Het gat in de Ozonlaag

Frank Daerden (Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie)

In dit eerste van twee bijdragen over de aardse stratosfeer gaan we dieper in op de ozonlaag. Waar bevindt zich de ozonlaag? Wat is het belang van deze laag? Waar bevindt zich het gat in de ozonlaag? Hoe is dit ozongat ontstaan? Wat kunnen we eraan doen? Hoe zal het ozongat evolueren?

De indeling van de aardatmosfeer

De aardatmosfeer wordt verticaal ingedeeld in een aantal *lagen* die elk hun karakteristieke kenmerken hebben. Deze indeling gebeurt op basis van het verticale temperatuurverloop in de atmosfeer. Als we de temperatuur als functie van de hoogte onderzoeken, heeft deze een op het eerste gezicht nogal merkwaardig verloop (zie figuur 1).

In principe zou men kunnen denken dat de temperatuur steeds blijft dalen met toenemende hoogte. Dit blijkt duidelijk niet het geval te zijn en op 50 kilometer hoogte bereikt de temperatuur vrijwel terug de waarde van aan het aardoppervlak.

Aan de hand van dit temperatuurverloop definieert men de verschillende atmosferische lagen. De onderste laag, tot een hoogte van ongeveer 16 kilometer, noemt men de *troposfeer*. De daarboven liggende laag, waarin de temperatuur stijgt met de hoogte, is de *stratosfeer*. Boven 50 km begint de *mesosfeer*, waarin de temperatuur terug daalt met de hoogte.

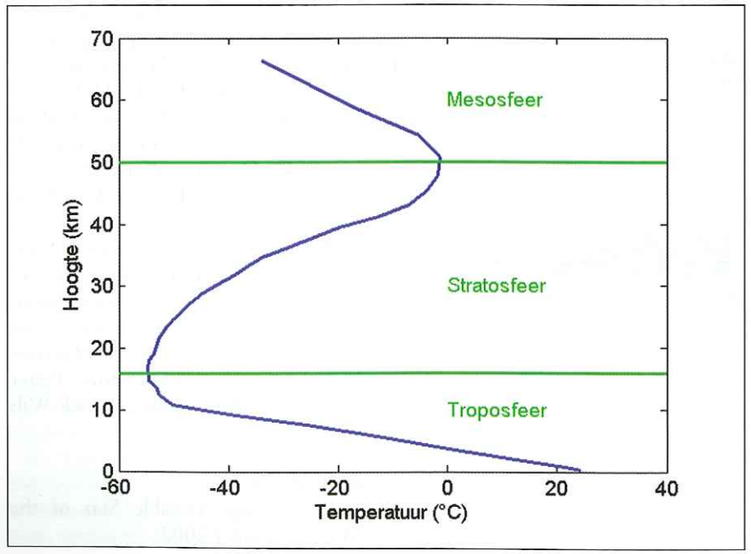
Wanneer we het principe "warme lucht stijgt" hanteren, dan kunnen we vaststellen dat dat in de troposfeer nogal moeilijk ligt, aangezien de hoger liggende lucht kouder moet zijn. De troposfeer *kolkt* voortdurend van warme lucht die naar boven wil, tegen het temperatuurverloop in. Vandaar de naam troposfeer, want "tropos" is Oudgrieks voor *omkering*. De stratosfeer is daarentegen een vrij stabiel gelaagd gebied. Vandaar de naam, want het Latijnse "stratum" betekent *gelaagdheid*.

Aangezien de dichtheid van de lucht sterk afneemt met de hoogte, zit de meeste lucht in de onderste lagen. Bijna 90% van de totale hoeveelheid lucht zit in de troposfeer en nagenoeg 10% in de stratosfeer, met een restprocentje in de bovenliggende lagen.

Tot slot van deze inleiding vermelden we het belang van elke laag. De woelige troposfeer, die tevens vrijwel al het water van de atmosfeer bevat, is vooral van belang voor de meteorologische fenomenen die er in optreden, met andere woorden de troposfeer bepaalt ons weer. De kalme stratosfeer is de plaats waar de luchtmoleculen in alle rust chemische reacties met elkaar en fotochemische reacties met het zonlicht kunnen aangaan. De stratosfeer bepaalt vooral de *stralingsbalans* van de atmosfeer. In de hogere luchtlagen zijn alle moleculen geïoniseerd en treden er vooral elektromagnetische effecten op.

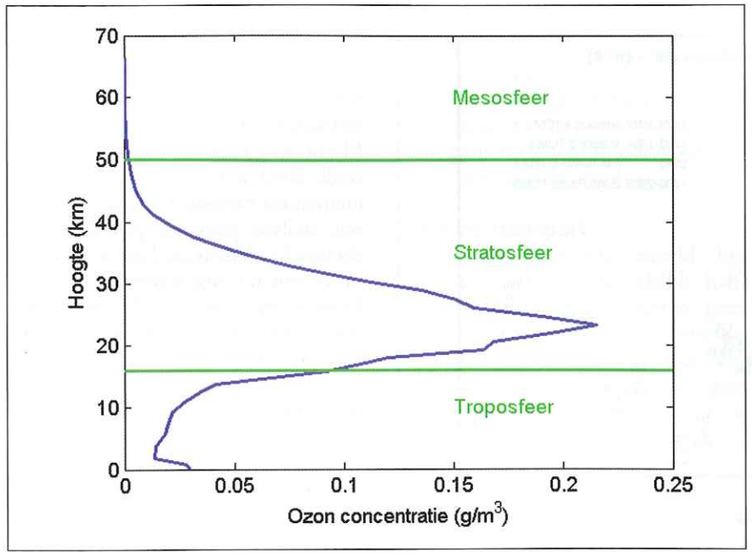
In dit artikel concentreren we ons enkel op de stratosfeer.

Figuur 1. Afbakening van de verschillende luchtlagen aan de hand van het temperatuurverloop in de aardatmosfeer (situatie boven België tijdens de zomer, 12h UT).



De ozonlaag

De chemische samenstelling van de atmosfeer oogt op het eerste gezicht vrij eentonig: 99.966% van de lucht bestaat uit stikstof, zuurstof en argon. Daarom worden alle andere stoffen *minderheidsbestanddelen* genoemd. Nochtans speelt het subtiele chemische evenwicht tussen deze minderheidsbestanddelen en hun interactie met het zonlicht een enorme rol. Zo is de ozonmolecule (O_3) van vitaal belang voor de stralingsbalans in de atmosfeer en zodoende voor alle leven op Aarde. In de loop van de geschiedenis heeft zich een evenwichtssituatie gevormd, waarbij 90% van het ozon zich in de stratosfeer bevindt tussen een hoogte van 15 en 35 km, de *ozonlaag* genaamd (zie figuur 2). Het maximum van de ozonconcentratie bevindt zich op een hoogte van ongeveer 25 km. Zelfs bij dit maximum bedraagt de hoeveelheid ozon slechts enkele moleculen per miljoen luchtmoleculen!



Figuur 2. Verloop van de ozonconcentratie met de hoogte.

Het fotochemische belang van ozon ligt hierin, dat deze molecule de ultravioletstralen uit het zonlicht absorbeert. Deze straling vernietigt de ozonmolecule dan, waardoor er een zuurstofmolecule (O_2) en één vrij zuurstofatoom vrijkomt:

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

Deze reactie is in evenwicht met een andere reactie waarbij hoogenergetische UV straling een zuurstofmolecule splitst, waarop beide vrijgekomen zuurstofatomen met twee andere zuurstofmoleculen terug ozon vormen:

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

De ozonlaag absorbeert op deze manier de meeste UV straling van de Zon, waardoor de onderliggende gebieden hiertegen beschermd worden. De ozonlaag is dus van enorm belang voor het leven op Aarde. UV straling veroorzaakt zonnebrand, cataract, en verandert de structuur van DNA, wat tot kankers kan leiden.

Daarnaast is deze absorptie door ozon rechtstreeks verantwoordelijk voor de temperatuursstijging in de stratosfeer. Het merkwaardige temperatuurverloop uit figuur 1 wordt dus veroorzaakt door de ozonlaag.

Ozon op zich is een giftige molecule en is, wanneer deze in onze omgeving gevormd wordt, schadelijk voor het leven. Dit is het geval tijdens warme zomerdagen bij een vervuilde lucht. Men spreekt hier van troposferisch ozon. Dit zorgt nogal eens voor verwarring als het over het nut van ozon gaat! Stratosferisch ozon is van vitaal belang voor de bescherming van het leven, terwijl troposferisch ozon daarentegen erg schadelijk is.

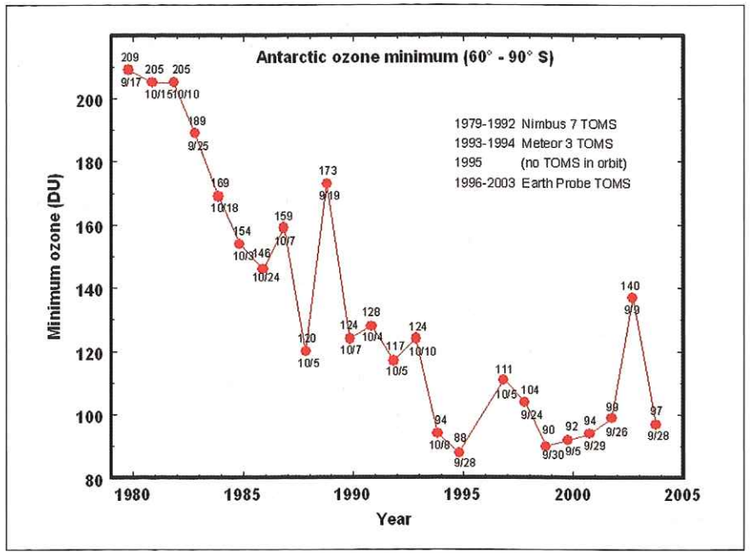
Een gat in de ozonlaag

Grote paniek ontstond er halfweg de jaren 1980 toen men een heus gat in de ozonlaag ontdekt had boven Antarctica. In *Nature* (nr. 315 van 1985) deelden J.C. Farman, B.G. Gardiner en J.D. Shanklin van de British Antarctic Survey hun meetresultaten mee, die duidelijk aangaven dat de ozonkolom boven hun Antarctische basis tijdens de lokale lente (oktober) opmerkelijk gedaald was sinds de jaren 1970. Latere metingen, ook door satellieten, bevestigden alleen maar deze negatieve ontwikkeling.

Een van de instrumenten die voor de meest aaneensluitende reeks observaties van ozon in de atmosfeer heeft gezorgd, is de Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) van de NASA. Dit type instrument is sinds 1979 vrijwel ononderbroken actief geweest op verschillende opeenvolgende satellieten. In figuur 3 staan de jaarlijkse minimumwaarden van de ozonkolom boven het zuidpoolgebied weergegeven zoals gemeten door TOMS. Vóór 1980 waren er nooit waarden beneden de 200 DU gemeten. De afbraak van de ozonkolom in dit gebied is erg drastisch. De minimumwaarden lijken zich recentelijk te stabiliseren tussen 80 en 100 DU, maar dit is grotendeels de bijdrage van het troposferisch ozon tot de totale kolom. In de stratosfeer worden de ozonconcentraties vaak tot nul herleid. Vandaar dat men spreekt over het ozongat.

De Dobson eenheid (DU)

Een belangrijke grootheid waarmee men de hoeveelheid ozon in de atmosfeer kan weergeven, is de zogenaamde *ozonkolom*. Dit is de totale hoeveelheid ozon boven een bepaald punt, geïntegreerd over de hoogte. We wijzen er nogmaals op dat de hoeveelheid ozon in de atmosfeer vrij klein is. Als men alle ozon in de atmosfeer op standaard temperatuur en druk (0°C en 1 atmosfeer) zou brengen, zou dit een laag van slechts een 3-tal mm over de Aarde vormen. Per definitie stelt men dat bij deze voorwaarden een laag van 0.01 mm dikte = 1 Dobson eenheid (Dobson unit, DU) is. DU is de erkende eenheid voor ozonkolom. Onder normale omstandigheden is de ozonkolom tussen 200 DU en 400 DU dik.

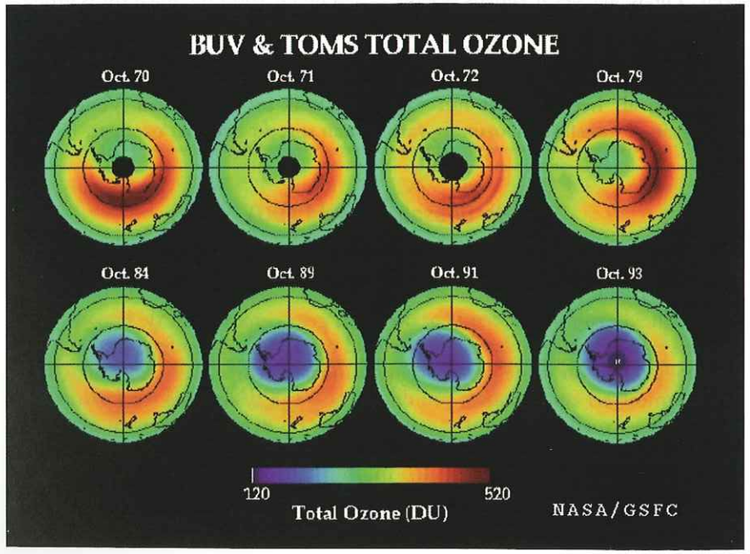


Figuur 3. Evolutie van de minimumwaarden van de ozonkolom boven de zuidpool zoals gemeten door het instrument TOMS. Bron: *NASA*.

Eveneens zorgwekkend is de uitbreiding van het gebied waarin ozon afgebroken wordt. In figuur 4 is de evolutie weergegeven van de gemiddelde grootte van het ozongat in oktober, zoals berekend uit observaties van BUV en TOMS. Reeds halfweg de jaren 1980 overtrof het ozongat het Antarctisch continent (dat groter is dan Europa) in oppervlakte. Sinds halfweg de jaren 1990 breidt het ozongat zich geregeld uit tot boven het zuidelijk punt van Zuid-Amerika. Recent benaderde de oppervlakte de 30 miljoen vierkante kilometer, wat overeenkomt met de grootte van Afrika (zie figuur 5).

Sinds halfweg de jaren 1990 heeft ook Europa zich gestort op het observeren van de ozonlaag, eerst met het instrument GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) op ERS/2 en sinds 2002 met verschillende instrumenten op Envisat. In figuur 5 wordt een analyse getoond, gemaakt door chemische data-assimilatie van observaties van het instrument MIPAS op Envisat, van het tot dusver grootst opgemeten ozongat, namelijk dat van 26 september 2003.

Figuur 4. Evolutie van de omvang van het gat in de ozonlaag zoals gemeten door de instrumenten BUV en TOMS tussen 1970 en 1993. Bron: *NASA*.

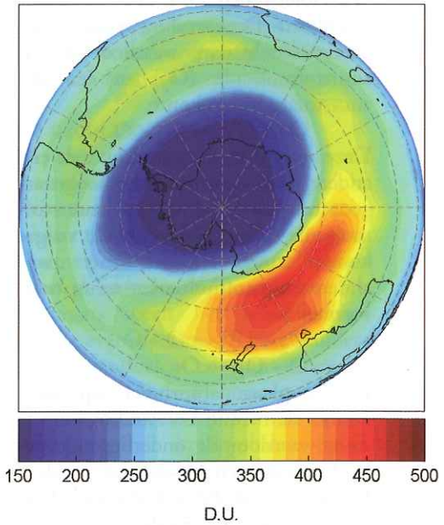


Op zoek naar de oorzaken

De zoektocht naar de oorzaken van de aantasting van de ozonlaag zou aanvankelijk niet zo heel moeilijk blijken. Immers, jaren voor de publicatie van Farman et al. was er al onderzoek gedaan naar de mogelijke gevolgen van menselijke industriële activiteit op de ozonlaag. Men had alleen niet verwacht dat het zo een vaart zou lopen.

De Nederlandse wetenschapper Paul Crutzen had in 1970 aangetoond dat stikstofoxides ozon kunnen afbreken.

Figuur 5. Grootste ozongat ooit waargenomen, op 26 september 2003. De afbeelding is een resultaat van chemische data-assimilatie van observaties van het instrument MIPAS aan boord van ESA/Envisat. Bron: *BASCOE/BIRA-IASB/ESA*.



De Amerikaan Harold Johnston kwam tot soortgelijke bevindingen en gebruikte deze om in 1971 al te waarschuwen dat de geplande vloot supersonische vliegtuigen catastrofaal zou zijn voor de ozonlaag, aangezien deze vliegtuigen stikstofoxides midden in de ozonlaag zouden lozen. De plannen voor deze toestellen werden dan ook snel opgeborgen, op de enkele Concordes na.

In 1974 publiceerden de Amerikanen Mario Molina en Sherwood Rowland hun onderzoek dat aantoonde dat het technologische wondermiddel CFK (chloor-fluor-koolwaterstof) schadelijk kon zijn voor de ozonlaag. Dit product werd onder andere toegepast als drijf- en koelgas en was in de jaren 1950 ontdekt als een reukloos, inert gas dat dus vrijwel onschadelijk voor het milieu verondersteld werd en alom in grote hoeveelheden gebruikt werd.

Omdat er geen supersonische luchtvloot ontstaan was, moest de afbraak van de ozonlaag te wijten zijn aan de CFK's. De reactie van de wereld was nooit gezien in aangelegenheden van milieuproblematiek, en het UNO-protocol van Montreal uit 1987 inzake afname van CFK-productie werd in 1992 reeds zover aangepast dat de productie ervan sinds 1996 nagenoeg stopgezet is.

In 1995 ontvingen Crutzen, Molina en Rowland trouwens samen de Nobelprijs voor scheikunde voor hun onderzoek rond de ozonlaag.

CFK's en transport

De geïndustrialiseerde wereld ligt grotendeels op het noordelijk halfrond en pinguïns produceren geen CFK's. Waarom treedt het ozongat dan op aan de zuidpool? Het antwoord ligt hier bij de luchtstromingen in de atmosfeer. Op grote schaal is de algemene luchtcirculatie zo dat lucht in de tropen opwelt en de tropopauze –de barrière tussen troposfeer en stratosfeer– doorbreekt. Eenmaal in de stratosfeer stijgen de luchtstromingen nog hoger en dan is er een transport van tropen naar polen toe. Uiteindelijk belandt de lucht in de polaire stratosferische gebieden, waar zij dan terug daalt, de troposfeer in. Deze luchtstroming heet de *Brewer-Dobson circulatie* (zie figuur 6).

De CFK's zijn in de troposfeer inderdaad chemisch inert, maar waar men destijds geen rekening mee had gehouden, is dat deze stoffen uiteindelijk in de stratosfeer belanden. Boven de ozonlaag staan ze bloot aan UV straling en worden ze vernietigd, waarbij er chloor vrijkomt. Een vrij chlooratoom is desastreus voor ozon door de reacties

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

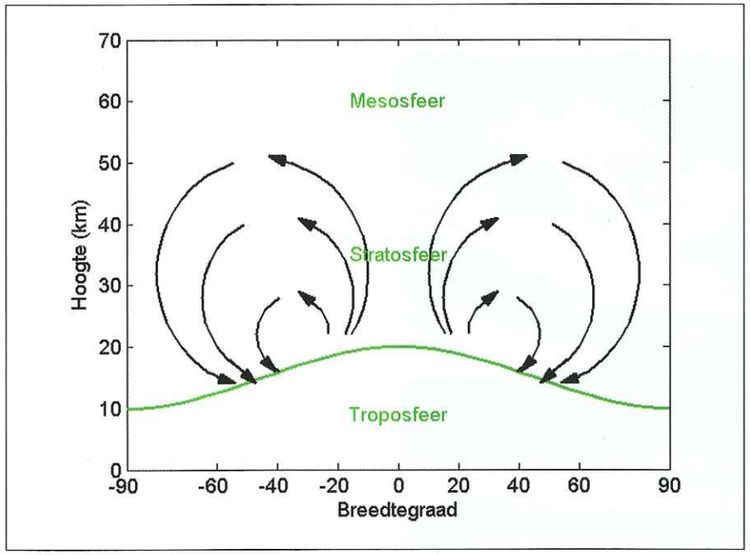
die gecombineerd als eindbalans opleveren

$$O_3 + O \rightarrow 2\,O_2$$

Deze eindbalans betekent dus niet alleen dat er een ozonmolecule verdwijnt, maar ook dat het originele chlooratoom terug vrij is en ongestoord een andere ozonmolecule kan gaan aanvallen. (Deze cyclus lijkt eindeloos, maar treedt gelukkig niet altijd even efficiënt op. Het vrije chlooratoom wordt redelijk snel opgeslorpt in de nogal inerte stoffen HCl en $ClONO_2$. Men noemt dit *reservoirstoffen* voor chloor.)

Op deze manier kon men begrijpen dat CFK's uiteindelijk kunnen zorgen voor vrije chlooratomen in de polaire ozonlaag, maar dit verklaarde nog niet waarom de grote ozonafbraak zich precies aan de *zuidpool* manifesteerde. Daarnaast had men doorheen de jaren ook opgemerkt dat het gat in de ozonlaag steeds verdween in november en zich opnieuw vormde in augustus. Met andere woorden, het gat was er alleen tijdens de lokale late winter en lente. Ook het waarom hiervan was onduidelijk.

Figuur 6. Luchtstromingen doorheen de stratosfeer. De Brewer-Dobson circulatie brengt vervuilde lucht van de gematigde breedtes naar polaire gebieden.



In de wolken...?

Het snel doorvoeren van het Montreal-protocol geeft aan dat men zich in die tijd wel bewust was van het CFK-probleem, maar hoe de zaak nu precies in elkaar stak, was toch nog enige tijd onduidelijk. Het feit dat het gat in de ozonlaag zich vormt in de late winter en vooral in de lage stratosfeer, wijst erop dat een en ander te maken moet hebben met erg lage temperaturen die daar en dan heersen. Dat het gat zich niet vormde tijdens het putje van de winter maar eerder op de overgang naar de lente, wijst dan weer op het belang van het intredend *zonlicht* na de lange poolnacht.

Uiteindelijk werd langzaamaan een antwoord gevonden bij de *polaire*

stratosferische wolken (Polar Stratospheric Clouds of PSC's). Waar men vroeger dacht dat de stratosfeer normaal gezien wolkenvrij is, wegens het tekort aan water, blijkt nu dat er zich in de lage stratosfeer, op hoogtes rond de 20 km, toch wolken kunnen vormen van vooral waterijs en HNO_3-verbindingen. Deze kunnen enkel gevormd worden bij de allerkoudste temperaturen in de atmosfeer, onder de –78°C, en treden daarom enkel op tijdens de polaire winters, voornamelijk nabij de zuidpool, maar ook wel aan de noordpool. Satellietwaarnemingen van deze wolken zijn er gedaan sinds 1982, maar hun groot belang voor de ozonafbraak werd pas vanaf begin jaren 1990 erkend.

Achteraf zag men in dat de zuidpoolreiziger Robert Scott in zijn dagboek op 1 augustus 1911 waarschijnlijk een dergelijke PSC beschreef:

"Er was redelijk wat licht vandaag; het zonlicht werd rechtstreeks gereflecteerd door een enkele grillige, veelkleurige wolk in het noorden, een schitterend zicht."

(vrij vertaald door de auteur; merk op dat deze dag in de poolnacht valt).

Doordat PSC's meestal uit ijskristallen bestaan, zijn ze zeer helder. Dikwijls zijn ze ook veelkleurig; daarom worden ze ook parelmoerwolken genoemd. Doordat ze hoger liggen dan gewone wolken worden ze pas zichtbaar na zonsondergang, wat inderdaad een schitterend schouwspel moet opleveren. (Niet te verwarren met de lichtende nachtwolken, die zich op nog grotere hoogte bevinden, in de mesosfeer.)

In figuur 7 is een foto weergegeven van een PSC die opgemerkt werd boven Oslo in december 2000. Hierop is duidelijk te zien hoe de wolk pas oplicht nadat de Zon laag genoeg achter de horizon is gezakt. De troposferische wolken bevinden zich dan niet meer in het zonlicht.

Welk effect kunnen deze wolken hebben op de ozonlaag? Het antwoord op deze vraag vinden we in de *heterogene chemie*. In de ijle lucht is het niet zo evident dat twee moleculen elkaar tegenkomen om een chemische reactie aan te gaan. Op het oppervlak van wolkdruppeltjes of -kristallen is de kans hierop veel groter. Een molecule kan zich vasthechten aan zo'n wolkdeeltje en wachten tot dat er een andere molecule aankomt. Dit soort oppervlaktereactie noemt men een *heterogene reactie*. Wat er nu precies gebeurt in PSC's is dat door allerlei reacties met de reservoirstoffen HCl en $ClONO_2$ op de wolkdeeltjes chloorverbindingen worden vrijgemaakt. Onder invloed van zonlicht geven deze chloorverbindingen op hun beurt chlooratomen vrij, die dan ongeremd ozon kunnen gaan afbreken in de onmiddellijke nabijheid van die wolken.

Uiteindelijk passen de stukjes van de puzzel dus allemaal in elkaar. Luchtstromingen brengen de CFK's die wij hier produceren naar de hoge stratosfeer. Daar worden ze vernietigd en komt er chloor vrij, dat verder naar de polaire lage stratosfeer wordt getransporteerd. Dit chloor wordt echter al snel vastgezet in de reservoirstoffen. Normaal gezien kan de stof hier niet meer uitkomen, tenzij door heterogene reacties op PSC's, die enkel bij zeer lage temperaturen gevormd worden. Voorts is er nog zonlicht nodig om de chlooratomen vrij te maken. Dit verklaart allemaal waarom het meeste ozon wordt afgebroken in de polaire gebieden, aan het einde van de lokale winter, bij het terugkeren van het zonlicht.

Figuur 7. Een foto van PSC's boven Oslo op 1 december 2000. De donkere wolken net boven de horizon zijn gewone troposferische wolken, die donker zijn omdat ze zich niet meer in rechtstreeks zonlicht bevinden (de Zon staat reeds ver onder de horizon). De hoger liggende PSC's lichten dan ineens fel op. Foto: *Geir Braathen* (NILU).

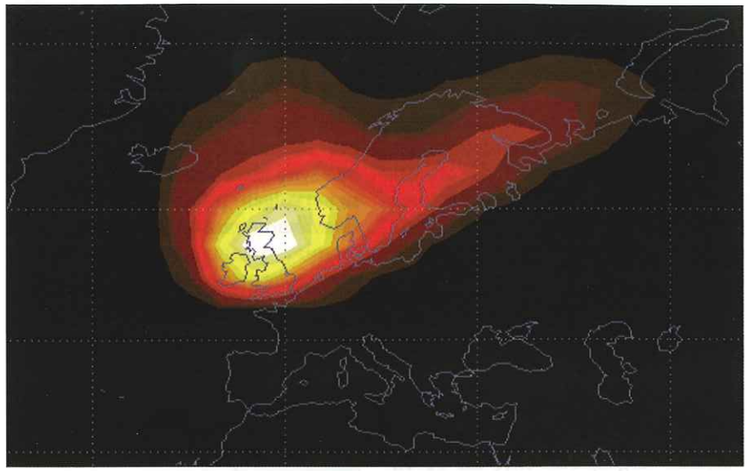
Situatie aan de noordpool

Waarom is er dan geen ozongat aan de noordpool? De verklaring hiervoor is te vinden in volgend merkwaardig verschil tussen noord- en zuidpool op Aarde. Op de zuidpool ligt het continent Antarctica, dat volledig omgeven is door oceaan. Op de noordpool daarentegen ligt geen continent, enkel pakijs, maar deze ijszee is vrijwel helemaal omgeven door continent.

De luchtstromingen op Aarde zijn zo dat er zich rondom de polen een wat sterkere stroming voordoet, de *vortex* genaamd. Deze wordt sterker naarmate de temperatuur daalt en is in feite slechts uitgesproken aanwezig tussen de lokale herfst en lente. Deze vortex is een soort draaikolk rondom de pool en het resultaat ervan is dat de lucht binnenin grotendeels wordt afgescheiden van de lucht buiten de vortex. Er is met andere woorden weinig transport van lucht doorheen deze barrière. Binnen in de vortex is de lucht kouder dan erbuiten, want dichter bij de pool. De vortex werkt zodoende ook als een isolatieschild, dat de lucht binnenin de vortex extra koud houdt. Hoe kouder de lucht, hoe gemakkelijker PSC's ontstaan en hoe meer ozon er afgebroken wordt.

De polaire vortex kan echter verstoord worden doordat de wind over hoge bergen scheert. De bergen verstoren het mooie windpatroon en veroorzaken wat men berggolven noemt. Aan het zuidelijk halfrond beweegt de vortex meestal mooi rondom Antarctica en zal van weinig tot geen bergen hinder ondervinden. Aan de noordpool is de situatie duidelijk anders. Vooral de hoge bergen op Groenland, het ontbreken van continent tussen Groenland en Europa, en dan weer de hoge bergen in Noorwegen verstoren de vortex ten zeerste. Zodoende is er van een stabiele situatie geen sprake en blijft het nooit lang koud genoeg om tot een serieuze ozonafbraak te komen.

Berggolven hebben nog een tegenstrijdig effect. In de golfbeweging die ze in de luchtstromingen veroorzaken, ontstaan ook lokaal plaatsen met lagere temperatuur dan voorheen. Daar ontstaan dan weer gemakkelijker PSC's en daarom ziet men vooral PSC's optreden in de buurt van bergketens. Aan de zuidpool is dat dan vooral nabij het Antarctisch Schiereiland (dat zich richting Vuurland uitstrekt), aan de noordpool treden PSC's vooral op tussen Groenland en Noorwegen, soms zelfs op de breedte van Schotland (zie figuur 8).

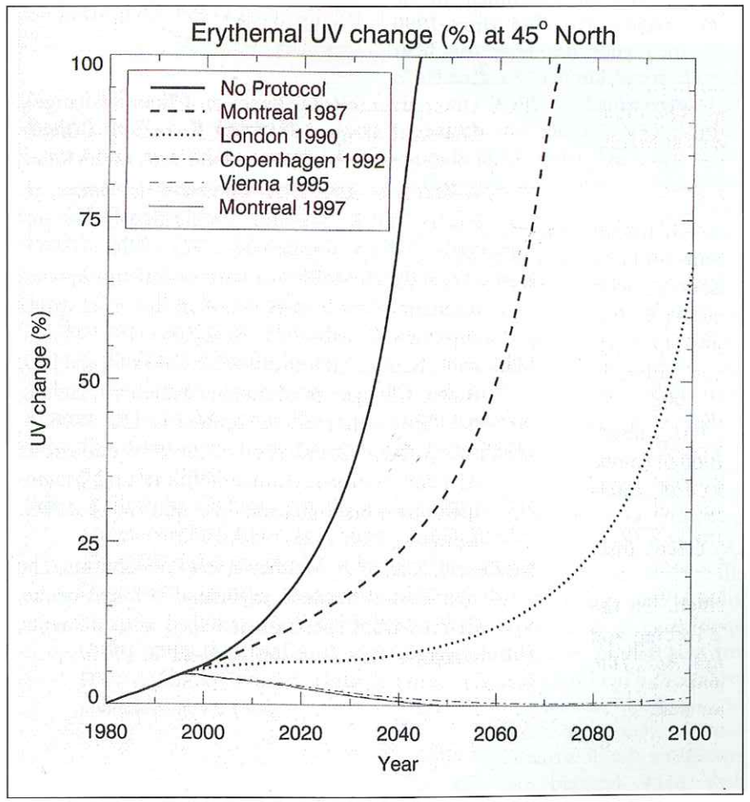


Figuur 8. Het data-assimilatiesysteem BASCOE is in staat om uit de meteorologische gegevens en de berekende chemische luchtsamenstelling de aanwezigheid van PSC's te berekenen. Hier een voorbeeld van een polaire stratosferische wolk over Schotland op 10 januari 2003 om 18h UT. Deze wolk bevindt zich op 20 km hoogte. Bron: *BASCOE/BIRA-IASB*.

Wat brengt de toekomst?

De problematiek van het ozongat was duidelijk te wijten aan de door menselijke technologie geloosde CFK's. Door een speling van het lot hebben we het zwaard van Damocles van ons af weten schuiven, naar een afgelegen gebied waar gelukkig geen mensen wonen. Een verder doorgedreven gebruik van CFK's zou het gat alsmaar groter en dieper hebben gemaakt. Het ozongat is uiteraard het meest spectaculaire gevolg van de CFK-lozingen, maar daarnaast merkt men

Figuur 9. Geschat effect van de verschillende CFK-protocollen. Weergegeven is de geschatte toename (in %) van schadelijke UV-straling op noordelijke gemiddelde breedtes, zonder ingreep (volle lijn) en tevens voor elk van de opeenvolgende UNO protocollen. Bron: *WMO Global Ozone Research and Monitoring project – report no. 44.*



wereldwijd dat de ozonkolom geleidelijk afneemt sinds de jaren 1980, als gevolg van de toegenomen aanwezigheid van chloor in de stratosfeer. De geschatte invloed op de volksgezondheid zonder ingreep en de effecten van de verschillende protocollen op het verbieden van CFK's zijn weergegeven in figuur 9.

Opmerkelijk is dat door het stoppen met de lozing van CFK's en aanverwante stoffen de situatie zich normaal gezien uiteindelijk vanzelf zal herstellen. Er hoeft geen ozon aangevoerd te worden (een onmogelijke taak trouwens), bij wegblijven van nieuw aangevoerde chloor zal het natuurlijke evenwicht terugkeren. Inderdaad, het chloor in de stratosfeer wordt langzaam uitgeregend via de reservoirstof HCl. Men moet hierbij ook rekening houden met het feit dat de reisduur van de CFK's doorheen de atmosfeer wel 50 jaar of meer kan bedragen, zodat CFK's die in de jaren 1980 geloosd werden nog over enkele decennia kunnen aankomen in de polaire regio's. Pas eind jaren 1990 heeft men voor het eerst een licht dalende trend kunnen waarnemen in de hoeveelheid CFK's in de stratosfeer, als gevolg van de protocollen die eind jaren 1980 doorgevoerd zijn, conform de voorspelling van figuur 9.

De situatie is echter niet zo eenvoudig, want de vermoede klimaatswijziging onder invloed van de broeikasgassen heeft een drastische invloed op de ozonlaag. De toename van broeikasgassen in de atmosfeer heeft zoals bekend als gevolg dat de onderste luchtlagen opgewarmd worden, maar de hogere luchtlagen zullen hierdoor daarentegen afkoelen. Koudere stratosferische omstandigheden werken de ozonafbraak in de hand. Door de koppeling met het broeikaseffect en de klimaatverandering (want minder ozon werkt op zijn beurt de opwarming in de hand) is het echter vrij moeilijk in te schatten wat de evolutie van het ozongat zal zijn. Over het algemeen vermoedt men dat het ozongat zeker nog een decennium kan groeien en dat de situatie pas midden deze eeuw hersteld zal zijn. (De vroegtijdige splitsing van het ozongat in 2002 lijkt in deze evolutie eerder een toevallige gebeurtenis te zijn geweest, als gevolg van een zeer uitzonderlijke dynamische situatie.)

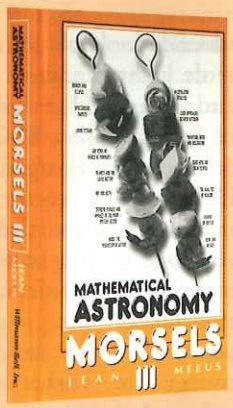
De situatie aan het noordelijk halfrond is nog onduidelijker. De mogelijkheid bestaat dat er zich ook daar een ozongat kan voordoen, maar de schattingen van grootte en diepte van zo'n arctisch ozongat lopen nogal uiteen. Hoe dan ook mogen we niet uitsluiten dat de situatie ernstig kan worden. Als de temperatuur in de arctische stratosfeer met slechts enkele graden zou dalen in het komende decennium, dan kan er een ozongat ontstaan vergelijkbaar met dat boven de zuidpool, wat honderden miljoenen mensen zou bedreigen. Dit bijkomende gevaar wordt nogal eens over het hoofd gezien wanneer men het heeft over klimaatswijziging en het Kyoto-protocol. Reden te meer om uitermate voorzichtig te zijn.

De toestand van de stratosfeer en in het bijzonder de ozonlaag zoals berekend door BASCOE is dagelijks te volgen op de website *http://bascoe.oma.be*.

ZOEKERTJE

Te koop. Oculair 10 mm Super Plössl, schijnbaar veld 52°. In nieuwe staat; vraagprijs 40 EUR. Contact opnemen met Jordaan Beauprez (tel.: 051 77 77 80, GSM: 0479 42 16 59).

Nieuw!



In 1997 verscheen van Jean Meeus het boek *Mathematical Astronomy Morsels*. Daarin behandelt hij ruim zestig aspecten van de wiskundige sterrenkunde. In 2002 verscheen een vervolg met 75 andere thema's: *More Mathematical Astronomy Morsels*.

Deze indrukwekkende collectie astronomische wetenswaardigheden wordt nu verder aangevuld met nieuwe onderwerpen. In *Mathematical Astronomy Morsels III* overtreft Jean Meeus weer zichzelf. Ook nu weer vormt elk hoofdstuk een op zich staand geheel, zodat het boek in stukjes kan "verorberd" worden. Een greep uit de inhoud:

- Jaren met vijf zonsverduisteringen
- De beweging van de Zon aan de hemel van Mercurius
- Venus en Antares
- Eclipsen van de middernachtzon
- De grootste declinaties van de planeten
- Kan Venus zichtbaar zijn om middernacht?

In totaal worden niet minder dan 57 thema's behandeld over 400 bladzijden. Ook wie geen wiskundeknobbel heeft, zal plezier aan dit werk beleven.

De prijs voor dit unieke werk bedraagt slechts 33.00 EUR (verzendingskosten inbegrepen). Ook het eerste en het tweede deel zijn nog verkrijgbaar tegen dezelfde prijs. Bestellen kan door het gepaste bedrag over te maken op rekening 000-1600462-59 van VVS-publicaties, Oostmeers 122 C te 8000 Brugge met vermelding van "Morsels 1", "Morsels 2" en/of "Morsels 3".