hun publicatie in Nature werd in juni 1974

in Engeland eerst over het hoofd gezien, maar het bericht verscheen een paar maanden later wel in de Amerikaanse kranten.

3.4 De boodschap wordt uitgedragen 41
Voor het einde van 1974 kwamen er bevestigende rapporten van andere Amerikaanse onderzoekers en tegen het eind van het jaar was het gevaar van de CFK's tot de nationale televisie doorgedrongen. Onmiddellijk kwamen de chemiereuzen, die de CFK's produceren, in verzet en de 'spuitbusoorlog' was begonnen. Uit deze propagandaoorlog kwamen nieuwe rapporten te voorschijn die tot actie van de overheid zouden leiden. Inmiddels kwam Crutzen met de waarschuwing dat vernietiging van ozon de warmtebalans van de atmosfeer zou verstoren en klimaatsveranderingen tot gevolg kon hebben.

3.5 Hoe staan de zaken nu? 45
In oktober 1978 werd in de VS de toepassing van CFK's als drijfgas voor spuitbussen verboden. De Chemical Manufacturers Association zette een netwerk van CFK-meetstations op dat later in een overheidsnetwerk werd geïntegreerd. De CFK-concentraties bleken met 5% per jaar toe te nemen. De aanvankelijke vermindering van de CFK-uitstoot werd al gauw te niet gedaan doordat de rest van de wereld niet meedeed. Ook de regering Reagan had minder belangstelling voor het milieu. Maar de United Nations Environmental Program (UNEP) slaagde erin in 1985 de Weense Conventie voor de bescherming van de ozonlaag bijeen te brengen en die werd in 1987 door de Conferentie van Montreal gevolgd.

Hfdst. 4 4.1 Ozon-eters en de biosfeer 49
Het SST-vraagstuk van de jaren zeventig had de belangstelling van het gevaar van NO_x voor de ozonlaag gewekt en in 1974 wees Crutzen nog op een andere antropogene oorzaak van NO_x-vervuiling en dat was de kunstmest. De verklaring daarvan volgt uit de stikstofcyclus.

4.2 Biologische kringlopen 50
De organische chemie houdt zich bezig met de studie van koolstofverbindingen en daartoe behoren ook de aminozuren, verbindingen met stikstof, die de eiwitten vormen. Die eiwitten zijn bouwstenen van DNA en RNA, de dragers van de genetische code. Levende organismen moeten stikstof opnemen en bij dit proces zijn bacteriën betrokken waarvan sommige zuurstof nodig hebben die aan nitraten in de bodem kan worden onttrokken. Hierbij komt lachgas (N_2O) vrij.

4.3 Lachgas is niet zo grappig 53
Evenals CFK's wordt lachgas niet in de troposfeer aangetast, maar het wordt in de stratosfeer door de UV-straling afgebroken tot NO. Dat is dan een katalysator bij de ozonafbraak die het evenwicht in de stratosferische ozonconcentratie moet onderhouden. aldus is ook de stikstofkunstmest een bedreiging voor de ozonlaag. Dit geldt ook voor verbranding van steenkool en olie.

4.4 Dinosaurussen en scenario's voor de ondergang 56
Het magnetisch veld om de aarde beschermt ons tegen kosmische straling. Wanneer een tijdelijke verzwakking van dit aardmagnetisch veld samenvalt met een exploderende supernova of een uitbarsting van zonneactiviteit dan maakt de uit protonen bestaande kosmische straling stikstofatomen vrij die NO_x-moleculen vormen en zo de vernietiging van de ozonlaag bevorderen. Dit is één van de verklaringen voor de ondergang van de dinosaurussen, 65 miljoen jaren geleden. Ook kernexplosies hebben zo'n effect.

4.5 Kleine dingen kunnen van grote betekenis zijn 59
Broom is evenals chloor gevaarlijk voor de ozonlaag. Gebromeerde chloorkoolwaterstoffen worden voor brandblussen gebruikt en broommethaan is een verstuivingsmiddel in de landbouw tegen insekten en knaagdieren. Een 'broombom' zou ook de ozonlaag kunnen vernietigen. Voor chemische reiniging worden tetrachloorkoolwaterstof en methylchloroform (door de EPA als vervanger van het 'smog'-gas trichlooretheen geïntroduceerd) geproduceerd. Natuurlijk chloor is afkomstig uit vulkaanuitbarstingen maar ook uit verbranding van plantaardig materiaal. Hiertegenover staat dat methaan (CH_4) uit moerassen, rijstvelden, termietenhopen en koeienmagen, NO kan binden en zo de stratosferische ozon beschermt maar daarentegen meer 'slechte' ozon in de troposfeer veroorzaakt. Ozontoename nabij de aarde tegenover ozonafname op grote hoogte is geruststellend wat betreft zonnebrand, maar veront rustend wat het klimaat aangaat, omdat de troposfeer warmer wordt en de stratosfeer afkoelt.

Hfdst. 5 5.1 Broeikasgassen 65
Broeikasgassen absorberen een deel van de infrarode uitstraling van de aarde en reguleren zo de temperatuur. De uitstoot van CFK's, methaan en lachgas samen met de toenemende CO_2-productie versterken dit effect en kunnen extra broeikas-opwarming van de aarde tot gevolg hebben.

5.2 Het broeikaseffect van koolstofdioxide 67
Het CO_2-gehalte van de lucht is in 1850 van 270 ppm tot 345 ppm in 1987 gestegen. Oorzaken zijn de verbranding van steenkool en olie en de ontbossing. Verdubbeling van het CO_2-gehalte (in 2030?) zal volgens modelberekeningen een stijging van de gemiddelde wereldtemperatuur tussen 1,5 °C en 7,7 °C tot gevolg hebben.

5.3 Andere broeikasgassen 69
Lovelock noemde al in 1973 de bijdrage van CFK's aan het broeikaseffect. Naast CO_2 zijn er de andere sporegassen en al die kleintjes samen leveren al een grotere bijdrage aan het broeikaseffect dan CO_2 alleen.

5.4 Het vooruitzicht op lange termijn 72
In de geschiedenis van de aarde zijn permanente ijskappen een uitzondering. Daarvoor moet zich tijdens de verschuiving van de continenten land in de buurt van de polen bevinden. Zo bevinden we ons nu in een ijstijdperk en daarbinnen in een tussenijstijd. De echte ijstijden duren gemiddeld ongeveer 100.000 jaren.

5.5 Wonen in een warmere wereld 73
Het warmer worden van de aarde zal zich het minst bij de evenaar en het meest op de hogere breedtegraden manifesteren. De verdeling van de klimaatsveranderingen over de aarde laten zich nog maar slecht door computermodellen berekenen. Wel bleek er al enige overeenstemming met opgetreden regionale perioden van extreme temperaturen. Daarbij komt de discussie over de mogelijke stijging van de zeeniveaus. Dat veranderingen niet geleidelijk behoeven te zijn, blijkt uit het plotseling optreden van de zuidpoolgat in de ozonlaag.

5.6 De invloeden op de ozon 77
Afbraak van de ozonlaag betekent minder opvang van UV-stralen en daardoor afkoeling van de stratosfeer. Doorvallende UV-stralen zullen op geringe hoogte de ozonhoeveelheid in de troposfeer doen toenemen. Daardoor wordt de troposfeer warmer, want ozon is ook een broeikasgas. Rowland wijst ook op deze gevaarlijke verstoring van de temperatuuropbouw van de atmosfeer en daaruit volgende ontregeling van de 'weermachine'.

Hfdst. 6 6.1 Het gat boven de zuidpool 81
Britse waarnemers maten vanaf 1957 het ozongehalte van de lucht boven Halley Bay bij de zuidpool. Na 1975 begon zich in de voorjaarmetingen (september, oktober) een toenemende stijging af te tekenen.

6.2 Het gat verschijnt 81
Aanvankelijk hoorde men niets van NASA, de beheerder van de satelliet die de ozonverdeling volgt. Nadat Farman in mei 1985 over zijn bevindingen te Halley Bay publiceerde, bleek dat NASA de lage waarden als waarschijnlijke meetfouten uit de waarnemingsreeksen had verwijderd. Na correctie kwam het jaarlijkse 'ozongat' inderdaad tevoorschijn. Er speelden zich dus totaal onverwachte processen in de atmosfeer af.

6.3 Chemische aspecten 84
De afname van de ozonhoeveelheid ging te Halley Bay gepaard met een toename van de CFK-concentratie. Farman veronderstelde toen al dat de zeer lage wintertemperatuur boven Antarctica het ontstaan van organisch chloor zou bevorderen. De hypothesen die vervolgens werden opgesteld, varieerden van veranderingen in de atmosferische circulatie (de 'dynamische' verklaring) en chemische afbraak van ozon door NO_x als gevolg van een toegenomen zonneactiviteit (zoals het genoemde scenario voor het uitsterven van de dinosaurussen) tot een uitbarsting van fotochemische activiteit na ongewoon koude wintercondities boven Antarctica. Onafhankelijk van elkaar kwamen een team uit Californië en de onderzoekers Crutzen en Arnold uit Duitsland met de hypothese dat de extreme koude Polar Stratospheric Clouds (PSC's) deed ontstaan en er chemische reacties op de wolkendeeltjes zouden optreden waardoor chloor wordt vrijgemaakt.

6.4 Een proces van eliminatie 87
Modelonderzoek gesteund door waarnemingen wees op een versterkte windcirculatie om het zuidpoolgebied. Deze winterse 'polar vortex' sluit dit gebied dan af voor warmere lucht uit lagere breedten. Uit ballonmetingen bleek dat in deze koude lucht een aanzienlijke stratosferische ozonafbraak optrad, waarbij chloor hoogstwaarschijnlijk een rol speelde.

6.5 Ten zuiden van Punta Arenas 91
In augustus 1987 verscheen een grote internationale ploeg van onderzoekers onder leiding van NASA met een tweetal speciaal toegeruste vliegtuigen in Punta Arenas op het zuidelijke puntje van Zuid-Amerika. Dit Airborne Antarctic Ozone Experiment (AAOE) trof in september extreem ozonverval aan. De metingen bevestigden de theorie dat in de PSC's chloor wordt vrijgemaakt dat als chlooroxide (ClO) zijn ozonvernietigend werk deed zodra de zon terugkwam.

6.6 Het Dahlem-overleg 96
Watson, de leider van het AAOE, bracht in november 1987 rapport uit tijdens de 'Dahlem Conferentie' te Berlijn, waar een aantal kopstukken van het ozononderzoek bijeen was. Ook de auteur John Gribbin was daar aanwezig. Watson toonde daar 'het rokend pistool', een overtuigende correlatie tussen de afname van O_3 en de toename van ClO wanneer het vliegtuig de polar vortex binnenvloog. De deelnemers aan de conferentie waren het eens dat er geen twijfel meer mogelijk was aan de rol die door de toenemende hoeveelheid chloor uit CFK's bij de vernietiging van ozon boven de zuidpool wordt gespeeld. Het gaat hierbij om reacties aan de ijsdeeltjes van de PSC's dus om een heterogeen systeem van een vaste, een vloeibare en een gasvormige fase, kortheidshalve 'heterogene chemische processen' genoemd. Een aantal processen in het 'koude reactievat' wordt beschreven.

Hfdst. 7 **7.1 De gevolgen voor de hele aarde 105**

7.2 De dynamica van de verdunning 105
Doordat bij de zuidpool elk jaar even 'de stop uit het ozonbad' wordt getrokken komt daar het evenwicht tussen aanmaak en afbraak bij een lagere ozonconcentratie te liggen. Nadat de polar vortex is opgelost verspreidt deze lage concentratie zich ook over lagere breedten. Maar daar blijken, onafhankelijk hiervan, ook al extra ozonverliezen op te treden.

7.3 De wereldwijde ozonuitputting 106
Satellieten vertonen de laatste tijd een wereldwijde ozonafname van gemiddeld een half procent per jaar en dat is tweemaal zoveel als uit de bekende processen valt te berekenen. Men dacht dat hiervan misschien iets aan een verhoogde zonneactiviteit zou zijn toe te schrijven. Als dit zo zou zijn zou de ozonafbraak nu weer kleiner moeten zijn want in 1988 bereikte de zonneactiviteit weer een minimum. Zo'n vermindering is niet waargenomen. Het ozonverlies heeft plaats op een gemiddelde hoogte van 40 km en bedroeg 12% tussen 1978 en 1984.

7.4 Een noordelijk gat? 108
Satellietopnamen lijken ook boven het noordpoolgebied een klein gat in de ozonlaag aan te geven, hoewel daar de toegankelijkheid voor zeestromingen een afsluitende polar vortex en zeer lage temperaturen onwaarschijnlijk maakt. Verschillende onderzoekers vonden aanwijzingen voor andere heterogene chemische processen die chloor kunnen vrijmaken zoals op zwevende druppeltjes salpeterzuur en zwa-

velzuur. Ozonafbraak na de uitbarsting van El Chichon wijst op die activiteit van zwavelzuur. Aldus zou het zwavelzuur in de Junge-laag een wereldwijde bedreiging voor de ozonlaag kunnen vormen. Nader onderzoek bij de noordpool bevestigde het plaatselijk optreden van koude insluitingen en ozonverval, waarvoor ijsvorming, zoals bij de zuidpool, niet nodig bleek. Er bestaan dus aanmerkelijk meer bedreigingen voor de ozonlaag dan er in 1987 ten tijde van de Montreal-conferentie bekend waren. De recent gemeten ozonverliezen zijn dan ook veel groter dan toen werd aangenomen.

7.5 Een griezelig scenario 118
Theoretisch bestaat de mogelijkheid dat de afkoeling van de stratosfeer het stabiele systeem van ronddraaiende winden op het zuidelijk halfrond versterkt en uitbreidt, en daarmee de wintertemperaturen en de gemiddelde ozonconcentraties verder doet afnemen. Zo'n positieve terugkoppeling zou dus de stabiliteit van de atmosfeer verstoren.

7.6 Omslagpunten 121
Er worden andere voorbeelden van positieve terugkoppelingen genoemd. De stralingsreflectie door zich uitbreidende sneeuwvelden versnelt de klimaatomschakeling naar een ijstijd. Omgekeerd zou een temperatuurverhoging en een zeespiegelstijging het afglijden van ijsmassa's bij de zuidpool kunnen bevorderen. Dit zou een metershoge verdere zeespiegelstijging tot gevolg kunnen hebben. Op grond van recente studies acht men dit echter minder waarschijnlijk.

7.7 Vaarwel Gaia? 123
De verpersoonlijking van de biosfeer als Moeder Aarde, of Gaia, symboliseert haar vermogen tot zelfhandhaving en niet de bescherming van de menselijke soort. Voorbeelden zijn de isolerende werking van de atmosfeer en de stabilisering van het zuurstofgehalte door negatieve terugkoppelingen en ook handhaven van de beschermende ozonlaag zou de mensheid al in dit proces ten gronde kunnen gaan.

Hfdst. 8 **8.1 Strategieën voor actie 127**
Hoewel bij wetenschappers alle twijfel aan de urgentie van optreden was verdwenen gold dit nog niet algemeen voor de industrie en de publieke opinie.

8.2 Het broddelwerk van Montreal 128
De overeenkomst van Montreal die in 1987 de internationale vermindering van de CFK-uitstoot moest regelen, werd net voor de onthullingen door het Airborne Antarctic Ozone Experiment

afgesloten. De noodzaak van veel verdergaande maatregelen moest nog tot de overheden en alle CFK-producenten en -verwerkers doordringen. Al ging het Protocol van Montreal dan lang niet ver genoeg, het voorzag wel in periodieke herwaarderingen van de situatie in het licht van nieuwe wetenschappelijke feiten.

8.3 CFK's vandaag 133
Helaas zijn de CFK's (F 12 voor airconditioners in auto's, F 11 voor schuimplastics, F 11 en F 12 voor koelkasten en F 113 als oplosmiddel in de chipindustrie) zeer goedkoop te vervaardigen en de huidige productiecapaciteit is zeer ruim met het oog op de export naar ontwikkelingslanden. China en India eisen voor hun groeiende koelkastproductie een 'eerlijk aandeel' op.

8.4 Lokale tactieken 134
De publieke opinie is een machtige factor want voor de producent is het koopgedrag bepalend. Reclame met milieuvriendelijkheid komt in zwang en de Groene Partij is mede bepalend voor het doortastende Duitse overheidsbeleid. De chemiereuzen Du Pont en ICI haasten zich om vervangingsmiddelen te ontwikkelen en op de markt te brengen.

8.5 Morgen is het te laat 136
Een verhoogde kans op huidkanker is maar van ondergeschikte betekenis: het fytoplankton, het begin van de maritieme voedselketen, is in gevaar en het Antarctisch ozongat is nooit voorspeld. Niemand weet waar de voortdurende toename van de ozonconcentratie verder nog op uit kan draaien. Om die toename af te snijden moet het totale CFK-gebruik direct met 95% omlaag. Helaas zal dan in de komende 20 jaren de ozonlaag toch nog verder worden afgebroken omdat er al zoveel CFK's in de troposfeer zijn opgeslagen.

8.6 Naschrift 139
In juni 1990 is te Londen het Montreal Protocol aanzienlijk verscherpt en de industrie is hard bezig met aanvaardbaarheidsstudies voor de vervangende HFK's en HCFK's. Bij die vervanging gaat het in de eerste plaats om de ODP (Ozone Depletion Potential) maar ook om de HGWP (Halogen Global Warmth Potential). De vervangers zijn namelijk ook broeikasgassen. Het besef dat het bij de ODP's en HGWP's alleen om de uiteindelijke cumulatieve effecten gaat en dat de effecten op kortere termijn doorgaans veel ongunstiger zijn, is zeker nog niet algemeen doorgedrongen. Het is daarom waarschijnlijk dat ook het huidige aangescherpte Montreal Protocol nog verder zal moeten worden aangepast waarbij men met name bepaalde 'tijde-

lijke vervangers' versneld zal moeten opruimen. De Duitse wetgeving loopt hierbij voorop. De dreigende gevolgen van een toenemende vergiftiging van de atmosfeer dwingen tot grote spoed.

Namenregister

AFEAS naschrift
Airborne Antarctic Ozone Experiment 6.5, 7.4, 8.1
Airborne Arctic Stratosphere Expedition 7.4
Albritton naschrift
Alert Bay 7.4
Alfred Wegener Institut voorwoord
Alliance for Responsible CFC Policy 8.4
Ambach, W. 7.4
American Chemical Society 3.4
American Geophysical Union, Baltimore (Maryland) 6.4
Andersen, J. 7.4
Anderson, J. 6.6, 8.1, naschrift
Angell, J. 7.3, 8.2
Applied Research Corporation 6.3
Arnold, F. 6.3, 6.6, naschrift
Arosa, Zwitserland 4.5, 7.4
Arrhenius, S. 5.1
Atkinson, R.J. 7.2
Atmospheric and Environmental Research Inc. (Cambridge, Mass.) 7.4
Atmospheric Lifetime Experiment (ALE) 3.4

Barrett, J. 6.6
Benedick, R. 8.2
Bernhard, S. voorwoord
Birks, J. voetnoot 4.4, 4.5
Blumthaler, M. 7.4
Boeing 2.1, 2.2
Boston 3.2, 3.3
Boulder, Colorado voorwoord, 2.2
Böttcher, C.J.F. 7.7
Brasseur, G. voorwoord, 6.6, 7.2, 7.4, 9.1, literatuurlijst
British Antarcticic Survey voorwoord, 6.1
Broecker, W.S. 5.2, 5.3, 5.6
Bührke, Th. naschrift (literatuur)

Callis, L. 6.4
Cape Canaveral 2.3
Carter 3.4
Chamberlain, P.C. 5.1
Chapman. S. 1.1, 1.4
Charlson, B. voorwoord
CIAP 2.2, 2.3, 3.4
Cicerone, R.J. voorwoord, 2.3, 3.4, 3.5, 5.6, 7.4
Climate Change (rapport) 5.3
CMA 3.5, 6.5, 7.4, 8.2, 8.3, naschrift
Concorde voorwoord, 1.4, 2.1, 2.2
Conferentie van Würzburg 8.2
Connor, B. 6.6
Consultative Committee on Ozone Layer 4.5
CPSC 3.5
Crutzen, P.J. voorwoord, 1.4, 2.2, 3.4, 4.1, 4.3, 4.4, 4.5, 6.3, 6.4, 6.6

Dahlem conferentie voorwoord, 3.2, 5.6, 6.5, 6.6, 7.4
Dayton, S. 7.4
Department of Transportation 2.2
Dobson 1.2, 6.2, 6.3, 7.4
Doniger, D.D. 2.2
Dotto, L. 1.4, 2.3, 3.4, 3.5
Du Pont 3.2, 3.3, 8.2, 8.4, naschrift

Eggert naschrift
El Chichon 2.2, 3.2, 4.5, 7.4, naschrift
El-Sayed, S. 8.5
Emory University Atlanta 1.4
EPA 1.4, 3.5, 4.5, 8.2, naschrift
Ephraums, J.J. 5.6
Esch, M. 3.4
European Space Agency 2.3
Europese Commissie naschrift
Evans, W. 7.4

Fahey, D.W. 7.4
Farman, J.C. voorwoord, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7.4, 8.1, 8.2, 8.5
Fay, K. 8.4
FDA 3.5
Fisher, D.A. naschrift
Flohn, H. 5.4
Freie Universität voorwoord

Freon 3.2, 3.3
Friends of the Earth 8.3

GAGE 3.4
Gaia 1.4, 3.2, 3.5, 4.1, 4.3, 5.6, 7.6, 7.7, 8.1, 8.5, naschrift
Garcia, R.R. 6.6
Goddard voorwoord, 5.3, 6.7, 6.3, 6.5, 7.3
Granier, C. naschrift (literatuur)
Greenhouse Gases and Aerosols naschrift
Gribbin, J. voorwoord, 1.3, 2.3, 7.4, naschrift
Groene Partij 8.4
Group Report, Changes in Antarctica Ozone 6.6, 7.4

Hales, C.H. naschrift
Halley Bay 6.1, 6.2, 6.5
Hamill, P. 6.3, 6.6
Hampson, J. 2.2, 4.5
Hansen, J. 5.3
Harrison, H. 2.2
Harvard 2.3, 3.3, 3.4, 7.4, 8.1
Harvard University 2.3, 3.4, 7.4
Heath, D. 4.4, 7.3, 7.4
Heilig, G. naschrift
Henriksen, T. 7.4
Hewlett-Packard 3.2
Hirschfelder, J. 2.2
Hodel, D. 8.2
Hoffman, J.S. naschrift
Hofmann, D.J. 2.2, 2.3, 7.4
Houghton, J.T. 5.6

ICI 8.4, naschrift
Inadvertent Modification of the Stratosphere (IMOS) 3.4
Institute for Applied System Analysis 5.4, 5.6
Internationaal Geofysisch Jaar 6.1
International Conference on the Ecology and Toxicology of Fluorocarbons 5.3
IPCC 5.3, naschrift
Isaksen, I.S.A. voorwoord, 4.4, 4.5, 6.6

Jaramillo, M. 6.6
Jenkins, G.J. 5.6
Johnston, H.S. 2.2, 2.3, 3.3, 4.5
Jones, R.L. 7.4
Junge, C.E. 1.4
Junge-laag 7.4, naschrift
Jungfraujoch 7.4

Kinnison, 2.2
Kirchner, G.W. 7.7
Kiruna (Zweden) 7.4
Ko, M. 7.4
Kolb, C. 3.2, 3.3
Kreuger, A. 4.4
Krüger, B. voorwoord

Labitzke, K. voorwoord
Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) naschrift
Lamont-Doherty Geological Observatory 5.2
Larsen, S.H.H. 7.4
Legrand, M.L. 3.2
Lerman, S. 1,4
Lindley, A. naschrift
Lloyd, Ph. 7.4
Lovelock, J.E. voorwoord, 3.2, 3.3, 3.5, 4.3, 5.3, 5.6, 6.6, 7.5, 7.7

Machta, L. 3.3
Mahlman, J. voorwoord, 6.4, 7.2, 7.5, 7.7
Manabe, S. 5.2
Margulis, L. 3.4
Mauna Loa 5.2
Max Planck Institut (Lindau) naschrift
Max Planck Institut f. Chemie voorwoord
Mayewski, P.A. 3.2
McCarthy, R. 3.3
McCormick, P. voorwoord
McDonald, J. 2.2
McElroy, M.E. 2.3, 3.2, 3.4, 3.5, 4.5, 6.3, 6.4, 6.6
McMurdo Station 6.3, 6.4, 6.5, 7.4
Mészáros, E. 1.4
Milne, R. naschrift (literatuur)
Molina, M. 3.3, 3.4, 3.5, 6.6
Montreal voorwoord, 3.5, 7.2, 7.4, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 9.1

NAS 2.2
NASA Jet Propulsion Laboratory (Pasadena) 6.6
NASA voorwoord, 2.2, 2.3, 3.2, 3.4, 4.4, 5.3, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7.4, 9.1
NASA Washington voorwoord
NASA-Goddard voorwoord, 5.3, 6.3, 6.5
NASA-Langley Research Center voorwoord, 5.3
National Academy of Sciences (NAS) 2.3
National Science Foundation (NSF) 6.5

Natural Resources Defense Council 2.2
NCAR voorwoord, 5.2, afkortingen
Newman, P.A. 6.3, 6.6
Nieuw Zeeland 6.4, 6.5, 7.1, 7.2
NOAA 3.3, 7.4, naschrift
NOZE 6.3, 6.4, 6.5
NOZE II 6.5

Ozone Trends Panel 7.2, 7.4

PAFT naschrift
Palca, J. 7.4
Palo Alto Research Laboratory 2.3
Parrish, A. 6.6
Pearce, F. 3.2, 7.7
Prather, M.J. 2.3, naschrift
Princeton University voorwoord, 5.2, 6.4
Proffitt, M.H. 7.2
Protocol van Montreal 7.4, naschrift
Punta Arenas voorwoord, 3.5, 6.5, 8.1, 8.2

Qiu, S. naschrift (literatuur)

R & D Associates voorwoord
Ramanathan, V. 5.3, 5.6
Reagan 3.4, 8.2
Reid, G. 4.4, 4.5
Reijnders, L. naschrift
Rogers, P. 3.4
Rowland, F.S. voorwoord, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 5.6, 6.3, 6.6, 8.1, 8.5
Royal Society 3.2
Ruderman, M. 4.4

Salawitch, R.J. 6.6, 7.4
Schiff, H. 1.4, 2.3, 3.4, 3.5
Schneider, S.H. 5.2, 5.3, 5.6
Schroeberl, M. 6.3, 6.6
Scientific Assessment of Stratospheric Ozone 7.4, naschrift
Scorer, R. 3.4
Shine, K. naschrift (literatuur)
Shklovski, I. 4.4
Solomon , S. 6.3, 6.4, 6.6, 7.4
Solomon, P.M. voorwoord, 6.4, 6.5, 6.6
Sprong, W.J.M. naschrift
SRI International (Menlo Park) 6.6
State University New York SUNY) voorwoord, 6.4, afkortingen
Stavanger 7.4
Steven, H. naschrift
Stichting Natuur en Milieu 8.4, naschrift
Stolarski, R.S. voorwoord, 2.3, 3.5
Sullivan, W. 3.4
Swager, J. naschrift (literatuur)
Sørensen naschrift

Texas A&M University 8.5
The Changing Atmosphere (eds. Rowland, Isaksen) 6.6
Tolba, M. 8.2
Tupulev 2.1
Turco, R. voorwoord, 6.3
Tyndall, J. 5.1

U.S. Atomic Energy Commission 3.3
U.S. Department of Energy 2.2
U.S. Department of the Interior 8.2
UNEP 3.4, 5.6, 8.2, naschrift
Universiteit Arizona 2.2
Universiteit van Michigan 2.3, 3.3, 3.4, 3.5
Universiteit van Oslo voorwoord
University of California (Berkeley) 2.2, 3.3
University of California (Irvine) voorwoord, 3.3
University of Chicago 5.3
University of East Anglia 5.5
University of North Carolina 5.5
University of Washington (Seattle) voorwoord
University of Wisconsin 2.2

Verenigde Naties voorwoord
Vermeulen, P.E.J. naschrift
VROM voorwoord, naschrift

Walters, S. naschrift (literatuur)
Watson, B. voorwoord, 6.5
Weense conventie (Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer) 3.4, 4.5, 8.2
Wetherald, R. 5.2
Whitten, G. voetnoot 4.4, 4.5
Wiedermann, R. naschrift
Wofsy, S.C. 2.3, 4.5, 6.6
Wuebbels, 2.2

York University, Toronto 3.4

Zafra, R.L. de 6.6
Zurer, P.S. 2.3

Zakenregister

Aardas 7.6
Aardtemperatu(u)r(en) 5.4, 7.7
Absorptie 1.2, 5.6
Ademhaling 1.3, 4.2
Aerosol(en) 3.1, 4.4, 6.5, 7.2, 7.4, naschrift (+ literatuur)
Airconditioner(s) 8.3
Airconditioning voorwoord
Algen 7.7
Aminogroep 4.2
Aminozuren 4.2
Ammoniak 1.3, 4.2
Antarctica voorwoord, 1.1, 2.3, 3.1, 3.2, 3.4, 3.5, 4.4, 4.5, 5.3, 5.5, 5.6, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 8.1, 8.5
Antarctisch(e) voorwoord, 2.2, 3.5, 4.4, 4.5, 6.2, 6.3, 6.4, 6.6, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 8.2
Arctisch 7.4, 7.7
Argon 1.2, 3.3
Atlantische Oceaan 3.2, 5.5

Bacterië(n) 1.2, 4.2, 4.3, 4.5
Bacteriële oorsprong 1.2
Ballon(nen) 6.3, 6.4, 6.5, 7.4
Ballonmetingen 6.4, 7.4
Ballonvlucht(en)6.4, 6.5
Bestrijdingsmiddelen 4.5
Biologische kringloop 4.2, 4.3
Blaasgas naschrift
Bliksem 1.1, 4.2, 7.7
Blokkerend hoog 5.5
Blusapparaten 8.2
Blussen van branden 4.5
Bosbranden 4.5, 7.7
Brandblusschuim 3.1
Brandblussers 4.5
Broeikaseffect 1.1, 1.3, 4.5, 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 6.6, 7.5, 7.6, 7.7, naschrift
Broeikasgas(sen)1.2, 5.1, 5.3, 5.5, naschrift
Broeikasopwarming 5.1
Broeikasverwarming 5.3
Broeikaswerking naschrift
Broombom 4.5
Broomhoudende 8.2
Broommethaan 4.5
Broommonoxide 6.5

CFK-11 naschrift
CFK-12 naschrift
CFK-Actieprogramma naschrift
CFK-uitstoot 3.3, 3.5, 5.3, 8.1, 8.2, 8.4
Chemiereuzen 3.4, 8.4, naschrift
Chemische industrie 1.1, 3.1, 3.4, naschrift
Chemische reinigingsindustrie 4.5
China 8.2, 8.3, naschrift
Chip(s) voorwoord, 3.1, 8.3
Chloor voorwoord, 1.2, 2.3, 3.2, 3.3, 3.4, 4.4, 4.5, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7.3, 8.5, naschrift
Chloorchemie 6.4
Chloordioxide 6.4, 6.5, 6.6
Chloorfluorkoolwaterstoffen CFK voorwoord, 3.1, 3.2, 7.2, naschrift
Chloormethaan 4.5
Chloormonoxide 6.4, 6.5, 6.6, 7.4
Chloornitraat 3.4, 6.5, 6.6, 7.3
Chlooroxide voorwoord
Chloorradicalen 2.2
Chloorverbinding(en) 2.3, 4.5, 6.4, 6.5, 6.6, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 8.5, naschrift
Chloorwaterstof4.5, 6.5, 6.6
Circumpolar vortex 7.2, 7.4
Circumpolar vortices 7.4
Cirkelvormig windpatroon 6.6
Computerberekening(en) 5.5
Computermodellen 2.2, 3.5, 5.2, 5.5, 6.4, 7.4, 8.2, naschrift
Computersimulatie(s) 5.3, 6.4, 7.4
Congress 2.2, 3.4
Continenten 5.4

Dehydratie 7.4
Denitrificatie 7.4
Derde wereldlanden 4.5, 5.3
Dimethylsulfide (DMS) 7.7
Distikstofoxide 4.2, 4.3
DNA 1.4, 4.2
Dobson-eenheden 6.2, 6.3

Dobson-spectrofotometer 1.2
Drijfgas(sen) voorwoord, 3.1, 3.2, 3.4, 4.3, 4.5, 8.4, naschrift
Dynamica 6.2, 6.4, 6.6, 7.1, 7.2, 7.4
Dynamische verandering 6.6

Economische groei 5.3
Ecosysteem voorwoord, 4.3, 7.6, naschrift
Eéncellige 1.3
Eéndimensionaal 7.4
Eiwitten 1.4, 4.2
Elektromagnetische 1.2
Energieverbruik 5.3
Equator 1.4, 5.5
Europese Gemeenschap 5.5, 8.2, 8.3

F-11 3.2, 3.3, 3.5, 5.3, 6.3, 6.5, 6.6, 8.2, 8.3, 8.4
F-12 3.2, 3.3, 3.5, 4.5, 5.3, 6.3, 6.5, 6.6, 8.2, 8.3, 8.4
F-113 3.2, 3.3, 8.2, 8.3, 8.4
Fabriek(en) 3.2, 8.2, 8.3, naschrift
Fabrikanten 8.4, naschrift
Fermentatie 1.3, 4.2
Fluor 3.2
Fossiele brandstof(fen) 5.3
Fossielen 4.4
Fotochemisch(e) 1.1, 2.2, 4.1, 4.5, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7.2, 7.3, 7.4, naschrift
Fotolyse 1.2, 1.3, 7.4
Fotolytische 7.4
Fotosynthese 1.3, 4.2
Fytoplankton 1.4, 8.5

Gebromeerde chloorkoolstoffen 4.5
Gedehydreerd(e) 6.5
Gedenitrificeerd 6.5
Gehalogeneerde 8.4, naschrift
Geisers 1.3
Gekatalyseerde 3.3, 7.4
Genetische code 4.2
Genetische manipulatie 4.2
Gletsjers 4.5, 5.5, 7.6
Graanareaal 5.5
Graangewassen 4.2
Grondstation 6.2, 6.5, 7.3, 7.4

Halogeen koolwaterstof(fen) 6.3
Halogenen 4.5
Halonen 8.2, naschrift
HCFK naschrift
HCFK-22 3.2, 5.3, 8.4, naschrift
HCFK-123 naschrift
Heterogene reacties 7.4
HFK 3.2, naschrift
HFK-134a naschrift
HGWP naschrift
High Speed Civil Transport (HSCT) 2.2
Homogene reacties 7.4
Huidkanker voorwoord, 1.4, 2.2, 2.3, 3.4, 4.5, 5.6, 8.5
Hydroxyl 6.6
Hydroxylradicaal 2.2, naschrift
Hypersonisch(e) 2.1, 2.2

India 5.5, 8.2, 8.3, naschrift
Industrialiserende naschrift
Industrie(ën) 1.1, 2.2, 3.1, 3.4, 3.5, 4.5, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, naschrift
Industrielanden naschrift
Industriële ontwikkeling 4.5
Industriële proces(sen) 4.2, 4.5
Industriële produkten 6.6
Industriële tijdperk 5.3
Industriële vervuiling 5.2
Infraro(o)d(e) 1.1, 1.2, 1.3, 5.1, 5.3, 5.6, naschrift
Interglaciale 7.6

Jaartemperatuur 1.4, 5.5

Kalksteen 1.3
Kanker 1.4, 2.2, 2.3, 3.4, 4.5, 5.6, 8.5, naschrift
Katalysator 1.2, 3.5, 4.2, 4.3
Katalytisch(e) 2.2, 3.3
Kernexplosie(s) 4.4
Kernkoppen 4.4
Kernoorlog 4.4
Kettingreactie(s) 1.2, 2.2, 2.3, 3.3
Klimaat 2.2, 3.4, 4.5, 5.3, 5.4, 5.5, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 8.5
Klimaatmodel(len) 5.3
Klimaatsverandering(en) 4.4, 5.3, 5.6, 7.5
Knolletjesbacteriën 4.2
Koeling 3.5, 8.1, 8.4, naschrift
Koelinstallatie(s) 3.1, naschrift
Koelkast(en) 3.1, 8.3
Koelkastenindustrie 8.3
Koelmiddel 4.5
Koolstof 1.3, 3.2, 4.2, 5.2, 7.7
Koolstofdioxide 1.2, 1.3, 1.4, 3.3, 4.2, 4.5, 5.1, 5.2, 5.3, 5.5, 7.7
Kosmische stralen 4.4

Koude-industrie naschrift
Krill 1.4
Kristalstructuur 6.6
Kunstmest 3.5, 4.1, 4.3
Kunstmeststoffen 4.1, 4.3

Lachgas 4.2, 4.3, 5.1, 5.3, 7.4
Lachgasconcentratie 7.4
Landbouw 4.1, 4.2, 4.5
Leguminozen 4.2
Lekdetectie naschrift
Leven voorwoord, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 3.2, 4.2, 4.3, 4.4, 5.1, 7.7, 8.3
Levend(e) organisme(n) 1.3, 1.4, 3.1, 4.1, 4.2, 4.3
Levensvormen 1.3, 4.2, 7.7
Londen 8.4, naschrift
Luchtbehandelingsinstallatie naschrift
Luchtbeweging 6.2, 6.4, 7.5
Luchtstroming(en) 3.2, 6.4
Luchtvloot 2.2

Magnetisch veld 4.4
Mars 1.3, 1.4, 3.2
Melano(o)m(a) 1.4
Menselijk immuunsysteem 1.4
Menselijk leven voorwoord, 1.1, 1.4
Menselijk lichaam 3.2, 4.2, 7.7
Menselijke activiteit(en) voorwoord, 2.1, 2.3, 4.3, 4.4, 4.5, 5.1, 5.2, 5.3, 6.6, 7.4, 7.6
Menselijke bevolking 4.5
Menselijke bijdrage 5.1
Menselijke nitraatproduktie 4.3
Menselijke soort 4.4, 7.7
Menselijke wezens 1.3
Mensheid 2.2, 7.4, 7.5, 7.7, 8.1, 8.5
Mesosfeer 1.1, 4.4
Mesozoïcum 5.4
Meteoor 1.3
Meteorieten 1.3
Methaan 1.3, 4.5, 5.1, 5.3, 5.6
Methylchloroform 4.5, naschrift
Microgolfemissie 6.4
Microgolfsignaal 6.4
Milieubeschermers 3.1
Milieuchemici 4.1
Milieulobby 3.4, 3.5
Milieuorganisaties voorwoord
Milieupolitiek 8.4
Milieuprobleem 4.5
Milieupubliciteit 8.2
Minigat(en) 6.6, 7.4

Moeder Aarde 1.4, 3.2
Moerasgas 4.5
Moerassen 4.5
Moessonregens 5.5

N_2O-concentraties 7.4
NAT ($HNO_3 . 3H_2O$) 7.4
Natuurlijke kringloop 4.5
Niet-lineair(e) 4.5, 5.5, 7.4
Niet-lineariteit 4.5, 8.2
Nimbus 7 3.5, 6.2, 6.4, 7.2, 7.3, 7.4
Nitraatademhaling 4.2
Nitraatbemesting 4.3
Nitraten 4.2, 4.3
Nitrogenase 4.2
Noordelijk halfrond 2.2, 2.3, 4.4, 5.4, 5.5, 7.4, 7.5, 7.6
Noordpool 4.4, 5.4, 7.4
Noordpoolgebied 6.6, 7.4
Noordpoolwinter 7.4
Nucleaire winter 4.4
Nucleï 7.7
Nucleïnezuren 1.4, 4.2

Oceanen 1.3, 1.4, 3.3, 5.2, 5.3, 5.5, 7.6, 7.7, 8.5
ODP naschrift
Oersoep 1.3, 4.2
Olie 1.2, 4.3, 5.2
Ontbossing 5.2
Ontwikkelingslanden 8.2, 8.3, 8.4, naschrift
Oplosmiddel 3.1, 8.3
Ozon-eters 4.1, 4.5
Ozonafbraak 3.2, 3.5, 5.6, 6.3, 6.6, 7.2, 7.4, naschrift
Ozongat voorwoord, 2.2, 3.2, 3.5, 4.4, 5.6, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 8.2, 8.5, naschrift
Ozonkolom 4.5, 7.2, 7.4
Ozonprobleem 3.2, 3.3
Ozonschild 3.3, 4.4
Ozonuitdunning 5.6, 6.2
Ozonuitputting 4.5, 6.4, 6.6, 7.3, 8.1, 8.5
Ozonverlies 6.2, 6.4, 7.2, 7.3, 7.4, naschrift
Ozonvernietiging 4.5, 6.3, 6.4, 6.6

Planeten 1.3, 1.4
Plantengroei 5.2
Polar vortex 6.4, 6.6, 7.2, 7.4
Politiek voorwoord, 2.3, 3.4, 3.5, 6.5, 8.1, 8.2
Pool 5.4, 6.2, 6.5, 6.6, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5

Poolgebied(en) 1.1, 6.4, 7.4, 7.5, 8.5, naschrift
Poolnacht voorwoord, 6.5, 6.6
Poolwervel 7.4, 7.5
Poolwinter 7.2. 7.4, 7.5
Poolwinternacht 6.1
Producent(en) 3.1, 3.5, 8.2, 8.3, 8.4, naschrift
Prognose naschrift
Protocol 8.2, 8.4, naschrift
Protonen 4.4
PSC 6.3, 6.5, 6.6, 7.4, 7.5
Publieke belangstelling voorwoord, 2.2, 3.4, 6.5

Quasi Biannual Oscillation (QBO) 3.2

Radioactiviteit 1.3
Raket(ten) 2.3, 3.4, 7.4
Raketaandrijving 2.3, 6.5
Raketmotor(en) 2.3
Ramjet 2.3
Reactievat 6.4, 6.6, 7.1, 7.5
Recycling 8.3, naschrift
Regen voorwoord, 3.3, 4.2, 5.5
Registratieverplichting naschrift
Reinigingsmiddel 4.5
Rijstvelden 4.5
RNA 1.4, 4.2
Rokend(e) pistool voorwoord, 6.6
Ruimtestation 2.3
Ruimtevaartuig(en) 2.3, 3.3
Ruimteveer 2.1, 2.2, 2.3
Ruimtevlucht(en) 2.3
Ruimtevoertuig 2.3

Salpeterzuur 3.1, 4.2, 6.5, 6.6, 7.4, naschrift
Satelliet(en) voorwoord, 2.3, 3.5, 4.4, 6.1, 6.2, 6.3, 6.5, 7.2, 7.3, 7.4
Satellietgegevens voorwoord, 6.2, 7.4
Satellietmetingen 6.2
SBUV 6.2, 6.4, 7.3, 7.4
Scenario(s) 4.4, 4.5, 5.5, 6.3, 7.4, 7.5, 7.7, 8.2
Schuim 3.1, 8.3, 8.4, naschrift
Schuimfabricage naschrift
Schuimisolatie 3.1
Schuimplastic voorwoord, 3.1, 8.3, naschrift
Scientific Assessment Report naschrift
Sedimenten 1.3
Smog 1.1, 2.2, 4.5, naschrift
Sneeuw 5.4, 7.6
Sneeuwvelden 5.1, 7.6
Snowblitz 7.6
Sojabonen 4.2
Space Shuttle(s) 2.3, 3.4, 4.1
Spectrofotometer 6.1, 6.2, 6.4
Spectroscopi(e)sche 1.2, 6.1
Spectrum 1.1, 1.2, 1.3, 5.1, 6.1
Sporegassen 5.1, 5.3, 5.6, 7.4
Spuitbus(sen) voorwoord, 3.1, 3.2, 3.4, 3.5, 4.1, 4.3, 4.5, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, naschrift
Spuitbusoorlog 3.1, 3.2, 3.4, 3.5, 4.1, naschrift
Spuitbusuitstoot 8.2
SST voorwoord, 2.1, 2.2, 2.3, 3.3, 4.1, 7.2
Steenkool 4.3, 5.1, 5.2, 5.3
Stikstofbinding 4.2
Stikstofcyclus 4.1
Stikstofonttrekkende bacteriën 4.3
Stikstofonttrekking 4.3
Stikstofoxide(n,s) 1.2, 2.2, 2.3, 3.4, 4.1, 6.4, 6.5, 7.3
Straalmotoren 2.3
Straalvliegtuig(en) 2.2, 6.5
Stralingsevenwicht 7.5
Stratopauze 1.1
Stratosferische vliegtuigen 2.2
Sulfaataerosolen 7.2
Sulfaatdeeltjes 7.4
Sulfaatgehalte 2.2
Sulfaattoename 2.2
Super SST 2.1
Supernova 4.4
Supersonisch voorwoord, 2.1, 2.2

Temperatuurdaling 4.4, 5.6
Temperatuuropbouw 5.6
Temperatuurpatronen 5.2, 5.5
Temperatuurspreiding 5.5
Temperatuurstijging 5.2, 5.5
Temperatuurtoename 5.2, 5.3
Temperatuurverandering(en) 4.5, 5.6
Temperatuurverschil(len) 5.5
Termietenheuvels 4.5
Terugkoppeling(en) 3.2, 4.3, 4.5, 7.5, 7.7
Thermosfeer 1.1
Toendra 7.7
TOMS 6.2, 6.4, 6.5, 6.6, 7.1, 7.2, 7.4
Trichloorethaan 4.5
Trichlooretheen 4.5, naschrift
Tropisch(e) 5.4, 7.7
Tropopauze 1.1, 4.5
Tussenijstijd 5.4

UFO 2.2

Uitlaatgas voorwoord, 2.2, 2.3, 3.5
Ultraviolet voorwoord, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 3.3, 3.5, 4.3, 4.4, 4.5, 5.1, 5.6, 6.5, 6.6, 7.3, 7.5, 8.5
Ultraviolet zonlicht 5.6, 6.6, 7.3, 7.5
UV 1.2, 1.3, 1.4, 3.3, 6.6, 7.4, naschrift
UV-B 1.4

Venster 5.1, naschrift
Venus 1.3, 1.4
Verbranding 1.3, 1.4, 2.3, 4.3, 4.5, 5.1, 5.3, 7.7
Verbrandingsgassen 2.2
Verdubbeling van de koolstofdioxide 5.2, 5.5
Verdunning 7.2, 8.2
Verstuiver(s) 3.1
Verstuivingsmiddel(en) 3.4, 4.5
Vervanger(s) 8.4, naschrift
Vervanging(en) naschrift
Vervangingsmiddel(en) 8.2, 8.4
Vissen 1.4, 8.5
Vliegtuig voorwoord, 2.1, 2.2, 2.3, 6.5, 6.6, 7.4
Vlinderbloemigen 4.2
Voorjaarsgat 7.4
Vrije radicalen 3.3
Vruchtwisseling 4.2
Vulkaan 2.2, 7.4
Vulkaanuitbarsting 7.4
Vulkanen 1.3, 2.3, naschrift
Vulkanisch(e) 1.3, 2.3, 3.2, 3.5, 4.5, 5.5, 7.4, naschrift
Vuur 1.4, 4.3

Walvis 1.4
Warmtebalans voorwoord, 3.4, 4.5, 5.6
Waterdamp 1.3, 2.2, 5.1, 5.3, 7.6
Waterstof 1.3, 2.2, 2.3, 3.2, 4.2, naschrift
Waterstofchloride 7.4
Weermachine 5.6
Weerpatronen voorwoord, 4.5, 5.6
Weersatelliet 4.4, 6.2
Wereldbevolking 1.4, 8.3
Wereldmilieu voorwoord, 3.5, 5.3, 8.4
Wereldtemperatu(u)r(en) 4.5, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5
Wervel 6.4, 6.6, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5
Windpatronen 5.5, 6.4, 6.6, 7.4
Winternacht 6.6, 7.3
Wolkendek 6.5, 7.7

IJsdeeltjes 6.6
IJskap(pen) 1.4, 5.4, 5.5, 7.6
IJskristallen 2.2, 7.4
IJstijd(en) 1.4, 5.4, 7.5, 7.6, 7.7
IJstijdperk 5.4
IJsveld(en) 5.4, 7.6
IJzeroxide 1.3

Zee 1.1, 1.3, 4.3, 4.4, 5.1, 5.5, 7.6, 7.7
Zeeniveau(s) 1.1, 1.4, 5.5, 5.6, 6.2, 7.6
Zeeoppervlak 5.1
Zelfherstel 5.6
Zonne-energie 1.1, 1.2, 1.3, 5.1, 7.6, 7.7
Zonneactiviteit 4.4, 7.3
Zonnebaden 1.4
Zonnebrand 3.4, 4.4
Zonnevlam 4.4
Zonnevlekken 4.4
Zonnewarmte 2.2
Zuidelijk halfrond voorwoord, 2.2, 3.4, 3.5, 4.4, 6.1, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7.1, 7.2, 7.4, 7.5
Zuidpool 3.2, 4.4, 5.2, 5.4, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7.1, 7.4, 8.5, naschrift
Zuidpoolgebied 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7.3, 7.4, 7.5, 8.1, 8.2
Zuidpoolwinter 6.2
Zure depositie naschrift
Zure regen voorwoord, 4.5, 8.2
Zuurdruppels 7.4
Zwavelvrije brandstof 2.2
Zwavelzuur 6.6, 7.4, naschrift
Zwavelzuurdeeltjes naschrift