

issn 0065-3713

INSTITUT D'AERONOMIE SPATIALE DE BELGIQUE

3 - Avenue Circulaire

B - 1180 BRUXELLES

AERONOMICA ACTA

A - N° 374 - 1993

Atmosphärisch ozon

by

C. MULLER

BELGISCH INSTITUUT VOOR RUIMTE-AERONOMIE

3 - Ringlaan

B - 1180 BRUSSEL

VOORWOORD

Deze tekst werd in het "Nederlands tijdschrift voor natuurkunde" gepubliceerd.

AVANT-PROPOS

Ce texte a été publié dans le "Nederlands tijdschrift voor natuurkunde".

FOREWORD

This text has been published in the "Nederlands tijdschrift voor natuurkunde".

VORWORT

Diezer Tekst wird in das "Nederlands tijdschrift voor natuurkunde" herausgegeben

ATMOSPHERISCH OZON

Christian MULLER

Samenvatting

Sinds 1925 is de aanwezigheid van ozon in de stratosfeer bekend, maar pas rond 1970 ontstond er bezorgdheid over de stabiliteit van de ozonlaag onder invloed van industriële verstoring. Rond 1980 bleek deze bezorgdheid terecht toen seizoengebonden ozon-afname tijdens de Zuidpoolente werd waargenomen. Na 20 jaar atmosfeeronderzoek is nu gebleken dat de chemie een belangrijke rol speelt in de ozonafbraak en dat de mens hieraan mede schuldig is. In de tussentijd is troposferisch ozon, dat sinds de jaren vijftig wordt gemeten als produkt van stedelijke vervuiling, toegenomen op grotere schaal.

Résumé

Quoique la présence de l'ozone dans la stratosphère ait été connue depuis 1925, ce n'est que depuis environ 1970 qu'on s'est inquiété de la stabilité de la couche d'ozone sous l'influence des perturbations industrielles. Dans les années 1980, cette inquiétude se trouva confirmée par la diminution saisonnière de l'ozone durant le printemps antarctique. Après vingt ans de recherche atmosphérique, il apparaît que la chimie joue un rôle important dans la décroissance de l'ozone et que les activités humaines y participent. Entretemps, l'ozone troposphérique, mesuré depuis les années 1950 comme polluant urbain, s'est accru sur une grande échelle.

Abstract

The presence of stratospheric ozone has been known since 1925, however, a concern over the stability of the ozone layer under the influence of industrial perturbations appeared only around 1970. In the eighties, this concern was confirmed by the seasonal ozone decrease during the Antarctic spring. After 20 years of atmospheric research, it appears that the chemistry plays an important role in this decrease and that human activities participate in it. In the meanwhile, tropospheric ozone, which was measured as a urban pollutant since the fifties has shown a large scale increase.

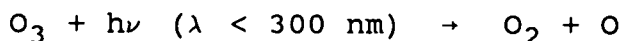
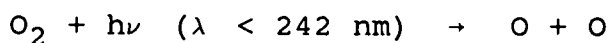
Zusammenfassung

Das Vorhandensein des Ozons in der Stratosphäre ist seit 1925 bekannt, es ist aber erst nach ungefähr 1970 dass man sich Sorgen macht über die Stabilität der Ozonsschicht industrielle Störungen gegenüber. Diese Sorge sind während der achzigen Jahren durch die jahrenzeitlichen Abnahmen des antarktischen Ozons Tatsachen geworden. Nach zwanzig Jahren ist es festgestellt dass die Chemie zusammen mit den menschlichen Tätigkeiten eine bedeutende Rolle in den Ozonsabnahmen spielt. Inzwischen ist das, seit 1950 als Komponent des städtischen Luftverseuchung gemessene, troposphärische Ozon erheblich gestiegen.

Ozon (O₃) in de troposfeer (zie kader) is bekend sinds de ontdekking door Schönbein in 1948. In deze vroege jaren werden op verschillende stations veldmetingen verricht en in verband gebracht met allerlei milieuverschijnselen. Deze waarnemingen hebben jammer genoeg weinig waarde meer voor ons, omdat onconventionele technieken werden toegepast, waarvan het resultaat vaak meer zegt over de totale hoeveelheid oxidanten in de atmosfeer. Aan het begin van deze eeuw werd het ozononderzoek een vaste routine. De ontwikkeling van UV-instrumentatie leidde tot de ontdekking dat ozon UV-straling absorbeert, waardoor zonnestraling met een golflengte korter dan 300 nm niet tot het aardoppervlak doordringt.

De ontdekking van de stratosfeer in 1912 en de opkomst van de luchtvaart leidden tot een brede ontwikkeling van de meteorologie. Nagenoeg gelijktijdig ontdekten Fabry en Buisson in Frankrijk, Dobson in Engeland en Götz in Zwitserland dat het absorberende ozon zich bevindt in de stratosfeer op een maximum hoogte van 25 km. Nauwkeurige routinemetingen begonnen in 1926 in Arosa (Zwitserland) en zijn tot op heden voortgezet. Het doel van deze eerste onderzoekers was om ozon als speurgas (tracer) voor atmosferische circulatie te gebruiken. We moeten hen nu dankbaar zijn voor hun metingen van absolute waarden, waardoor de hele serie ozonmetingen van toen nu nog steeds kan worden vergeleken met die van het huidige netwerk van 'Dobson' instrumenten.

Een eerste theoretische verklaring werd in 1930 gegeven door Chapman : ozon wordt zowel gevormd als vernietigd door UV-straling in de stratosfeer volgens het schema :



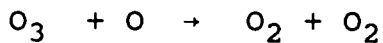
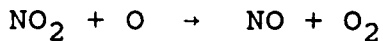
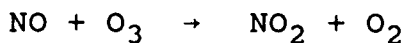
waarbij M een katalytisch molecuul is.

Dit eenvoudige mechanisme leidt tot een ozonlaag van ongeveer de juiste concentratie op ongeveer de juiste hoogte. De volgende stap kon worden gezet naar aanleiding van uitgebreide raketwaarnemingen na de oorlog. Meer verfijnde ozonwaarden brachten Bates en Nicolet in 1950 ertoe waterstof afkomstig uit waterdamp en methaan in dit schema te betrekken.

De ozon-controverse

Stikstofoxyden, hoewel eerder door Nicolet geïntroduceerd om de vorming van de D-laag in de ionosfeer te verklaren, kwamen pas echt in beeld in 1970 toen het mechanisme werd gevonden om stikstofoxyden in de stratosfeer te vormen. Troposferisch N₂O (lachgas), afkomstig van kunstmest en landbouwactiviteiten, werd geïdentificeerd als een stabiele bron in de stratosfeer, waar het dissocieert in NO en atomair zuurstof. Tevens werd duidelijk dat NO ook een belangrijke component is in de uitlaatgassen van straalvliegtuigen, in het

bijzonder de supersonische Concorde. NO leidt ondermeer tot een katalytische cyclus waarin ozon en atomaire zuurstof recombineren, terwijl NO zich herstelt volgens :



Dit mechanisme leidt tot vernietiging van het stratosferische ozon door een heel kleine hoeveelheid stikstofoxyde. Dit inzicht gas aanleiding tot een versneld vijf jaar durend atmosferisch onderzoekprogramma, gebaseerd op ballon/Concorde-campagnes aan de experimentele kant en één-dimensionale atmosferische modellering aan de theoretische kant. De conclusie was zowel verbazingwekkend als onverwacht : stikstofoxyde (NO) is een natuurlijk bestanddeel van de stratosfeer en het verdwijnt door uitregenen uit de troposfeer als zure regen; op hoogtes beneden de 15 km zouden vliegtuigen zelfs smogreacties veroorzaken en (verwaarloosbare) ozon producenten worden, terwijl op Concore-hoogte (18 km) de vliegtuigen neutraal zouden zijn voor de ozonbalans. Deze conclusie was zeer onderkoeld vergeleken met de verhitte twist, die de achtergrond vormde van de mislukte Amerikaanse en Russische supersonische vliegtuigprogramma's, terwijl de Concorde zijn eerste commerciële vluchten uitvoerde. Er werd evenwel gesteld dat een nieuwe studie noodzakelijk is voordat de ontwikkeling van een op grote hoogte vliegend (30 km), sneller en zwaarder supersonisch vliegtuig (Mach 2-3) ter hand wordt genomen, en dit is de huidige situatie.

Chloriden verschenen in 1974 op het toneel, toen ontdekt werd dat freon uit spuitbussen en koelkasten een vast bestanddeel van de atmosfeer van verstedelijkte gebieden was gaan vormen. Andere studies, met als doel chloriden als tracer voor atmosferisch transport te gebruiken, lieten zien dat chloriden al in het hele atmosferische systeem aanwezig waren. Verscheidene auteurs publiceerden dat deze freonen ongeschonden naar de stratosfeer diffunderen waarna ze fotodissociëren. Hierbij zou atomair chloor worden vrijgemaakt, dat een katalytische reactie zou initiëren, in evenwicht met ClO, welk ozon vernietigt. Ook hier ontstond een hevige controverse, die tot op heden niet is beslecht (Brasseur, 1992; Dotto and Schiff, 1978, Gribbin, 1988).

Een deel van de controverse werd veroorzaakt door de grote industriële belangen die waren gemoeid met de investeringen in freonfabrieken, die tot in 1974 waren gedaan, toen volgens iedereen deze produkten nog volkomen veilig waren. Na twintig jaar onderzoek kan worden vastgesteld dat er geen enkele natuurlijke bron van stratosferisch chloor is geïdentificeerd en dat men moet veronderstellen dat alle stratosferische chloor- en fluorvervindingen die zijn waargenomen daar door menselijk handelen terechtkwamen. De vraag naar het verliesmechanisme van chloor blijkt veel ingewikkelder te

beantwoorden dan die van NO, het is geen simpel uitregenen van zoutzuur.

De industriële en politieke wereld reageerden langzaam bij het zoeken naar freonvervangers, eerst voor spuitbussen, toen voor industriële reinigingsmiddelen en nu ook voor koelmachines. Verscheidene verdragen, met name het Montreal-protocol van 1987, werden aangenomen om de produktie en het ontsnappen van freonen te verminderen en deze zijn inmiddels door nationale wetgevingen bekrachtigd. Het laatste aspect van deze geschiedenis is de rol die wordt gespeeld door bromiden, zoals toegepast in halon-brandblussers. Hoewel broomveel effectiever ozon kan afbreken dan chloor, werden halonen door het Montreal protocol niet aan banden gelegd. Het Amerikaanse milieu-agentschap heeft nu een nieuwe regelgeving ingesteld, die alleen het gebruik van de bestaande voorraden toelaat voor essentieel gebruik.

De onverwachte opschudding uit de Zuidpool

Ozon aan de Zuidpool wordt gemeten sinds het Internationale Geofysische jaar van 1957-1958. De jaarlijkse variaties onthulden enige specifieke zaken : een maximum in november verbonden met een plotselinge verwarming van de atmosfeer en een relatief laag plateau in oktober. Gemiddeld genomen was de ozonkolom hoger dan op gematigde breedte, hetgeen overeenkwam met de reeds eerder waargenomen toename van ozon met de breedtegraad. Tijdens de Belgisch-Nederlandse expeditie van 1965-1967 naar Koning-Boudewijn-basis gaven meteorologen van het KNMI destijds een dynamische verklaring voor de periodieke ozonvariaties. Echter, in het begin van de jaren tachtig lieten twee series waarnemingen herhaald lage oktober ozonwaarden zien die moeilijk met dit dynamische beeld waren te rijmen (figuur 1). Deze metingen kwamen van het Japanse Syowa station en het Britse Halley Bay station. De Japanners waren de eersten die dit resultaat publiceerden, zowel in Japanse tijdschriften als op het ozonsymposium in 1984, maar de Britse publikatie (Farman et al., 1985) in Nature in 1985 maakte echter wereldnieuws, speciaal nadat de auteurs curven hadden getrokken die een correlatie tussen de ozonafname en de freontoename over dezelfde periode lieten zien. Het ozongat werd vervolgens ook in de ultraviolet-terugverstrooiings-metingen van het satellietinstrument TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) gevonden (zie voorplaat), dat sinds 1978 mondiale ozonmetingen uitvoerde, maar waar de anomale metingen aan de Zuidpool tot dan toe waren afgedaan als een artefact in de techniek. Twee uitgebreide Amerikaanse campagnes in 1987 en 1988 bevestigden het bestaan van het ozongat en zijn omvang; in oktober 1987 werden de laagste waarden ooit gemeten. Sindsdien zijn deze lage waarden van 100 DU (zie kader) bijna elk jaar herhaald, met name in 1991 en 1992.

Het mechanisme dat tot het ozongat leidt, verschilt van de katalytische cyclus voor chloor- en stikstofdioxide; er is een sterk verband met de vorming van stratosferische wolken gedurende de poolnacht in de Zuidpoolvortex (een stabiele

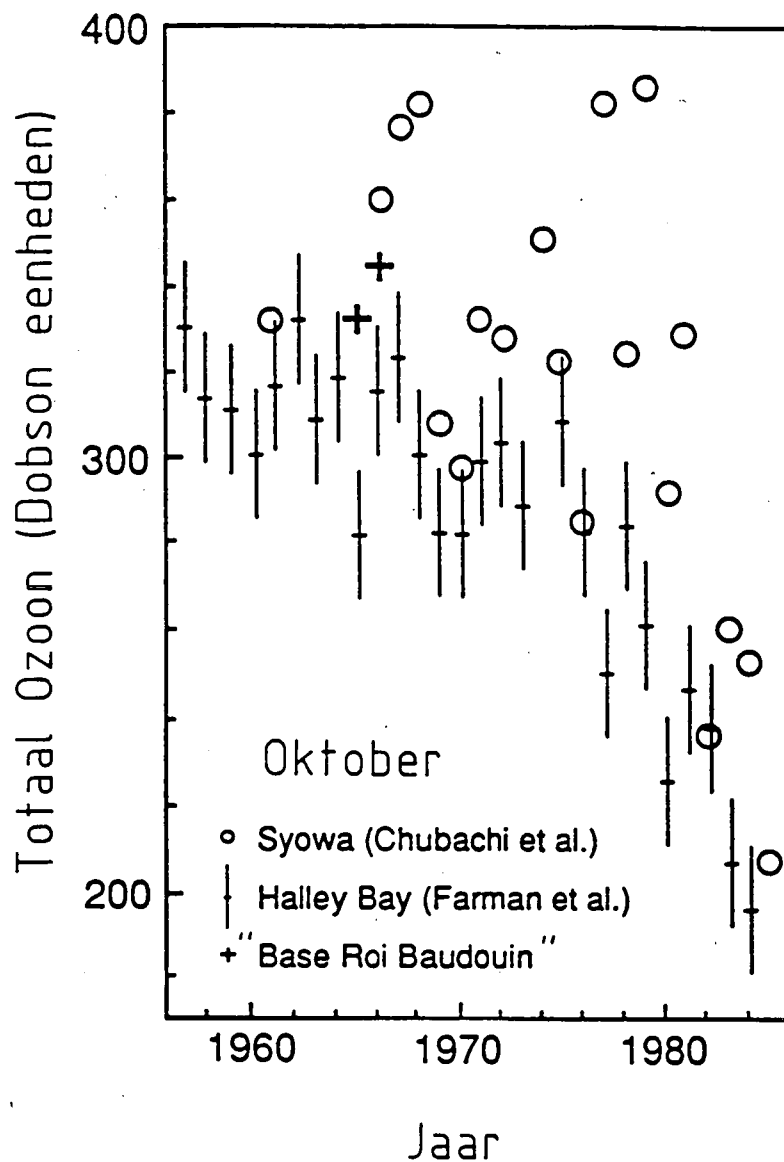


Fig. 1. De ontdekking van het ozongat vanuit verschillende grondstations aan de zuidpool. De Belgisch-Nederlandse waarnemingen vanaf de Koning-Boudewijn-basis zijn afgebroken in 1967, toen het grondstation werd gesloten (H. Kelder en Chr. Muller - Herinterpretatie van antarctische ozonmetingen vanuit de Koning-Boudewijn-basis, 1992).

stratosferische luchtstroming rond de pool). Aan deze wolken condenseert altijd een groot aantal gassen, inclusief zoutzuur en salpeterzuur, ten gevolge van de extreem lage temperaturen. Bij het terugkeren van de zon in de Zuidpoolente (oktober) beginnen de gassen uit de ijsdeeltjes vrij te komen en ontstaat er een fotochemische nevel, die zeer reactief is en die het ozon vernietigt. Het exacte mechanisme is niet bekend; verscheidene reacties gebaseerd op heterogene chemie (gasvastestof fase) zijn voorgesteld welke de waarnemingen schijnen te verklaren. Onderzoek aan antarctische waarnemingen van voor 1970 laat zien dat het maximum in november samengaat met het opbreken van de vortex; men heeft echter niet de anomaal lage oktober-waarden van ozon uit de jaren tachtig kunnen reproduceren. Het is jammer dat de meetreeks zich niet uitstrekt tot voor 1957. Een niet-conventionele ozonmeting van 1959 van het Franse station Dumont d'Urville laat zeer eigenaardige spectrale verdelingen zien, die als lage ozonwaarde geïnterpreteerd zouden kunnen worden. Echter, de metingen zouden ook door de polaire stratosferische wolken zelf kunnen worden verklaard. Het meest directe bewijs voor een chemische oorsprong van het ozongat wordt geleverd door de anticorrelatie van ClO en ozon, gemeten in de vroege zuidpoolente van 1987 tijdens een NASA U-2 vlucht langs de meridiaan.

Vanaf 1990 worden ook aan de Noordpool tijdens iedere lente ozon-meetcampagnes uitgevoerd, maar tot nu toe zijn er nog geen ozongaten waargenomen (figuren 2, 3, 4). Een van de redenen hiervan is dat vanwege andere landmassaverdeling rond de Noordpool er geen stabiele vortex ontstaat en ook dat zelfs met de zeer hoge ClO-waarden van 1992 de temperatuur te hoog is om langdurig polaire stratosferische wolken te vormen. Een ozongat aan het Noordelijke halfrond zou uiteraard enorme consequenties hebben voor de economie en de gezondheid van de bevolkingscentra boven de 50ste breedtegraad. Tot op heden is de verwachte toename in de schadelijke UV-B-straling echter niet waargenomen. De toename van aerosolen (sulfaatdeeltjes), de daarmee gepaard gaande wolkvorming, maar ook de vorming van troposferisch ozon speelt hier een rol, omdat deze op hun beurt UV-B-straling absorberen.

Troposferisch ozon

Troposferisch ozon maakt slechts 10% van de totale ozonkolom uit, maar speelt een belangrijke rol in het leefmilieu en in de chemische cycli waarin het is verwickeld. Troposferisch ozon reageert, na excitatie door UV-licht met waterdamp. Het daarbij gevormde hydroxyl-radicaal is zeer reactief en gaat reacties aan met koolmonoxyde, methaan en bijna alle andere door menselijk of natuurlijk toedoen in de atmosfeer gebrachte gassen. Het OH-radicaal wordt daarom wel het reinigingsmiddel van de atmosfeer genoemd. Of er een netto produktie of verlies van ozon optreedt, hangt in sterke mate af van de aanwezige hoeveelheid NO. Dit laatste ontstaat voornamelijk door menselijke activiteit uit N₂O. In NO-rijke gebieden zal er een netto ozonproduktie plaatsvinden, in NO-arme gebieden een netto verlies (Crutzen, 1987). De ironie

TOMS gegevens 1978-1992, 55 breedtegraden

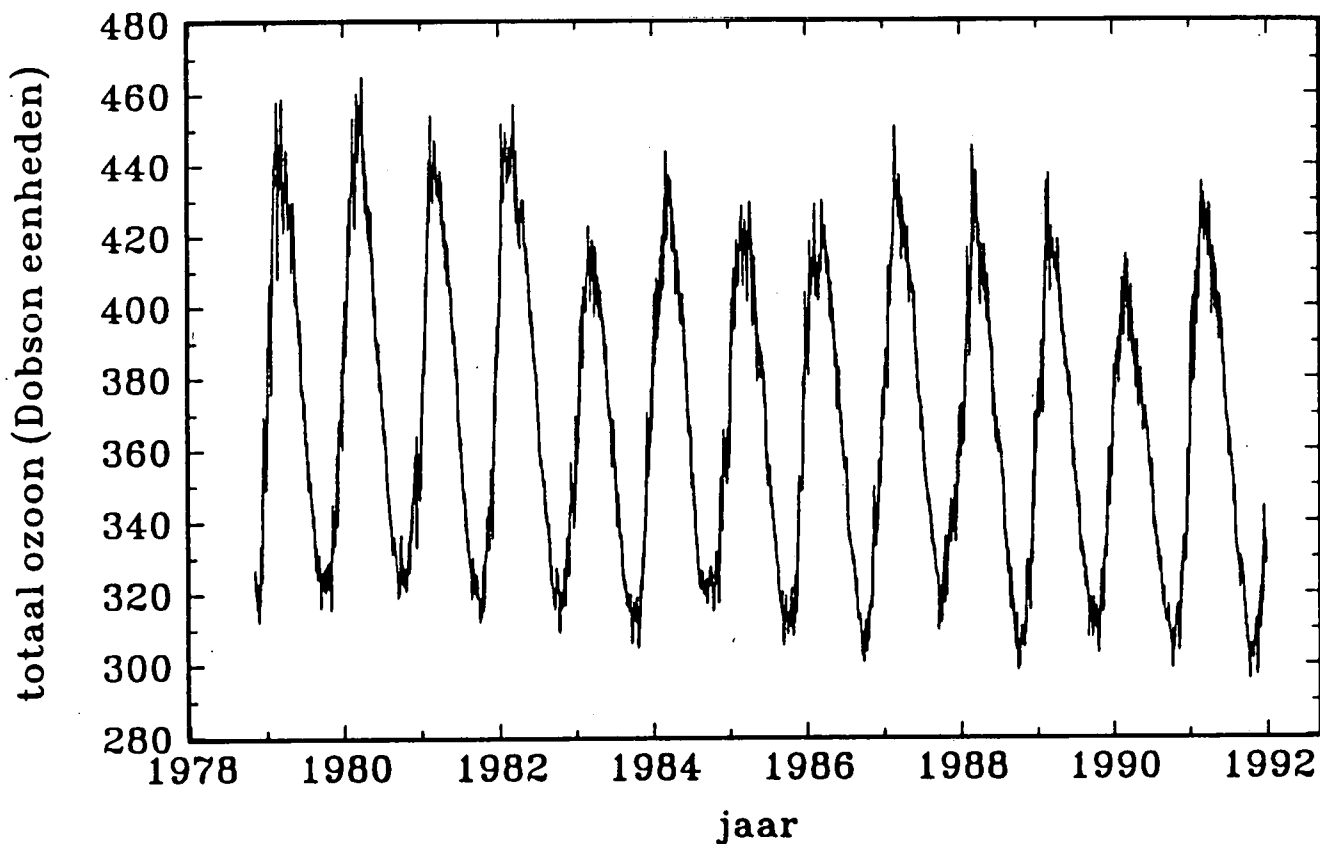


Fig. 2. TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) satellietmetingen van de totale ozonkolom, gemiddeld over de 55e noorderbreedtegraad over de periode 1978 tot 1992. Men ziet onmiddellijk dat de seizoensvariaties veel groter zijn dan de eventuele lange termijn trend. Het is daarom noodzakelijk nauwkeurige metingen te doen over een lange tijdsperiode.

TOMS gegevens, tussen 50 en 60 breedtegraden.
maandelijkse gemiddelden

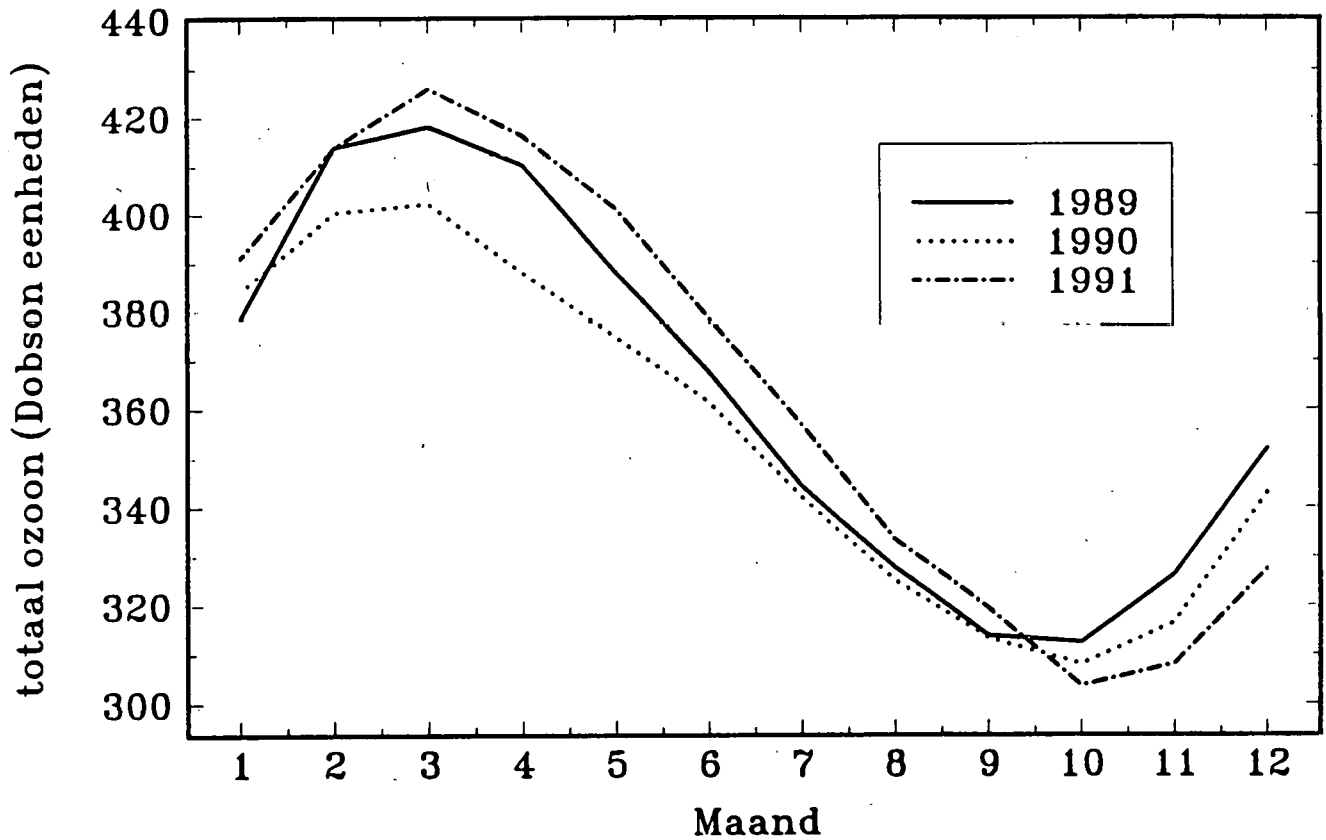


Fig. 3. Maandelijkse variatie in de totale ozonkolom voor de jaren 1989, 1990 en 1991. Het zonale ozonkolom gemiddelde van 50 tot 60 graden NB is gegeven. (Uit : TOMS ozonmetingen van 1978 tot 1991, NASA 1992).

TOMS ozoon over Amsterdam en Brussel (Ukkel)

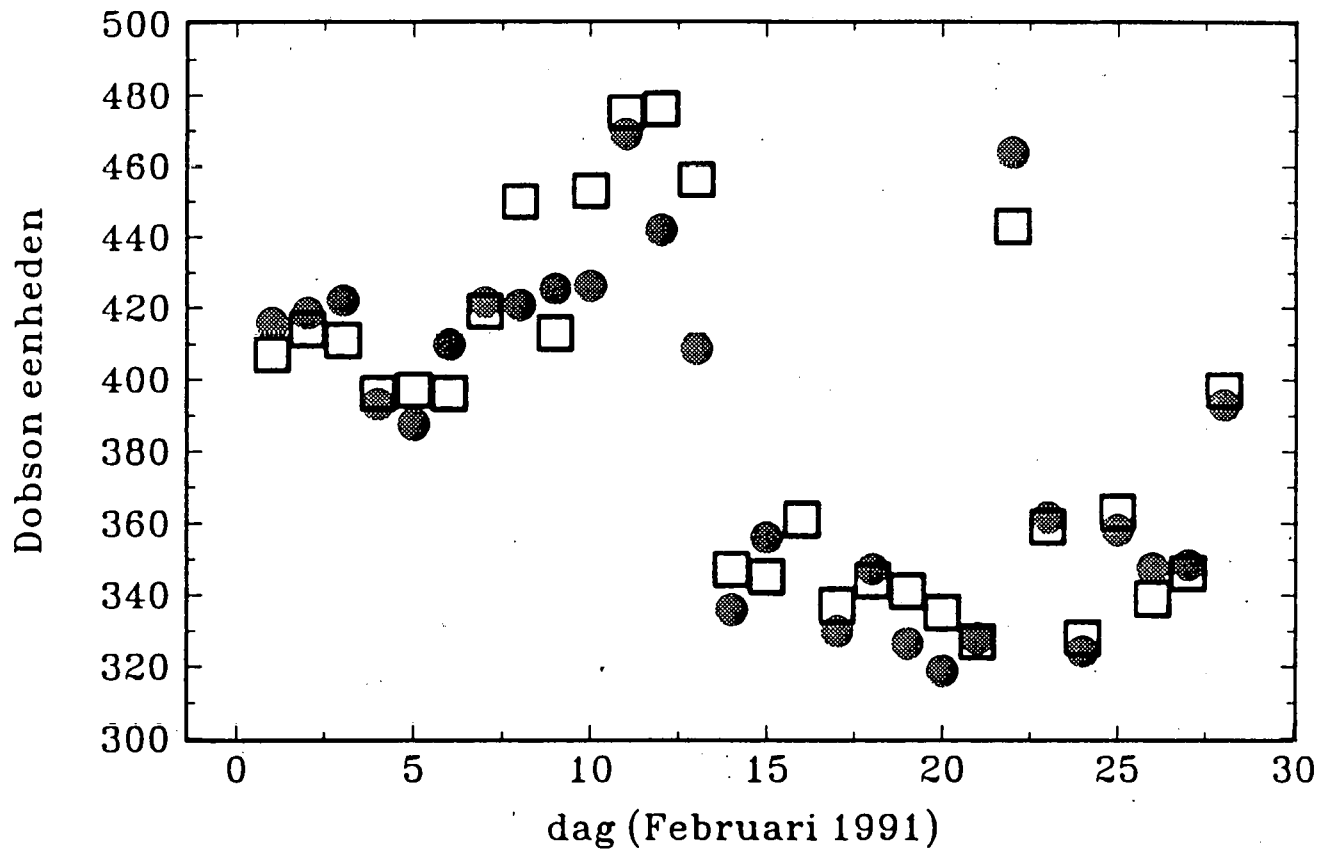


Fig. 4. Vergelijking van de totale ozonkolom metingen met het satellietinstrument TOMS boven Ukkel (Koninklijk Meteorologisch Instituut, België) en Amsterdam. De Belgische metingen zijn gevalideerd met het Dobson grondinstrument. Het netwerk van Dobson grondstation is essentieel voor de validatie van de satellietmetingen. Men ziet dat de metingen in Ukkel representatief zijn voor de ozonsituatie boven Nederland.

hierbij is dat NO-vervuilde lucht stabiliserend werkt op de afbraak van de andere sporegassen (door de verhoogde ozon en daarmee OH-produktie). Anderzijds leidt de toename van troposferisch ozon tot schade voor de gezondheid.

Er zijn weinig vroege metingen van de toename van troposferisch ozon, maar modelberekeningen laten een toename zien van meer dan een factor 10 aan het Noordelijk halfrond, vergeleken met de ozonconcentratie in de pre-industriële atmosfeer. De laatste 20 jaar is er meer dan een verdubbeling gemeten.

In de ozonbalans spelen de tropen een belangrijke rol : de dunnere stratosferische ozonlaag en de hogere zonnestand veroorzaken een intensere UVB-straling, en daardoor een grotere produktie van het OH-radicaal. De troposferische ozonproduktie is daar nog beperkt vanwege de NO-arme atmosfeer, maar een potentieel gevaar ligt op de loer: de explosieve bevolkingstoename en de verwachte industriële ontwikkeling in de tropen zal de belangrijkste atmosferische verandering voor de toekomst bepalen.

Blik op de toekomst

De UARS (Upper Atmospheric Research Satellite) waarnemingen van januari 1992 tonen hoge ClO-concentraties aan boven Europa. Deze veroorzaken weliswaar geen ozongat, maar laten wel een lagere ozonkolom zien boven België in februari 1992 en 1993. Als deze trend zich ongeveer vijf jaar lang zou voortzetten, moet er serieuze bezorgdheid worden geuit over de gevolgen van de noordelijke ozon-afname. De waarneming uit Ussel werd onlangs bevestigd door de TOMS satelliet (Gleason et al., 1993) en schijnt zijn oorsprong te vinden in de uitbarsting van de Pinatubo vulkaan in 1991. Boven de Zuidpool wordt het ozongat ieder jaar groter en bestrijkt nu het gehele continent. Het gat blijkt ook ieder jaar hardnekkiger, het opbreken van de vortex gebeurt ieder jaar op een later tijdstip.

De totale mondiale ozon-afname is niet goed bekend. Een afname van ongeveer 5% over de periode 1978 tot 1992 wordt algemeen aangenomen, maar valt binnen de foutenmarge van de huidige satellietmetingen. Een geheel nieuwe generatie van ruimteinstrumentatie wordt nu ontwikkeld om nauwkeurige metingen te verrichten van ozon en gerelateerde gassenconcentraties. Prominent hierin is het SCIAMACHY-instrument (SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CartographY), een Nederlands-Duits nationaal project dat onlangs door de Nederlandse ministerraad werd goedgekeurd. Het SCIAMACHY-instrument zal naar verwachting in 1998 worden gelanceerd op de Envisat-1 satelliet van ESA, die nog een aantal andere instrumenten voor atmosfeeronderzoek zal meevoeren.

Om in een vroegtijdige Europese ozonmeting te voorzien, wordt door ESA het GOME-instrument (Global Ozone Monitoring Experiment) ontwikkeld. Het gaat hier om een verkleinde versie

van Sciamachy, die zal meevliegen op de ERS-2 satelliet, waarvan de lancering eind 1994 is gepland. Het hart van beide instrumenten is de spectrometer. Deze is in Nederland door TPD-TNO en SRON (Stichting Ruimte Onderzoek Nederland) ontwikkeld. In het wetenschappelijk team zijn naast de Duitse en internationale onderzoekers ook wetenschappers van SRON, KNMI, RIVM en IMAU gestart met het voorbereiden van de metingen. De instrumenten zullen een meetnauwkeurigheid halen van 1% voor ozon en verder zullen ze de aanwezigheid van aerosolen en verschillende belangrijke atmosferische gassen, in het bijzonder stikstofoxyden, meten. SCIAMACHY zal als uitbreiding op GOME ook de hoogteverdeling van de genoemde gassen meten en daarmee het onderscheid tussen stratosfeer en troposfeer. Verder zal SCIAMACHY als uitbreiding op GOME naast de ozongassen ook broeikasgassen N_2O , CH_4 en CO/CO_2 meten. Vanwege de polaire baan van de satelliet, die in 3 dagen een mondiale bedekking haalt, kunnen de mondiale ozontrend en de regionale variaties daarop efficiënt worden gemeten. De verwachting is dat na een paar jaren van observaties een schatting kan worden gemaakt van de invloed die de veranderende samenstelling van de atmosfeer op ons klimaat zal hebben.

REFERENTIES

- BRASSEUR, G., Natural and anthropogenic perturbations of the stratospheric ozone layer, *Planet. and Space Sci.*, **40**, 1992.
- CRUTZEN, P.J., *The Geophysiology of Amazonia*, Ed. R.E. Dickson Wiley, Chichester-New York, 1987.
- DOTTO, L. and H. SCHIFF, *The ozone war*, Doubleday, 1978.
- Farman, J.C., B.G. Gardiner and J.D. Shanklin, Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction, *Nature*, **315**, 207-10, 1985.
- GLEASON, J.F., P.K. BHARTIA, J.R. HERMAN, R. Mc PETERS, P. NEWMAN, R.S. STOLARSKI, L. FLYNN, G. LABOW, D. LARKO, C. SEFTOR, C. WELLENMEYER, W.D. KOMHYR, A.J. MILLER and w; planet, Record low global ozone in 1992, *Science*, **260**, 523-526, 1993.
- GRIBBIN, J., *The hole in the sky, Man's threat to the ozone layer*, Bantam Books, 1988.

APPENDIX

Samenstelling van de atmosfeer

De aarde wordt omhuld dooreen dunne gasschil met een dichtheid die afneemt met de afstand tot het aardoppervlak volgens de barometrische hoogteformule met een karakteristieke exponent van 7 km. In die gasschil bestaat een temperatuurverdeling die een aantal atmosferische lagen definieert :

- de troposfeer met een dikte variërend van 16 km aan de equator tot 8 km aan de polen. De troposfeer wordt gekarakteriseerd door een temperatuurafname van 6,5°C per km hoogte. In de troposfeer bevindt zich het grootste deel van de atmosferische waterdamp, van primair belang voor alle atmosferische processen. De troposfeer omvat de atmosferische grenslaag van ongeveer 3 km hoogte. Dit is een turbulente laag met goede menging, waarin de uitstoot van natuurlijke en antropogene sporegassen plaatsvindt met directe (smog, zure regen) of indirecte (ozonafbraak) invloed op de biosfeer.
- de tropopauze is een stabiel overgangsgebied boven de troposfeer waar de temperatuur nagenoeg constant is (-60°C). Er vindt daardoor weinig verticale uitwisseling plaats met de bovenliggende stratosfeer.
- in de stratosfeer, van 15 tot 50 km hoogte, neemt de temperatuur weer toe tot ongeveer 0°C in de stratopauze op 50 km hoogte. De stratosfeer bevat 90% van de totale hoeveelheid atmosferisch ozon. Het temperatuurprofiel van de atmosfeer wordt bepaald door de ozonlaag, waar UV-absorptie van de zon in warmte wordt omgezet. Op ongeveer 22 km hoogte, bij een druk van ongeveer 30 mbar bereikt de ozonconcentratie zijn maximum. De totale hoeveelheid ozon, de zogenaamde kolomhoogte, wordt uitgedrukt in Dobson-eenheden (DU), genoemd naar de Oxfordse fysicus Dobson, waarbij 1 DU overeenkomt met 10^{-2} mm kolomhoogte bij standaardtemperatuur en druk. De ozonkolom hoogte vertoont natuurlijke variaties per seizoen, 2 jaar (quasi-binnual oscillation) en 11 jaar (zonnecyclus) met een gemiddelde waarde van ongeveer 300 tot 400 DU's.
- de mesosfeer van 50 tot 80 km hoogte, wordt gekenmerkt door een wederom afnemende temperatuur tot -90°C in de mesopauze. Binnen deze schil bevindt zich 99% van de totale atmosfeer. Boven de mesosfeer bevinden zich de thermosfeer, die de ionosfeer tussen 80 en 300 km bevat en vervolgens de magnetosfeer, die de overgang vormt met de interplanetaire ruimte.

Interessante verdere achtergrondlectuur over het onderwerp zijn de boeken van Dotto en Schiff (1978) en van Gribbin (1988) en het artikel van Brasseur uit (1992).