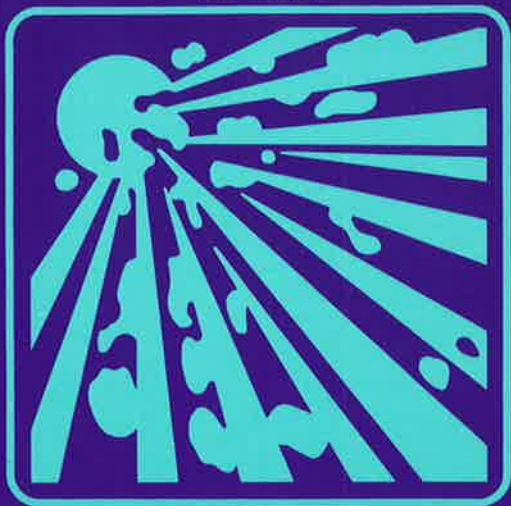


OZONLAAG

1EC
B2942

de beschermers bedreigd



Vragen en antwoorden
op een rij gezet door TNO

OZONLAAG

de beschermer bedreigd

© 1989 TNO, Den Haag
ISBN 90 330 1511 0 / CIP
NUGI 831

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

No part of this book may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm or any other means without written permission from the publisher.

Zetwerk en lithografie: Migg bv, Sneek
Omslag: Wim de Vries, Leeuwarden
Druk: Tulp bv, Zwolle

OZONLAAG

de beschermmer bedreigd

Vragen en antwoorden
op een rij gezet
door TNO

auteurs:

drs. M.G.M. Roemer
drs. W.J. van den Brink

Friese Pers Boekery bv

DRACHTEN / LEEUWARDEN



INFO-REEKS

In deze reeks zijn reeds verschenen:

- Straling en radioactiviteit
- Kanker, je moet er meer van weten
- Gif in de grond
- Voeding en sport
- Aids een race met de tijd
- Trombose, je moet er meer van weten
- Uw huis verstandig bewoond
- Technologie, wat gebeurt er?
- Ons oor en het geluid om ons heen
- Ozonlaag, de beschermer bedreigd

Inhoud

	Pagina
<i>Voorwoord</i>	8
1. <i>Inleiding</i>	10
Is luchtverontreiniging een probleem van de huidige tijd?	
Wat is de samenhang tussen de diverse soorten luchtverontreiniging?	
2. <i>De atmosfeer, chemie en meteorologie</i>	18
Wat is de atmosfeer?	
Uit welke elementen bestaat de atmosfeer?	
Wat is de rol van het zonlicht?	
Wat is ozon?	
Hoe is de ozonlaag ontstaan?	
Is de ozonlaag er altijd geweest?	
3. <i>Ozon in de stratosfeer</i>	27
Sinds wanneer meet men stratosferisch ozon?	
Hoe meet men ozon?	
Is de dikte van de ozonlaag van nature constant?	
Hoe onderscheidt men natuurlijke variatie van 'echte' aantasting?	
Wat is de trend in het ozongehalte?	
Waardoor wordt de ozonlaag aangetast?	
Wat is het gat in de ozonlaag?	
Is er een verklaring voor het feit dat het gat zich boven de Zuidpool bevindt?	
Kunnen er elders ook gaten voorkomen?	
Welke stoffen zijn 'verdacht'?	
Waarvoor worden deze stoffen gebruikt?	
Hoe lang en hoe ver zal de aantasting van de ozonlaag doorgaan?	
Kan de aantasting van de ozonlaag zo ver gaan dat er geen herstel meer mogelijk is?	

4. *Ozon in de troposfeer* 47
Hoe komt ozon in de troposfeer?
Hoe gaat de chemische vorming van ozon in zijn werk?
Is de vorming van ozon in de troposfeer overal hetzelfde?
Neemt de ozonconcentratie in de troposfeer toe?
Welke bronnen zijn verantwoordelijk voor de emissies?
Veranderen deze emissies?
Kan de ozonconcentratie in Nederland worden teruggebracht?
5. *Broeikaseffect* 58
Wat is het broeikaseffect?
Welke stoffen zijn er bij het broeikaseffect betrokken?
Waardoor komt CO₂ in de atmosfeer?
Is de atmosfeer in staat opwarming tegen te gaan?
Hoeveel stijgt de temperatuur?
Hoeveel fluctueert de temperatuur van nature?
6. *Zure regen* 68
Wat is zure regen?
Welke stoffen zijn erbij betrokken?
Waardoor komen deze stoffen vrij?
Hoe zuur is de zure regen?
Hoe hoog is de belasting van de Nederlandse bodem door zuur?
Hoe is de situatie in het buitenland?
Is Nederland een importeur of een exporteur van zure regen?
7. *Gevolgen en effecten* 74
Hoeveel extra U.V. komt er aan de grond als de ozonlaag dunner wordt?
Leidt toeneming van U.V.-straling tot huidkanker?
Zijn er nog andere nadelige gevolgen voor de gezondheid?
Is het nog wel veilig om in de zon te zitten?
Zijn er middeltjes die tegen extra U.V. beschermen?
Welke gevolgen zijn er voor dieren en planten?
Is ozon gevaarlijk voor de gezondheid?
Zijn CARA-patienten gevoeliger voor verhoogde ozoncon-

centraties dan anderen?

Is er een verhoogde kans op infectieziekten van de longen en op longkanker?

Wat zijn de gevolgen voor planten en bomen?

Wat zijn de gevolgen voor de landbouw?

Wat zijn de effecten van ozon op materialen?

Welke grenswaarde wordt in Nederland voor ozon gesteld en wordt die wel eens overschreden?

Wat zijn (in het kort) de gevolgen van het broeikaseffect?

Wat zijn (in het kort) de gevolgen van zure regen?

8. *Maatregelen en beleid* 85

Welke maatregelen met betrekking tot de ozonlaag zijn al getroffen in internationaal verband?

Welke maatregelen met betrekking tot de ozonlaag zijn al getroffen in nationaal verband?

Welke maatregelen zijn er getroffen met betrekking tot ozon in de troposfeer?

Welke maatregelen zijn er getroffen met betrekking tot het broeikaseffect?

Welke maatregelen zijn er getroffen met betrekking tot zure regen?

Zijn de huidige maatregelen voldoende?

Verklarende woordenlijst 92

Register 95

Voorwoord

Het gat in de ozonlaag... Kennelijk iets om je zorgen over te maken? Wetenschappers melden alarmerende berichten: er zijn daar boven ons, in de atmosfeer, processen aan de gang waar we kennelijk geen greep op hebben, maar die de mensheid welhaast onafwendbaar op een catastrofe doen afstevenen. Andere berichten melden dat het met de gevaren allemaal wel meevalt, en dat we gewoon wat minder spuitbussen moeten gebruiken.

De informatie is voor niet-deskundigen in het algemeen verre van eenvoudig. Wat gebeurt er nu precies, en waarom is er reden tot ongerustheid? Velen weten niet dat er niet alleen sprake is van een afname van de ozon-concentratie, maar dat op leefniveau de ozonconcentraties juist stijgen. Dat lijkt mooi als compensatie, maar beide verschijnselen hebben vervelende consequenties. Ozon is een stof van cruciaal belang in de atmosfeer. Ozon draagt ook bij aan het broeikaseffect, een probleem dat zich net als de andere twee afspeelt op wereldwijde schaal.

Dit boekje legt de nadruk op de problematiek van de aantasting van de ozonlaag, waarvan het gat in de ozonlaag boven Antarctica het meest bekende verschijnsel is. Daarnaast wordt ook aandacht besteed aan de stijgende ozonconcentraties op leefniveau en aan het broeikaseffect. Het verschijnsel 'zure regen' wordt in het kort besproken om het beeld van alle (momenteel bekende) grootschalige luchtverontreinigingsproblemen te completeren. De samenstellers hebben zich tot doel gesteld om op een voor niet-deskundigen begrijpelijke wijze de ozon-problematiek uit te leggen. Aangezien in de pers regelmatig berichten verschijnen over beleidskwesties en over de door luchtverontreiniging aangerichte schade, is aan die onderwerpen relatief weinig aandacht besteed. De nadruk in dit boekje ligt op de verschijnselen zelf: welke fysische en chemische processen erbij betrokken zijn.

Voor het lezen is, dachten wij, een geringe voorkennis van chemie een voordeel maar niet noodzakelijk. Achterin het boekje is

een lijst opgenomen waarin een aantal begrippen nader wordt verklaard.

Binnen de Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek TNO wordt, naast onderzoek op een groot aantal andere terreinen, ook aan de in dit boekje beschreven onderwerpen aandacht besteed. Verschillende aspecten staan daarbij in de belangstelling. Vanuit die binnen TNO opgebouwde kennis en ervaring is dit boekje samengesteld. Het materiaal werd aangedragen door de volgende TNO-onderzoekers:

A.C. Besemer, Prof.ir. L.J. Brasser, Prof.dr.ir. P.J.H. Builtjes, Ir. H.S.M.A. Diederer, Dr. R. Guicherit, Dr. J. van Ham, Drs. R.N. Hooftman, Dr. K.D. van den Hout, Dr. C.J.M. Kramer, Dr.ir. G. de Mik, Drs. P.G. Schipper en Dr. J. Visser.

De van deze personen ontvangen informatie werd vervolgens tot het voorliggende boekje verwerkt door ondergetekenden, die dan ook verantwoordelijk zijn voor het uiteindelijke resultaat. Wij willen op deze plaats de genoemde TNO-medewerkers hartelijk dank zeggen voor hun medewerking aan de totstandkoming van deze uitgave.

Wij hopen dat dit boekje meer inzicht verschaft omtrent de niet te onderschatten problemen die de mens in de 'huishouding' van de atmosfeer veroorzaakt, en dat ook de lezer naar vermogen proberen zal een bijdrage aan de oplossing van die problemen te leveren. Daar zijn wel degelijk mogelijkheden voor, en alle kleine beetje helpen.

drs. Michiel Roemer
drs. Jan van den Brink

1. Inleiding

IS LUCHTVERONTREINIGING EEN PROBLEEM VAN DE HUIDIGE TIJD?

Sinds de mens vuur gebruikt om zich te verwarmen en om op te koken is er luchtverontreiniging. De brandstoffen waren oorspronkelijk hout, turf en gedroogde mest. De lucht in de eenvoudige hutten, met een stookplaats in het midden van de vloer en een rookgat in het dak, zal verre van aangenaam zijn geweest. Het gebruik van bruinkool en steenkool (plaatselijk al omstreeks het jaar 800) nam toe naarmate minder hout beschikbaar was door de ontbossing en de bevolking groeide. Dit gebeurde eerst in Engeland waar de atmosfeer in de dicht bebouwde steden slechter werd door het gebruik van steenkolen in woningen en in de toen nog kleine bedrijven als bakkerijen, bierbrouwerijen, smederijen, pottenbakkerijen, etc.

In 1257 volgt de eerste officiële vermelding van luchtverontreiniging als koningin Eleanor de toenmalige hoofdstad Nottingham verlaat om op het schone platteland in Tutbury Castle de rook van de stad te ontluchten. Spoedig daarna werd Londen residentie en hoofdstad, maar ook daar werden sea-coles (overzee vanuit Newcastle aangevoerde steenkolen) gestookt. Deze in dagbouw gewonnen vette kolen waren eigenlijk ongeschikt om in open haarden te stoken zodat ook in Londen een dichte rook hing. Het parlement vaardigde in 1273 de eerste wet op de luchtverontreiniging uit, waarbij het stoken van sea-coles verboden werd gedurende de periode dat het parlement bijeen was. In 1306 werd het verband nog eens onderstreept door een koninklijk besluit dat het stoken van sea-coles verbood in de periode dat de koning in de Tower verbleef. Nog datzelfde jaar werd een overtreder veroordeeld en ter dood gebracht. Veel geholpen heeft het niet, want in 1661 schreef John Evelyn, een adviseur van de koning, een rapport over luchtverontreiniging dat afgezien van de woordkeus bijna modern aan doet. Zelfs de aanbevelingen van groengordels en brandstofkeuze passen nog in onze tijd. De aanhef van het rapport liegt er niet om:

Fumigium

Or the Inconvenience of the Aer and Smoake of London Dissipated.

It was one day, as I was walking in Your Majesties Palace at White Hall, (where I have sometimes the honour to refresh myself with the Sight of Your Illustrious Presence, which is the Joy of Your Peoples hearts) that a presumptuous smoake issuing from one or two tunnels neer Northumberland-House, and not far from Scotland-Yard, did so invade the Court; that all the Rooms, Galleries, and Places about it were filled and infested with it; and that to such a degree, as Men could hardly discern one another from the Clowd, and none could support, without manifest Inconveniency.

Ondanks de in het rapport voorgestelde maatregelen van planologische aard, samen met een wetsvoorstel betreffende brandstoffen en locatiekeuze voor bedrijven, wordt de lucht in Engeland niet schoner. Herdrukken van het rapport in 1772, 1825 en 1933 kunnen niet voorkomen dat in 1952 tijdens een dichte Londense mist ongeveer 4000 personen meer dan normaal sterven.

Ook in Nederland wordt de luchtverontreiniging ervaren en bestreden. In de meeste grote steden worden plaatselijke keuren opgesteld, waarmee voornamelijk de locatiekeuze van bedrijven en de te gebruiken brandstoffen worden geregeld. John Evelyn vermeldde al dat in Holland grote hoeveelheden hout voor dit doel werden geïmporteerd. Bij ons zijn dergelijke keuren bekend van:

1608 Haarlem

1615 Breda

1622 Utrecht

circa 1655 Amsterdam

Bij ons bleef het probleem beperkt doordat tot de Tweede Wereldoorlog de industrie van bescheiden omvang bleef. Het stoken van kolen voor de verwarming van gebouwen leverde wel een flinke hoeveelheid zwaveldioxyde (SO_2) en roet op.

Na de Tweede Wereldoorlog ontwikkelt in de westerse wereld de industrie zich zeer snel en neemt ook het gemotoriseerde verkeer snel in omvang toe. Het gevolg is dat er naast de klassieke ver-

ontreinigende stoffen zoals zwaveldioxyde en roet vele andere stoffen de lucht in gaan zoals koolwaterstoffen, stikstofoxyden, loodverbindingen etc. Door de overschakeling op het zwavelvrije aardgas halverwege de zestiger jaren daalt evenwel de concentratie van zwaveldioxyde in de stedelijke gebieden aanzienlijk. Concentraties van andere stoffen daarentegen nemen toe.

In Los Angeles wordt in 1944 melding gemaakt van hinderlijke smogsituaties. Deze smog heeft echter een geheel ander karakter dan de zogenaamde Londensmog, waarbij een combinatie van zwavel en mist voor overlast zorgt. Het verschijnsel in Los Angeles treedt in de vroege middag op bij overvloedige zonneschijn. Begin jaren vijftig wordt duidelijk dat deze smog gevormd wordt door reacties van koolwaterstoffen met stikstofoxyden onder invloed van licht waarbij ozon ontstaat. Sindsdien spreekt men van fotochemische luchtverontreiniging. In 1955 worden in het Nieuwe Waterweggebied de eerste verschijnselen van fotochemische luchtverontreiniging duidelijk. In 1969 wordt in het Westland voor het eerst beschadiging van gewassen door ozon aangetoond. In 1971 wordt na een drie weken durende smogperiode die bijzonder veel klachten opleverde het Rijnmondgebied tot saneringsgebied aangewezen.

In het begin van de jaren zeventig begint het besef te komen dat het milieu werkelijk bedreigd wordt. Er worden maatregelen getroffen om de luchtverontreiniging te bestrijden. Voor sommige stoffen heeft dit succes, voor andere duidelijk niet.

Tot voor de Tweede Wereldoorlog was er vrij weinig bekend over de chemie van de atmosfeer. Nadien is de ontwikkeling van deze tak van wetenschap snel gegaan. Een duidelijke impuls aan de ontwikkeling van de atmosferische chemie werd gegeven door de groeiende bezorgdheid over de gevolgen van de luchtverontreiniging en de daarmee samenhangende behoefte meer te weten over de chemische (en fysische) processen in de atmosfeer. Met het voortschrijden van de kennis werd duidelijk dat bepaalde vormen van luchtverontreiniging niet beperkt bleven tot de brongebieden maar ook in veraf gelegen gebieden merkbaar waren.

Onderscheid wordt gemaakt naar de schaal waarop de processen spelen. Zo spreekt men van luchtverontreiniging op stedelijke, landelijke, continentale en mondiale schaal om de omvang van het

probleem aan te geven. In dit boekje komen alleen de grootschalige luchtverontreinigingsproblemen aan de orde: aantasting van de ozonlaag, toeneming van het ozongehalte op leefniveau, zure regen en het broeikaseffect.

Zure regen is een probleem dat vooral op continentale schaal speelt. De zure regen in Europa is geheel en al een gevolg van de uitstoot van verzurende stoffen in Europa en wordt niet door Amerikaanse emissies beïnvloed. Het verschijnsel kreeg pas bekendheid nadat de gevolgen ervan duidelijk werden: de verzuring van de meren in Scandinavië en de aantasting van de bossen in West-Duitsland. Toen duidelijk was dat de omvang van de schade groot was werd er geld beschikbaar gesteld om het probleem te onderzoeken. Een bestrijdingsbeleid dateert van de laatste jaren.

Aantasting van de ozonlaag, de toeneming van ozon op leefniveau en de toeneming van het CO₂ gehalte in de atmosfeer zijn problemen die spelen op mondiale schaal.

Bezorgdheid over de aantasting van de ozonlaag heeft in een kleine wetenschappelijke kring al een vrij lange geschiedenis. Het veelvuldig testen van atoombomben in de atmosfeer zou een bedreiging voor de ozonlaag kunnen zijn. Meetbaar bewijs hiervoor is echter nooit gevonden. Aan het einde van de jaren zestig en in het begin van de jaren zeventig stonden in de Verenigde Staten de supersonische vliegtuigen (de zgn S.S.T.'s, zoals de Concorde) ter discussie. Bij een intensief gebruik van deze vliegtuigen zou de dikte van de ozonlaag met ongeveer 4% afnemen ten gevolge waarvan de kans op huidkanker zou toenemen. Financiële overwegingen deden de Amerikaanse vliegtuigmaatschappijen afzien van de bouw van dit soort vliegtuigen. Door de relatie met kanker werd het Amerikaanse publiek zich bewust van het belang van de ozonlaag.

De in 1974 door Rowland en Molina ontwikkelde theorie over de aantasting van de ozonlaag door C.F.K.'s was verrassend. Van deze stoffen was bekend dat ze nergens mee reageerden en volkomen veilig voor de volksgezondheid waren. Gevolg van deze theorie was dat in de V.S. de toepassing van C.F.K.'s als drijfgassen in spuitbussen verboden werd. Toen in de hieropvolgende jaren duidelijk werd dat het met de verwachte aantasting wel meeviel verflauwde de belangstelling. Met de ontdekking van het zogenaamde gat in de ozonlaag boven de Zuidpool kreeg het probleem

hernieuwde aandacht. De publieke bezorgdheid leidde ertoe dat het probleem ook politieke aandacht kreeg. Met het aanpakken van het probleem is intussen ook in andere landen een zeer voorzichtige begin gemaakt.

In 1896 reeds publiceerde de Zweedse onderzoeker Arrhenius een artikel waarin hij wees op het gevaar van stijging van het CO₂ gehalte door het verbranden van kolen. Na hem wezen vele andere geleerden op mogelijke gevaren. Pas de laatste 10-15 jaar begint wereldwijd het besef door te dringen dat stijging van de CO₂ concentratie een groot probleem vormt. Onlangs, op een conferentie in Toronto, is een beroep gedaan op regeringen en industrie om te beginnen met het verlagen van de CO₂ emissies.

Dat hoge ozonconcentraties aan de grond slecht zijn voor de gezondheid is al geruime tijd duidelijk. In enkele landen zijn maatregelen getroffen om de piekwaarden van de ozonconcentratie te verlagen. Hoewel die maatregelen in die landen tot resultaat hebben geleid is intussen gebleken dat ook buiten de geïndustrialiseerde gebieden een ozonprobleem is ontstaan; de jaargemiddelde concentraties stijgen verontrustend. Stijging van het (jaar)gemiddelde ozongehalte op leefniveau is de nieuwste vorm van mondiale luchtverontreiniging. Onderzoek wordt er wel aan verricht, een internationaal bestrijdingsbeleid is nog niet op gang gekomen.

WAT IS DE SAMENHANG TUSSEN DE DIVERSE SOORTEN LUCHTVERONTREINIGING?

De vier grootschalige luchtverontreinigingsproblemen (aantasting van de ozonlaag, stijging van ozonconcentratie in de onderste luchtlagen (de zogeheten troposfeer), zure regen en het broeikas-effect) worden in dit boek apart besproken. Deze problemen staan echter niet geheel los van elkaar. Oorzaken en gevolgen van deze verschijnselen zijn voor een deel gemeenschappelijk. Wat is het verband ertussen?

In de tabel zijn voor de vier verschijnselen de belangrijkste karakteristieken samengevat.

	aantasting ozonlaag	stijging ozon in de troposfeer	zure regen	broeikas effect
betrokken stoffen	C.F.K.'s Halonen N ₂ O	Koolwater- stoffen NO _x CO	SO ₂ NO _x NH ₃	CO ₂ C.F.K.'s N ₂ O CH ₄ O ₃
belangr.fysisch/ chemisch gevolg	meer ultra- violette stra- ling op aarde		verzuring van bodem en water	hogere tempera- tuur op aarde
maatschappelijk gevolg	grotere kans op huidkanker	aantasting planten	aantasting planten	stijging zee- spiegel
andere fysisch/ chemische gevolgen	hogere temperatuur op aarde	hogere temperatuur op aarde minder ultra- violette stra- ling op aarde		

- C.F.K.'s: Chloor-Fluor-Koolstofverbindingen. De vaak hier-
voor gebruikte aanduiding freon is de merknaam die DuPont,
's-werelds grootste fabrikant op dit gebied, aan deze verbindingen
heeft gegeven;
- Halonen: gelijksoortige verbindingen als C.F.K.'s; er komt ech-
ter ook Broom in voor;
- Koolwaterstoffen: de familienaam van alle mogelijke verbindin-
gen die uit koolstof en waterstof bestaan. Methaan (CH₄) is er een
van;
- NO_x: de som van stikstofmonoxyde (NO) en stikstofdioxyde
(NO₂);
- N₂O: distikstofoxyde, ook bekend onder de naam lachgas, niet
te verwarren met NO₂;
- CO : koolmonoxyde;
- CO₂: kooldioxyde;

- NH_3 : ammoniak;
- SO_2 : zwaveldioxyde;
- O_3 : ozon; de concentratie van ozon verandert niet direct door uitstoot, maar door chemische reacties in de atmosfeer.

Er worden wel eens twee 'soorten' ozon onderscheiden: het 'goede' ozon en het 'slechte' ozon. Met het goede ozon wordt het ozon in de ozonlaag bedoeld dat het leven op aarde beschermt tegen schadelijke ultraviolette straling. Het slechte ozon heeft betrekking op de ozon in de onderste luchtlagen van de atmosfeer, op leefniveau. Ozon heeft giftige eigenschappen en is al in lage concentraties schadelijk voor planten.

Het belangrijkste gevolg van een dunner wordende ozonlaag is dat meer ultraviolette straling de aarde bereikt – met ongunstige gevolgen voor de gezondheid van mensen, dieren en planten. De toeneming van ultraviolette straling op aarde door de aantasting van de ozonlaag wordt slechts gedeeltelijk gecompenseerd door verhoogde absorptie van ultraviolette straling door stijging van het ozongehalte in de troposfeer. 80-90% van alle ozon bevindt zich in de ozonlaag waardoor zelfs relatief geringe variaties daar van groot gewicht zijn. Stijgende ozonconcentraties op leefniveau leiden tot schade aan planten en bomen. De grootschalige aantasting van de Europese bossen is waarschijnlijk een gevolg van zure regen en ozon.

Ozon speelt ook een belangrijke rol in de temperatuurhuishouding van de atmosfeer. Zowel de vermindering van ozon in de ozonlaag als de toeneming van ozon in de troposfeer dragen bij tot een temperatuurstijging op aarde (zie hoofdstuk 5). Niet alleen ozon zelf, maar ook enkele stoffen die nauw verwant zijn met de ozonhuishouding zoals de C.F.K.'s, CH_4 en N_2O zijn van belang met betrekking tot de broeikasproblematiek: samen dragen ze bijna evenveel bij tot een temperatuurstijging op aarde als CO_2 . Het broeikaseffect zal leiden tot een gemiddeld hogere temperatuur op aarde en in de troposfeer. De gevolgen op lange termijn zijn groot: de zeespiegel zal rijzen en veel streken zullen een ander klimaat krijgen.

Sommige van de betrokken stoffen zijn bij meer verschijnselen betrokken. Stikstofoxyden zijn zowel van belang bij de vorming van zure regen als bij de vorming van ozon in de troposfeer. Ook me-

thaan en lachgas spelen een dubbele rol: beide zijn betrokken bij de broeikasproblematiek, methaan is van belang bij de vorming van ozon in de troposfeer en lachgas speelt een rol bij de aantasting van de ozonlaag. Een zeer belangrijk aspect van deze vormen van luchtverontreiniging, met uitzondering van zure regen, is de lange duur van de verstoringen. Zelfs indien maatregelen worden genomen die de uitstoot van de veroorzakende stoffen geheel aan banden leggen, dan nog zal het tientallen jaren duren voordat de atmosfeer weer in natuurlijk evenwicht is gekomen.

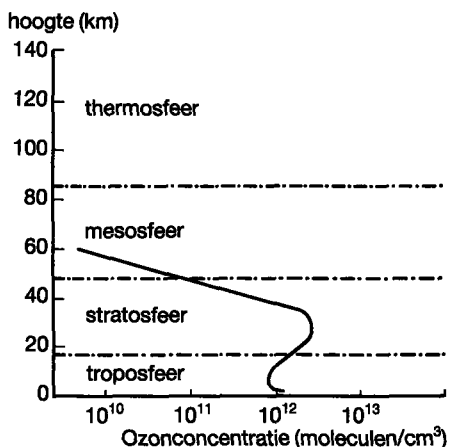
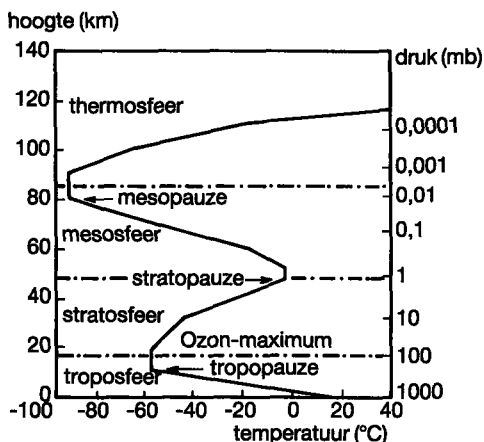
2. De atmosfeer, chemie en meteorologie

WAT IS DE ATMOSFEER?

De atmosfeer is een relatief dunne laag lucht om de aarde heen. Ten opzichte van de omvang van de aarde is de atmosfeer niet dikker dan een schil ten opzichte van een appel. De aarde heeft een diameter van 12700 km, de atmosfeer, althans het belangrijkste deel ervan, is niet hoger dan 100 km. Een duidelijke bovengrens is niet te geven, de lucht wordt steeds ijler en de atmosfeer gaat geleidelijk over in de interplanetaire ruimte. Lucht is een mengsel van stikstof en zuurstof met daaraan toegevoegd een groot aantal stoffen in relatief kleine hoeveelheden. Tot 100 km hoogte is de verdeling van stikstof en zuurstof in lucht uniform, daarboven niet meer.

Dat de lucht steeds ijler wordt met toenemende hoogte is voor iedereen die wel eens in de bergen is geweest een bekend verschijnsel. Als vuistregel kan gebruikt worden dat bij een stijging van 16 km de dichtheid van de lucht een factor 10 is afgenomen. Op 100 km hoogte is de lucht ongeveer miljoen keer zo dun als op de grond. Verrassender is het verloop van de temperatuur met de hoogte, zie figuur 2.1. De temperatuur neemt eerst af tot ongeveer -50°C op 15-20 km hoogte, stijgt vervolgens tot het vriespunt op ongeveer 50 km hoogte, daalt daarna om tenslotte na 80-90 km hoogte weer op te lopen. Dit temperatuurprofiel staat in verband met de aanwezigheid van de ozonlaag, en heeft belangrijke gevolgen voor atmosferische luchtbewegingen.

Aan de hand van het verloop van de temperatuur in verticale richting wordt de atmosfeer in een aantal lagen onderscheiden. Vanaf de grond zijn dat achtereenvolgens de troposfeer (0-15 km), de stratosfeer (15-50 km), de mesosfeer (50-85 km) en de thermosfeer (85-500 km). Deze lagen zijn niet strikt gescheiden van elkaar. Tussen de stratosfeer en de troposfeer bijvoorbeeld vindt in beperkte mate uitwisseling van lucht plaats. In de troposfeer bevindt zich 80-85% van alle massa van de atmosfeer. Omdat de gemiddelde temperatuur in de troposfeer afneemt met de hoogte,



Figuur 2.1. a) Het verloop van de temperatuur met de hoogte. Duidelijk te zien is dat de temperatuur een minimum heeft op circa 15 km en een maximum op circa 50 km hoogte. De overgang van de troposfeer naar de stratosfeer wordt tropopauze genoemd.

b) Het verloop van de ozonconcentratie met de hoogte. Met ozonlaag wordt dat gedeelte bedoeld waar de ozonconcentratie het hoogst is.

ontstaan sterke verticale luchtbewegingen, wat leidt tot wolkenvorming. De troposfeer is de laag waar het weer 'gemaakt' wordt. Het onderste gedeelte van de troposfeer, daar waar de invloed van de grond zich direct doet gelden (bijvoorbeeld op de windsnelheid) wordt grenslaag of menglaag genoemd. Sterke turbulentie zorgt ervoor dat binnen deze laag die in hoogte varieert tussen een paar honderd meter en 2-3 km alle stoffen goed gemengd worden. De stratosfeer is belangrijk doordat zich daar de meeste ozon bevindt. Tussen 15 en 35 km ligt het grootste gedeelte, circa 90% van alle in de atmosfeer aanwezige ozon. Dit gedeelte heet daarom de ozonlaag.

UIT WELKE ELEMENTEN BESTAAT DE ATMOSFEER?

Stikstof en zuurstof zijn de belangrijkste bestanddelen van de atmosfeer, samen goed voor 99% van de samenstelling. Het derde element in volgorde van voorkomen is het edelgas argon dat ontstaat als een volgproduct door radioactief verval van onder andere uranium. De edelgassen zoals argon, neon en helium reageren niet met andere stoffen en ze zijn voor de atmosferische chemie niet van belang. De overige stoffen komen weliswaar in relatief zeer kleine hoeveelheden voor (de zgn sporegassen), maar spelen niettemin een zeer belangrijke rol.

Gemiddelde samenstelling van de atmosfeer

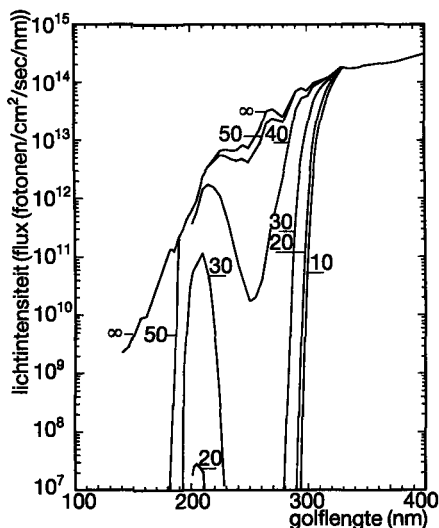
naam	symbool	volumepercentage
stikstof	N ₂	78.08
zuurstof	O ₂	20.94
argon	Ar	0.93
kooldioxyde	CO ₂	0.0340
neon	Ne	0.0018
helium	He	0.0005
methaan	CH ₄	0.00017
waterstof	H ₂	0.00005
ozon	O ₃	0.000015
koolmonoxyde	CO	0.000009
C.F.K.11	CFCl ₃	0.000000022
C.F.K.12	CF ₂ Cl ₂	0.000000036

Om de concentraties van sporegassen aan te duiden worden geen volumepercentages gebruikt maar eenheden als ppm, ppb en ppt die respectievelijk staan voor particles per million, per billion en per trillion. CO₂ bijvoorbeeld heeft dus een concentratie van 340 ppm, wat betekent dat er per miljoen luchtmoleculen 340 moleculen CO₂ aanwezig zijn. In deze tabel zijn gemiddelde concentraties weergegeven. Afhankelijk van de reactiviteit van een stof is de verdeling ervan over de atmosfeer al dan niet homogeen. De C.F.K.'s bijvoorbeeld zijn onreactief in de troposfeer en hun verdeling is homogeen. Pas in de stratosfeer worden zij afgebroken en neemt hun concentratie sterk af met de hoogte. Zeer reactieve stoffen kunnen plaatselijk, in de buurt van bronnen hoge concentraties hebben. Door hun hoge reactiviteit neemt de concentratie snel af met toenemende afstand van de bron.

WAT IS DE ROL VAN HET ZONLICHT?

Licht is elektromagnetische straling van verschillende golflengten. De samenstelling van het licht (het zgn. spectrum) hangt af van de temperatuur van het voorwerp dat licht uitstraalt. De zon heeft aan haar oppervlakte een temperatuur van circa 6000 graden; het maximum van het spectrum bevindt zich in het zichtbare golflengtegebied, d.w.z. tussen de 400 en 800 nanometer (1 nanometer, afgekort nm, is 1 miljardste meter). Voor de atmosferische chemie zijn ook de kortere golflengten (ultraviolet) en de langere golflengten (infrarood) van belang. Het zonlicht heeft twee belangrijke functies: het zorgt voor warmte en het bewerkstelligt een aantal chemische reacties die van essentieel belang zijn voor de samenstelling van de huidige atmosfeer. De samenstelling van het zonlicht op verschillende hoogten is in figuur 2.2 weergegeven. De figuur toont het kortgolfige deel van het spectrum met golflengten kleiner dan 400 nm.

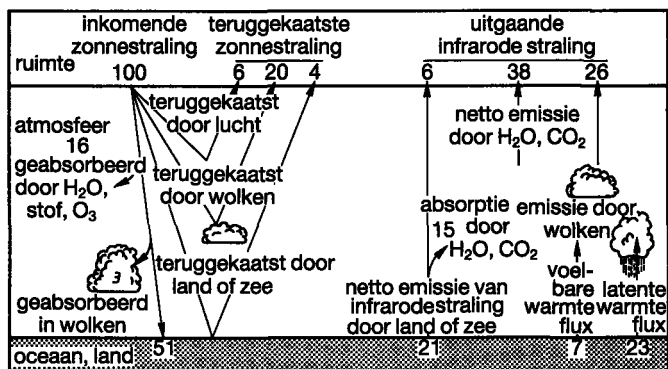
Wat gebeurt er met het zonlicht als het de atmosfeer binnendringt? Een deel van het zonlicht wordt teruggekaatst het heelal in. Voor het grootste deel van deze zogenaamde reflectie zijn wolken verantwoordelijk. Een deel van het zonlicht wordt in de atmosfeer geabsorbeerd en de rest van het licht bereikt op directe of indirecte wijze het aardoppervlak. Het licht geeft warmte aan de



Figuur 2.2. De intensiteit van het zonlicht op 10, 20, 30, 40 en 50 km hoogte en aan de top van de atmosfeer, aangeduid met ∞ . Licht met een golflengte kleiner dan 180 nm wordt boven de 50 km geabsorbeerd. Licht met een golflengte groter dan 300 nm bereikt de aarde.

aarde en aan de atmosfeer. Tegenover deze energietoevoer staat dat de aarde en de atmosfeer zelf ook straling uitzenden. Deze straling heeft een lange golflengte en is niet zichtbaar. De balans tussen inkomende zonnestraling en uitgaande langgolvlige straling is voor de aarde en atmosfeer te zamen precies in evenwicht, zie figuur 2.3. Apart bekeken ontvangt de aarde netto teveel en de atmosfeer netto te weinig straling. Dit energieverval wordt goedgemaakt doordat vanaf de aarde warme en vochtige lucht opstijgt en daardoor energie omhoog voert. Een tweede aspect is dat de evenaar veel meer warmte ontvangt dan de polen. Dit verschil in verwarming is in feite de motor achter het weer.

De van de zon afkomstige straling met een golflengte kleiner



Figuur 2.3. Stralingsbalans voor aarde en atmosfeer. De eenheden zijn relatieve eenheden van energie; 100 is de van de zon ontvangen energie. De balans werkt als volgt:

1) uit de ruimte: 100, naar de ruimte: 30 (teruggekaatste zonnestraling) + 70 (uitgaande infrarode straling) = 100.

2) uit de atmosfeer: 38 (door waterdamp en CO₂) + 26 (door wolken) = 64, naar de atmosfeer: 16 (door waterdamp, stof en ozon) + 3 (door wolken) + 15 (waterdamp en CO₂) + 7 (voelbare warmteflux) + 23 (latente warmteflux) = 64.

3) naar de aarde: 51 (zonnestraling), van de aarde: 21 (infrarode straling) + 7 (voelbare warmteflux) + 23 (latente warmteflux) = 51. Voelbare warmteflux is het opstijgen van warme lucht, latente warmteflux is het opstijgen van waterdamp; tijdens condensatie komt die warmte weer vrij.

dan 100 nm wordt boven de 100 km geabsorbeerd. Veel van de straling met een hogere golflengte wordt geabsorbeerd tussen 30 en 50 km hoogte. De lucht tussen 30 en 50 km absorbeert zoveel licht en dus warmte dat deze een hogere temperatuur heeft dan de erboven en de eronder gelegen lucht. Ook de aarde heeft een hogere temperatuur dan de bovenliggende lucht. Daardoor heeft de temperatuurcurve een geknikte vorm.

Naarmate het zonlicht verder de atmosfeer binnendringt wordt er meer kortgolvlige straling uitgefilterd. De straling die het aardoppervlak bereikt heeft een golflengte groter dan 300 nm. Dat de in-

tensiteit van zonlicht met een golflengte kleiner dan 300 nm afhankelijk is van de hoogte boven het aardoppervlak is van belang voor chemische processen in de atmosfeer. Het betekent dat de ontleding van sommige stoffen onder invloed van licht pas plaats vindt boven een bepaalde hoogte.

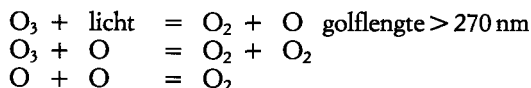
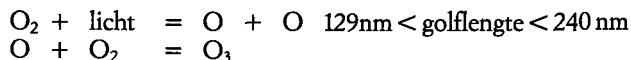
WAT IS OZON?

Ozon is een molecuul dat bestaat uit 3 zuurstofatomen; het wordt aangeduid met de chemische formule O_3 . De Duitse onderzoeker C.F. Schonbein 'ontdekte' in 1839 de stof. De naam ozon is afgeleid van het Griekse werkwoord 'ozein' dat ruiken betekent. Na elektrische ontladingen in zuurstof hangt er een sterke geur die afkomstig is van ozon. Ozon wordt geroken na een stevig onweer.

HOE IS DE OZONLAAG ONTSTAAN?

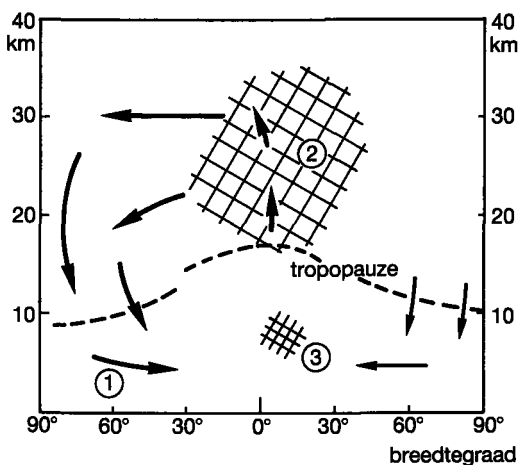
De vorming van ozon (O_3) begint met de ontleding onder invloed van licht van een zuurstofmolecuul (O_2) in twee zuurstofatomen ($O + O$). Het molecuul wordt gesplitst in twee stukken. De reactie van een zuurstofatoom met een ander zuurstofmolecuul levert ozon op. Het licht dat in staat is zuurstof te ontleden heeft een bepaalde golflengte, nl. tussen 129 en 240 nm.

Op circa 30 km hoogte wordt het meeste ozon gevormd. Daarboven is er te weinig zuurstof om veel ozon te produceren, eronder is al het licht met de vereiste golflengte uitgefilterd. Ozon zelf wordt echter ook ontleed door licht, vooral door licht met een grotere golflengte, groter dan 270 nm. Boven circa 35 km hoogte speelt ook licht met een golflengte kleiner dan 270 nm een rol. Ook kan ozon met een vrij zuurstofatoom reageren tot twee zuurstofmoleculen. De belangrijkste reacties zijn hieronder weergegeven.



Dit stelsel reacties werd in 1930 door Chapman voorgesteld als een verklaring voor de vraag hoe de ozonlaag gevormd is. De ozonlaag moet niet als een scherpbegrensde laag gezien worden, maar als een laag waar zich het grootste deel van de ozon bevindt. Ook buiten deze laag is ozon aanwezig. Het ozonmaximum bevindt zich op circa 20 km hoogte, een stuk lager dan de hoogte waarop het gevormd wordt. Door luchtstromingen wordt het ozon naar beneden gevoerd en van de tropen naar polen, zie figuur 2.4.

Er zijn twee oorzaken waardoor er ook ozon onder de ozonlaag, in de troposfeer te vinden is. De eerste is transport; met name in het voorjaar op het Noordelijk Halfrond en in het najaar op het Zuidelijk Halfrond wordt er veel ozon in de troposfeer gebracht. Dit is een belangrijke bron van ozon in de troposfeer. De tweede oorzaak is ontleding, eveneens door licht, van stikstofdioxyde (NO_2). Ook dit levert een zuurstofatoom op dat zich daarna bindt



Figuur 2.4. Vorming en transport van ozon. Het belangrijkste bron-gebied van ozon is (2). Vandaar wordt het naar de polen getransporteerd. Een deel komt in de troposfeer terecht. In de troposfeer gaat ozon verloren door chemische reacties of door depositie op de grond (1). Ozon kan ook in de troposfeer gevormd worden (3).

met een zuurstofmolecuul tot ozon. Dit is het enige chemische proces waarbij ozon in de troposfeer gevormd kan worden.

IS DE OZONLAAG ER ALTIJD GEWEEST?

Nadat de aarde was ontstaan, was er een atmosfeer die geheel anders van samenstelling was dan de huidige atmosfeer. De zgn. oeratmosfeer bevatte nauwelijks enige zuurstof. Nadat de oceanen waren ontstaan en primitieve vormen van leven mogelijk werden, kwam de zuurstofproductie langzaam op gang als een bijproduct van de fotosynthese, het proces waarbij CO_2 en water onder invloed van zonlicht worden omgezet in koolwaterstoffen en zuurstof. Door de opbouw van zuurstof werd er ook ozon gevormd. Nadat er voldoende ozon gevormd was werd het aardoppervlak beschermd tegen ultraviolette straling (golflengte kleiner dan 300 nm). Deze bescherming zorgde ervoor dat ook buiten de oceanen leven tot ontwikkeling kon komen. Er zijn aanwijzingen dat dit gebeurde vanaf het moment dat de hoeveelheid ozon in de ozonlaag de helft van de huidige waarde had bereikt.

3. Ozon in de stratosfeer

SINDS WANNEER MEET MEN STRATOSFERISCH OZON?

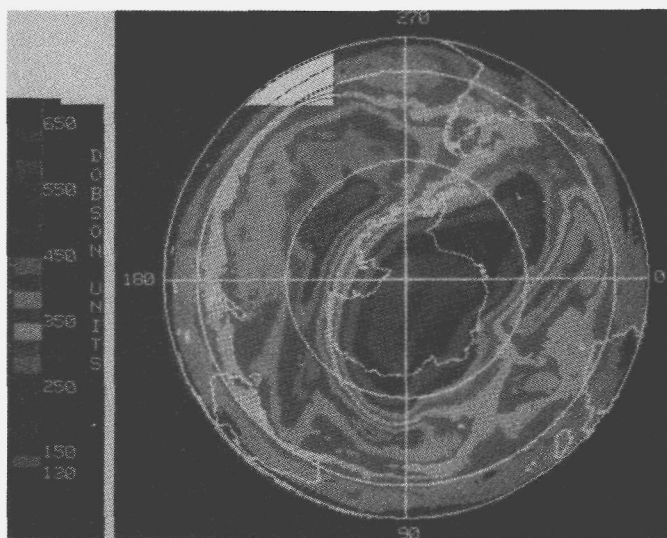
De eerste meting van de kolomdikte ozon dateert van 1913(*). Fabry en Buisson waren de eersten die vanaf de grond met behulp van een optisch instrument de totale hoeveelheid ozon in een kolom maten en zodoende experimenteel het bestaan van de ozonlaag aantoonde. In de jaren twintig werd onder stimulans van vooral Dobson de apparatuur verbeterd. In Europa werd een bescheiden netwerk van meetstations opgezet. De eerste stations waren Oxford (Engeland), Valentia (Ierland), Lerwick (Shetland eilanden), Abisko (Zweden), Lindenberg (Duitsland) en Arosa (Zwitserland). Een paar jaar later werd dit net opgeheven en werden de instrumenten verspreid over een grootschaliger net met stations op alle continenten. Behalve de stations in Oxford en Arosa waren er nu stations in Californië, Egypte, India en Nieuw-Zeeland. De resultaten gaven een indruk van het jaarverloop van de kolomdikte ozon. Tevens bleek dat de dikte van de kolom afhankelijk van de breedtegraad was.

Deze metingen gaven geen inzicht in de verticale verdeling van ozon, alleen in de kolomdikte. In het begin van de jaren dertig ontwikkelde Gotz een methode om vanaf de grond metingen te doen aan de verticale ozonverdeling, de zgn. Umkehrmethode. Deze methode maakte het mogelijk om in negen opeenvolgende lagen de concentratie te berekenen. Door de arbeidsintensiteit van de be-

(*) Onder kolomdikte ozon, ook wel ozontotaal genoemd, wordt de totale hoeveelheid ozon bedoeld die zich in een kolom van 1 cm^2 bevindt, uitgestrekt vanaf de grond tot aan de top van de atmosfeer. Wanneer men in deze kolom alle andere stoffen verwijdert en men de totale hoeveelheid ozon samendrukt onder omstandigheden van 1000 millibar en 0 graden Celsius blijft er een kolom over met een hoogte van niet meer dan 0,3 cm. Ozontotalen worden uitgedrukt in de eenheid Dobson (0,3 cm is 300 Dobson). Aangezien bijna alle ozon in de ozonlaag geconcentreerd is is de kolomdikte een maat voor de concentratie in de ozonlaag.

werkingen die op de metingen volgden duurde het tot de komst van de computers, bijna 30 jaar later, voordat deze methode routinematig kon worden toegepast.

Directe meting van het verticale ozonprofiel gebeurde met behulp van daartoe opgelaten ballons. De eerste profielmeting via oplating van een ballon met meetapparatuur en radiosondering vond plaats in 1934. Hoewel hiermee de betrouwbaarheid van de resultaten verbeterd werd bleef ook deze methode behept met vrij grote foutenmarges. De ontwikkeling van chemische meetmethoden zorgde ervoor dat de metingen betrouwbaarder werden waardoor vanaf 1960 de betekenis van de ballonoplatingen toenam. Het Internationale Geofysisch Jaar (1957/1958) gaf het onder-



Figuur 3.1. Satellietopname van de kolomdikte ozon op 10 oktober 1986 boven Antarctica, Australië en Nieuw-Zeeland en de punt van Zuid-Amerika. De donkerste vlek in het midden van de foto geeft 150 Dobson aan, de wat grotere vlek eromheen, die bijna geheel Antarctica bedekt, geeft 175 Dobson aan; de achtereenvolgende grijs tinten verschillen 25 Dobson van elkaar.

zoek aan ozon een nieuwe impuls. Een groot aantal onderzoekstations werd ingericht. Sinds die tijd bestaat er een wereldwijd netwerk van meetstations. Ozonmetingen vanuit satellieten zijn vanaf 1967 op gang gekomen. Door het grote aantal waarnemingen is het gebruik van satellieten voor het onderzoek onmisbaar geworden. Uit satellietgegevens wordt de ozonverdeling over een groot gebied voor een bepaalde dag berekend. Figuur 3.1 toont de kolomdikte ozon boven Antarctica op 10 oktober 1986.

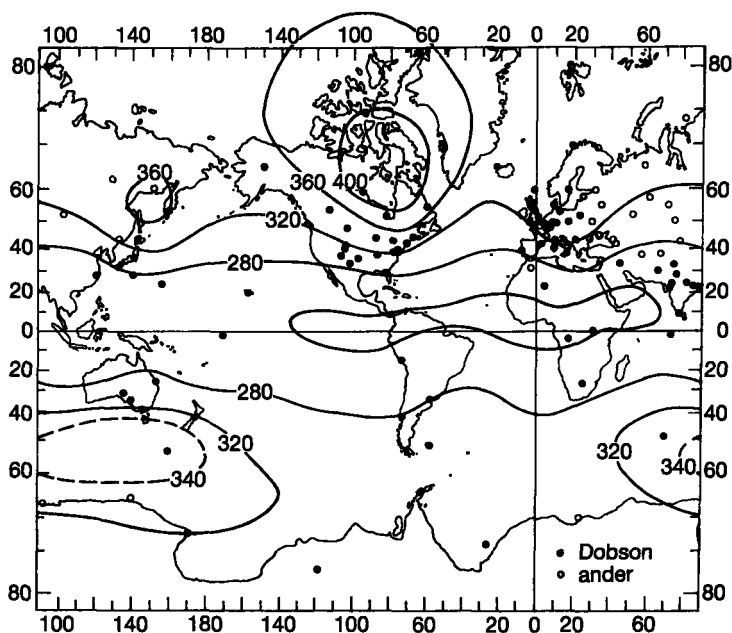
HOE MEET MEN OZON?

Ozontotalen worden gemeten met behulp van een Dobson-spectrometer. De Dobsonspectrofotometer is standaardapparatuur op meer dan 100 meetstations van het wereldwijde meetnet. Het principe van het apparaat is in de jaren dertig door Dobson ontwikkeld. Het apparaat meet vanaf de grond de intensiteit bij een aantal golflengten in het golflengtegebied tussen 300 en 340 nm. De lichtabsorptie is in dit gebied sterk afhankelijk van de golflengte. Licht met een golflengte kleiner dan 290 nm bereikt nagenoeg het aardoppervlak niet. Dit licht, waarvan de intensiteit aan de top van de atmosfeer bekend is, wordt onderweg gedeeltelijk door ozon geabsorbeerd of door luchtmoleculen en aerosolen (stofdeeltjes) in allerlei richtingen verstrooid. Men vergelijkt het verschil in intensiteit tussen twee golflengten waarvan de een sterk en de ander nauwelijks door ozon geabsorbeerd wordt. Deze intensiteitsverhouding is een maat voor de hoeveelheid geabsorbeerd licht en dus voor de hoeveelheid ozon. In de praktijk gebruikt men een aantal golflengteparen om de invloed van verstrooiing door lucht of aerosol te elimineren.

In figuur 3.2 is te zien hoe de meetstations met Dobsonspectrometers en met andere apparatuur (filterinstrumenten) over de wereld verdeeld zijn.

IS DE DIKTE VAN DE OZONLAAG VAN NATURE CONSTANT?

Er bestaat een aantal in de atmosfeer van nature voorkomende processen die de kolomdikte ozon beïnvloeden. Sommige van deze processen zijn periodiek van aard zoals de zonnecyclus en de



Figuur 3.2. Wereldwijde verdeling van Dobson- en andere instrumenten in het tijdvak 1957-1966. Ook is de gemiddelde kolomdikte ozon aangegeven.

zogenaamde quasi-biennial-oscillation, die hieronder wordt toegelicht. Andere zijn eruptief van karakter zoals vulkaanuitbarstingen. De invloed van deze verschijnselen is terug te vinden in de meetreeksen.

Onder de zonnecyclus wordt variatie van zonneactiviteit verstaan die ervoor zorgt dat met een periode van 11 jaar de van de zon ontvangen hoeveelheid ultraviolet licht varieert. Deze variatie heeft tot gevolg dat per jaar de vorming en afbraak van ozon verandert. In jaren met een maximum aan zonneactiviteit is de totale hoeveelheid ozon iets hoger dan in jaren met een minimum aan zonneactiviteit. De verandering in ozonconcentratie ten gevolge van de zonnecyclus is terug te vinden in de ozonconcentratie op grotere

hoogte, 40 km en hoger. Berekeningen op theoretische gronden worden bemoeilijkt door het feit dat niet precies bekend is hoe groot de variatie in ultraviolet licht ten gevolge van de zonnecyclus is. Er bestaan wel schattingen over de variatie in U.V. intensiteit, op grond waarvan de ozonvariatie berekend kan worden. Geschat wordt dat de kolomdikte ozon tussen jaren met een zonnemaximum en een zonneminimum een vermindering van circa 0,7% – 2,0% ondergaat.

Analyses van meetreeksen leveren schattingen van dezelfde grootte op. Hierbij doet zich het probleem voor dat er maar weinig stations zijn die een zo lange meethistorie hebben dat er drie of meer zonnecycli in passen. Op dit moment wordt een natuurlijke variatie ten gevolge van de zonnecyclus van circa 2% aangenomen.

Een tweede periodiek veranderlijk verschijnsel is de zogenaamde quasi-biennial oscillation. Het verschijnsel komt neer op een variatie in de windsnelheid in de stratosfeer met een periode van ongeveer 2,5 jaar. Binnen deze periode verandert de wind van westelijk naar oostelijk en weer terug naar westelijk. Dit verschijnsel doet zich voor in de equatoriale gebieden van de stratosfeer en is van invloed op het transport van ozon in de stratosfeer. Het verband tussen de kolomdikte ozon en de wind in de stratosfeer blijkt het meest duidelijk voor de equatoriale gebieden. Niettemin is de procentuele variatie ten gevolge van dit verschijnsel op de gematigde en polaire breedten hoger dan aan de equator. De maximale variatie bedraagt ongeveer 2%.

Vulkaanuitbarstingen kunnen grote hoeveelheden stof, en soms ook chloor, de stratosfeer inblazen. Stof heeft een verstorend effect op de metingen. Bovendien kan het de temperatuur in de stratosfeer beïnvloeden en daarmee indirect het transport van ozon over de stratosfeer. Hoewel meetreeksen van de hogere luchtlagen wel een plotselinge vermindering van ozonconcentratie laten zien, bijvoorbeeld na de uitbarsting van de Agung in 1963, is het effect op de kolomdikte ozon nauwelijks waarneembaar.

HOE ONDERSCHIEDT MEN NATUURLIJKE VARIATIE VAN 'ECHTE' AANTASTING?

Dit onderscheid is alleen te maken als de aantasting uitstijgt bo-

ven de natuurlijke variatie. Binnen bepaalde onzekerheidsmarges is bekend hoe groot de natuurlijke variatie is. Men kan de meetreeksen hiervoor corrigeren. Als er dan nog sprake is van een neerwaartse trend, gezien over een groot aantal jaren, dan kan men spreken van aantasting.

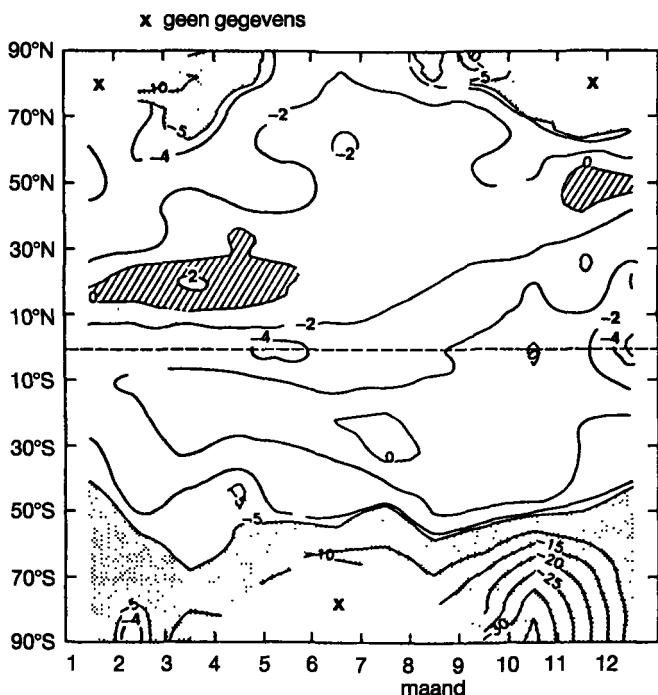
WAT IS DE TREND IN HET OZONGEHALTE?

Bij trendanalyse wordt onderscheid gemaakt tussen mondiaal gemiddelde trends en plaatselijk gemiddelde trends. Zo bestaat er een trend in de mondiaal gemiddelde kolomdikte (d.w.z. over de totale hoeveelheid ozon over de gehele wereld) en een trend in kolomdikte per breedtegraad. De trends in de meetreeksen van de stations vormen de basis voor de trends per breedtegraad en uiteindelijk voor de trend in het mondiaal gemiddelde.

Vastgesteld is dat de gemiddelde kolomdikte ozon, gemeten tussen de breedtegraden 53N en 53Z in de periode van 1978 tot 1985 is afgenomen met 2,5% (niet gecorrigeerd voor zonnecyclus). Deze periode komt vrijwel overeen met de gang van een zonnemaximum naar een zonneminimum. Wat er over blijft aan buitennaatuurlijke trend is dus gering. Het beeld wordt anders wanneer er gekeken wordt naar een trend per breedtegraad. Uit figuur 3.3 valt op te maken dat de vermindering van de kolomdikte ozon op de gematigde en polaire breedtegraden veel groter is dan de vermindering op equatoriale breedtegraden.

Aangezien satellietwaarnemingen nog maar een korte geschiedenis hebben wordt er ook naar trends van grondstations gekeken, in het bijzonder naar die op het Noordelijk Halfrond waar een behoorlijke dichtheid van het meetnet bestaat. Na correctie voor het effect van zonnevariatie vindt men dat in de periode van 1969 tot 1986 de gemiddelde kolomdikte tussen de breedtegraden 30N en 64N is afgenomen met 1,7% tot 3,0%. De hoogste afneming binnen dit gebied wordt gevonden voor de meest noordelijke breedtegraad. Nog duidelijker wordt de trend wanneer voor deze periode alleen de wintermaanden in beschouwing worden genomen. De afneming varieert dan van 2,3% in de subtropen tot 6,2% in de zone van 53N tot 64N.

De meest uitgesproken trend is te vinden boven Antarctica waar



Figuur 3.3. Procentuele verandering in de kolomdikte ozon van 1979 tot 1986, bepaald met de TOMS-satelliet (Total Ozone Mapper Spectrometer).

x: in de poolgebieden kan gedurende de poolnacht niet gemeten worden.

ten tijde van het plaatselijk voorjaar (september t/m november) de ozontotalen de laatste tien jaar met meer dan 50% zijn afgenomen. De afneming boven hetzelfde gebied op een hoogte tussen 15 en 20 km is zelfs 95%. Dit verschijnsel boven Antarctica wordt aangeduid als 'het gat in de ozonlaag'.

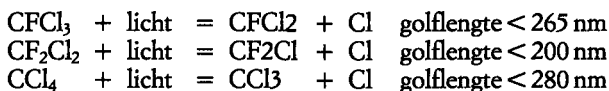
WAARDOOR WORDT DE OZONLAAG AANGETAST?

De reacties van de Chapmancyclus zijn niet de enige reacties die voor ozon in de stratosfeer van belang zijn. In feite zijn er erg veel stoffen die op directe of indirecte wijze het ozonniveau beïnvloeden. Belangrijk in dit verband zijn de waterstofoxyden, stikstofoxyden en chlooroxyden. Deze stoffen, die van nature in de stratosfeer voorkomen, kunnen een katalytische cyclus met ozon aangaan, d.w.z. er vindt een aantal reacties plaats die als netto effect hebben dat er ozonmoleculen worden omgezet in zuurstof terwijl er met de stoffen zelf niets gebeurd is.

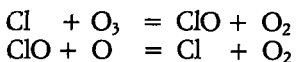
Vanzelfsprekend is dit een effectief afbraakmechanisme. Er zijn echter nog andere reacties in het spel waardoor deze katalytische cycli niet onbeperkt door blijven gaan. Hierdoor bestaat er een zeker evenwicht; er wordt evenveel ozon gevormd als afgebroken. Door toedoen van de mens is met name het chloorgehalte in de stratosfeer stijgende waardoor het huidige evenwicht verstoord wordt.

In 1974 publiceerden de Amerikaanse onderzoekers Molina en Rowland hun theorie over aantasting van de ozonlaag door C.F.K.'s, een afkorting voor chloor-fluor-koolstofverbindingen. De belangrijkste, meest voorkomende C.F.K.'s, C.F.K.11 en C.F.K.12, zijn verbindingen van chloor- en fluoratomen met een enkel koolstofatoom. Deze verbindingen zijn zo stabiel dat ze in de troposfeer niet worden afgebroken. Pas in de stratosfeer worden deze stoffen afgebroken door inwerking van kortgolvig licht. Hierdoor splitsen de chloor- en fluoratomen zich af. De C.F.K.'s transporteren dus in feite chloor en fluor naar de stratosfeer.

De chloorcyclus is schematisch weergegeven in figuur 3.4. Chloor komt vrij door inwerking van licht op C.F.K.'s.

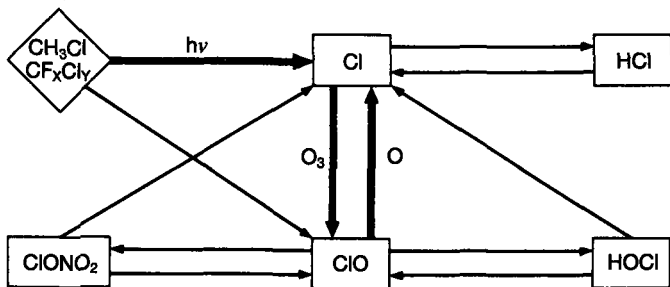


Het aldus gevormde chloor gaat een reactie met ozon aan. De volgende twee reacties zijn erg belangrijk.



Ozon wordt zo omgezet in (moleculair) zuurstof.

Chloor (Cl) en chloormonoxide (ClO) worden actief chloor genoemd, omdat dit chloor direct bij de omzetting van ozon betrokken is. Chloor komt ook nog in andere, niet-actieve verbindingen voor. Deze chloorhoudende stoffen vormen dus reservoirstoffen, zie figuur 3.4. Via een groot aantal reacties kan chloor uit de reservoirstoffen worden vrijgemaakt tot actief chloor. Andere reacties daarentegen zorgen ervoor dat actief chloor gebonden wordt tot een reservoirstof. De aanwezigheid van andere dan chloorhoudende stoffen is van invloed op de hoeveelheid chloor in actieve vorm.



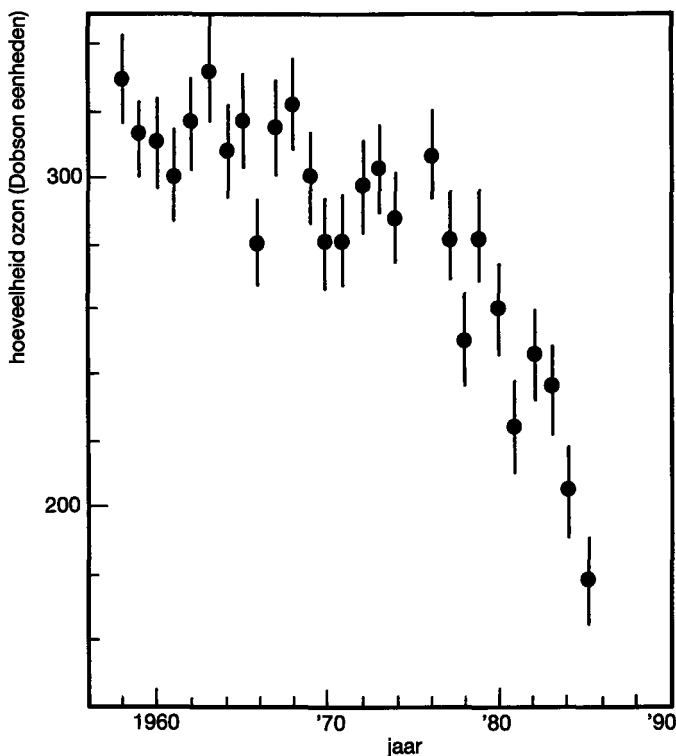
Figuur 3.4. Chloorcyclus in de stratosfeer. Chloor wordt ingebracht via de C.F.K.'s; actieve chloor wordt gevormd door ontleding van C.F.K.'s via licht ($h\nu$). Cl en ClO gaan in elkaar over door reacties met O_3 en O. De overige stoffen zijn reservoirstoffen.

De waterstof- en stikstofcyclus werken volgens hetzelfde principe. Hoe ingewikkeld de chemie van de atmosfeer wel is wordt duidelijk als men bedenkt dat bovengenoemde cycli niet los van elkaar staan maar elkaar ook beïnvloeden. Een verschuiving in bijvoorbeeld de stikstofcyclus is ook van invloed op de twee andere cycli.

WAT IS HET GAT IN DE OZONLAAG?

In 1985 kwamen de eerste berichten over een zeer sterke vermindering van de kolomdikte ozon boven Antarctica. De meetreeks van ozon op het Britse onderzoeksstation Halley Bay waar vanaf 1957 de kolomdikte ozon wordt gemeten, vertoonde vanaf de tweede helft van de jaren zeventig een sterke neerwaartse trend, zie figuur 3.5.

De oktoberwaarden van ozon zijn over een periode van minder

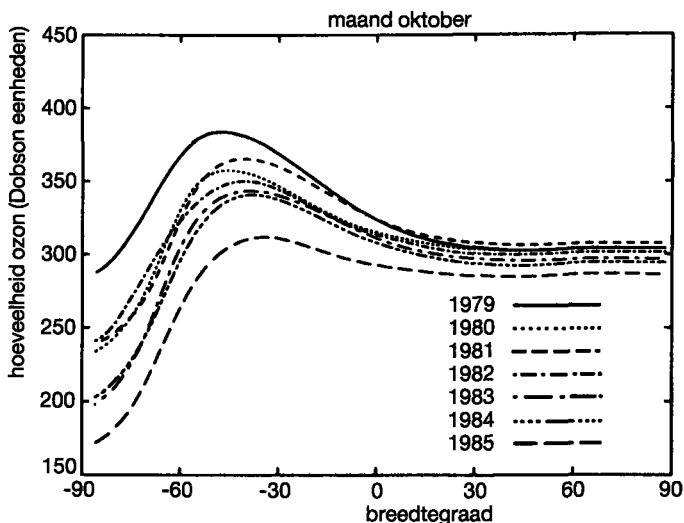


Figuur 3.5. Kolomdikte ozon op Halley Bay (Antarctica) vanaf 1957. De neerwaartse trend is duidelijk te zien.

dan 10 jaar bijna gehalveerd. De reductie is zo sterk dat men sindsdien over een gat spreekt, hoewel het strikt genomen beter is te spreken over zeer sterke verdunningen. Nader onderzoek toonde aan dat het gat zich over het gehele Zuidpoolgebied uitstrekt.

Zeer lage ozonconcentraties waren al eerder door een Amerikaanse satelliet waargenomen, maar door de programmatuur die alle waarnemingen op fouten controleert als onrealistisch laag en dus fout verworpen. Nadat de Britten hun bevindingen hadden gepubliceerd onderzochten de Amerikanen hun oude gegevens en ontdekten eveneens zeer lage ozonconcentraties boven de Zuidpool.

Het verschijnsel doet zich voor in de maanden september, oktober en november, dus tijdens de voorjaarsmaanden op het Zuide-



Figuur 3.6. Maandgemiddelde kolomdikte ozon in de maand oktober, geïntegreerd vanaf de Zuidpool: -90 is de kolomdikte op de Zuidpool, 0 de gemiddelde kolomdikte op het Zuidelijk Halfrond en 90 de gemiddelde kolomdikte voor de gehele atmosfeer. Hoewel in de maand oktober de sterkste vermindering boven de Zuidpool optreedt, lopen de concentraties elders ook terug.

lijk Halfrond. De overige maanden laten ook een teruggang zien maar die blijft beperkt tot enkele procenten.

Analyse van meetgegevens laat zien dat de verdunning van het ozongehalte niet alleen plaats vindt boven Antarctica maar dat ook het gebied erbuiten onderhevig is aan een (zij het minder drastische) afneming van de ozonconcentratie. De situatie op het Zuidelijk Halfrond is zo dat in de winter (juni-augustus) de ozonconcentratie boven Antarctica laag is en dat in een ring er omheen (op 60° ZB) de concentratie het hoogst is. In het voorjaar (september-november) wordt op een bepaald moment, dat overigens van jaar tot jaar enkele weken uiteen kan liggen, de ring doorbroken en stijgt de ozonconcentratie boven Antarctica tot ongeveer het niveau van het omringende gebied. De gegevens vanaf 1979 tonen aan dat het minimum in het begin van het voorjaar steeds dieper wordt en ook dat de maximumconcentraties afnemen, zij het minder drastisch, zie figuur 3.6.

IS ER EEN VERKLARING VOOR HET FEIT DAT HET GAT ZICH BOVEN DE ZUIDPOOL BEVINDT?

De ontdekking van sterke verdunningen in de ozonlaag boven Antarctica kwam als een volslagen verrassing. De al eerder genoemde theorie van Molina en Rowland schiet tekort om zulke drastische reducties te verklaren. Bovendien was het een raadsel waarom het gat juist boven de Zuidpool optrad. Het stratosferisch onderzoek dat in een aantal landen sindsdien een sterke financiële injectie heeft gekregen, heeft tot nu toe een groot aantal theorieën opgeleverd die voornamelijk of chemisch of meteorologisch van aard zijn. In het eerste geval legt men de nadruk op chemische reacties die onder de speciale omstandigheden die boven Antarctica heersen (extreem lage temperaturen), zeer effectief ozon verwijderen. In het tweede geval zoekt men de verklaring in een verandering van het stromingspatroon rond de Zuidpool waardoor ozon-arme lucht vanuit de troposfeer zou worden aangevoerd. Hoewel een sluitende theorie die op alle vragen antwoorden geeft nog niet bestaat, is men het er inmiddels over eens dat chemische reacties onontbeerlijk zijn in een verklaring. Een theorie gebaseerd op louter meteorologische argumenten schiet tekort.

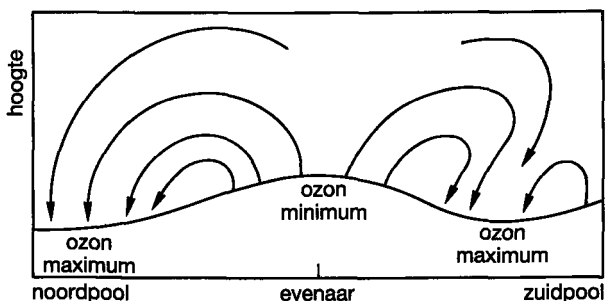
Veronderstellingen over wijzigingen in de meteorologie worden niet door metingen gestaafd. Niettemin is men het erover eens dat de meteorologie (d.w.z. het transport van ozon) een uitermate belangrijke rol speelt met betrekking tot de verdeling van ozon over de atmosfeer.

1) *chemische theorie*

In deze theorie speelt het bestaan van uit ijskristallen bestaande wolkjes in de stratosfeer boven Antarctica een sleutelrol. Ze worden P.S.C.'s genoemd, Polar Stratospheric Clouds. Hoewel de stratosfeer zeer droog is kunnen zich boven Antarctica door de extreem lage temperatuur (-80°C) dunne ijle wolkenlaagjes ontwikkelen. Op de ijskristalletjes, waaruit deze wolken bestaan, condenseren stikstofhoudende verbindingen (HNO_3 en NO_2), zodat deze niet meer vrij in de lucht voorkomen. Deze verbindingen hebben het vermogen chloor te binden tot een inactieve reservoirstof. Doordat ze verdwijnen is het resultaat dat er meer actief chloor beschikbaar is om met ozon te reageren. Chloor reageert vervolgens met ozon op een katalytische wijze die echter verschilt van de door Molina en Rowland in 1974 voorgestelde reacties. In dit verband zijn verschillende reactiecycli voorgesteld, die als netto effect hebben dat ozon wordt omgezet in zuurstof. In een ervan komt ook broom voor, een stof die chemisch gezien verwant is aan chloor. In de andere voorgestelde cycli speelt een reactie onder invloed van licht een rol. Waargenomen is dat de ozonconcentratie pas sterk terugloopt nadat de poolnacht is afgelopen. Mogelijk neemt gedurende de poolnacht het gehalte actief chloor toe zonder dat er iets met het ozon gebeurt. Pas wanneer de zon weer boven de horizon verschijnt worden de cycli voltooid waardoor in een soort explosie zeer veel ozon wordt omgezet.

2) *meteorologische theorie*

De verdeling van ozon over de lage stratosfeer (onder de 30 km hoogte) wordt in eerste instantie bepaald door transport. Zonder dit transport zou er boven de polen nauwelijks ozon voorkomen. Luchtbewegingen in de stratosfeer zorgen ervoor dat grote hoeveelheden ozon van de tropen naar de polen worden verplaatst, zie figuur 3.7.



Figuur 3.7. Transport van ozon in de stratosfeer. Het transport naar de Zuidpool is gedurende enkele maanden in het jaar geblokkeerd.

In de winter en in het begin van het voorjaar (op het Zuidelijk Halfrond) komt het poolwaartse transport niet verder dan ongeveer 60°ZB . De ijsbedekking van het continent en de aanwezigheid van uitgestrekte oceanen er omheen zorgen ervoor dat de luchtcirculatie rond Antarctica min of meer geïsoleerd is. Het is een draaiende beweging rond de Zuidpool met instroming van lucht afkomstig van grotere hoogten.

Als in het voorjaar de zon weer boven de horizon komt en het continent verwarmt, wordt deze structuur doorbroken en stroomt ozonrijke lucht het gebied binnen. In de meteorologische theorie gaat men er van uit dat het stromingspatroon zich in het begin van het voorjaar heeft gewijzigd. Voordat de geïsoleerde situatie doorbroken wordt zou er een opwaartse beweging plaats vinden die ozonarme lucht vanuit de troposfeer aanvoert.

Als verklaring van dit verschijnsel is een aantal suggesties gedaan. Verhoogde absorptie van zonnestraling door toeneming van het aantal Polar Stratospheric Clouds of stijging van de zeewatertemperatuur worden genoemd. Het is intussen aangetoond dat binnen enkele dagen tijd sterke dalingen in ozonconcentraties kunnen optreden ten gevolge van opstijgende luchtbewegingen. Daarentegen is er nog geen bewijs gevonden dat over perioden van een maand de gemiddelde luchtbeweging opwaarts zou zijn.

Een uitgebreide meetcampagne in 1987 leverde overtuigende aanwijzingen op dat de chemie boven Antarctica verstoord is.

Concentraties van chloormonoxide werden gemeten die een factor 1000 hoger waren dan buiten het poolgebied en die voldoende hoog zijn om de chemische theorie te ondersteunen. Bovendien werd een sterke anti-correlatie gevonden tussen chloormonoxide en ozon: lage ozonconcentraties als chloormonoxide hoog was en andersom. De metingen wijzen erop dat een verstoorde chemie de verklaring is voor het gat boven de Zuidpool.

KUNNEN ER ELDERS OOK GATEN OPTREDEN?

Verdunningen zijn ook elders geconstateerd, bijvoorbeeld boven Spitsbergen. De verdunningen zijn echter nog lang niet zo drastisch als boven Antarctica. Een belangrijke vraag is of er op andere plaatsen ook stratosferische wolken voorkomen. Stratosferische lucht boven het Noordpoolgebied is zo'n 10 graden warmer dan de lucht boven het Zuidpoolgebied doordat er regelmatig inmenging van warmere lucht uit het Zuiden plaats vindt. Uit recent onderzoek blijkt echter dat Polar Stratospheric Clouds frequenter voorkomen dan men aanvankelijk dacht. Als de ijsdeeltjes van deze wolken niet uit puur water blijken te bestaan maar uit een combinatie van water en stikstofhoudende verbindingen, dan wordt het bestaan van Polar Stratospheric Clouds buiten Antarctica waarschijnlijker; er is dan namelijk een minder lage temperatuur vereist om deze wolken te vormen. Uit onderzoek van meetgegevens blijkt dat de sterkste ozonreducties voorkomen in de koudste gebieden. Vermindering van de kolomdikte ozon op het Noordelijk Halfrond is nog niet geconstateerd in de tropische gebieden, maar wel in het Noordpoolgebied.

WELKE STOFFEN ZIJN 'VERDACHT'?

In de wetenschappelijke wereld is men het erover eens dat bij het verschijnsel van het gat boven de Zuidpool de hoge chloorconcentraties vrijwel zeker een rol spelen. De belangrijkste transporteurs van chloor naar de stratosfeer zijn in de tabel vermeld. Waarschijnlijk speelt broom een ondergeschikte rol in de atmosferische chemie. De gemeten broomconcentraties zijn erg laag. Als echter de uitstoot van broomhoudende producten in het huidige tempo blijft toenemen zal broom op termijn wel van belang zijn. Lachgas

(N₂O) is vermoedelijk de belangrijkste leverancier van stikstof in de stratosfeer. De volgende tabel geeft de karakteristieken van de belangrijkste stoffen.

stof	formule	verblijf tijd in de atmosfeer ¹⁾	concentratie (ppt)	trend in concentratie boven Antarctica	uitstoot (miljoen kg/jaar)
		(jaar)	(ppt)		
C.F.K.11	CFCl ₃	75	220	+5%/jaar	340
C.F.K.12	CF ₂ Cl ₂	111	360	+4%/jaar	440
methylchloroform	CH ₃ CCl ₃	8	135	+5%/jaar	600
tetrachloride	CCl ₄	80	155	+1,5%/jaar	100
C.F.K.113	C ₂ F ₃ Cl ₃	90	25	+15%/jaar	160
C.F.K.114	C ₂ F ₄ Cl ₂	185	12	+6%/jaar	20
C.F.K.115	C ₂ F ₅ Cl	380	5		5
halon 1211	CF ₂ BrCl	25	2	+20%/jaar	10
halon 1301	CF ₃ Br	110	2		10
lachgas	N ₂ O	150	302000	+0,2%/jaar	25000
methylchloride	CH ₃ Cl	2	600		4000

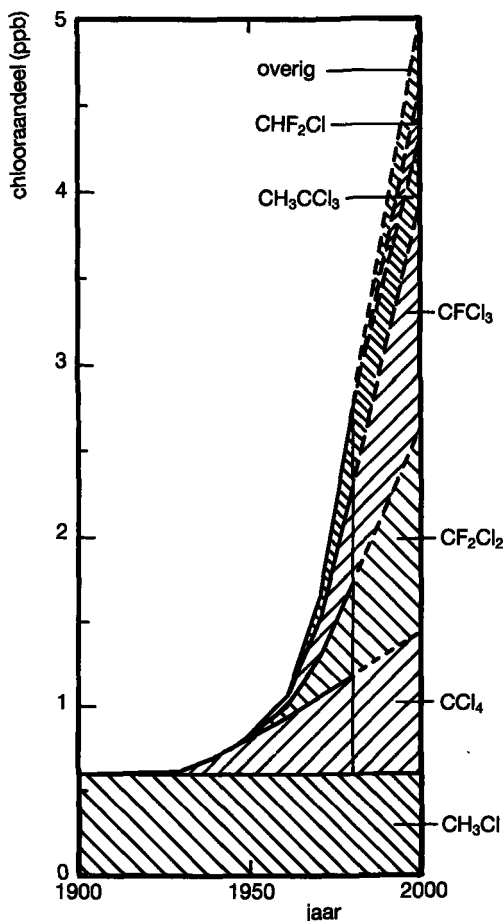
¹⁾ De verblijftijd of levensduur van een verbinding in de atmosfeer is een maat voor de tijd die de atmosfeer nodig heeft om een verbinding af te breken.

N₂O is een produkt van microbiologische activiteit in de bodem. De emissie ervan neemt toe ten gevolge van bemesting. N₂O wordt pas in de stratosfeer afgebroken.

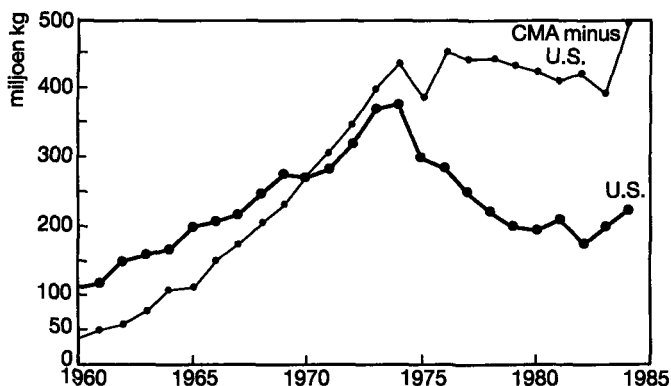
Methylchloride is grotendeels een natuurlijk produkt afkomstig uit de oceanen. De overige gechlloreerde of gebromeerde stoffen zijn industrieel vervaardigde produkten met uiteenlopende toepassingen. De bijdrage van de belangrijkste stoffen aan het chloorgehalte in de stratosfeer is in figuur 3.8 af te lezen.

De produktie van de twee belangrijkste C.F.K.'s, C.F.K.11 en C.F.K.12 is vanaf de jaren vijftig op gang gekomen. Aanvankelijk werd de produktie geheel gedomineerd door de Verenigde Staten, maar na 1974 toen in de V.S. een verbod op het gebruik van C.F.K.'s in spuitbussen werd ingesteld is de produktie daar flink

gedaald. Sinds 1980 is de wereldproductie weer stijgende, zie figuur 3.9.



Figuur 3.8. Bijdrage van diverse stoffen aan het chloorgehalte in de stratosfeer. Methylchloride is van natuurlijke oorsprong, de overige stoffen niet; hun aandeel wordt pas na de Tweede Wereldoorlog van belang.



Figuur 3.9. Productie van C.F.K.11 en C.F.K.12 in de Verenigde Staten en in de overige landen die rapporteren aan de Chemical Manufacturers Association. Het in 1974 in de V.S. van kracht geworden verbod op toepassing van drijfgassen in spuitbussen is goed in de grafiek te zien.

WAARVOOR WORDEN DEZE STOFFEN GEBRUIKT?

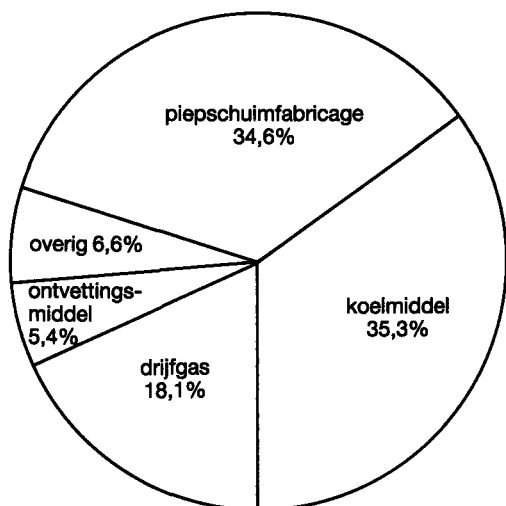
Het gebruik van C.F.K.'s kan in een aantal categorieën worden onderverdeeld. Deze zijn:

- 1) als drijfgas in spuitbussen;
- 2) als koelmiddel in koelsystemen zoals ijs- en vrieskasten, maar ook in luchtverversingsapparatuur;
- 3) als ontvettingsmiddel in de elektronica-industrie;
- 4) als hulpmiddel bij de fabricage van kunststofschuimen.

De halonen (de gebromeerde verbindingen) worden veel gebruikt in brandblussystemen.

De procentuele verdeling van C.F.K.'s over de verschillende categorieën in de V.S. is in figuur 3.10 weergegeven.

In de Verenigde Staten is het aandeel van drijfgassen in de totale C.F.K.-emissie ten gevolge van het verbod in 1974 gering. In de meeste Europese landen waaronder Nederland hebben de drijfgassen nog wel een substantieel aandeel. De bedoeling is dat door



Figuur 3.10. Aandeel van diverse toepassingen in de totale C.F.K.-emissie in de Verenigde Staten in 1985.

een overeenkomst met de Nederlandse fabrikanten van spuitbussen het gebruik van C.F.K.'s in spuitbussen rond 1990 tot een minimum zal zijn teruggebracht.

HOE LANG EN HOE VER ZAL DE AANTASTING VAN DE OZONLAAG DOORGAAN?

Op grond van de verblijftijd van de belangrijkste C.F.K.'s, C.F.K.11 en C.F.K.12, die respectievelijk op 75 en 110 jaar wordt berekend, kan worden gesteld dat zelfs bij een volledige stop van het gebruik van deze stoffen het nog zeker 100 jaar duurt voordat de atmosfeer voor het grootste deel van deze stoffen is ontdaan. Het grootste deel van deze stoffen bevindt zich nu nog in de troposfeer. Die massa verdwijnt alleen via de stratosfeer waarbij chloor of broom wordt afgestaan. Dus de versterking van de chemische samenstelling van de ozonlaag zal zeker nog 100 jaar duren. Hoe sterk de ozonlaag zal worden aangetast is niet met zekerheid te zeggen. Het is zeker dat het chloorgehalte in de stratosfeer in de

komende jaren alleen nog maar zal stijgen. Berekeningen geven aan dat als het Protocol van Montreal wordt nageleefd (zie hoofdstuk 8) in 2035 de mondiaal gemiddelde kolomdikte met 3,5% is gedaald; op hoge noordelijke breedtegraden kan in het voorjaar de vermindering oplopen tot circa 10%. Bij voortzetting van de huidige trend C.F.K.-emissie zal naar verwachting de mondiaal gemiddelde kolomdikte in 2035 met circa 10% zijn teruggelopen.

KAN DE AANTASTING VAN DE OZONLAAG ZO VERGAAN DAT ER GEEN HERSTEL MEER MOGELIJK IS?

De ozonlaag bestaat dankzij een evenwicht tussen vorming en afbraak van ozon. Door toeneming van de concentratie chloor en broom neemt de afbraak van ozon toe terwijl de vorming constant blijft. Er ontstaat een nieuw evenwicht bij een lagere ozonconcentratie. Als uiteindelijk, een paar honderd jaar nadat een volledige stop op de uitstoot van freonen en halonen van kracht is geworden, alle niet-natuurlijke chloor- en broomhoudende verbindingen uit de atmosfeer verdwenen zijn, zal het natuurlijk evenwicht zich waarschijnlijk weer instellen. Helemaal zeker is dat echter niet. De atmosfeer is zo complex dat het niet uitgesloten is dat de verstoring door freonen en halonen ervoor zorgt dat de oude situatie (voordat deze stoffen geëmitteerd werden) niet meer terugkomt.

4. Ozon in de troposfeer

HOE KOMT OZON IN DE TROPOSFEER?

De ozonhuishouding in de troposfeer is geheel anders dan in de stratosfeer. In tegenstelling tot wat in de stratosfeer het geval is wordt ozon in de troposfeer niet gevormd door inwerking van licht op zuurstof. Licht met de daarvoor benodigde golflengte wordt volledig in de stratosfeer geabsorbeerd en dringt dus niet in de troposfeer door. Vorming van ozon begint hier met de ontleding van stikstofdioxyde (NO_2) door licht. De hiervoor benodigde straling heeft een langere golflengte en dringt wel tot in de troposfeer door. Uit deze reactie ontstaat stikstofmonoxyde (NO) en atomair zuurstof. De laatste stof reageert weer met moleculair zuurstof (O_2) tot ozon. Dit is de enige manier waarop in de troposfeer ozon gevormd kan worden.

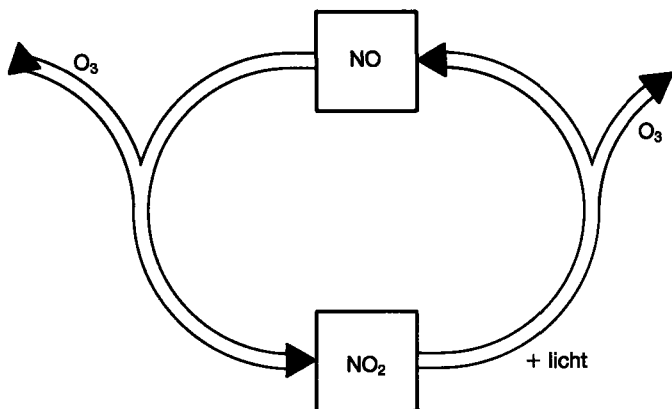
Er is nog een andere belangrijke bron, en dat is inmenging van ozonrijke lucht uit de stratosfeer. Dat is ook te zien aan de concentratie hoog in de troposfeer. Boven de 10 km hoogte neemt de ozonconcentratie sterk toe, in het bijzonder op de gematigde breedten van beide halfronden. Inmenging vindt vooral daar plaats.

Ozon wordt op twee verschillende manieren uit de troposfeer verwijderd. In de eerste plaats is ozon een reactieve stof die met een groot aantal andere stoffen reageert, waarbij ozon wordt omgezet. In de tweede plaats is er depositie. Letterlijk genomen betekent dit dat ozon op het aardoppervlak neerslaat. Door de reactiviteit van ozon wordt het molecuul omgezet als het met het aardoppervlak in contact komt, waardoor het dus verdwijnt. Voor planten en bomen is dit van belang omdat zij overdag, wanneer de huidmondjes van de bladeren open staan, veel ozon opnemen. Hoge concentraties ozon hebben een schadelijke uitwerking op de planten en bomen.

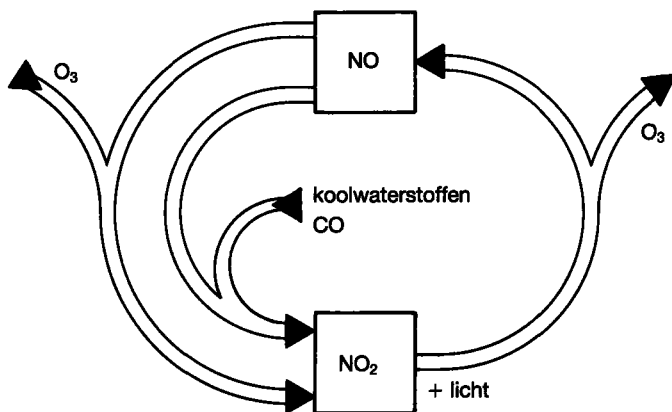
HOE GAAT DE CHEMISCHE VORMING VAN OZON IN ZIJN WERK?

Twee groepen van stoffen zijn uiterst belangrijk in de chemi-

a) zonder koolwaterstoffen



b) met koolwaterstoffen



Figuur 4.1. Ozoncyclus in de troposfeer; a) zonder koolwaterstoffen en CO, b) met koolwaterstoffen en CO.

sche processen die met ozon te maken hebben, nl: stikstofoxyden (NO en NO_2 , samen aangeduid met NO_x) en koolwaterstoffen (KW), een grote groep organische stoffen die in zeer uiteenlopend tempo, variërend tussen enkele seconden en enkele jaren, worden afgebroken. Afbraakprodukten van koolwaterstoffen reageren met stikstofmonoxyde waarbij ozon gevormd kan worden.

Hoe gaat dat in z'n werk? Een centrale plaats nemen de stikstofoxyden NO en NO_2 in; zij vormen als het ware het hart van de troposferische chemie. Hun werking is te vergelijken met een dubbele pomp. NO en NO_2 worden snel in elkaar omgezet door twee reacties. De eerste reactie kost ozon, de tweede reactie levert ozon op (overdag, vanwege de ontleding door licht). Netto gebeurt er nog niets. Anders wordt het wanneer koolwaterstoffen worden toegevoegd, zie figuur 4.1. Afbraakprodukten van koolwaterstoffen zorgen ervoor dat de eerste slag (van NO naar NO_2) gemaakt kan worden zonder dat het ozon kost, zodat er na de tweede slag ozon overblijft.

Essentieel is dat er een combinatie van stikstofoxyden en koolwaterstoffen nodig is om ozon te vormen, en dat de effectiviteit van de ozonproductie afhangt van de verhouding van stikstofoxyden en koolwaterstoffen. Om in termen van een dubbele pomp te blijven: als er veel stikstofoxyden zijn, maar weinig koolwaterstoffen dan wordt er wel ozon heen en weer gepompt, maar door het ontbreken van koolwaterstoffen levert dat geen extra ozon op. Andersom als er veel koolwaterstoffen zijn maar geen stikstofoxyden wordt er nauwelijks ozon heen en weer gepompt zodat de 'winst' die er in de eerste slag gemaakt zou kunnen worden zich niet voor doet. Vandaar dat bij de bestudering van de chemie in de buitenlucht niet alleen gekeken wordt naar de concentraties van die verbindingen maar ook naar hun verhoudingen.

IS DE VORMING VAN OZON IN DE TROPOSFEER OVERAL HETZELFDE?

Vorming van ozon is sterk afhankelijk van de concentratieverhouding tussen koolwaterstoffen en stikstofoxyden. Deze verhouding hangt weer af van de snelheid waarmee deze stoffen worden afgebroken.

Stikstofoxyden reageren niet alleen volgens de zojuist besproken

reacties. Andere reacties zorgen ervoor dat de stikstofoxyden omgezet worden in stoffen die niet van direct belang zijn voor de vorming van ozon. Doordat deze reacties snel zijn, vertoont de concentratie van stikstofoxyden een sterk verloop met de afstand tot de bron.

Koolwaterstoffen worden in een zeer uiteenlopend tempo afgebroken. Er zijn zeer reactieve koolwaterstoffen die binnen enkele uren vrijwel volledig afgebroken zijn. Deze categorie speelt daarom alleen in de directe omgeving van de bron een rol. Andere, trager reagerende koolwaterstoffen zijn ook op grotere afstand van de bron nog volop in de lucht aanwezig. Naarmate de afbraak trager verloopt neemt de draagwijdte van de stof toe. Methaan is de traagst reagerende koolwaterstof en heeft een verblijftijd in de troposfeer van ongeveer 10 jaar. Hierdoor is methaan vrijwel homogeen over de troposfeer verdeeld.

Het verschil in reactiviteit, en diensgevolge het verschil in concentratieverhouding tussen stikstofoxyden en koolwaterstoffen, maakt dat er onderscheid gemaakt dient te worden tussen ozonvorming op stedelijke schaal, op landelijke schaal en op wereld-schaal. De tabel laat zien dat er sprake is van drie verschillende chemische regimes.

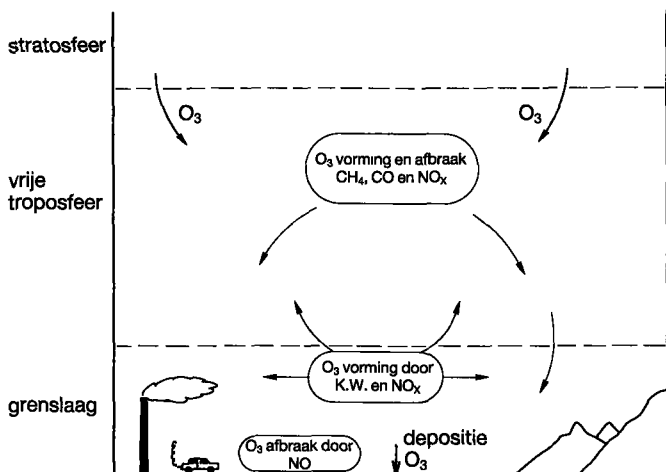
schaal	NO_x/KW verhouding	ozonvorming
wereldschaal	1) laag	gering
landelijke schaal	2) medium	hoog
stedelijke schaal	3) hoog	negatief

1) In de vrije troposfeer is er een overmaat aan koolwaterstoffen, vooral methaan en koolmonoxyde. Iets meer of minder van koolwaterstoffen is niet van invloed op de ozonvorming. Bepalend voor de ozonvorming hier zijn de concentraties stikstofoxyden.

2) De verhouding tussen stikstofoxyden en koolwaterstoffen is 'optimaal'.

3) Er is een overmaat aan stikstofoxyden. Dicht bij bronnen is dit vooral in de vorm van stikstofmonoxyde; er wordt ozon afgebroken.

Het plaatje van de 'ozonhuishouding' in de troposfeer wordt pas duidelijk als er rekening gehouden wordt met het transport van ozon en andere stoffen door luchtbewegingen. Zie figuur 4.2.



Figuur 4.2. Vorming en afbraak van ozon in de grenslaag en in de vrije troposfeer. Inmenging van ozon vanuit de stratosfeer en depositie aan de grond. Pijltjes geven het transport aan.

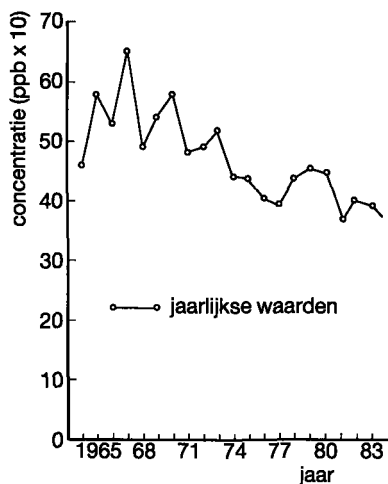
Ozon, gevormd in de grenslaag van de geïndustrialiseerde gebieden, wordt naar de vrije troposfeer getransporteerd waardoor de ozonconcentratie daar stijgt. Evenzeer belangrijk voor de ozonconcentratie in de vrije troposfeer is de vorming van ozon in de vrije troposfeer zelf. Stijging van de ozonconcentratie in de vrije troposfeer betekent dat via neerwaartse luchtbewegingen de grenslaag van meer ozon wordt voorzien. Dit is vooral merkbaar in de 'schone' gebieden. In die gebieden wordt in de grenslaag geen ozon gevormd; er zijn daar geen plaatselijke bronnen van belang. In de geïndustrialiseerde gebieden is de invoer van ozon uit de vrije troposfeer minder merkbaar omdat de afbraak van ozon door NO in die gebieden een belangrijke rol speelt.

Een tweede belangrijk onderscheid dient gemaakt te worden tussen gemiddelde concentraties (over een maand, seizoen of jaar) en piekwaarden die voorkomen tijdens episoden, perioden van enkele dagen waarin de concentraties van ozon en andere stoffen hoog oplopen. Episoden kunnen worden beschouwd als speciale gevallen waarbij tijdelijk een soort deksel op de menglaag is geplaatst: de geëmitteerde stoffen en het gevormde ozon kunnen er niet uit. De chemische oven raakt (tijdelijk) oververhit en de ozonconcentraties lopen sterk op. In deze situaties spelen de zeer snel afbreekbare koolwaterstoffen een belangrijke rol.

Op landelijke en stedelijke schaal kunnen onder ongunstige omstandigheden gedurende enkele dagen hoge tot zeer hoge ozonconcentraties optreden die enkele veelvoud van het gemiddelde bedragen. In weersituaties met weinig wind en veel zon kan er veel ozon gevormd worden. Door de geringe wind wordt de lucht nauwelijks ververst en blijven de concentraties van de luchtverontreinigende stoffen hoog. De mooie zomer van 1976 was een zomer waarin de ozonconcentraties regelmatig het voor de volksgezondheid toelaatbaar geachte niveau overschreden. Berucht was en is de situatie in Los Angeles waar de fotochemische luchtverontreiniging in feite 'ontdekt' is. Omsloten door bergen waardoor de luchtcirculatie stagneert in combinatie met een zeer intensief verkeer en veel zonneschijn, is het daar een ideale oven voor ozonproductie. De piekwaarden daar liggen een factor twee tot drie hoger dan in Nederland. Men spreekt dan ook wel over 'Los Angeles smog' als men het over een periode met veel ozon heeft.

NEEMT DE OZONCONCENTRATIE IN DE TROPOSFEER TOE?

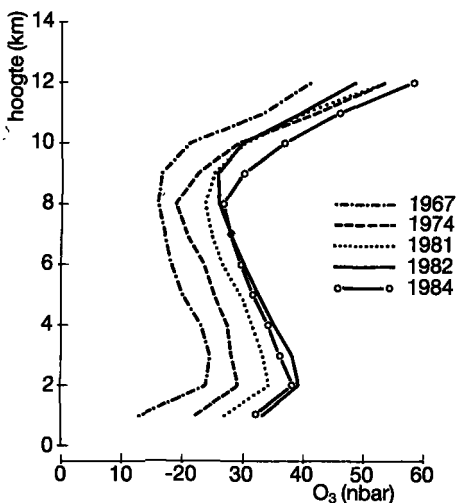
Trends worden nog niet zo lang gemeten. In Los Angeles worden de ozonconcentraties vanaf 1963 gemeten. Tot 1970 namen de zomerse piekwaarden daar steeds verder toe. Sindsdien zijn de maxima enigszins gedaald door ingrijpende emissiebeperkende maatregelen en door een veranderde samenstelling van de koolwaterstoffen, waarbij zeer reactieve koolwaterstoffen gedeeltelijk vervangen zijn door minder reactieve koolwaterstoffen, zie figuur 4.3.



Figuur 4.3. De trend in de jaarlijkse hoogste ozonconcentratie in Los Angeles. Vanaf het eind van de jaren zestig zijn de piekwaarden gedaald.

Een duidelijke trend in de Nederlandse maxima sinds het begin van de ozonmetingen is niet te onderkennen mede door de grote van jaar tot jaar optredende fluctuaties. De gemiddelden dalen licht: dit wordt door de stijgende NO_x emissies veroorzaakt. Door de in Nederland hoge concentraties NO domineert de tijdelijke afbraak van ozon over de vorming uit NO_2 . Pas op grote afstand wordt er ozon gevormd.

Over de trend op mondiale schaal in de troposfeer is minder bekend doordat stations die gesitueerd zijn in zgn. schone achtergrondgebieden (d.w.z. gebieden die niet direct onder invloed van industrie en verkeer liggen) in het algemeen nog maar een korte meetreeks hebben. De meetreeks van het meetstation Hohenpeissenberg in de Duitse Alpen waar vanaf 1967 ozon gemeten wordt laat zien dat het ozongehalte in de troposfeer sterk is toegenomen, ook op grotere hoogte, zie figuur 4.4. Ook boven Canada en Alaska worden ozonconcentraties gemeten die wijzen op een toename in dezelfde orde van grootte.



Figuur 4.4. Het jaargemiddelde ozonprofiel in de troposfeer boven Hohenpeissenberg (West-Duitsland). Sinds 1967 zijn de concentraties aanzienlijk gestegen.

Dit beeld wordt ondersteund door berekeningen met computermodellen waarin de atmosferische chemie wordt nagebootst. Als de berekeningen worden uitgevoerd met emissies zoals die waarschijnlijk rond 1900 zijn geweest blijkt dat sindsdien de ozonconcentraties in de troposfeer meer dan verdubbeld zijn. Zeer oude metingen, uitgevoerd rond 1870 in Montsouris, toen een dorpje buiten Parijs, geven hetzelfde aan: in 100 jaar tijds is de ozonconcentratie sterk opgelopen.

WELKE BRONNEN ZIJN VERANTWOORDELIJK VOOR DE EMISSIES?

In onderzoek en beleid wordt bij de koolwaterstoffen onderscheid gemaakt tussen methaan enerzijds en alle andere koolwaterstoffen, aangeduid met niet-methaan koolwaterstoffen (NMKW) anderzijds. In de tabel staat de verdeling van de bronnen vermeld, voor de gehele wereld en voor Nederland. Opge-

merkt moet worden dat schattingen van emissies op wereldschaal onzeker zijn. De emissies in Nederland zijn relatief goed bekend.

Aandeel (%) van diverse bronnen in de emissies van methaan, NMKW en NO_x.

bronsort	wereld			Nederland		
	methaan	NMKW	NO _x	methaan	NMKW	NO _x
verkeer		7		1	42	51
energieopwekking						
olie-industrie		2	40		7	37
overige industrie				1	29	
aardgas (productie, distributie)	22	2		10*		
bossen ¹⁾		74			3	
verbranden van biomassa ²⁾	13		20			
vee ³⁾	22			84		
rijstvelden ⁴⁾	13	15				
moerassen ⁴⁾	24					
bodem ⁴⁾			10			3
bliksem ⁵⁾			15			
overig	6		15	4	19	9
totaal	100	100	100	100	100	100
totale emissie in miljoenen tonnen per jaar						
	500	1000	50**	0,5	0,45	0,16**

* eigen ruwe schatting, wegens ontbreken van gegevens

** uitgedrukt in eenheden stikstof

¹⁾ Het grote aandeel van bossen wat betreft de NMKW komt voor rekening van isopreen, een stof die vooral door bladeren van loofwoud wordt geëmitteerd en van terpenen, een groep stoffen die vooral door naaldwoud wordt geëmitteerd. Beide zijn zeer reactief en slechts in de directe omgeving van bossen van belang.

²⁾ Het verbranden van hout, struiken en grasland komt in de tro-

pen veelvuldig voor, onder andere om gebieden snel toegankelijk en geschikt te maken voor landbouw en veeteelt.

³⁾ microbiologische afbraak van voedselresten in het maag/darmkanaal.

⁴⁾ door microbiologische activiteit.

⁵⁾ de enorme hitte in een bliksemschicht ontleedt stikstof en zuurstof waardoor NO gevormd wordt.

Het lijkt alsof een groot deel van deze koolwaterstof- en NO_x-bronnen van natuurlijke aard is. In feite echter is bliksem de enige bron waarop door de mens geen invloed wordt uitgeoefend. Ontwikkeling van de veestapel, aanleggen van rijstvelden, droogleggen van moerassen en bodemgebruik (bijvoorbeeld bemesting) zijn menselijke activiteiten. De aard van de bron mag dan natuurlijk zijn, de omvang ervan niet meer.

VERANDEREN DEZE EMISSIES?

In vrijwel alle landen neemt het aantal bronnen van koolwaterstoffen en NO_x gestaag toe. In een aantal landen is men erin geslaagd de daardoor stijgende emissie door emissiebeperkende maatregelen (bijvoorbeeld: katalysators, betere constructie van olieopslagtanks) te beperken en soms zelfs een daling te bewerkstelligen. Voor koolwaterstoffen is dit gelukt in o.a. de V.S., Japan en sommige Westeuropese landen waaronder Nederland. Voor NO_x geldt hetzelfde in de V.S. en Japan maar niet voor Europa. Door intensivering van het verkeer wordt het effect van deze maatregelen voor een deel teniet gedaan. In veel andere landen nemen de emissies toe zodat op mondiale schaal gezien de emissies van methaan, NMKW en NO_x stijgende zijn.

KAN DE GEMIDDELDE OZONCONCENTRATIE IN NEDERLAND WORDEN TERUGGEBRACHT?

Computermodellen van uiteenlopende complexiteit worden gebruikt om de wijze waarop de diverse stoffen zich in de atmosfeer verspreiden en daar reageren na te bootsen. Al eerder is genoemd dat om de vorming van ozon goed te begrijpen er een onderscheid gemaakt moet worden tussen vorming op diverse scha-

len. De gemiddelde ozonconcentratie in Nederland is een gevolg van inmenging in de grenslaag van ozon uit de vrije troposfeer en van vorming van ozon in de grenslaag. Voor het eerstgenoemde proces is vorming van ozon op wereldschaal van belang, waarbij methaan, koolmonoxyde (CO) en vooral stikstofoxyden een rol spelen. Voor het tweede proces zijn ook de meer reactieve koolwaterstoffen van belang, evenals de stikstofoxyden.

Met behulp van computermodellen is onderzocht wat de invloed is van emissiereducties op mondiale en Europese schaal op de gemiddelde ozonconcentratie in Nederland. Het blijkt dat reductie van niet-methaan-koolwaterstofemissies nauwelijks leidt tot een verminderde ozonvorming op wereldschaal, en dat dus de bijdrage van inmenging van ozon uit de vrije troposfeer aan de grondconcentratie vrijwel onveranderd blijft. De vorming van ozon in de grenslaag vermindert aanzienlijk waardoor reductie van koolwaterstofemissies een gunstig effect heeft.

De situatie wat betreft reductie van NO_x -emissies is geheel anders. Weliswaar vermindert emissiereductie van NO_x de vorming van ozon in de vrije troposfeer, de vorming in de grenslaag neemt daarentegen toe. In Europa is de NO_x -concentratie zo hoog dat terugdringing ervan in eerste instantie leidt tot meer ozon. Vermindering van NO_x -emissie heeft dus in eerste instantie een tegengesteld effect. Pas bij zeer forse reducties van de NO_x -emissie zal sprake zijn van een vermindering van de ozonconcentratie in Europa. De tabel geeft de invloed van Europese emissiereducties op de gemiddelde ozonconcentratie in Nederland.

Invloed van Europese emissiereducties op de gemiddelde ozonconcentratie tijdens het groeiseizoen.

Reductie	Ozonverandering (in %)
NMKW, 40%	-3%
NO_x , 30%	+6%

Hieruit blijkt dat forse reducties van de NO_x -emissies niet in staat zijn om de ozonconcentratie in Europa terug te dringen. Dat lukt pas als reducties van 60% – 80% worden gerealiseerd.

5. Broeikaseffect

WAT IS HET BROEIKASEFFECT?

In hoofdstuk 2 is in het kort de stralingsbalans aan de orde gekomen, zie ook figuur 2.3. De aarde ontvangt kortgolvlige straling van de zon en zendt zelf langgolvlige straling uit; zie figuur 5.1. De door de aarde uitgezonden straling bestaat uit golflengten tussen de 5 en 50 μm (μm , micrometer, is een miljoenste meter) en ligt dus in het infrarode gebied. Wanneer er geen atmosfeer was zou de door de aarde uitgezonden straling de ruimte in verdwijnen. De atmosfeer absorbeert het grootste deel van de aardse straling en zendt een deel weer terug naar de aarde. Zonder atmosfeer zou de temperatuur op aarde zo'n 30 graden lager zijn dan de huidige temperatuur. De atmosfeer ligt als een deken op de aarde en houdt de warmte vast. De belangrijkste stoffen die de aardstraling absorberen zijn waterdamp (H_2O), kooldioxyde (CO_2) en ozon (O_3). Van nature komen deze stoffen voor in de atmosfeer. Met het broeikasprobleem wordt bedoeld dat het absorberend vermogen van de atmosfeer toeneemt. Doordat de concentraties in de lucht van CO_2 en een aantal andere stoffen stijgen, wordt er meer warmte vastgehouden zodat verwacht kan worden dat de temperatuur op aarde zal stijgen.

WELKE STOFFEN ZIJN ER BIJ HET BROEIKASEFFECT BETROKKEN?

Gelet op de zojuist genoemde rol van absorptie van licht zal het duidelijk zijn dat alleen die stoffen van belang zijn die straling absorberen in het golflengtegebied waarin de aarde straling uitzendt. Welke stoffen dat zijn laat figuur 5.1 zien.

De meeste straling wordt door waterdamp geabsorbeerd. Uit de figuur blijkt dat er bepaalde golflengten in het infrarode gebied zijn, die nauwelijks geabsorbeerd worden. Dit golflengtegebied heet het atmosferische venster. Stoffen die juist in dit golflengtegebied absorberen spelen een belangrijke rol. De bijdrage van de belangrijkste stoffen staat in de tabel vermeld.

Procentuele bijdrage van diverse stoffen aan de temperatuurverhoging op aarde

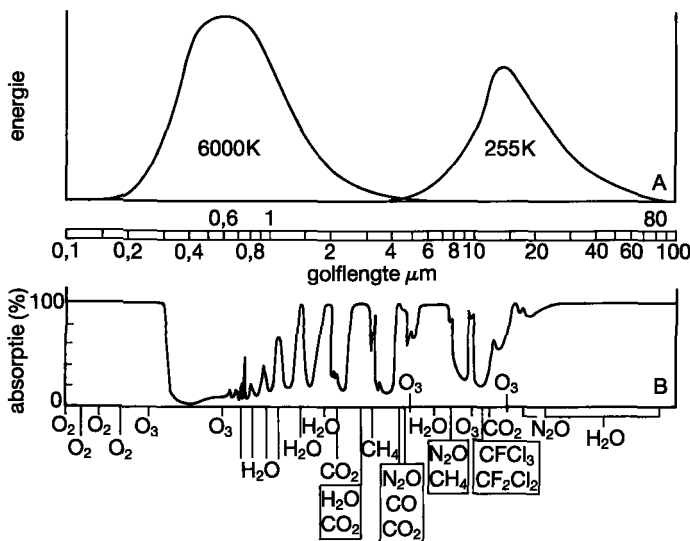
stof	geschatte concentratie * toeneming 1980 naar 2030	bijdrage aan temperatuur verhoging op aarde in 2030
CO ₂	30%	46%
CH ₄	40%	9%
N ₂ O	25%	6%
O ₃ , stratosfeer	**	5%
O ₃ , troposfeer	**	4%
C.F.K.11	600%	16%
C.F.K.12	600%	8%
overige stoffen		6%

* Deze schatting gaat er van uit dat de concentratiestijging van de in de tabel genoemde stoffen tot 2030 ongewijzigd blijft.

** Verandering in de ozonconcentratie is sterk afhankelijk van de hoogte.

Benadrukt moet worden dat de stijgingen van de concentraties schattingen zijn bij een ongewijzigde voortgang van de huidige trend. Het geeft een beeld van het belang van de diverse verbindingen voor het broeikas effect. Aangezien de afnemende van ozon in de stratosfeer vrijwel geheel voor rekening komt van de C.F.K.'s is de bijdrage van C.F.K.11 en C.F.K.12 aan een temperatuurverhoging op aarde ongeveer 29%. Sommige gasen zoals CFC₃, een C.F.K., zijn sterker absorberend dan CO₂, maar omdat de concentratie van CFC₃ zo veel lager is dan die van CO₂, is het effect nog tamelijk gering. Toch is het effect van andere stoffen dan CO₂ niet te verwaarlozen, gezamenlijk dragen ze ongeveer net zoveel bij als CO₂.

Opvallend is de dubbele rol die ozon speelt. Het absorbeert zowel aardse straling als zonnestraling. In de stratosfeer domineert absorptie van zonnestraling. Door de afnemende van het ozongehalte in de stratosfeer dringt er meer zonnestraling door op aarde. Weliswaar wordt er ook minder aardstraling geabsorbeerd en dus ook minder teruggestraald, maar dat weegt niet op tegen de toename van zonnestraling. In de troposfeer domineert de absorptie van aardse straling. Toeneming van ozon in de troposfeer leidt tot meer absorptie van aardse straling. Verlies van zonnestraling



Figuur 5.1. A) Spectrum van zonnestraling (6000 K) en aardse straling (255 K);

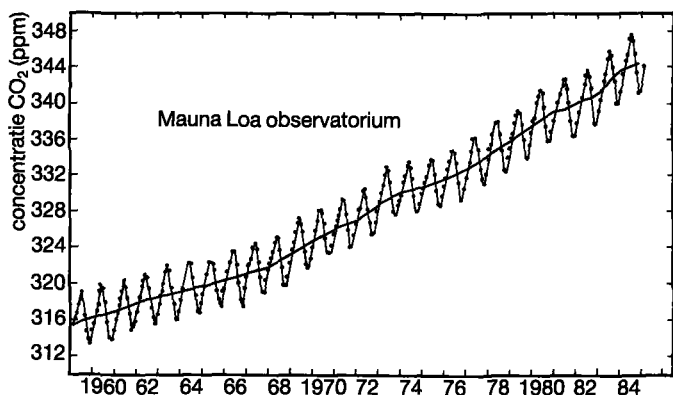
B) Percentage van de straling die geabsorbeerd wordt tussen de aarde en de top van de atmosfeer. Aangegeven is bij welke golflengten diverse stoffen absorberen.

weegt hier niet tegen op. Toeneming van troposferische ozon heeft netto als resultaat dat er meer warmte op aarde blijft. Dus zowel afnemende van stratosferische ozon als toeneming van troposferische ozon betekent meer warmte op aarde. Opmerkelijk is dat met uitzondering van CO_2 de overige stoffen ook betrokken zijn bij de aantasting van de ozonlaag of bij de ozonproblematiek in de troposfeer.

WAARDOOR KOMT CO_2 IN DE ATMOSFEER?

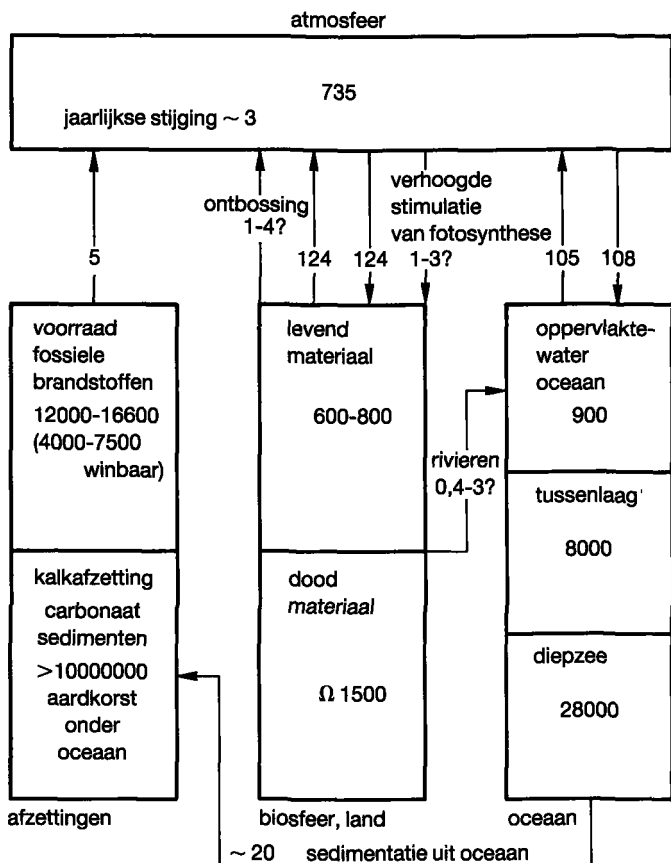
Sinds het begin van de industriële revolutie, ongeveer 150 jaar geleden, is de CO_2 concentratie in de troposfeer met zo'n 25% toegenomen. Als belangrijkste oorzaak moet worden genoemd de

verbranding van fossiele brandstoffen (steenkolen, aardolie en aardgas) waarbij grote hoeveelheden CO_2 vrijkomen. De groot-schalige boskap waardoor minder CO_2 door de planten en bomen uit de lucht wordt opgenomen draagt ook, zij het in mindere mate, bij aan de stijging van de CO_2 concentratie. De stijging van de laatste tientallen jaren is duidelijk in figuur 5.2 waarneembaar. Goed te zien is dat de CO_2 concentratie seizoensafhankelijk is: in de zomer overheerst de opname door planten, bomen en algen de emissies, in de winter is de fotosynthese gering en domineren de emissies.



Figuur 5.2. De CO_2 -concentratie in Mauna Loa (Hawai). Duidelijk is de invloed van de seizoenen te zien. Sinds het begin van de reeks is de concentratie circa 10% gestegen.

Koolstof is een van de belangrijkste bouwstenen van levende organismen; het komt voor in planten, bomen en ook in algen in de oceanen. Door verbranding van bijvoorbeeld hout of steenkool komt die koolstof in de vorm van CO_2 vrij. Ook komt CO_2 voor in de oceanen en ligt het als koolstof opgeslagen in sedimenten. De grootste hoeveelheden zitten in sedimenten opgeslagen; die opslag gebeurde in de beginperiode van de atmosfeer toen de atmosfeer veel meer CO_2 dan nu bevatte. Tussen deze systemen wordt voortdurend CO_2 uitgewisseld, zie figuur 5.3. De bijdrage van de



Figuur 5.3. Koolstofcyclus. De grootte van de koolstoflast in de diverse compartimenten is uitgedrukt in de eenheid 10 tot de macht 15 gram koolstof; de flux is uitgedrukt in de eenheid 10 tot de macht 15 gram koolstof per jaar (miljoen keer miljard gram koolstof per jaar).

mens door verbrandingsprocessen en boskap lijkt gering maar heeft niettemin grote consequenties.

De jaarlijkse CO₂ emissie bedraagt op wereldschaal ongeveer 5.000 miljoen ton koolstof, dus heel wat meer dan de emissies van de stoffen die bij de ozonafbraak betrokken zijn. Daar komt dan nog eens 10% bij door oxydatie van CO en koolwaterstoffen die in de atmosfeer worden omgezet tot CO₂. De CO₂ toeneming die het gevolg is van verminderde opname door planten en bomen (als direct gevolg van boskap) wordt op ongeveer 20% geschat van de toeneming ten gevolge van verbrandingsprocessen. De werkelijke bijdrage door de boskap is nogal onzeker.

IS DE ATMOSFEER IN STAAT OPWARMING TEGEN TE GAAN ?

Een toenemende concentratie van straling absorberende gasen leidt in eerste instantie tot een stijging van de temperatuur op aarde. Een temperatuurstijging aan het aardoppervlak is vervolgens van invloed op een aantal processen die daardoor iets anders verlopen; daardoor kan de temperatuur nog meer stijgen, minder stijgen of zelfs dalen ten opzichte van het huidige niveau. In het eerste geval is er sprake van een positieve (versterkende) terugkoppeling, in het tweede en derde geval is er sprake van een negatieve (remmende) terugkoppeling. In het geheel van atmosfeer, biosfeer, oceanen, land en ijs bestaan er talloze terugkoppelingsmechanismen. Enkele belangrijke terugkoppelingen zijn:

1a) hogere temperatuur op aarde → meer verdamping van water uit de oceaan → meer waterdamp in de atmosfeer → meer absorptie van aardstraling → nog hogere temperatuur.

1b) meer waterdamp in de atmosfeer → meer wolken → meer reflectie van zonnestraling overdag → lagere temperatuur; of: meer terugkaatsing van aardstraling 's nachts → hogere temperatuur.

1c) meer waterdamp in de atmosfeer → meer neerslag (ook in de vorm van sneeuw) → meer reflectie van zonnestraling → lagere temperatuur.

2) hogere temperatuur op aarde → gedeeltelijke afsmelting van ijskappen → minder terugkaatsing van zonnestraling → hogere tem-

peratuur.

3) hogere temperatuur op aarde → meer CO_2 verdampt uit de oceaan en komt in de atmosfeer → hogere temperatuur.

4) hogere temperatuur op aarde → stimulering van plantengroei → meer opname van CO_2 door planten → minder CO_2 in de atmosfeer → lagere temperatuur.

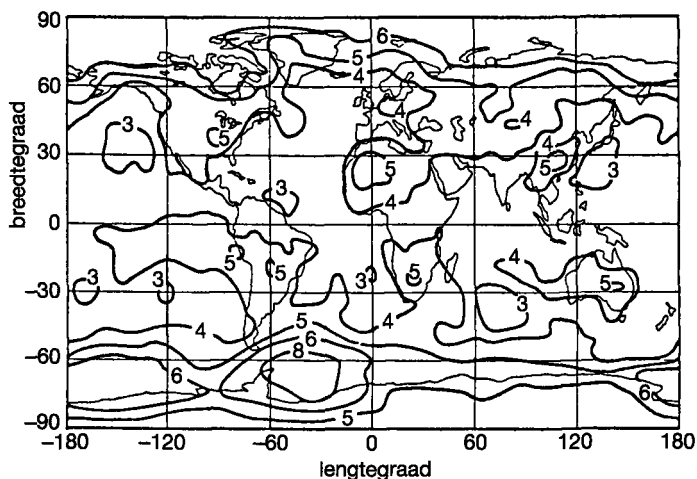
Zo bestaan er talloze terugkoppelingen, die bovendien niet los van elkaar staan. Tevens spelen sommige van deze mechanismen op totaal verschillende tijdschalen een rol. Processen waarbij opwarming van de oceaan is betrokken zijn zeer traag. Door de grote warmtecapaciteit en de enorme massa van de oceaan duurt het erg lang voordat de oceaan is opgewarmd. Zeer belangrijk zijn die processen waarbij wolkenvorming betrokken is. Omdat de fysica van wolken nogal ingewikkeld is, bestaat er nog veel onduidelijkheid wat het effect van meer wolken op de temperatuur zal zijn.

HOEVEEL STIJGT DE TEMPERATUUR?

Om beter te begrijpen hoe de verschillende fysische grootheden elkaar beïnvloeden en om prognoses te kunnen maken hoeveel de temperatuur zal stijgen zijn (en worden) er modellen ontwikkeld die de gang van zaken in de atmosfeer nabootsen. Deze modellen bevatten de belangrijkste processen die op de temperatuur van invloed zijn. Omdat de fysica van wolken een zeer ingewikkeld gebeuren is bestaat er enig verschil tussen de uitkomsten van de diverse modellen. Niettemin is men het er over eens dat stijging van de CO_2 concentratie in de atmosfeer de temperatuur doet toenemen. Als de CO_2 concentratie zou verdubbelen ten opzichte van het huidige niveau vindt men waarden voor een toename van de temperatuur van circa $1,5 - 4,5^\circ\text{C}$. De temperatuurstijging is niet overal op aarde even groot. De grootste stijging zal zich in de buurt van de polen voordoen; de kleinste stijging in de tropen. In figuur 5.4 is dat te zien.

HOEVEEL FLUCTUEERT DE TEMPERATUUR VAN NATURE?

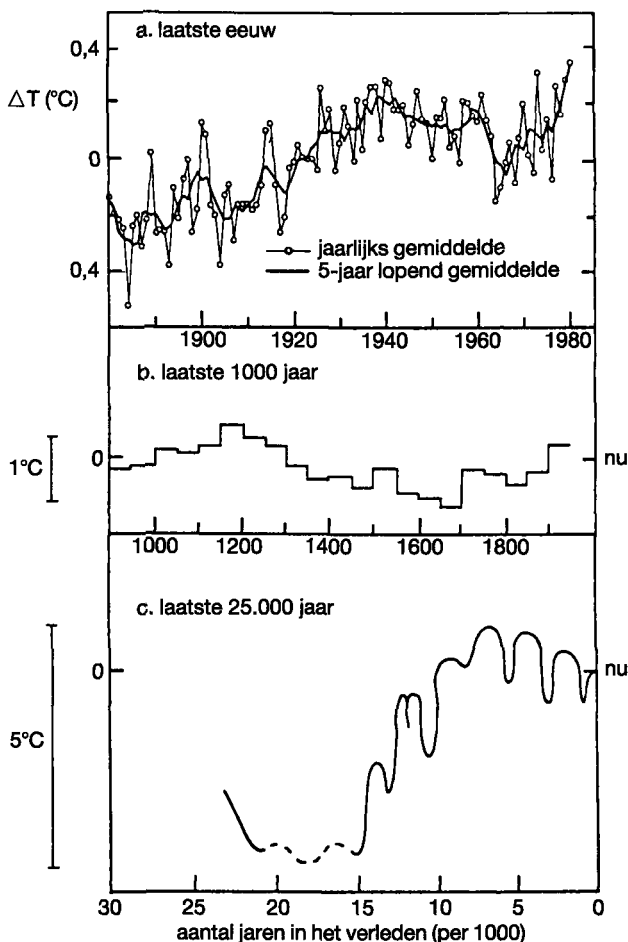
De gemiddelde temperatuur op aarde is niet altijd hetzelfde ge-



Figuur 5.4. Berekende temperatuurstijging op aarde bij een verdubbeling van de CO₂ concentratie. De grootste stijging wordt bij de polen verwacht.

weest. In het verleden zijn er perioden geweest met een lage temperatuur, de ijstijden, en daartussen liggende perioden waarin de temperatuur hoog was. Kleine veranderingen in de baan die de aarde om de zon maakt waardoor de hoeveelheid van de zon ontvangen straling varieerde lagen hieraan ten grondslag.

Het klimaat op aarde wordt, afgezien van de hoeveelheid zonnestraling, bepaald door een samenspel tussen atmosfeer, oceanen en ijskappen. Ieder van de drie reageert volgens een eigen karakteristieke tijd op uitwendige veranderingen. De gemiddelde temperatuur op aarde ondergaat niet alleen fluctuaties van een zeer lange periode, zoals de periode tussen twee opeenvolgende ijstijden, maar ook fluctuaties van kortere duur. De temperatuurschommelingen op aarde van de laatste 100 jaar, van de laatste 1000 jaar en van de laatste 25.000 jaar zijn in figuur 5.5 weergegeven.



Figuur 5.5. De gemiddelde temperatuur op aarde in de: a) laatste eeuw, b) laatste 1000 jaar en c) laatste 25.000 jaar; de nullijn is de gemiddelde temperatuur van de laatste 100 jaar. De laatste grote ijstijd dateert van circa 20.000 jaar terug. De (laatste) kleine ijstijd dateert van 1600-1700.

De laatste grote ijstijd dateert van ongeveer 20.000 jaar terug. In de periode daarna heeft het klimaat nog enkele kleinere schommelingen ondergaan. De perioden met een lagere temperatuur worden met kleine ijstijd aangeduid. De laatste kleine ijstijd vond plaats tussen ongeveer 1600 en 1700. Daar hebben we waarschijnlijk het grote aantal winterlandschappen van de nederlandse schilders uit de zeventiende eeuw aan te danken.

Op korte termijn terug is te zien dat de gemiddelde temperatuur de laatste twintig jaar weer stijgt. Er valt nog niet aan af te lezen dat deze stijging een gevolg is van het broeikaseffect. De natuurlijke schommelingen van de gemiddelde temperatuur overheersen nog het beeld. Verwacht wordt echter dat vóór de eeuwwisseling de concentratiestijging van CO_2 en andere broeikasgassen zichtbaar wordt in het temperatuurverloop. De temperatuurstijging is dan naar verwachting boven de natuurlijke schommelingen uitgekomen. Naar aanleiding van de grote droogte in de zomer van 1988 in de Verenigde Staten zijn discussies opgelaaaid of deze droogte al dan niet een bewijs zou zijn voor het broeikaseffect.

6. Zure regen

WAT IS ZURE REGEN?

'Zure regen' is in feite een misleidende en verouderde benaming. Beter is het om van zure depositie te spreken. Zure depositie omvat zowel droge als natte depositie (neerslag). De toenemende belasting van het milieu door zure stoffen is al lange tijd zichtbaar in de steeds zuurder wordende neerslag. Vrij recent is echter het inzicht dat ook grote hoeveelheden zure stoffen door zgn. droge depositie, dus zonder opneming in regenwater, naar het aardoppervlak worden getransporteerd. In dit geval gaat het om stoffen in gasvormige of vaste toestand (aerosol) die na contact met het aardoppervlak daar achter blijven. Deze stoffen worden aan bodem, planten of materialen geabsorbeerd. In Nederland draagt de droge depositie zelfs meer dan tweederde bij aan de totale zure depositie.

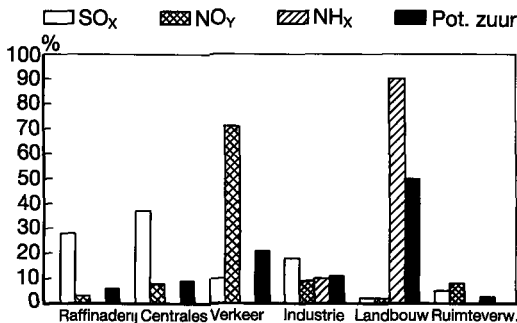
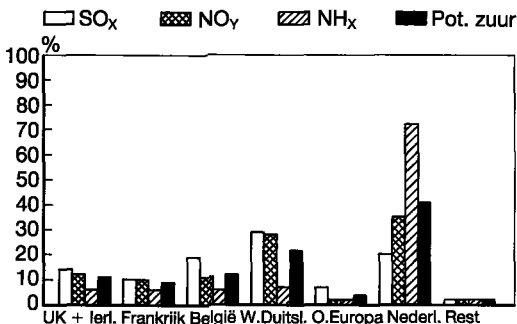
Verzuring van de bodem is voor het grootste deel een gevolg van zure depositie. Op plaatsen waar veel bemest wordt raakt de bodem op directe wijze verzuurd.

WELKE STOFFEN ZIJN ERBIJ BETROKKEN?

Zure depositie komt voor verreweg het grootste deel voor rekening van drie stoffen met hun reactieprodukten. Dat zijn: zwaveldioxyde (SO_2), stikstofoxyden (NO_x) en ammoniak (NH_3). Zwaveldioxyde lost op in water onder vorming van zwaveligzuur dat verder oxydeert tot zwavelzuur. Ook als gas kan zwaveldioxyde tot zwavelzuur oxyderen. Zwaveldioxyde en volgprodukten zorgen voor circa 40 % van de totale verzuring in Nederland. Stikstofoxyden lossen vrij slecht op in water; als gas worden zij snel in salpeterzuur (HNO_3) omgezet. Circa éénderde van de verzuring in Nederland wordt veroorzaakt door stikstofoxyden en hun reactieprodukten.

Ammoniak is de meest voorkomende basische component in het milieu. Deze stof neutraliseert gedeeltelijk bovengenoemde zuren onder vorming van ammoniumzouten waardoor de lucht en het regenwater minder zuur worden. Wanneer het door depositie in

de bodem terechtkomt worden ammoniak en ammoniumzouten door micro-organismen deels omgezet in salpeterzuur. Ook het door ammoniak geneutraliseerde zuur komt dan weer vrij. Op deze wijze is ammoniak een sterk verzurende component die voor



Figuur 6.1. a) Bijdrage van ons land en de ons omringende landen aan de zure depositie in Nederland in 1985; b) bijdrage van Nederlandse broncategorieën aan het Nederlandse aandeel in de depositie in Nederland in 1985.

Depositie van SO₂ en SO₄ is aangeduid met SO_x; depositie van NO, NO₂, NO₃ en HNO₃ is aangeduid met NO_y; depositie van NH₃ en NH₄OH is aangeduid met NH_x; 'pot zuur' is de totale bijdrage aan de zure depositie.

circa 25 % bijdraagt aan de verzuring in Nederland. De depositie van ammoniak verloopt vrij snel en vindt dus dicht bij de bronnen plaats. Daarom is ammoniak meer dan de andere stoffen een specifiek Nederlands probleem.

De bijdrage van diverse Nederlandse broncategorieën tot het Nederlandse aandeel van de zure depositie in Nederland is in figuur 6.1 weergegeven. Ook is weergegeven welke landen mede bijdragen aan de zure depositie in Nederland.

WAARDOOR KOMEN DEZE STOFFEN VRIJ?

Zwaveldioxyde wordt voornamelijk geëmitteerd door elektriciteitscentrales, oliaffinaderijen en grote industrieën. Stikstofoxyden worden vooral door het verkeer (uitlaatgassen) in de lucht gebracht. Ammoniakemissies komen vrijwel geheel voor rekening van de agrarische sector (mest).

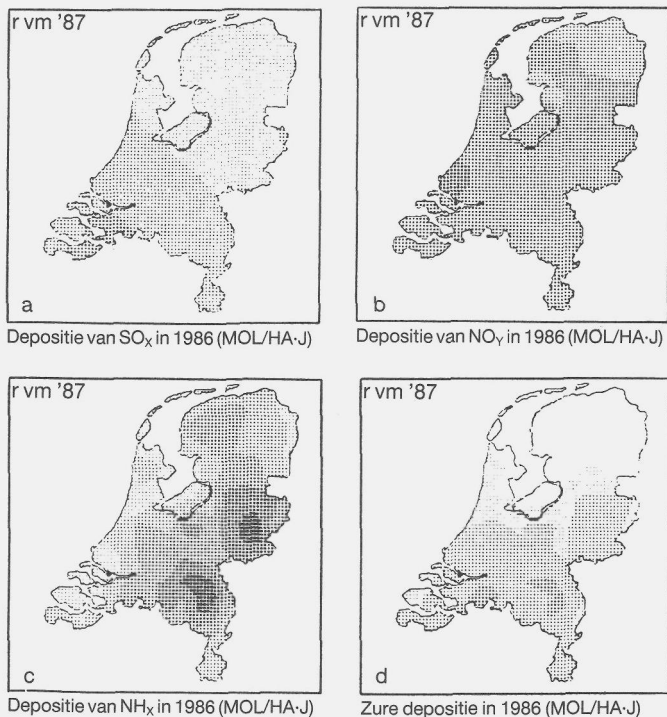
De verzuring is een grootschalig internationaal probleem. Emissies uit Nederland dragen bij aan de verzuring in het buitenland en omgekeerd. Circa 45 % van de verzuring in Nederland wordt veroorzaakt door binnenlandse bronnen. Hiervan neemt de agrarische sector met zijn ammoniakemissies de helft voor zijn rekening.

HOE ZUUR IS DE ZURE REGEN?

De zuurgraad wordt meestal uitgedrukt in de zogenaamde pH waarde die aangeeft hoeveel zuurvormende H^+ ionen aanwezig zijn (een H^+ ion is een waterstofatoom zonder elektron). Een vloeistof met een pH van 7 wordt neutraal genoemd; hoe lager dit getal hoe zuurder de vloeistof. De pH-schaal is een logaritmische schaal: twee vloeistoffen met een pH verschil van 1 verschillen een factor 10 in zuurgraad. Volledig schoon natuurlijk regenwater heeft een pH van 5,6 en is dus al een beetje zuur. Dit komt door de aanwezigheid van CO_2 dat in water oplost tot koolzuur. Het Nederlandse regenwater heeft een pH van ongeveer 4,0-4,5. Ter vergelijking: gewoon drinkwater (leidingwater) heeft een pH tussen 6,5 en 8,0; azijnzuur in oplossing zoals dat in de winkel te koop is heeft een pH van 3,4.

HOE HOOG IS DE BELASTING VAN DE NEDERLANDSE BODEM DOOR ZUUR?

De belasting van de bodem door zure depositie wordt uitgedrukt in zuurequivalenten. Een zuurequivalent komt overeen met 32 gram SO_2 of 46 gram NO_x of 17 gram NH_3 . In deze hoeveelheden is het zuurvormend vermogen van de drie stoffen even groot.



Figuur 6.2. Zure depositie in 1986 in Nederland. a) Depositie van SO_2 en SO_4 , samen aangeduid met SO_x ; b) depositie van NO , NO_2 , NO_3 en HNO_3 , samen als NO_y aangeduid; c) depositie van NH_3 en NH_4OH , samen als NH_x aangeduid; d) totale zure depositie. Hoe donkerder de gebieden des te zuurder de depositie.

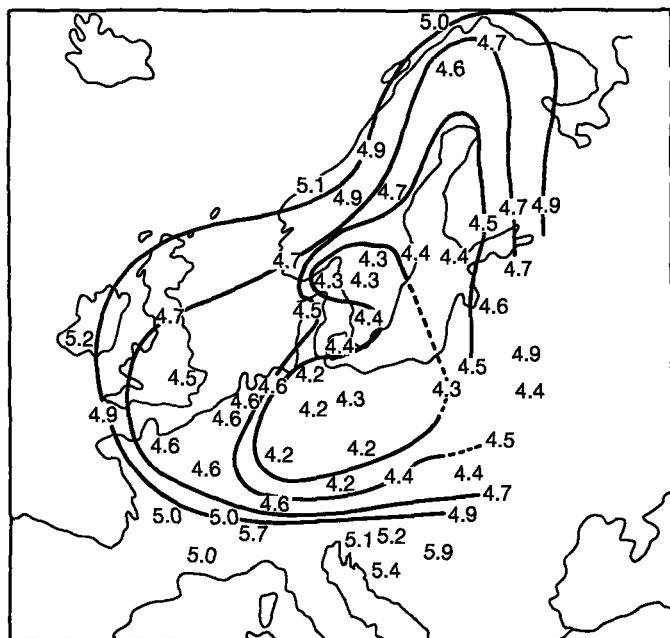
Met het begrip zuurequivalenten wordt een totale zure depositie uitgedrukt, samengesteld uit de concentraties van de drie stoffen, ongeacht de onderlinge verdeling. In 1986 was de totale zure depositie (zowel door droge als door natte depositie) op de Nederlandse bodem gemiddeld 4900 zuurequivalenten per hectare per jaar. In 1980 was dat nog 5900 zuurequivalenten. De daling moet vooral worden toegeschreven aan verminderde emissies van SO_2 in Nederland en omliggende landen. Aangenomen wordt dat het depositieniveau waarbij geen schade optreedt voor naaldbossen 1400 zuurequivalenten per hectare per jaar bedraagt en voor loofbossen 2400 zuurequivalenten per hectare per jaar. De ruimtelijke verdeling van de zure depositie in Nederland is in figuur 6.2 weergegeven.

HOE IS DE SITUATIE IN HET BUITENLAND?

De jaargemiddelde pH-waarden van het regenwater in Europa liggen tussen 4,2 en 5,9. Zie figuur 6.3. De laagste en dus zuurste waarden zijn te vinden in Midden-Europa, in het bijzonder het grensgebied tussen Tsjechoslowakije, Oost-Duitsland en Polen. De verbranding van zwavelhoudende brandstoffen is in dit gebied zeer intensief. De regenwatercijfers in Nederland worden 'gunstig' beïnvloed door de aanwezigheid van ammoniak, dat immers het zuur tijdelijk neutraliseert (zie de tweede vraag van dit hoofdstuk).

IS NEDERLAND EEN IMPORTEUR OF EXPORTEUR VAN ZURE REGEN?

Nederland exporteerde in 1985 circa 20 % meer SO_2 dan het importeerde. Voor NO_x was de export ongeveer een factor 2,5 hoger dan de import en voor NH_3 zelfs een factor 9 hoger. Nederland is dus netto een exporteur van verzurende stoffen. Hoe zeer de problematiek internationaal van aard is blijkt wel uit het feit dat van de totale depositie op Nederlandse bodem circa 80% van SO_2 uit het buitenland afkomstig is, terwijl dat voor NO_x 65 % is en voor NH_3 25 %.



Figuur 6.3. Isolijnen van de pH-waarde van regenwater, opgevangen in Europese niet-industriële gebieden.

7. Gevolgen en effecten

a) Vermindering van ozon in de stratosfeer

HOEVEEL EXTRA U.V. KOMT ERAAN DE GROND ALS DE OZONLAAG DUNNER WORDT?

In hoofdstuk 3 werd vermeld dat de ozonlaag met name licht met korte golflengte tegenhoudt. Ultraviolet licht heeft zoals de naam al zegt een golflengte kleiner dan violet licht. Er worden drie soorten U.V.-licht onderscheiden. Deze soorten zijn:

U.V.-A (golflengte 315-400 nm)

U.V.-B (golflengte 280-315 nm)

U.V.-C (golflengte 100-280 nm)

Hoe korter de golflengte des te schadelijker de straling. De meest schadelijke soort, U.V.-C, komt in het zonlicht dat de aarde bereikt niet voor. Licht met een golflengte van ongeveer 300 nm en hoger bereikt wel de aarde, licht met een kortere golflengte niet. Door aantasting van de ozonlaag zal de intensiteit van U.V.-A en vooral U.V.-B straling op aarde toenemen. Het verband tussen afnemning van de ozonkolom en de toeneming van de intensiteit van de U.V.-straling is in de tabel gegeven.

ozon afnemning	toeneming U.V.-straling	
	290-320 nm	320-360 nm
(%)	(%)	(%)
10	8	1
20	17	2
30	27	3
40	38	5

Dat de intensiteit van de U.V.-A straling maar weinig verandert, wordt duidelijk als bedacht wordt dat maar een klein gedeelte van de U.V.-A straling in de atmosfeer geabsorbeerd wordt. Het verdwijnen van ozon heeft dus weinig invloed op die straling.

LEIDT TOENEMING VAN U.V.-STRALING TOT HUIDKANKER?

Van in-de-zon-liggen word je bruin. Dit wordt veroorzaakt door de U.V.-B straling in het zonlicht. Die straling bevordert ook de aanmaak van vitamine D in het lichaam, wat van belang is voor de botvorming. Ongewenste gevolgen voor de huid door blootstelling aan U.V.-B straling zijn huidverbranding, versnelde veroudering van de huid en huidkanker. Voor de meeste mensen is het betrekkelijk eenvoudig om zich te beschermen tegen de gevolgen van toenemende U.V.-B straling. Opletten bij het zonnebaden dat men niet verbrandt is de beste aanpassing aan de plaatselijke intensiteit van de straling. Beschermen tegen overmatige blootstelling is geboden. Voor een aantal beroepsgroepen is blootstelling aan U.V.-B straling echter onvermijdelijk wegens werkzaamheden in de buitenlucht. Onder die groepen komt huidkanker van oudsher in relatief hoge frequentie voor en dan met name op de hals, hoofd en handen: daar waar de zon direct op de huid straalt. Uit onderzoek is gebleken dat het risico op huidkanker toeneemt naarmate de blootstelling aan U.V.-B straling langer duurt en naarmate de intensiteit van de straling hoger is. Hierbij geldt voor de verschillende soorten huidkanker een iets andere relatie. Voor basaalcelcarcinomen, een meestal goedaardige vorm van huidkanker, is het risico evenredig met het kwadraat van de stralingsdosis en de 5e macht van de totale in de straling doorgebrachte tijd. Voor plaveiselcelcarcinomen is dit risico evenredig met de derde macht van de dosis en de 6e macht van de tijd. Het totaal aantal gevallen van deze huidkankervormen in Nederland bedraagt momenteel circa 12.000 per jaar, waarvan ongeveer 90 met dodelijke afloop. Bij aantasting van de ozonlaag zal de dosis U.V.-B straling toenemen. Blootstelling aan zo'n hogere dosis werkt kwadratisch of met een derdemachts relatie door in het totaal aantal kankergevallen. Een verhoging van de dosis met 30% zal dus leiden tot 70% tot 120% meer gevallen van deze soorten huidkanker. Het risico wordt dus groter tenzij mensen zich korter aan de zon blootstellen, en tenzij men beter de huid beschermt. Een derde vorm van kanker, de melanomen ('kwaadaardige moedervlek') wordt mogelijk ook veroorzaakt door U.V.-B straling, maar hoe die relatie is, is niet bekend. Het aantal gevallen met me-

lanomen is momenteel in Nederland circa 600 per jaar, waarvan ongeveer 300 per jaar met dodelijke afloop. Het aantal melanomen neemt sterk toe, ook in andere landen. Gebleken is dat ze het meest voorkomen bij mensen die binnenshuis werken en zich onregelmatig aan de zon blootstellen, maar dan wel direct aan hoge doses. Mogelijk is het gebrek aan gewenning van de huid aan zonlicht daarbij van belang.

ZIJN ER NOG ANDERE NADELIGE GEVOLGEN VOOR DE GEZONDHEID?

Een ander gevolg van meer U.V.-B straling is dat het menselijk afweersysteem verzwakt wordt. Het afweersysteem beschermt de mens zo veel mogelijk tegen allerlei infecties. Verzwakking van het afweersysteem houdt in dat mensen een grotere kans lopen infecties op te lopen.

Er zijn aanwijzingen dat verhoogde blootstelling aan U.V.-B straling het ontstaan van oogaandoeningen bevordert. Onderzoek aan dieren heeft aangetoond dat oogaandoeningen vaker optreden wanneer zij aan meer U.V.-B straling worden blootgesteld.

IS HET NOG WEL VEILIG OM IN DE ZON TE ZITTEN?

De gewenste en ongewenste effecten van U.V. staan alle in verband met dosis en tijdsduur van de blootstelling. Wanneer de U.V.-straling toeneemt treedt bij het eerste zonnebaden eerder verbranding op; men moet dan dus korter in de zon verblijven. Bij de eerste blootstelling aan de zon treden in de huid natuurlijke beschermingsprocessen op: directe en vertraagde bruining en huidverdikking. Verdikking van de opperhuid begint na enkele dagen en duurt enkele maanden. Door deze verdikking kan de doorlatendheid van de huid voor UV-straling aanzienlijk gereduceerd worden wat uiteraard bescherming biedt. Bescherming van de huid door bruining is gering.

De hoeveelheid straling die leidt tot verbranding van de huid is gerelateerd aan de hoeveelheid die huidkanker veroorzaakt. Hierbij speelt de huidskleur een belangrijke rol. Blanke mensen die in de zon snel verbranden hebben een grotere kans op huidkanker dan mensen die minder snel verbranden. Bij donker gekleurde blan-

ken en personen van het negroïde ras komt huidkanker minder voor.

Toeneming van U.V.-straling leidt dus tot een verhoogde kans op huidkanker. De meest voor de hand liggende remedie voor zonzonabidders is dan ook de duur van het zonnebaden te beperken. Voor mensen die beroepshalve veel in de buitenlucht vertoeven is dat geen oplossing. Voor hen betekent meer U.V.-straling een verhoogd risico op een vorm van huidkanker, tenzij men het lichaam met extra kledingstukken beschermt.

Aangezien voorkoming van erger inhoudt dat mensen hun gedragspatroon moeten wijzigen (opletten hoe lang men in de zon vertoeft), luidt de conclusie dat aantasting van de ozonlaag leidt tot een onveiligere situatie voor de gezondheid.

ZIJN ER MIDDELTJES DIE TEGEN EXTRA U.V. BESCHERMEN?

De gebruikelijke anti-zonnebrandmiddelen zijn ook geschikt als de U.V.-straling toeneemt. Men kan overwegen om middelen met een hogere beschermingsfactor te gaan gebruiken. De middelen worden echter getest op hun werking tegen zonnebrand. Het is niet bekend of ze ook tegen het ontstaan van huidkanker beschermen. Daarom lijkt het verstandig om geen extra bescherming te zoeken door middeltjes te gaan smeren.

*.j.

WELKE GEVOLGEN ZIJN ER VOOR DE DIEREN EN PLANTEN?

Bij zoogdieren en vogels bestaat een verhoogde kans op oogaandoeningen. Larven van waterdieren in de bovenste waterlagen zijn zeer gevoelig voor toeneming van U.V.-B straling. Organismen in zee zoals plankton kunnen aangetast worden. Vooral bij de Zuidpool is de zee zeer rijk aan dit soort micro-organismen. Zij staan aan het begin van voedselketens, en hun aantasting heeft dan ook rechtstreeks gevolgen voor de visstand.

Hetzelfde geldt ten aanzien van landbouwgewassen: veel voedingsgewassen zijn gevoelig voor toeneming van U.V.-B straling. Onderzoek toonde aan dat de opbrengst van sojabonen ongeveer 25% terugloopt als zij aan 25% meer U.V.-B worden blootgesteld.

De landbouwopbrengsten zullen dus achteruit gaan als de intensiteit van de U.V.-B straling toeneemt. Voor zover bekend zijn deze gevolgen op dit moment nog niet merkbaar.

b) toeneming van ozon in de troposfeer

IS OZON GEVAARLIJK VOOR DE GEZONDHEID?

Ozon is een zeer reactief gas en een zeer krachtige oxidator. Het is deze eigenschap die ten grondslag ligt aan de door ozon veroorzaakte nadelige gezondheidseffecten. Of er effecten optreden en van welke aard en intensiteit deze effecten zijn, hangt af van de concentratie ozon die in de lucht voorkomt en van de duur van de blootstelling.

Het is verstandig onderscheid te maken tussen acute en chronische effecten. Acute effecten treden vrij snel op na blootstelling aan relatief hoge concentraties. Chronische effecten treden op na langdurige blootstelling aan relatief geringe concentraties. De meeste onderzoeksresultaten hebben betrekking op experimenten waarbij de blootstellingsduur relatief kort was. Bij een relatief hoge ozonconcentratie (meer dan 100 ppb) worden verschijnselen waargenomen als irritatie van de slijmvliezen, zere keel, pijn op de borst, hoest en hoofdpijn. Dat bij hoge ozonconcentraties in de buitenlucht klachten over tranende ogen gemeld worden moet waarschijnlijk worden toegeschreven aan hoge concentraties aldehyden en peroxybenzoylnitraat, stoffen die een rol spelen bij de ozonvorming en die gedurende episoden in hoge concentraties voorkomen. Personen met aandoeningen aan de luchtwegen blijven bij ozonconcentraties boven de 80 ppb last te ondervinden. Met proefpersonen zijn diverse inademensproeven gedaan waaruit blijkt dat ozon met name effect heeft op de ademhalingswegen. Deze effecten treden op voor gezonde personen bij een concentratie van circa 100 ppb. Echt merken zullen de meeste mensen dit niet, wel personen die zware arbeid verrichten of die meer dan normaal gevoelig zijn.

Over gezondheidseffecten bij de mens ten gevolge van langdurige blootstelling bestaan nauwelijks gegevens.

ZIJN CARA-PATIËNTEN GEVOELIGER VOOR VERHOOGDE OZON-CONCENTRATIES DAN ANDEREN?

Daar ozon met name een effect heeft op de ademhalingswegen zullen in het algemeen gesproken mensen die aandoeningen hebben van de luchtwegen meer last ondervinden dan anderen. Uit epidemiologisch onderzoek blijkt dat personen met luchtwegaandoeningen eerder en sterker reageren dan mensen zonder dergelijke aandoeningen. Of dit alleen aan ozon moet worden toegeschreven is echter de vraag. Bij verhoogde ozonconcentraties zijn namelijk vaak ook andere luchtverontreinigende stoffen in verhoogde concentraties aanwezig.

IS ER EEN VERHOOGDE KANS OP INFECTIEZIEKTEN VAN DE LONGEN EN OP LONGKANKER?

Hoewel door middel van dierproeven (bij muizen) is aangetoond dat ozon tumoren kan veroorzaken is het aannemelijk te veronderstellen dat ten gevolge van de ozonconcentraties zoals die in Nederland voorkomen de kans op het ontstaan van longtumoren bij de mens verwaarloosbaar klein is. Wat betreft het ontstaan van infectieziekten geldt enigszins hetzelfde. Uit experimenten met proefdieren is komen vast te staan dat door inademing van ozon de kans op infectieziekten kan toenemen doordat de ozon de werking van het afweermechanisme tegen infecties aanzienlijk vermindert. Om deze effecten te bereiken moeten evenwel zulke hoge concentraties ozon worden gebruikt dat dit ver van de realiteit afstaat. Op basis van dierexperimenten en epidemiologisch onderzoek kan dus niet geconcludeerd worden dat er voor de mens een verhoogde kans op infectieziekten bestaat bij ozonconcentraties zoals die nu worden waargenomen. Eenmaal opgelopen infecties van de ademhalingswegen kunnen echter door ozon worden verergerd omdat ozon het afweermechanisme verzwakt.

WAT ZIJN DE GEVOLGEN VOOR PLANTEN EN BOMEN?

Bekend is dat bossen schade ondervinden door toeneming van de ozonconcentratie. Onduidelijk is nog op welke manier de bio-

logische processen in een bos door ozon verstoord worden. Het is wel duidelijk geworden dat de vitaliteit van bossen door een aantal oorzaken wordt aangetast. Belangrijke factoren zijn: verzuring van de grond, verstoring van de fotosynthese door ozon en zwaveldioxyde, een tekort aan magnesium en een overmaat aan voedingsstoffen zoals stikstofverbindingen.

Een overdosis aan stikstof speelt in Nederland een belangrijke rol. De vergrassing van de heide is daar een duidelijk voorbeeld van. Hoeveel de diverse factoren bijdragen valt niet te zeggen. Al deze factoren bij elkaar leiden er toe dat de vitaliteit van de bossen achteruit gaat, waardoor zij gevoeliger worden voor de inwerking van natuurlijke factoren zoals insecten, vorst en droogte.

WAT ZIJN DE GEVOLGEN VOOR DE LANDBOUW?

Door opnemings van ozon uit de lucht wordt een aantal processen in de planten verstoord. De fotosynthese loopt terug, de groei vermindert en de bladeren kunnen zichtbaar aangetast worden. Dertig jaar geleden werd al opgemerkt dat bij hoge ozonconcentraties de bladeren van de tabaksplant, een van de meest gevoelige planten voor ozon, beschadigd raakten. De schade aan het blad neemt sterk toe als de ozonconcentratie hoger wordt of als de blootstelling langer duurt. Bladschade is vooral een gevolg van blootstelling aan hoge ozonconcentraties gedurende enkele dagen; dergelijke situaties doen zich voor tijdens episoden.

De belangrijkste gevolgen van blootstelling aan relatief lage concentraties gedurende lange tijd zijn vergeling, verbleking, remming van de groei en vermindering van de opbrengst. Geschat wordt dat door luchtverontreiniging, met ozon als de belangrijkste schade veroorzakende stof, de oogst van gewassen circa 5% is teruggelopen.

WAT ZIJN DE EFFECTEN VAN OZON OP MATERIALEN?

Doordat ozon een sterk reactief gas is kan het snel met allerlei organische stoffen reageren; vooral rubberhoudende produkten zijn kwetsbaar. Dit geldt in het bijzonder voor autobanden die, doordat ze onder druk staan, eerder door ozon worden aangetast. De gevoeligheid van autobanden voor ozon wordt verminderd

door tijdens de fabricage zogenaamde anti-ozonanten toe te voegen.

Van andere stoffen die gevoelig zijn voor ozon kan gezegd worden dat de slijtage ten gevolge van de inwerking van ozon zo gering is dat het de levensduur van die produkten niet of nauwelijks bekort.

De bijdrage van ozon aan de aantasting van cultuurgooederen zoals gebouwen en monumenten is vrij klein. De schade wordt vooral aangericht door SO_2 en NO_x . Gevoelig voor ozon zijn schilderijen en de uit papier, textiel of leer vervaardigde kunstvoorwerpen. Hoewel de ozonconcentraties in musea en archieven veel lager liggen dan buiten en de luchtvochtigheid ook lager is, wat gunstig is, treden door de lange blootstellingsduur toch aantastingsverschijnselen op. Er bestaan schattingen van voor dergelijke voorwerpen aanvaardbare ozonconcentraties; de geadviseerde ozonconcentraties van 1 ppb zijn echter binnen gebouwen geen realiseerbare waarden.

WELKE GRENSWAARDE WORDT IN NEDERLAND
VOOR OZON GESTELD EN WORDT DIE WEELENS
OVERSCHREDEN?

In de meeste westerse landen zijn luchtkwaliteitsnormen opgesteld. Stoffen die door hun eigenschappen een gevaar kunnen opleveren voor de gezondheid van mensen, dieren en planten mogen een bepaalde concentratie niet overschrijden. Er bestaan normen voor de kwaliteit van binnenlucht, van belang in fabrieken, en voor de kwaliteit van buitenlucht. Die normen zijn niet in alle landen even streng en bovendien hanteren diverse landen afwijkende definities. Voor de buitenlucht bestaan voorlopige normen. Het ligt in de bedoeling dat zij over enige tijd door definitieve normen worden vervangen. In het Basisdocument Ozon worden advieswaarden gegeven voor zowel de bescherming van de mens als voor de bescherming van cultuurgewassen.

Luchtkwaliteitsnormen in Nederland voor ozon in de buiten-lucht.

norm	concentratie	opmerkingen
voorlopige grenswaarde	120 ppb	voor 1-uurgemiddelde concentraties; maximaal 5 dagen per jaar mag deze waarde overschreden worden.
advieswaarden voor cultuurgewassen	75 ppb	voor 1-uurgemiddelde concentraties.
	33 ppb	voor de 8-uurgemiddelde concentratie overdag, tussen 9.00 en 17.00 uur.
	25 ppb	voor de gemiddelde concentratie tijdens het groeiseizoen (overdag tussen 10.00 en 17.00 uur, van mei tot en met september.
advieswaarden voor mensen	80 ppb	voor 1-uurgemiddelde concentraties;
	55 ppb	voor 8-uurgemiddelde concentraties.

Er worden voor cultuurgewassen drie grenswaarden geadviseerd omdat, zoals in voorgaande vragen naar voren is gekomen, schadelijke effecten niet alleen bij hoge concentraties optreden maar ook bij lage langdurige concentraties.

In de periode 1980-1985 werden in Nederland de advieswaarden ruimschoots overschreden. De maximale 1-uurgemiddelde concentraties voor de diverse jaren in deze periode lagen tussen 115 en 215 ppb. Voor de 8-uurgemiddelde concentraties was dat 90 en 180 ppb en de gemiddelden voor het groeiseizoen varieerden tussen 40 en 48 ppb.

c) broeikaseffect

WAT ZIJN (IN HET KORT) DE GEVOLGEN VAN HET BROEIKASEFFECT?

Stijging van de temperatuur op aarde en in de troposfeer heeft twee verstrekkende gevolgen: het klimaat verandert en de zeespiegel stijgt. Onder klimaatverandering wordt verstaan verandering van de temperatuur, neerslag, gemiddelde windsnelheid, de verdeling van de wind over de windroos, enz.

Duidelijke voorspellingen hoe het klimaat in Nederland de volgende eeuw zal zijn, zijn nog niet te geven, zelfs niet met behulp van de meest geavanceerde computermodellen. De weermachine-rie is zeer complex en een aantal processen is nog niet goed bekend. Niettemin is het waarschijnlijk dat behalve de temperatuur ook de neerslaghoeveelheden zullen veranderen.

Klimaatveranderingen zullen grote gevolgen hebben: op sommige plaatsen zullen nu vruchtbare landbouwgebieden verdwijnen en op andere plaatsen, de toendra's bijvoorbeeld, zal de volgende eeuw misschien wel graan groeien. Een mogelijk gevolg is dat de woestijnen oprukken.

Voor Nederland is een zeer belangrijke vraag hoeveel de zeespiegel zal stijgen. Die vraag kan pas goed beantwoord worden als duidelijk is hoe groot de temperatuurstijging zal zijn en hoe de ijskappen daarop reageren. Van alle landijs ligt 90% opgeslagen op Antarctica waar het ijs op sommige plaatsen 4 km dik is.

Een uitgebreide discussie over alle consequenties die een klimaatverandering en een stijgende zeespiegel met zich meebrengen valt buiten het bereik van dit boekje.

d) zure regen

WAT IS (IN HET KORT) HET GEVOLG VAN ZURE REGEN?

Het meest sprekende gevolg van zure regen is de aantasting van de bossen. Wat de vitaliteit van de bossen betreft is de situatie zeer zorgelijk in landen als Polen, Tsjechoslowakije, Oostenrijk, Zwitserland, Duitsland ('Das grosse Waldsterben') en Nederland. Recent onderzoek heeft uitgewezen dat 60% van de Nederlandse bomen aangetast is. De mate van aantasting hangt echter niet alleen samen met de zuurgraad van de depositie, maar ook met de samenstelling van de bodem; kalkrijke bodems zijn in staat om enige tijd de toevloed van zuur te neutraliseren.

Bovendien kan de aantasting niet aan zure depositie alleen worden toegeschreven. Ook ozon is van belang; zie daarvoor eerder in dit hoofdstuk, onder b).

Zure depositie heeft ook grote gevolgen voor het leven in meren

en vennen; in Scandinavië is een groot deel van de meren biologisch dood. In Joegoslavië en Hongarije daarentegen zijn de meren nauwelijks verzuurd. Deze meren hebben, in tegenstelling tot de meren in Scandinavië, een groot bufferend vermogen, waardoor het zuur geneutraliseerd wordt.

Een zichtbare gevolg van de zure regen is ook de aantasting van oude gebouwen en monumenten; belangrijkste boosdoeners in dit geval zijn zwaveldioxyde en stikstofoxyde.

8. Maatregelen en beleid

WELKE MAATREGELEN MET BETREKKING TOT DE
OZONLAAG ZIJN AL GETROFFEN IN
INTERNATIONAAL VERBAND?

In het kader van de UNEP (United Nations Environment Programme, het milieuprogramma van de Verenigde Naties) is in 1985 een Verdrag voor de bescherming van de ozonlaag tot stand gekomen, het Verdrag van Wenen. De aanvankelijk 20 landen die dit Verdrag hebben ondertekend hebben zich verplicht tot het geven van informatie over produktie van stoffen die de ozonlaag aantasten (of daarvan verdacht worden) en tot het inbrengen van onderzoeksresultaten. Nadien sloten zich meer landen aan.

In 1987 is in hetzelfde kader het zgn. Protocol van Montreal tot stand gekomen, betreffende stoffen die de ozonlaag aantasten. Daarin wordt een gefaseerde vermindering van het gebruik van een aantal C.F.K.'s en halonen geregeld. Het Protocol treedt in werking na ratificatie door een voldoende aantal landen die tevens te zamen voor tenminste tweederde deel van het gebruik van deze stoffen verantwoordelijk dienen te zijn. Inmiddels lijkt aan deze voorwaarden voldaan te zullen worden. Het Protocol wordt van kracht per 1 januari 1989.

In Nederland heeft de volksvertegenwoordiging in september 1988 het Protocol goedgekeurd. Een groot aantal, voornamelijk ontwikkelingslanden, neemt niet deel aan het UNEP overleg; van die landen valt niet te verwachten dat ze het Verdrag en het Protocol zullen ondertekenen. Op korte termijn baart dat geen zorgen omdat deze landen weinig produceren en nog weinig produkten met C.F.K.'s gebruiken.

Het Protocol van Montreal houdt in:
Ontwikkelde landen brengen het gebruik en de produktie als volgt terug ten opzichte van 1986 (= 100%):

groep stoffen	C.F.K.'s (11,12,113,114,115)			Halonen (1211, 1301, 2402)
	1990	1994	1999	1993
jaar	1990	1994	1999	1993
gebruik	100%	80%	50%	100%
productie	110%	90%	65%	110%

Ontwikkelingslanden met een totaalgebruik van minder dan 0,3 kg per inwoner per jaar hebben een uitstel van 10 jaar gekregen. Ter vergelijking: in de Verenigde Staten ligt het jaarlijkse totaalgebruik van C.F.K.'s op 0,9 kg per inwoner en in Europa is dat 0,8 kg per inwoner.

De produktie van C.F.K.'s wordt minder aan banden gelegd dan het gebruik ervan. De achterliggende gedachte is dat de export naar de ontwikkelingslanden voldoende moet blijven om de daar groeiende behoefte aan C.F.K.'s op te vangen en te voorkomen dat daar C.F.K.'s geproduceerd gaan worden.

Ten tijde van de bijeenkomst in Montreal was al duidelijk dat de voorgestelde maatregelen niet erg vergaand zijn. De presentatie van de resultaten van de eerste grootscheepse meetcampagne boven Antarctica, twee weken later, onderstreepte dat de ozonlaag boven Antarctica zeer ernstig aangetast is en dat de maatregelen van Montreal lang niet voldoende zijn.

Hoewel het Protocol voor een aantal landen lang niet ver genoeg ging werd het algemeen toch gezien als een prestatie dat er een overeenkomst gesloten was. Dat het Protocol tekort schiet is door metingen en berekeningen in 1988 nog eens naar voren gekomen. Een conferentie van wetenschappers en beleidsmakers, in juni 1988 bijeengekomen in Toronto, deed een oproep aan alle regeringen en de betrokken industrie om in 1990 te komen tot een herziening van het Protocol van Montreal met als doel in het jaar 2000 de emissies van de belangrijkste C.F.K.'s tot vrijwel nul terug te brengen.

WELKE MAATREGELEN MET BETREKKING TOT DE OZONLAAG ZIJN AL GETROFFEN IN NATIONAAL VERBAND?

In Nederland werd in 1980 op vrijwillige basis een beperking van het C.F.K. gebruik in spuitbussen met 50% t.o.v. 1976 overeengekomen. Begin 1988 is, eveneens op grond van overleg, een veel verdergaande beperking overeengekomen dan vereist wordt volgens het Protocol van Montreal: binnen twee jaar zullen de Nederlandse spuitbusfabrikanten vrijwel geen C.F.K.'s meer toepassen. De productie van C.F.K.'s zal met 80-85% worden teruggebracht, zodat ook de export van C.F.K.'s wordt beperkt. Tevens wordt een regeling getroffen die import van spuitbussen met C.F.K.-drijfgas moet verhinderen.

Ook genoemd moet worden dat in 1988 proefprojecten zijn gestart waarbij onderzocht wordt op welke manier koelmiddelen in huishoudkoel- en vrieskasten kunnen worden teruggewonnen nadat de apparaten zijn afgedankt. Onderzoek naar het gebruik van alternatieven voor C.F.K.'s zal moeten leiden tot vervanging van de meest schadelijke C.F.K.'s door voor de ozonlaag onschadelijke stoffen.

Doelstelling is het gebruik van C.F.K.'s die schadelijk voor de ozonlaag zijn aan het einde van de eeuw geheel beëindigd te hebben.

WELKE MAATREGELEN ZIJN ER GETROFFEN MET BETREKKING TOT OZON IN DE TROPOSFEER?

Dat stijging van het ozon-gehalte in de troposfeer op mondiale schaal een ongewenst verschijnsel is, is pas zeer recent duidelijk geworden. Het onderwerp staat dan ook nog niet op de internationale of nationale politieke agenda. Daarentegen wordt in een aantal landen al sinds lange tijd een beleid gevoerd dat erop gericht is het optreden van episoden met hoge concentraties te bestrijden. Vooral in de Verenigde Staten en Japan is men daar actief in. De E.G. loopt ten opzichte van die landen ver achter. Initiatieven tot strengere normen struikelen steeds over de onwil van een aantal landen. Er bestaat de bindende E.G. richtlijn voor de uitworp door personenauto's, het zogenaamde Luxemburgse accoord, dat

werd opgesteld in het kader van de bestrijding van de verzuring. De richtlijn is een politiek compromis en niet het maximaal haalbare, want voor kleinere auto's worden minder strenge eisen gesteld dan voor grotere auto's. In de tabel staan de emissie-eisen en hun fasering. Van deze maatregel mag een positieve invloed op het verlagen van de ozonniveau's worden verwacht, ofschoon deze verlaging niet voldoende zal zijn.

Europese grenswaarden voor personenauto's

cilinder- inhoud	ingangs datum ¹⁾	eisen in grammen per test ²⁾			huidig aandeel in wagenpark
		CO	KW+NO _x	NO _x	
< 1400 cc	1-10-92/93	30	8	—	ca. 53%
1400-2000 cc	1-10-91/93	30	8	—	ca. 31%
> 2000 cc	1-10-88/89	20	6.5	3.5	ca. 3%

¹⁾ Het eerste jaartal heeft betrekking op bestaande typen, het tweede op nieuwe typen.

²⁾ Een test bestaat uit een in het laboratorium nagebootste standaard-stadsrit van ongeveer 4 km lang.

Op nationaal niveau is het beleid voor troposferische ozon nog in ontwikkeling. In 1988 is het Basisdocument Ozon gepubliceerd waarin bestaande kennis wordt samengevat. Daaraan worden vervolgens beleidsvoornemens verbonden. Toch worden nu al maatregelen getroffen om ozonconcentraties terug te dringen. Behalve de uitvoering van het zgn. Luxemburgse accoord betreft dat ook de bestrijding van NO_x binnen het kader van het anti-verzuringsbeleid en het actieprogramma koolwaterstoffen 2000 dat zich richt op industriële bronnen en huishoudens in het jaar 2000. Verder wordt fiscale stimulering van schone, kleine auto's voorbereid.

WELKE MAATREGELEN ZIJN ER GETROFFEN MET BETREKKING TOT HET BROEIKASEFFECT?

Het beleid ten aanzien van het broeikaseffect is van alle mon-

diale milieuproblemen nog het minst ontwikkeld. Dit hangt onder meer samen met het feit dat het probleem nauw verweven is met energieopwekking (door verbranding van fossiele brandstoffen). In het Nederlandse milieubeleid en ook in dat van andere landen wordt het beschouwd als een gesignaleerd milieuvraagstuk, dat nader onderzoek en studie vergt.

Het Europees parlement heeft in september 1986 een resolutie aangenomen die oproept tot maatregelen. De Europese Commissie heeft daar nog weinig mee gedaan. Ook in de Tweede Kamer is om een aanpak van het probleem gevraagd. Concrete maatregelen zijn echter nog niet getroffen. De roep om een internationale aanpak neemt toe. Op de conferentie van Toronto, juni 1988, is een oproep gedaan aan de geïndustrialiseerde landen om in 2005 de CO₂ emissies met 20% ten opzichte van 1988 te hebben teruggebracht.

Nederland organiseert eind 1989 een politieke conferentie over het probleem van klimaatverandering, met als doel de internationale aanpak van de problemen te bevorderen.

WELKE MAATREGELEN ZIJN ER GETROFFEN MET BETREKKING TOT ZURE REGEN?

De verzuring van meren en rivieren in Scandinavië is de aanleiding geweest tot de Conventie betreffende grensoverschrijdende luchtverontreiniging over lange afstanden. Deze Conventie kwam in 1979 tot stand als resultaat van jarenlange, onder meer in de OESO (Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling) voorbereide politieke bewustwording. Deze conventie is tot stand gekomen in het kader van de Economische Commissie voor Europa van de Verenigde Naties waarin naast West- en Oost-europese landen ook de Verenigde Staten en Canada deelnemen. In het verdrag wordt de bereidheid tot samenwerking uitgesproken.

De bewustwording van de samenhang tussen bossterfte en zure regen leidde in 1984 tot politiek toeverleg. 10 landen waaronder Nederland ondertekenden een verdrag om de SO₂ emissies per land met 30% terug te brengen ten opzichte van 1980 (Ottawa 1984). Enkele belangrijke landen, met name de V.S. en Groot-Brittannië, hebben dit protocol tot nu toe niet geratificeerd.

Over NO_x -reductie werd nog geen overeenstemming bereikt. Na jarenlang vooroverleg werd begin 1988 een voorstel verworpen voor beperking van de NO_x emissies met 30%. Naast en in aanvulling op de vaststelling van emissieplafonds per land wordt in E.G.-verband aan de formulering van bindende emissie-eisen gewerkt. De NO_x -eisen zijn voor wat het verkeer betreft vervat in het Luxemburgse accoord. In juni 1988 is overeenstemming bereikt over de uitworpeisen voor het vrachtverkeer en over een richtlijn uitworpeisen voor grote stookinstallaties.

In Nederland wordt sinds 1983 een anti-verzursingsbeleid gevoerd. Doelstelling is de atmosferische zure depositie terug te brengen van 5900 zuurequivalenten per hectare in 1980 tot 3000 zuurequivalenten per hectare. Gezien het grensoverschrijdend karakter van de luchtverontreiniging is een internationale aanpak vereist. Nederland maakt zich in het internationale overleg sterk voor een krachtig Europees en mondiaal beleid. Nationaal is een pakket maatregelen ontwikkeld dat tot gevolg moest hebben dat de emissies van SO_2 , NO_x en NH_3 zouden worden teruggebracht met respectievelijk een factor 3,5, 1,5 en 2 ten opzichte van de situatie in 1980. Bij de in 1988 gehouden tussentijdse evaluatie van het verzursingsbeleid is geconstateerd dat de ontwikkelingen het beleid hebben ingehaald: de economische groei, vooral tot uiting komend door het stijgende gebruik van de auto, doet een deel van de maatregelen teniet. In de Tweede Kamer is nu gevraagd om maatregelen die tot een verdergaande terugdringing van de emissies leiden. In 1989 wordt een bestrijdingsplan verzuring aan de Kamer voorgelegd.

ZIJN DE HUIDIGE MAATREGELEN VOLDOENDE?

Een probleem bij de vaststelling of maatregelen voldoende zijn, is dat er altijd onzekerheid bestaat over de ernst van de situatie. Bovendien bestaat er zeker bij dit soort grootschalige problemen nooit 100% wetenschappelijke zekerheid over de relatie tussen oorzaak en gevolg. Dat biedt belanghebbenden de mogelijkheid om, zeker in internationaal verband, minder strenge maatregelen te propageren. Met milieuvraagstukken hangen vrijwel altijd economische belangen samen. In de internationale discussie over te

nemen maatregelen blijkt voortdurend dat verdergaande voorstellen verworpen worden op grond van economische motieven.

De in het Protocol van Montreal voor de bescherming van de ozonlaag vastgelegde maatregelen zijn soepeler dan de ernst van de ontwikkelingen rechtvaardigt. Volgens berekeningen zullen de maatregelen van het Protocol leiden tot een mondiale ozonreductie in 2035 van 3,5%. Op de gematigde en polaire breedtegraden zal gedurende de voorjaarsmaanden de reductie in die tijd circa 10% bedragen. Geconcludeerd moet worden dat de huidige internationale maatregelen ontoereikend zijn. Herziening van het Protocol zal op korte termijn dienen te gebeuren.

Ook de 30% SO₂ vermindering die in de strijd tegen de zure regen werd overeengekomen en de Europese emissie-eisen voor kleine personenauto's zijn politieke compromissen. Van deze maatregelen is het zelfs de vraag of ze het huidige tempo van verzuring tot staan brengen; terugdringing vraagt om veel stringenter maatregelen. Een aantal landen, Scandinavië, West-Duitsland en Nederland, dringt aan op een strenger beleid.

Wat betreft de aanpak van de stijging van ozonconcentraties op leefniveau loopt de E.G. bepaald niet voorop. Gevreesd moet worden dat het tempo waarmee de problematiek zich doorzet het wint van het tempo waarmee een internationaal beleid van de grond komt.

Als algemene conclusie zou kunnen gelden dat de kans eerder groter dan kleiner is dat de gevolgen van het menselijk handelen ernstiger zijn dan werd aangenomen. Tevens blijkt dat waar milieu-maatregelen offers vragen, en dat is steeds het geval, de overeengekomen maatregelen minder stringent zijn dan nodig is.

Verklarende woordenlijst

Aerosol: letterlijk betekent het deeltje in de lucht; deeltje in vaste vorm dat door zijn lage gewicht lange tijd in de lucht blijft zweven.

Atoom: kleinste bouwsteen waarbij de chemische eigenschappen van een element nog tot uiting komen.

Biosfeer: het geheel van alle levende organismen – planten, dieren en mensen.

Depositie: het proces waarbij stoffen uit de lucht op de bodem terecht komen; hetzij door neerslag (natte depositie), hetzij door turbulentie (droge depositie).

Elektron: kleinste drager van negatieve elektrische lading; samen met proton en neutron bouwsteen van het atoom.

Emissie: uitstoot; de hoeveelheid van een stof die per tijdseenheid de lucht in gaat.

Episode: periode waarin hoge concentraties van luchtverontreinigende stoffen voorkomen; de duur ervan is meestal enkele dagen.

Fotochemische luchtverontreiniging: luchtverontreiniging waarbij onder invloed van licht hoge ozonconcentraties voorkomen.

Fotodissociatie: splitsing van een molecuul ten gevolge van licht.

Fotosynthese: het proces waarbij onder invloed van licht, water en CO₂ worden omgezet tot koolwaterstoffen; speelt zich af in planten, bomen en algen.

Infrarode straling: licht met een golflengte tussen 800 nm (nanometer) en 100 m (micrometer).

Ion: atoom of molecuul met een tekort of overschot aan elektronen; het is dus elektrisch geladen.

Kiloton: 1.000 ton ofwel 1.000.000 kilogram.

Kolomdikte ozon: een maat voor de totale hoeveelheid ozon die zich bevindt in een verticale kolom vanaf de grond tot aan de top van de atmosfeer.

Kortgolvlige straling: straling met een korte golflengte, zoals het licht van de zon.

Langgolvlige straling: straling met een lange golflengte, zoals de door de aarde uitgezonden straling.

Levensduur: zie verblijftijd.

Molecuul: kleinste bouwsteen waarbij de chemische eigenschappen van een verbinding nog tot uiting komen; een molecuul is opgebouwd uit een of meer atomen.

Micrometer: een miljoenste meter; afgekort tot μm .

Nanometer: een miljardste meter; afgekort tot nm.

Oxidator: letterlijke betekenis: zuurstofgever; een oxidator, zoals ozon is een stof die in een reactie zuurstof afstaat aan een andere stof (de geoxideerde stof).

ppb: afkorting van particle per billion; een deeltje per miljard andere deeltjes.

ppm: afkorting van particle per million; een deeltje per miljoen andere deeltjes.

ppt: afkorting van particle per trillion; een deeltje per triljoen andere deeltjes.

P.S.C.: afkorting voor polar stratospheric cloud; dunne wolkenlaagjes die vooral in de stratosfeer boven Antarctica voorkomen.

q.b.o.: afkorting van quasi-biennial-oscillation; variatie van de windsnelheid in de stratosfeer met een periode van 2-3 jaar.

Smog: samentrekking van 'smoke' en 'fog', een combinatie van zwaveldioxyde en mist; in Groot-Brittannië zeer berucht.

Spectrum: licht is elektromagnetische straling samengesteld uit een scala van golflengten; de karakteristieke samenstelling over de golflengten wordt spectrum genoemd.

Stralingsbalans: het verschil tussen de hoeveelheid straling die ontvangen wordt en de hoeveelheid die uitgezonden wordt.

Turbulentie: wervels in de lucht die voor menging zorgen.

Ultraviolette straling: licht met een golflengte tussen 100 en 400 nanometer.

Umkehrmethode: methode om door meting vanaf de grond de verticale verdeling van ozon te meten; hierbij wordt gebruik gemaakt van het feit dat de intensiteitsverhouding van twee golflengteparen afneemt als de zon zakt, maar weer toeneemt bij zeer lage zonnestand; aan dit gegeven is de naam van de methode ontleend.

Verblijftijd: maat voor de snelheid waarmee een stof in de atmosfeer wordt afgebroken; hoe groter de verblijftijd is, des te langer duurt het voordat de stof, als deze niet meer geëmitteerd of gevormd wordt, uit de atmosfeer verdwenen is.

Zichtbaar licht: licht met een golflengte tussen 400 nm (violet) en 800 nm (rood).

Zonnecyclus: periode van 11 jaar waarin de zon van activiteit wisselt.

Register

Actief chloor 35
atmosfeer 18
atomsferisch venster 58

Broeikaseffect 58

C.F.K.'s 15
Chapman 25
Chapmancyclus 34
chemische theorie 39
chloorcyclus 34

Depositie 47
Dobsonspectrometer 29

Episoden 52

Gat in de ozonlaag 36

Halonen 15
huidkanker 75

Katalytische cyclus 34
klimaatverandering 82
kolomdikte ozon 28
koolwaterstoffen 15, 49

Latente warmteflux 23
luchtkwaliteitsnormen 81
Luxemburgs Accoord 87

Melanomen 75
meteorologische theorie 39

Ozon 24
ozonlaag 20, 25

pH waarde 70
Polar Stratospheric
Clouds 39
ppb 21
ppm 21
ppt 21
Protocol van
Montreal 46, 85

Quasi-biennial oscillation 31

Reservoirstoffen 35

Spectrum 21
sporegassen 20
stikstofoxyden 49
stralingsbalans 23
stratosfeer 18, 20

Temperatuurschommelingen 65
terugkoppeling 63
troposfeer 18

Ultraviolet licht 74
Umkehrmethode 27
UNEP 85

Verdrag van Wenen 85
voelbare warmteflux 23

IJstijden 65

Zonnecyclus 30
zure depositie 68
zure regen 68
zuurequivalent 71
zuurgraad 70

STRALING
en radioactiviteit

TSJERNOBYL 1986



Vragen en antwoorden
op een rij gezet door TNO

90 330 1502 1

KANKER
je moet er meer van weten




Vragen en antwoorden
op een rij gezet door TNO

90 330 1503 x

GIF
in de grond




Vragen en antwoorden
op een rij gezet door TNO

90 330 1504 8

VOEDING
en sport




Vragen en antwoorden
op een rij gezet door TNO

90 330 1505 6

AIDS
een race met de tijd




Vragen en antwoorden
op een rij gezet door TNO

90 330 1516 1

TECHNOLOGIE
wat gebeurt er?




Vragen en antwoorden
op een rij gezet door TNO

90 330 1509 9

TROMBOSE
je moet er meer van weten




Vragen en antwoorden
op een rij gezet door TNO

90 330 1507 2

UW HUIS
verstandig bewoond




Vragen en antwoorden
op een rij gezet door TNO

90 330 1508 0

ONS OOR
en het geluid om ons heen




Vragen en antwoorden
op een rij gezet door TNO

90 330 1512 9

Het gat in de ozonlaag – een veel gehoorde kreet, de laatste jaren. Maar: wat wordt ermee bedoeld?

Enerzijds beschermt de ozonlaag ons tegen (een teveel aan) ultraviolette straling van de zon. Is het dan gevaarlijk voor onze gezondheid als er zich een gat in die laag bevindt? Sommigen halen daarover hun schouders op, anderen spreken van een onafwendbare catastrofe die de mensheid te wachten staat.

Anderzijds speelt ozon ook dichterbij het aardoppervlak een belangrijke rol. Hier dreigt, door luchtverontreiniging, juist een teveel aan ozon te ontstaan. Te hoge concentraties ozon zijn schadelijk voor de gezondheid van mens, plant en dier.

Dit boekje geeft antwoord op vragen over oorzaken en gevolgen van veranderingen van ozon-gehalten in de atmosfeer. Net als het zogeheten broeikas-effect, stopt ook het ozon-vraagstuk niet aan onze grens. Het is wat we noemen een mondiaal probleem. Maatregelen ter voorkoming van erger zijn pas effectief als iedereen er aan meedoet.