

Het milieu in Europa: de tweede balans

3. Aantasting van de ozonlaag



3. Aantasting van de ozonlaag

Voornaamste bevindingen

De jaarlijkse wereldwijde productie van stoffen die de ozonlaag aantasten is dankzij internationale beleidsmaatregelen ter bescherming van de ozonlaag met 80-90% teruggebracht ten opzichte van de maximumproductie. Ook de jaarlijkse emissies zijn snel verminderd. De effecten van de internationale maatregelen op de ozonconcentraties in de stratosfeer of op de hoeveelheid UV-B-straling die het aardoppervlak bereikt, is vanwege het trage verloop van atmosferische processen echter nog niet waar te nemen.

Het ozonafbrekend vermogen van alle chloor- en broomverbindingen (CFK's, halonen, enz.) in de stratosfeer zal naar verwachting tussen 2000 en 2010 zijn hoogste niveau bereiken. Tussen 1975 en 1995 daalde het ozongehalte in de atmosfeer boven Europa met 5%, waardoor meer UV-B-straling het onderste deel van de atmosfeer kan binnendringen en het aardoppervlak kan bereiken.

De laatste tijd zijn in het voorjaar boven het noordpoolgebied lokaal grote reducties in de concentratie stratosferisch ozon waargenomen. Zo daalde het ozongehalte boven de noordpool in maart 1997 tot 40% onder het normale niveau. Deze reducties zijn - hoewel minder ernstig - vergelijkbaar met die welke boven Antarctica zijn waargenomen, en geven aan hoezeer de aantasting van de ozonlaag nog steeds politieke aandacht behoeft.

Het herstel van de ozonlaag, dat tientallen jaren zal duren, zou versneld kunnen worden door eerder te stoppen met de productie en het gebruik van HCFK's en methylbromide, door te zorgen voor een veilige vernietiging van de CFK's en halonen die zich momenteel in opslagplaatsen bevinden, en door de smokkel in ozonafbrekende stoffen te voorkomen.

3.1. Inleiding

De hoeveelheid ozon (O₃) in de stratosfeer blijft in de meeste delen van de wereld, behalve in de tropen, afnemen met een snelheid die sinds het Dobris-rapport niet is veranderd (McPeters e.a., 1996a). De sterkste reducties doen zich voor boven het zuidpool- en het noordpoolgebied. Er bestaat geen twijfel meer over het feit dat het probleem wordt veroorzaakt door verhoogde concentraties chloor- en broomverbindingen in de stratosfeer. Deze verbindingen ontstaan voornamelijk door emissies van chloorfluorkoolwaterstoffen (CFK's), die worden gebruikt als koelmiddel in koelkasten en klimaatregelingstoestellen, als drijfgas in spuitbussen en als schuim- en schoonmaakmiddelen, en door emissies van broomhoudende fluorkoolwaterstoffen (halonen), die in brandblusapparaten worden gebruikt.

Ozonvermindering in de stratosfeer is niet gewenst, want bij een dunnere ozonlaag kan meer ultraviolet-B-straling (UV-B) het onderste deel van de atmosfeer binnendringen en het aardoppervlak bereiken. Satellietmetingen geven aan dat tussen 1979 en 1992 de gemiddelde UV-B-niveaus tussen 40° en 50° noorderbreedte met 10% per decennium zijn toegenomen (Herman e.a., 1996). Tussen deze zelfde breedtes op het zuidelijk halfrond bedroeg de toename 13% per decennium.

Kaart 3.1 toont de veranderingen in UV-B-straling bij helder weer boven Europa tussen 1980 en 1991. Naar verhouding waren de toenames het grootst boven Midden- en Noord-Europa, en kleiner boven Zuid-Europa.

In kader 3.1 wordt toegelicht welke rol stratosferisch ozon speelt bij het filteren van UV-straling van de zon en hoe dit proces door menselijk handelen wordt beïnvloed.

3.2. Effecten

UV-B-straling kan een aantal chemische en biologische processen op gang brengen die schadelijk kunnen zijn voor levende organismen. Bij de mens kan een toename van UV-B-straling leiden tot huidkanker, staar, zonnebrand, sneeuwblindheid, versnelde veroudering van de huid en aantasting van het immuunsysteem. Niet-kwaadaardige huidkanker is een van de meest voorkomende vormen van kanker bij de mens, en het verband met UV-B-straling staat vast (Moan e.a., 1989).

[Afbeelding blz. 60]

Onderzoek van de stratosfeer in het Arctic Lidar Observatory for Middle Atmosphere Research (ALOMAR), Andøya, 69°NB, Noorwegen. Bron: Kolbjørn Adolfsen, Raketbasis Andøya.

61 Aantasting van de ozonlaag

Er bestaat echter geen eenduidige relatie tussen het optreden van dergelijke aandoeningen en de stralingsniveaus, omdat niet alle bevolkingsgroepen even gevoelig zijn voor UV-straling.

Vastgesteld is dat UV-B-straling gevolgen heeft voor aquatische ecosystemen: UV-B bedreigt de productiviteit van fytoplankton en veroorzaakt schade in de vroege ontwikkelingsstadia van vissen, garnalen, krabben, amfibieën en andere dieren (UNEP, 1995). Fytoplankton staat aan de basis van de voedselketen in de oceanen; meer dan 30% van alle door de mens geconsumeerde dierlijke eiwitten op aarde is afkomstig uit de zee, terwijl dit percentage in ontwikkelingslanden nog hoger ligt. Uit onderzoek (Smith e.a., 1992) is gebleken dat de vermindering van de productie van fytoplankton met 6-12% die in de Antarctische wateren is opgetreden, rechtstreeks samenhangt met een toename van UV-B als gevolg van het Antarctische ozongat. Aangezien fytoplankton grote hoeveelheden atmosferische CO₂ vastlegt, kan dit in de toekomst ook invloed hebben op de CO₂-concentraties in de atmosfeer en op het versterkte broeikaseffect.

UV-B-straling kan ook invloed hebben op de plantengroei op het land, zelfs bij de huidige niveaus. Er bestaan grote verschillen in de manier waarop soorten op UV-B reageren. Planten beschikken over diverse mechanismen om de effecten van UV-straling te compenseren; een aantal kan zich tot op zekere hoogte aan hogere stralingsniveaus aanpassen.

Daarnaast heeft UV-straling invloed op chemische processen in de lagere atmosfeer. UV-straling draagt bij

Kaart 3.1 Berekende toename in effectieve UV-straling in Europa in 1991 ten opzichte van 1980

Toename UV-straling

Jaarlijkse UV-dosis in 1991 ten opzichte van de waarden in 1980

Opmerking: Berekend op basis van het gemeten ozontotaal, niet gecorrigeerd voor wolkeneffecten. De berekening is gebaseerd op huidkanker-gewogen UV-gegevens. Methode: Bordewijk en Van der Woerd, 1996. Bron: Slaper e.a., 1997.

tot hogere troposferische ozonconcentraties in verontreinigde gebieden (hoofdstuk 5) en beïnvloedt de levensduur en concentratie van een groot aantal verbindingen in de atmosfeer, waaronder diverse broeikasgassen. Bovendien zijn CFK's, en sommige van de verbindingen die CFK's moeten vervangen, zelf broeikasgassen (hoofdstuk 2).

3.3. De toestand van de ozonlaag

De hoeveelheid ozon in de stratosfeer is sinds ongeveer 1979 aan het afnemen. Figuur 3.1 toont de veranderingen in de totale ozonconcentratie in vier verschillende delen van de wereld vanaf 1960. Tabel 3.1 laat zien dat de afname van het ozongehalte op alle breedtegraden optreedt, maar het sterkst bij de polen.

De cumulatieve afname van het jaarlijks en mondiaal gemiddelde totaal aan ozon sinds 1979 is ongeveer 5%. Op gematigde breedten op beide halfronden bedraagt het geaccumuleerde verlies ongeveer 7%. In de tropen is het ozonverlies gering en statistisch niet significant. Op gematigde breedten op het noordelijk halfrond is het geaccumuleerde verlies in de winter en het voorjaar sinds 1979 ongeveer 11% (SORG, 1996).

Poolgebieden

In Antarctica zijn in het voorjaar, wanneer de ozonlaag gedurende een aantal maanden sterk verarmd is, grote UV-B-toenames waargenomen. Het ernstigste ozongat tot nu toe is gemeten in 1993, maar sindsdien zijn er gaten met een vergelijkbare diepte en geografische uitgestrektheid opgetreden. Metingen van het ozonprofiel tijdens

Tabel 3.1 Wereldwijde trends in de totale hoeveelheid ozon, november 1978 tot oktober 1994

Regio	Trend	% per decennium
NB		
NB		
NB		
NB		
NB		
NB		
NB		
NB		
NB		
ZB		
ZB		
ZB		
ZB		
ZB		
ZB		
ZB		
ZB		

Opmerking: The 2σ -kolom geeft de statistische fout met een 95%-betrouwbaarheidsinterval en omvat een 1,22%/decennium 2σ meetfout. Gebaseerd op versie 7 van de TOMS-gegevensverzameling (McPeters e.a., 1996b). TOMS is het satellietinstrument Total Ozone Mapping Spectrometer. De trendgegevens van TOMS worden bevestigd door metingen met andere instrumenten. Bron: MCPeters e.a., 1996a.

Kader 3.1: De ozonlaag en de processen die haar bedreigen

De stratosferische ozonlaag bestaat uit een verdunde sluier van ozongas die zich uitstrekt van ongeveer 10 km tot ongeveer 40 km boven de aarde. Het ozongehalte bereikt zijn maximumwaarde op een hoogte van ongeveer 20 km. De stratosfeer bevat ongeveer 90% van alle ozon in de atmosfeer; de overige 10% bevindt zich in de troposfeer.

Ozon ontstaat in het bovenste deel van de stratosfeer onder invloed van kortgolvlige (<190 nm) straling van de zon. Deze energetische straling kan zuurstofmoleculen (O_2) ontleden in atomaire zuurstof (O). Zuurstofatomen zijn zeer reactief en verbinden zich gemakkelijk met zuurstofmoleculen tot ozon (O_3). Onder invloed van ultraviolette straling met een iets grotere golflengte (<280 nm) kan de ozonmolecule weer uiteenvallen in moleculaire en atomaire zuurstof. Er bestaat dus een dynamisch evenwicht tussen de vorming en afbraak van ozon.

Het meeste ozon in de stratosfeer ontstaat boven de tropen, waar de zonneschijn het meest intens is. Door grootschalige luchtcirculatie wordt het naar de polen getransporteerd. Dit transport is het efficiëntst aan het einde van de winter en in het voorjaar. Dit leidt tot een maximum kolomdikte ozon (de hoeveelheid ozon in een kolom vanaf de grond tot bovenaan de atmosfeer) in het voorjaar en een minimum aan het einde van het najaar. De kolomdikte ozon (of ozontotaal) wordt gewoonlijk gemeten in Dobson-eenheden. Als de dikte van de ozonlaag 300 Dobson-eenheden is, betekent dat de ozonlaag 3 mm dik zou zijn als hij zou bestaan uit pure ozon bij een druk van 1 atm.

De door de mens veroorzaakte vernietiging van ozon wordt veroorzaakt door chloor en broom, maar niet alle chloor- en broomhoudende verbindingen zijn schadelijk voor de ozonlaag. Een groot aantal verbindingen reageert met andere gassen in de troposfeer of lost op in regendruppeltjes en bereikt de stratosfeer niet. Hoe langer de levensduur van een verbinding in de atmosfeer, hoe meer ervan tot de stratosfeer kan doordringen. De chloor- en broomverbindingen die de ozonlaag aantasten zijn CFK's, koolstoftetrachloride, methylchloroform, HCFK's en halonen, die allemaal een volledig door de mens veroorzaakte oorsprong hebben. De ozonlaag kan ook worden aangetast door methylchloride en methylbromide. De enige bekende significante bron van methylchloride zijn de oceanen. Methylbromide heeft een aantal door de mens veroorzaakte bronnen (bodemonmeting in de landbouw, verbranding van biomassa, additieven in benzine) maar er zijn ook grote natuurlijke emissies uit de oceanen.

Met name het gebruik van CFK's en halonen heeft geleid tot een toename van het chloor- en broomgehalte in de stratosfeer. Deze verbindingen zijn chemisch zeer stabiel en worden in de troposfeer niet afgebroken. In de stratosfeer worden ze door kortgolvlige zonnestraling langzaam afgebroken, waarbij chloor en broom vrijkomt. Deze stoffen zijn vervolgens betrokken bij chemische reacties waarbij ozon wordt vernietigd (kader 3.2). Het natuurlijke evenwicht tussen productie en afbraak van ozon verschuift dus naar een steeds lagere ozonconcentratie.

63 Aantasting van de ozonlaag

een typisch ozongat laten zien dat in september en oktober boven diverse Antarctische meetstations vrijwel alle ozon op een hoogte tussen 15 en 20 km is verdwenen, en dat het ozontotaal is afgenomen tot ongeveer een derde van de waarde uit de tijd voordat de ozongaten zich begonnen te vertonen. Het Antarctische ozongat vertoont de afgelopen paar jaar de neiging om eerder te beginnen en langer aan te houden.

In het noordpoolgebied werd het ozonverlies in de stratosfeer voor het eerst ontdekt in de winter van 1991-1992 (Braathen e.a. 1994; Von der Gathen e.a., 1995), en in 1993 bleek ongeveer een derde van het ozon in de lagere stratosfeer boven Groenland te zijn verdwenen (Larsen e.a., 1994). Uit tal van waarnemingen en modelberekeningen is inmiddels duidelijk geworden dat er sinds 1991-1992 in de winter boven het Arctische gebied een significant en grootschalig ozonverlies optreedt, steeds in samenhang met perioden van verhoogde chlooractivering (Isaksen e.a., 1997).

De processen die in de poolgebieden tot ozonafbraak leiden, worden beschreven in kader 3.2. Andere factoren die kunnen bijdragen tot aantasting van de ozonlaag, zowel in de poolgebieden als op lagere breedten, worden in kader 3.3 besproken.

Hoewel de ozonafname die rond de noordpool is waargenomen, niet zo ernstig is als die rond de zuidpool, zijn er bepaalde overeenkomsten tussen de situatie in het zuiden en in het noorden. Ten eerste zijn de temperaturen in de Arctische maalstroom (zie kader 3.2) de afgelopen paar winters duidelijk gedaald, en in de laatste drie winters (1994-1995 tot en met 1996-1997) hebben zich lagere temperaturen voorgedaan dan ooit (e.g. Labitzke en Van Loon, 1995; NOAA, 1996; SORG, 1996). Dit heeft de afgelopen twee winters (1995-1996 en 1996-1997) tot aanzienlijk ozonverlies geleid (Müller e.a., 1997, Rex e.a., 1997).

Zelfs kleine temperatuurdalingen in de Arctische maalstroom zullen op de lange termijn een merkbaar effect hebben op de ozonlaag. Aangezien de temperaturen reeds dicht bij het punt liggen waarop polaire stratosferische wolken worden gevormd, zal een kleine temperatuurdaling voldoende zijn om een grote toename van dergelijke wolken te veroorzaken.

Ten tweede houdt de Arctische maalstroom aan tot later in het voorjaar. Langdurige maalstromen zijn ook in het verleden waargenomen, en er zijn aanwijzingen dat de maalstroom sinds 1979 sterker is geworden (Zurek e.a., 1996), maar de combinatie van een koude en langdurige maalstroom lijkt toch een nieuwe ontwikkeling te zijn. Figuur 3.3 toont een index die de sterkte van de maalstroom combineert met de geografische omvang ervan in de laatste negen winters van begin november tot half mei. De grafiek laat zien dat de afgelopen winters langdurige maalstromen hebben gekend en dat die van 1997 het langst aanhield.

Gematigde breedten

Op gematigde breedten op het noordelijk halfrond is de jaarlijkse gemiddelde kolomdikte ozon sinds 1979 bijna met 5% per decennium afgenomen,

Figuur 3.1 Afwijkingen van de kolomdikte ozon ten opzichte van het niveau tot aan 1980

Europa

Noord-Amerika

Verre Oosten

Australië en Nieuw-Zeeland

Opmerking: Maandelijkse afwijkingen zijn uitgevlakt door een 12-maandsgemiddelde. Aangepast naar Bojkov e.a., 1995.

Bron: Vitali Fioletov

Figuur 3.2 Maandgemiddelden voor de kolomdikte ozon voor de maand maart, 1980 tot 1997
Dobson-eenheden

Bron: Gegevens verkregen van het NASA Goddard Space Flight Center. De gegevens voor 1980-1993 zijn TOMS versie 7. De figuur voor 1997 is afgeleid van vrijwel onvertraagde gegevens van TOMS over ADEOS I. Middeling en weergave uitgevoerd door NILU.

Kader 3.2: Ozonafbrekende mechanismen in de poolgebieden

De afbraak van stratosferisch ozon aan de polen wordt veroorzaakt door een reeks chemische reacties, die beginnen met de omzetting van stabiele halogeenverbindingen (voornamelijk zoutzuur en chloornitrat, afkomstig van CFK's) in chemisch meer actieve vormen.

In de gasfase reageren de stabiele verbindingen zeer traag, maar aan de oppervlakte van polaire stratosferische wolkendeeltjes kunnen zich snelle reacties voltrekken. Polaire stratosferische wolken kunnen zich vormen in de lagere stratosfeer (15-25 km) bij temperaturen lager dan -78°C , die typisch voorkomen binnen of aan de rand van de polaire maalstroom. De polaire maalstroom is een geïsoleerde luchtmasse die zich tijdens de wintermaanden voordoet door een sterke cyclonale luchtcirculatie, die weer wordt veroorzaakt door het temperatuurverschil tussen koude poollicht en warmere lucht uit gematigde luchtstreken.

De chloorverbindingen die vrijkomen bij de snelle reacties in de polaire stratosferische wolken kunnen onder invloed van licht gemakkelijk ontbinden, zodat er chlooratomen vrijkomen. Deze reageren snel tot chloormonoxide, dat vervolgens - via twee verschillende katalytische cycli - ozon afbreekt. Een van deze cycli wordt verantwoordelijk gehouden voor 70% van het ozonverlies in Antarctica. De andere cyclus, waarin reactief broom voorkomt, wordt beschouwd als de oorzaak van een groot deel van het ozonverlies in de warmere Arctische stratosfeer (SORG, 1996).

Kader 3.3: Andere factoren die mogelijk een rol spelen in de afbraak van ozon

De hoeveelheid waterdamp in de stratosfeer is een belangrijke parameter bij de afbraak van ozon, omdat meer water leidt tot meer vorming van polaire stratosferische wolken.

De lagere stratosfeer is relatief droog. Het water in de stratosfeer is grotendeels afkomstig van de oxidatie van methaan, waarvan de concentratie als gevolg van menselijke activiteiten langzaam maar zeker toeneemt. Ook vliegtuigen die in de lagere stratosfeer vliegen, dragen bij aan de waterbalans. Metingen in Boulder (40°NB) (Oltmans en Hofmann, 1995) laten een snellere toename van water zien dan verklaard kan worden uit de toename van methaan, en zouden kunnen duiden op andere lange-termijnveranderingen in de stratosfeer. Dit is echter de enige locatie waar gedurende een lange periode betrouwbare metingen zijn verricht, en de mondiale verspreiding van waterdamp in de stratosfeer is niet bekend.

Ook de aanwezigheid van aerosolen in de stratosfeer kan leiden tot ozonverlies, zowel in de poolgebieden als op gematigde breedten. De uitbarsting van de vulkaan Pinatubo in juni 1991 veroorzaakte een grote toename van de hoeveelheid aerosolen in de stratosfeer. De concentratie aerosolen bereikte in 1992 een hoogtepunt en is nu weer vrijwel teruggekeerd naar waarden zoals die tussen vulkaanuitbarstingen worden gemeten. Figuur 3.1 laat zien dat de grote hoeveelheden vulkanische aerosolen ten gevolge van de uitbarsting van de El Chichón in 1982 en de Pinatubo in 1991 samenvallen met de laagste ozonminima.

Figuur 3.3 Maalstroomsterkte-index voor de winters van 1988-1989 tot en met 1996-1997

november
december
januari
februari
maart
april
mei

Opmerking: De maalstroomsterkte-index is gebaseerd op een meteorologische parameter genaamd potentiële vorticeit (PV), die de mate van isolatie van de polaire luchtmassa ten opzichte van warmere lucht aangeeft. De maalstroomindex wordt verkregen door de PV van iedere rastercel te vermenigvuldigen met de oppervlakte van die rastercel. Dit wordt gedaan voor alle rastercellen waar de PV groter is dan een bepaalde waarde, en vervolgens wordt het product voor al deze rastercellen opgeteld.

Bron: ECMWF en NILU.

en in het voorjaar in diezelfde periode met 7% per decennium. Uit onderzoek is gebleken dat ozonarme lucht en chloorgeactiveerde lucht uit de Arctische maalstroom (zie kader 3.2) naar gematigde breedten wordt gevoerd en zich daar met andere lucht vermengt, hetgeen een rol speelt in de waargenomen daling (Norton en Chipperfield, 1995; Pyle e.a. 1995). Het proces kan verband houden met de uiterst lage temperaturen in de recente Arctische winters. Deze kunnen in principe samenhangen met natuurlijke variatie, maar als het om een trend gaat, misschien vanwege veranderende concentraties broeikasgassen, dan zou de afbraak van ozon op gematigde breedten kunnen blijven toenemen, ook als de chloor- en broomconcentraties in de stratosfeer beginnen af te nemen.

3.4. Concentraties in de atmosfeer

De toename van de *troposferische* concentraties van de belangrijkste ozonafbrekende stoffen (CFK's en halonen) is verminderd of beëindigd als gevolg van het Protocol van Montreal en latere amendementen daarop (Montzka e.a., 1996): de concentratie van CFK-11 kwam rond 1991 tot staan, en die van CFK-12 stijgt nu slechts langzaam. De concentraties hydrochloorfluorkoolwaterstoffen (HCFK's) zijn gering, maar nemen toe omdat ze ter vervanging van CFK's worden gebruikt (zie paragraaf 3.4) (figuur 3.4). De concentraties methylchloroform en koolstoftetrachloride zijn aanzienlijk afgenomen: in 1996 was de hoeveelheid methylchloroform gedaald tot 28% en koolstoftetrachloride tot 4% onder de maximumwaarde van 1992. Aan de andere kant nemen de concentraties halonen nog steeds toe door het kleine gedeelte dat jaarlijks vrijkomt uit de grote hoeveelheden die nog in bestaande apparaten aanwezig zijn.

De totale hoeveelheid door de mens geproduceerde ozonafbrekende chloor- en broomverbindingen in de troposfeer vertoonde in 1994 een maximum en vervolgens een langzame daling, veroorzaakt door de afname van de

Figuur 3.4 Concentraties chloorfluorkoolwaterstoffen en halonen in de troposfeer

chloor/broom
CFK-12
CFK-11
HCFK-22

Opmerking: Waargenomen concentraties gemiddeld over diverse meetlocaties op beide halfronden. De bovenste curve geeft de totale potentiële effectieve chloor/broomconcentratie weer.

Bron: ALE/GAGE/AGAGE-netwerk; Prinn e.a., 1995; Cunnold e.a., 1997. Gegevens voor HCFK-22 afkomstig van het NOAA/CMDL-netwerk. Potentiële effectieve Cl/Br-concentratie berekend door RIVM.

Figuur 3.5 Ozonafbrekende stoffen in de stratosfeer, 1900-2100

Opmerking: De curve toont de verwachte mengverhouding (frequentie van optreden) van zogeheten equivalent effectief chloor. Deze is gebaseerd op het protocol-scenario in het WMO/UNEP-ozononderzoek van 1998, waarin wordt uitgegaan van de maximale door de protocollen toegestane emissies.

Bron: Voorlopige gegevens WMO-ozononderzoek 1998 (Guus Velders, RIVM).

concentraties methylchloroform en koolstoftetrachloride. Vanwege de tijd die deze stoffen nodig hebben om zich door de atmosfeer naar boven te bewegen, wordt de maximale afbraak van ozon in de *stratosfeer* rond de eeuwwisseling verwacht, waarna deze zich zou moeten stabiliseren en vervolgens geleidelijk afnemen. Volledig herstel van de ozonlaag (tot de situatie van voor 1980) wordt, zelfs bij volledige naleving van de huidige internationale afspraken, niet vóór het midden van de volgende eeuw verwacht (figuur 3.5), en naar verwachting zullen er tot die tijd in het voorjaar ozongaten blijven optreden boven Antarctica.

3.5. Productie en emissies

CFK's

In tabel 3.2 staat de jaarlijkse wereldproductie van CFK's en aanverwante stoffen weergegeven voor de periode 1980-1994. De tabel bevat alleen gegevens van de voornaamste fabrikanten in de geïndustrialiseerde landen. De productie van CFK's in niet-geïndustrialiseerde landen, met name China en India (die tabel 3.2 niet laat zien), is niet in die mate afgenomen. Naar verhouding neemt het

Tabel 3.2 Wereld-jaarproductie van CFK's, HCFK's en een HFK, 1980-1995

jaar
 CFK-11
 CFK-12
 CFK-113
 CFK-114
 CFK-115
 HCFK-22
 HCFK-142b
 HCFK-141b
 HFK-134a
 x 1000 ton

Bron: AFEAS, 1997

67 Aantasting van de ozonlaag

aandeel van deze landen dus toe.

De wereldproductie van CFK's bedroeg in 1995 nog slechts 10-20% van de piekwaarde. In figuur 3.6 is de productiedaling in de EU te zien. In de EU en andere ontwikkelde landen worden nog steeds CFK's geproduceerd voor essentiële toepassingen, voornamelijk in de geneeskunde. Op grond van het Protocol van Montreal mogen de ontwikkelingslanden tot 2010 CFK's blijven gebruiken, terwijl de betrokken partijen overeen zijn gekomen dat 10% van de productie van de ontwikkelde landen mag worden gebruikt om in de elementaire binnenlandse behoefte van de ontwikkelingslanden te voorzien.

De jaarlijkse mondiale emissies van de belangrijkste CFK's (en HCFK's) zijn weergegeven in figuur 3.7 en figuur 3.8. In 1974 begon de emissie van CFK-11 en CFK-12 terug te lopen nadat het gebruik van CFK-11 en CFK-12 als drijfgassen in spuitbussen aan banden was gelegd; publicaties waarin werd gewaarschuwd dat CFK's de ozonlaag konden aantasten, hadden hierover begin jaren zeventig grote bezorgdheid gewekt. Begin jaren tachtig namen de emissies weer toe, voornamelijk door niet-aërosoltoepassingen zoals het blazen van schuim, koeling en airconditioning, maar na 1987 zette naar aanleiding van het Protocol van Montreal de daling in.

Vervangende stoffen

De inperking van de CFK-productie gaf de aanzet tot het gebruik van HCFK's en hydrofluorkoolwaterstoffen (HFK's) als vervangende stoffen. HCFK's bevatten chloor en kunnen eveneens de ozonlaag aantasten, maar in veel geringere mate dan de CFK's waarvoor ze in de plaats zijn gekomen. HFK's breken geen ozon af (maar zijn broeikasgassen en behoren tot de groep broeikasgassen die onder het Kyoto-protocol bij het Raamverdrag inzake klimaatverandering vallen, zie paragraaf 2.6.1). De productie van HCFK's wordt geregeld door het Protocol van Montreal en moet in de ontwikkelde landen vóór 2030 volledig beëindigd zijn (2015 in de EU). De ontwikkelingslanden moeten hun gebruik van HCFK's in 2016 bevriezen op het niveau van 2015 en mogen vanaf 2040 helemaal geen HCFK's meer gebruiken. Tabel 3.2, figuur 3.7 en figuur 3.8 laten zien dat de wereldwijde productie en emissie van HCFK-22 gestaag toeneemt, terwijl die van de overige HCFK's en HFK-134a de afgelopen jaren snel is toegenomen.

Methylbromide

Methylbromide is ook een gas dat stratosferisch ozon kan aantasten. Er is nog geen goed inzicht in de wereldwijde emissie en opslag van methylbromide. Door de mens veroorzaakte emissies worden veroorzaakt door de landbouw (vooral bodemontsmetting, 31% van de totale emissie), de verbranding van biomassa (22%) en additieven in benzine (7%), en in geringe mate door toepassingen zoals de ontsmetting van gebouwen en containers (3%) en de industrie (2%). De grootste natuurlijke bron wordt gevormd door de oceanen (35%), maar die kunnen ook als een groot verdwijnpunt fungeren, zodat hun precieze rol in de wereldwijde methylbromidebalans moeilijk te beoordelen is (SORG, 1996). Andere verdwijnpunten worden onder meer gevormd door oxidatie aan de lucht en opname in de bodem.

Figuur 3.6 EU-productie van enkele belangrijke ozonafbrekende stoffen, 1986-1996

x 1000 ton

CFK-11

CFK-12

CFK-113

CFK-114

CFK-115

halon 1211, 1301 & 2402

CCl₄

1,1,1-trichloorethaan

HCFK-22

Bron: Europese Commissie, Directoraat-Generaal XI

Figuur 3.7 Wereldwijde emissies van de belangrijkste ozonafbrekende stoffen, 1930-1995

CFK-11
CFK-12
CFK-113
CFK-114
CFK-115
HCFK-22

Bron: AFEAS, 1997

De concentratie methylbromide in de atmosfeer heeft de afgelopen decennia geen grote veranderingen laten zien. Methylbromide van natuurlijke en door de mens veroorzaakte herkomst is verantwoordelijk voor ongeveer 14% van de totale effectieve chloor/broomconcentratie in de stratosfeer. De constantheid van de concentratie methylbromide wijst erop dat emissie en opslag met elkaar in evenwicht zijn, maar de bekende bronnen en verdwijnpunten komen niet met elkaar overeen. Er zijn meer verdwijnpunten bekend dan bronnen, wat zou kunnen betekenen dat er nog een grote onbekende bron is, die zowel natuurlijk als door de mens veroorzaakt zou kunnen zijn.

De enige belangrijke toepassing van methylbromide die voor beheersingsmaatregelen in aanmerking zou kunnen komen, is bodemontsmetting in de landbouw. Rekening houdend met het feit dat de methylbromidebalans niet in evenwicht is, wordt geschat dat dergelijke beheersingsmaatregelen effect kunnen hebben op 16 tot 28% van de totale emissie (SORG, 1996).

3.6. Andere oorzaken van de aantasting van de ozonlaag

Er is nog een aantal andere menselijke en natuurlijke bronnen die een bedreiging voor de ozonlaag kunnen vormen (SORG, 1996):

- De emissie van stikstofoxiden, waterdamp, zwaveldioxide en roet door het luchtverkeer zal naar verwachting bijdragen tot de aantasting van de ozonlaag. Emissies van stikstofoxiden uit vliegtuigen kunnen reeds tot gevolg hebben gehad dat de ozonconcentraties in het bovenste deel van de troposfeer met enkele procenten zijn gestegen, met maximumwaarden in de Noord-Atlantische luchtverkeerscorridor. Modelstudies geven echter aan dat nieuwe supersonische vliegtuigen die in de lagere stratosfeer vliegen, stratosferisch ozon kunnen aantasten. Een grotere emissie van waterdamp en salpeterzuur door vliegtuigen zal de kans op de vorming van polaire stratosferische wolken vergroten, en dus ook de kans op een toename van de ozonafbraak (Peter e.a., 1991).
- Als gevolg van de wereldwijde klimaatverandering kunnen de temperaturen in de stratosfeer met enkele graden dalen. Dit kan tot meer polaire stratosferische wolkenvorming leiden, en dus tot meer ozonafbraak in de poolgebieden en mogelijk ook op hoge breedten.
- Toenemende concentraties broeikasgassen zouden veranderingen in stratosferische circulatiepatronen kunnen veroorzaken, wat kan leiden tot een dunnere ozonlaag in de poolgebieden.
- Grote vulkaanuitbarstingen kunnen zorgen voor een tijdelijke verdunning van de ozonlaag als gevolg van aerosoldeeltjes die vrijkomen bij de emissie van zwaveldioxide.

3.7. Het Protocol van Montreal en vervolgmaatregelen

De dramatische ontdekking van het Antarctische ozongat in 1985 heeft de internationale gemeenschap ertoe gebracht maatregelen te treffen om verdere grootschalige aantasting van de ozonlaag

Figuur 3.8 Wereldwijde emissies van HCFK-142b, HCFK-141b en HFK-134a, 1980-1994

x 1000 ton
HCFK-142b
HCFK-141b
HFK-134a

Bron: AFEAS, 1997

Figuur 3.9 Extra gevallen van huidkanker onder de Noordwest-Europese bevolking

gevallen per miljoen inwoners per jaar
geen maatregelen
Protocol van Montreal
amendementen van Kopenhagen

Bron: Slaper e.a., 1996.

69 Aantasting van de ozonlaag

te voorkomen. Nog datzelfde jaar werd in Wenen het Verdrag ter bescherming van de ozonlaag ondertekend. In september 1987 schaarden 47 landen zich achter het Protocol van Montreal betreffende stoffen die de ozonlaag aantasten, op grond waarvan het wereldwijde gebruik van bepaalde CFK's en halonen moest worden bevroren en het totale CFK-gebruik in het jaar 2000 met 50% moest zijn gereduceerd ten opzichte van het referentiejaar 1986.

Op dit moment hebben 162 partijen het Protocol van Montreal bekrachtigd. In 1990 in Londen en in 1992 in Kopenhagen werd het protocol aangescherpt en uitgebreid naar andere ozonafbrekende stoffen. Verdere doelstellingen werden overeengekomen in 1995 in Wenen en in 1997 in Montreal. De tijdschema's voor de uitbanning van de diverse soorten ozonafbrekende stoffen staan weergegeven in tabel 3.3.

In augustus 1997 hadden 72 partijen de amendementen van Kopenhagen bekrachtigd en 165 partijen het Verdrag van Wenen. De uitvoering van het Protocol van Montreal en de amendementen daarop heeft geresulteerd in een sterke vermindering van de productie en emissie van ozonafbrekende stoffen, en onlangs ook in een minder snelle toename en in sommige gevallen een afname van de concentraties van deze stoffen in de troposfeer. Er zit een zeker tijdsverloop tussen productie en emissie, afhankelijk van de toepassingen waarvoor de stoffen worden gebruikt en de levensduur van die apparaten, en tussen emissie en aankomst in de stratosfeer. Zoals verwacht heeft men de effecten van de reducties dan ook nog niet kunnen waarnemen, noch in de ozonlaag zelf, noch in de UV-B-stralingsniveaus.

Figuur 3.9 geeft schattingen van de extra gevallen van huidkanker bij de mens die te verwachten waren geweest bij uitblijven van internationale maatregelen om de uitstoot van ozonafbrekende stoffen tegen te gaan. Zonder een dergelijke aanpak had de totale incidentie van huidkanker tegen het jaar 2100 vier maal zo hoog kunnen zijn, en twee maal zo hoog indien alleen het oorspronkelijke Protocol van Montreal was uitgevoerd. Vooropgesteld dat de maatregelen die nu van kracht zijn volledig worden uitgevoerd, zou de ozonconcentratie in de stratosfeer rond het jaar 2000 een minimum moeten bereiken, maar de extra incidentie van huidkanker zal, vanwege het tijdsverloop, naar verwachting pas rond 2060 gaan afnemen.

De situatie zou nog verder kunnen worden verbeterd door de uitbanning van HCFK's en methylbromide te versnellen, met name in ontwikkelingslanden, en door te zorgen voor een veilige vernietiging van de CFK's en halonen die zich momenteel in winkels en andere opslagplaatsen bevinden (bijv. in oude koelkasten en brandblusapparaten).

Tabel 3.3 Tijdschema voor de uitbanning van ozonafbrekende stoffen door de ontwikkelde landen

Stof	Jaar	Protocol van Montreal
Halonen	1994	100% productiebeëindiging
CFK's, CCl ₄ , CH ₃ CCl ₃	1996	100% uitbanning (uitbanning van CFK's en CCl ₄ in de EU in 1995)
HBFK's	1996	100% uitbanning
HCFK's	1996	bevrozing van berekend gebruik op 2,8% van CFK-gebruik in 1989 plus totaal HCFK-gebruik in 1989 (berekend op 2,6% van het CFK-gebruik in de EU)
	2020	uitbanning met een uitloop van 0,5% tot 2030 voor onderhoud van bestaande apparatuur (uitbanning voor 2015 in the EU)
CH ₃ Br	1995	bevrozing van productie en gebruik op het niveau van 1991
	1999	vermindering met 25% t.o.v. bovenstaand niveau (25% vermindering vóór eind 1998 in de EU)
	2001	vermindering met 50%
	2005	uitbanning, eventueel met uitzondering van essentiële agrarische toepassingen

Opmerking: Het tijdschema voor de uitbanning van methylbromide is bij de laatste afspraken in Montreal in 1997 bijgesteld.

Bron: SORG, 1996

Verder zal het essentieel zijn om effectieve maatregelen te nemen om schendingen van de internationale afspraken (bijv. smokkel) te voorkomen; om de ozonafbrekende stoffen in de troposfeer te blijven bewaken om na te gaan of de protocollen worden nageleefd; en om de ozonlaag en de UV-stralingsniveaus te blijven bewaken om zeker te weten dat de maatregelen het gewenste effect hebben.

Literatuuropgave

AFEAS (1997). Production, sales and atmospheric release of fluorocarbons through 1995. AFEAS (Alternative Fluorocarbon Environmental Acceptability Study). Washington D.C., VS.

Bojkov, R.D., Bishop, L. en Fioletov, V.E. (1995). Total ozone trends from quality controlled ground-based data (1964-1994). In *J. Geophys Res.*, Vol. 100, p. 25867-25876.

Bordewijk, J.A. en Van der Woerd, H.J. (1996). Ultraviolet dose maps of Europe, a remote sensing/GIS application for public health and environmental studies. In BCRS Report No 96-30. Delft, Nederland.

Braathen G., Rummukainen, M., Kyrö, E., Schmidt, U., Dahlback, A., Jørgensen, R., Fabian, T.S., Rudakov, V.V., Gil, M., en Borchers, R. (1994). Temporal development of ozone within the arctic maalstrom during the winter of 1991/92. In *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 21, p. 1407-1410.

Cunnold, D.M., Weiss, R.F., Prinn, R.G., Hartley, D., Simmonds, P.G., Fraser, P.J., Miller, B., Alyea, F.N., Porter, L. (1997). GAGE/AGAGE measurements indicating reductions in global emissions of CCl₃F and CCl₂F₂ in 1992-1994. In *J. Geophys. Res.* Vol. 102, p. 1259-1269.

Herman, J.R., Bhartia, P.K., Ziemke, J., Ahmed, Z., Larko, D. (1996). UV-B increases (1979-1992) from decreases in total ozone. In *Geophys. Res. Lett.* Vol. 23, p. 2117-2120.

Isaksen, I., Von der Gathen, P., Braathen, G., Chipperfield, M., Goutail, F., Harris, N.R.P., Müller, R. en Rex, M. (1997). Ozone loss, Chapter 5 in European research in the stratosphere. The contribution of EASOE and SESAME to our current understanding of the ozone layer. Europese Commissie, Luxemburg. ISBN 92-827-9719-8.

Labitzke, K. en H. van Loon (1995). A note on the distribution of trends below 10hPa: The extratropical northern hemisphere. In *J. Met. Soc. Japan*, Vol. 73, p. 883-889.

Larsen, N., Knudsen, B., Mikkelsen, I.S., Jørgensen, T.S. en Eriksen, P. (1994). Ozone depletion in the Arctic stratosphere in early 1993. In *Geophys Res. Lett.*, Vol. 21, p. 1611-1614.

McPeters, R.D., Hollandsworth, S.M., Flynn, L.E. en Hermann, J.R. (1996a). Long-term ozone trends derived from the 16-year combined Nimbus 7/Meteor 3 TOMS version 7 record. In *Geophys Res. Lett.*, Vol. 23, p. 3699-3702.

McPeters, R.D., Bhartia, P.K., Krueger, A.J., Herman, J.R., Schlesinger, B.M., Wellemeyer, C.G., Seftor, C.J., Jaross, G., Taylor, S.L., Swisler, T., Torres, O., Labow, G., Byerly, W. en Cebula, R.P. (1996b). Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide. In NASA Reference Publication Washington D.C.

Moan, J., Dahlback, A., Henriksen, T. en Magnus, K. (1989). Biological Amplification Factor for Sunlight-Induced Non-Melanoma Skin Cancer at High Latitudes. In *Cancer Res.*, Vol. 49, p. 5207-5212.

Montzka, S.A., Butler, J.H., Myers, R.C., Thompson, T.M., Swanson, T.H., Clarke, A.D., Lock, L.T., Elkins, J.W. (1996). Decline in tropospheric abundance of halocarbons: Implications for stratospheric ozone. In *Science*, Vol. 272, p. 1318-1322.

Müller R., Crutzen, P.J., Groß, J-U., Brühl, C., Russel III, J.M., Gernandt, H., McKenna, D.S. en Tuck, A. (1997). Severe chemical ozone loss in the Arctic during the winter of 1995-96. In *Nature*, Vol. 389, p. 709-711.

NOAA (1996). Northern Hemisphere Winter Summary 1995/96: Selected indicators of stratospheric climate. NOAA Climate Prediction Centre, Washington D.C. Ook beschikbaar op het World Wide Web: http://cops.wwb.noaa.gov/products/stratosphere/winter_bulletins/nh_95-96/

Norton, W.A. en Chipperfield, M.P. (1995). Quantification of the transport of chemically activated air from the northern hemisphere polar maalstroom. In *Geophys. Res.*, Vol. 100, p. 25817-25840.

Oltmans, S.J. en Hofmann, D. (1995). Increase in lower stratospheric water vapour at a mid-latitude northern hemisphere site from 1981-1994. In *Nature*, Vol. 374, p. 146-149.

71 Aantasting van de ozonlaag

Peter, T., Brühl, C. en Crutzen, P.J. (1991). Increase in the PSC-formation probability caused by high-flying aircraft. In *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 18, p. 1465-1468, 1991.

Prinn, R.G., Weiss, R.F., Miller, B.R., Huang, J., Alyea, F.N., Cunnold, D.M., Fraser, P.J., Hartley, D.E. en Simmonds, P.G. (1995). Atmospheric trends and lifetime of CH₃CCl₃ and global OH concentrations. In *Science*, Vol. 269, p. 187-192.

Pyle, J.A., Chipperfield, M.P., Kilbane-Dawe, I., Lee, A.M., Stimpfle, R.M., Kohn, D., Renger, W., Walters, J.W. (1995). Early modelling results from the SESAME and ASHOE campaigns. In *Faraday Discuss.*, Royal Soc. of Chem., Vol. 100, p. 371-387.

Rex, M., Harris, N.R.P., Von der Gathen, P., Lehmann, R., Braathen, G.O., Reimer, E., Beck, A., Chipperfield, M.P., Alfier, R., Allaart, M., O'Connor, F., Dier, H., Dorokhov, V., Fast, H., Gil, M., Kyrö, E., Litynska, Z., Mikkelsen, I.S., Molyneux, Nakane, H., Notholt, J., Rummukainen, M., Viatte, P., Wenger, J. (1997). Prolonged stratospheric ozone loss in the 1995-96 Arctic winter. In *Nature*, Vol. 389, p. 835-838.

Slaper, H., Velders, G.J.M., Daniel, J.S., de Groot, F.R., Van der Leun, J.C. (1996). Estimates of ozone depletion and skin cancer incidence to examine the Vienna Protocol achievements. In *Nature*, Vol. 384, p. 256-258.

Slaper, H., Velders, G.J.M., Matthijsen, J. (1997). Ozone depletion and skin cancer incidence: a source-risk approach, p. 73-76, Book of Papers. Red.: B.J.M. Ale, M.P.M. Janssen en M.J.M. Pruppers. RISK97, International Conference "Mapping Environmental Risks and Risk Comparison".

Smith, R.C., Prezelin, B.B., Baker, K.S., Bidigare, R.R., Boucher, N.P., Coley, T., Karentz, D., MacIntyre, S., Matlick, H.A., Menzies, D., Ondrusek, M., Wan, Z., Waters, K.J. (1992). Ozone depletion: Ultraviolet radiation and phytoplankton biology in Antarctic waters. In *Science*, Vol. 255, p. 952-959.

SORG (1996). Stratospheric ozone 1996. United Kingdom Stratospheric Ozone Review Group. Sixth report. DoE Reference number 96DPL0021. HMSO, Londen. Dit rapport is ook beschikbaar op het World Wide Web: <http://www.ozone-sec.ch.cam.ac.uk/eorcu/>

UNEP (1995). Environmental effects of ozone depletion, 1994 assessment. In *Ambio*, Vol. 3, p. 138-196.

Von der Gathen, P., Rex, M., Harris, N.R.P., Lucic, D., Knudsen, B.M., Braathen, G.O., De Backer, H., Fabian, R., Fast, H., Gil, M., Kyrö, E., St. Mikkelsen, I., Rummukainen, M., Stähelin, J., Varotsos, C. (1995). Observational evidence for chemical ozone depletion over the Arctic in winter 1991-92. In *Nature*, Vol. 315, p. 131-134.

Zurek, R.W., Manney, G.L., Miller, A.J., Gelman, M.E. en Nagatani, R.M. (1996). Interannual variability of the north polar maalstrom in the lower stratosphere during the UARS mission. In *Geophys Res. Lett.*, Vol. 23, p. 289-292.