



Ozon

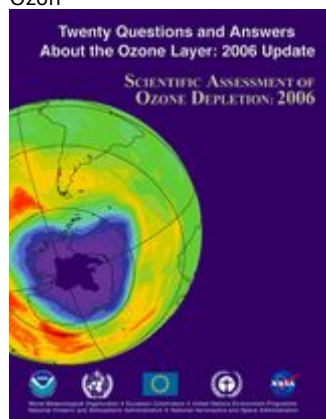
Twintig Vragen en Antwoorden over de Ozonlaag

30 augustus 2011

David Fahey, Michaela Hegglin, vrij vertaald door Mark Kroon (KNMI)

Wetenschappers wereldwijd zijn al decennialang geïnteresseerd in de chemische en fysische eigenschappen van de stof ozon. Wat begon met verkennend laboratoriumwerk in de 19de eeuw om de eigenschappen van de stof ozon vast te stellen, leidde in de 20ste eeuw tot het besef dat de ozonlaag van vitaal levensbelang is voor al het leven op Aarde door de absorptie van schadelijke ultraviolette straling afkomstig van de zon. Optische metingen vanaf de grond sinds de jaren '20 en vanaf satellieten in de ruimte sinds de jaren '70 hebben veel inzicht gegeven in de herkomst, het gedrag en de rol van ozon in de Aardse atmosfeer. Zo is ozon ook een belangrijke speler in de warmtehuishouding van de Aardse atmosfeer en als zodanig onderdeel van de moderne weermodellen van het KNMI. De rijke en gedetailleerde kennis over ozon is op indrukwekkende wijze gebundeld in de brochure 'Twenty Questions And Answers About The Ozone Layer' samengesteld door hoofdredacteur Dr. David F. Fahey en uitgegeven door de World Meteorologische Organisatie (WMO) United Nations Environment Programme (UNEP). Dit artikel is een samenvattende vrije vertaling van dit wereldwijd als standaardwerk erkende document.

Ozon



Inhoud

Inleiding

I. OZON IN ONZE ATMOSFEER

Vraag 1: Wat is ozon en waar bevindt het zich in de atmosfeer?

Vraag 2: Hoe wordt ozon gevormd in de atmosfeer?

Vraag 3: Waarom maken we ons druk over atmosferisch ozon?

Vraag 4: Is de dikte van de ozonlaag uniform over de hele wereld?

Vraag 5: Hoe wordt ozon gemeten in de atmosfeer?

II. HET OZONAFBRAAK PROCES

Vraag 6: Wat zijn de belangrijkste stappen in het proces van de vorming van het ozongat in de stratosfeer zoals veroorzaakt door menselijke activiteiten?

Vraag 7: Welke uitstoot door menselijke activiteiten leidt tot afbraak van de ozonlaag?

Vraag 8: Wat zijn de reactieve halogeengassen die ozon in de stratosfeer vernietigen?

Vraag 9: Wat zijn de reacties van chloor- en broom die de stratosferische ozonlaag vernietigen?

Vraag 10: Waarom is het 'gat in de ozonlaag' verschenen boven Antarctica terwijl de ozonlaag aantastende stoffen wereldwijd aanwezig zijn in de stratosfeer?

III. STRATOSFERISCHE OZONAFBRAAK

Vraag 11: Hoe ernstig is de afbraak van de Antarctische ozonlaag?

Vraag 12: Is er ook sprake van afbraak van de ozonlaag boven de noordpool?

Vraag 13: Hoe groot is de afbraak van de wereldwijde ozonlaag?

Vraag 14: Hebben veranderingen in de Zon en vulkaanuitbarstingen invloed op de ozonlaag?

IV. CONTROLE OP OZONLAAG AANTASTENDE STOFFEN

Vraag 15: Zijn er voorschriften voor de productie van ozonlaag aantastende stoffen?

Vraag 16: Is het Protocol van Montreal geslaagd in het verminderen van ozonafbrekende gassen in de atmosfeer?

V. GEVOLGEN VAN OZONAFBRAAK

Vraag 17: Zorgt de afbraak van de ozonlaag voor een verhoogde intensiteit aan ultraviolette straling op het aardoppervlak?

Vraag 18: Is afbraak van de ozonlaag de voornaamste oorzaak van klimaatverandering?

VI. OZON IN DE STRATOSFEER IN DE TOEKOMST

Vraag 19: Hoe zal het herstel van de ozonlaag worden geïdentificeerd?

Vraag 20: Wanneer is de ozonlaag naar verwachting volledig hersteld?

Inleiding

Ozon is een gas dat van nature aanwezig is in onze Aardse atmosfeer. Ozon werd al vroeg in de 19^{de} eeuw ontdekt en vastgesteld in laboratoriumexperimenten. Ozon heeft de chemische formule $[O_3]$ omdat een ozonmolecuul uit drie zuurstofatomen bestaat. Het woord 'ozon' is afgeleid van het Griekse woord 'ozein', wat zoveel betekent als 'te ruiken'. Ozon heeft namelijk een doordringende geur en wordt door mensen al bij zeer lage concentraties waargenomen. Je ruikt de prikkelende geur van ozon bijvoorbeeld bij het gebruik van een oude laserprinter.

De aanwezigheid van ozon in de Aardse atmosfeer werd pas later ontdekt met behulp van chemische en optische meetmethoden. Ozon is qua hoeveelheid slechts een zeer klein bestanddeel van de atmosfeer, maar de aanwezigheid is van vitaal belang voor het leven op Aarde. Het meeste ozon bevindt zich in het bovenste deel van de atmosfeer, de zogenaamde stratosfeer, die zich bevindt op meer dan 10 kilometer boven het aardoppervlak. Daar is ongeveer 90% van het atmosferische ozon aanwezig in de zogenaamde 'ozonlaag' die ons beschermt tegen de schadelijke ultraviolette zonnestraling door deze bijna volledig te absorberen.

Halverwege de jaren '70 werd echter door wetenschappers ontdekt dat een aantal door de mens geproduceerde chemicaliën, zoals chloorfluorkoolstoffen (afgekort CFK's), de ozonlaag wel degelijk kunnen afbreken. Afname van de dikte van de ozonlaag leidt tot een toename van de intensiteit van ultraviolette straling in ons leefmilieu, wat bij mensen tot een gevaarlijke toename van de kans op huidkanker en staar leidt, en bij planten en dieren tot even desastreuze gevolgen leidt. Na de ontdekking van dit urgente milieuprobleem werd internationaal onderzoek gericht op deze bedreiging van de ozonlaag. Uit lange meetreeksen van grondstations bleek dat de concentratie in de atmosfeer van ozonafbrekende stoffen gestaag toenam met als oorzaak de groeiende productie en het gebruik van deze chemicaliën voor airconditioning, het maken van schuimplastic, als drijfgas in spuitbussen en voor industriële reiniging. Wetenschappelijk onderzoek maakte de chemische reacties duidelijk die betrokken waren bij de afbraak van ozon. Met computermodellen kon daarna worden berekend hoeveel de ozonlaag werd aangetast en hoeveel meer dit zich zou voordoen in de toekomst, met desastreuze gevolgen voor het leven op aarde.

Uit waarnemingen aan de ozonlaag bleek dat de afbraak inderdaad was opgetreden. Het meest ernstige en meest verrassende ozonverlies bleek telkens terug te keren boven Antarctica in het lokale voorjaar. Het verlies van ozon in deze regio wordt over het algemeen het 'ozongat' genoemd, vanwege de nagenoeg totale afbraak van de ozonlaag over een enorm gebied. Maar boven andere delen van de wereld is ook een vermindering van de dikte van de ozonlaag vastgesteld, zoals de Arctische gebieden en de gematigde breedtegraden op het Noordelijk halfrond waar wij leven. Het werk van vele wetenschappers wereldwijd heeft geleid tot een rotsvast wetenschappelijk inzicht in de processen die leiden tot afbraak van de ozonlaag. Met dit inzicht weten we hoe en waarom de afbraak van de ozonlaag gebeurt. En, nog belangrijker, we weten dat als de concentraties van ozonlaag aantastende stoffen in de atmosfeer toenemen, dat de afbraak van de ozonlaag alleen maar sterker wordt.

In reactie op het vooruitzicht van een uiteindelijk levensbedreigende afbraak van de ozonlaag, hebben de regeringen van de wereld in 1987 unaniem het 'United Nations Montreal Protocol' opgesteld om dit wereldwijde probleem aan te pakken. In navolging van dit protocol, plus de latere wijzigingen en significante aanscherpingen daarvan, en als gevolg van de ontwikkeling van 'ozonvriendelijke' alternatieven door de chemische industrie, is de opbouw van de concentratie van ozonafbrekende stoffen in de atmosfeer vertraagd en zelfs begonnen te dalen. Hierdoor is het risico op verdere afbraak van de ozonlaag verminderd en wordt het herstel van de ozonlaag naar pre-1980 waarden, gegeven een voortdurende naleving van het Montreal Protocol, in de tweede helft van de 21^{ste} eeuw verwacht.

De Internationale Dag Voor Het Behoud Van De Ozonlaag wordt ieder jaar gevierd op 16 september, de dag waarop het Protocol van Montreal is afgesproken.

Dit is een verhaal van opmerkelijke prestaties: ontdekking, overeenstemming, besluiten, acties en verificatie. Het is een verhaal geschreven door velen: wetenschappers, technologen, economen, juridische deskundigen en beleidsmakers. En, dialoog is een sleutelingrediënt.

I. OZON IN ONZE ATMOSFEER

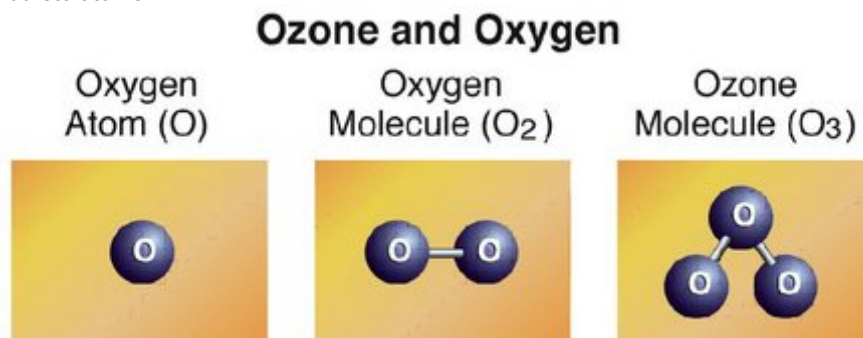
Vraag 1: Wat is ozon en waar bevindt het zich in de atmosfeer?

De stof 'ozon', of trizuurstof, is chemisch gezien een enkelvoudige stof van het element zuurstof, dat normaal als dizuurstof (O_2) in de atmosfeer voorkomt. Een ozonmolecuul bevat drie zuurstofatomen en wordt genoteerd als O_3 . Bij standaardtemperatuur en -druk is ozon een blauw gas. In vloeibare vorm heeft het een donkerblauwe kleur en een kookpunt van -112°C . Het smeltpunt ligt bij -193°C . Daaronder is ozon een donkerblauwe vaste stof.

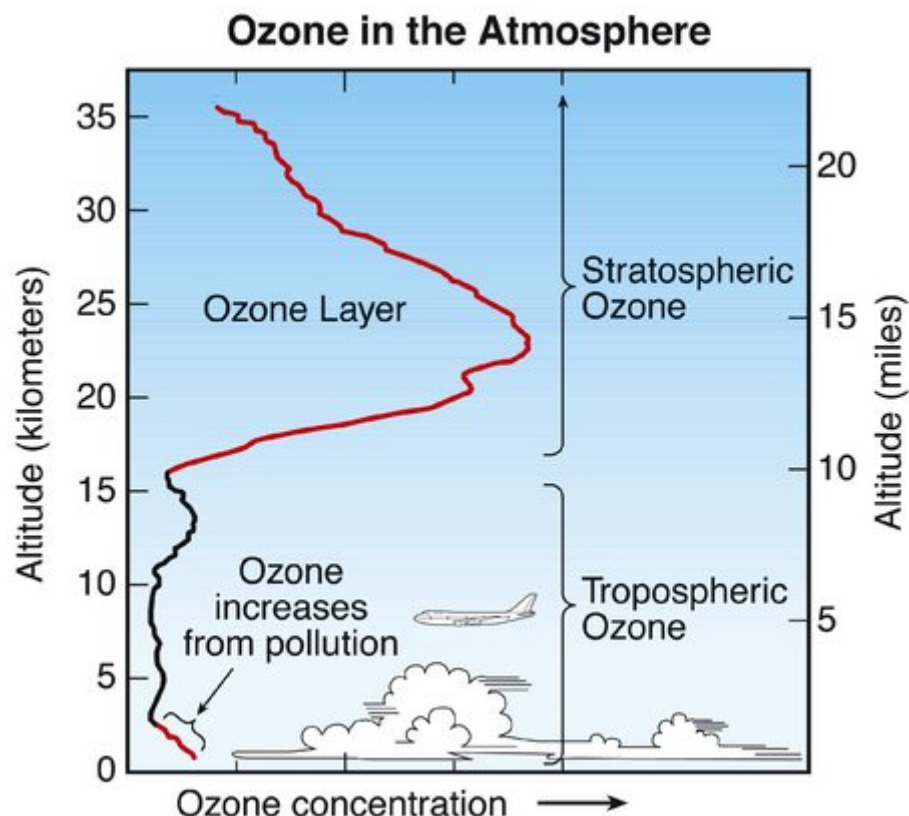
Ozon is als gas van nature aanwezig in onze atmosfeer. Ozon wordt in twee gebieden van de atmosfeer aangetroffen. Ongeveer 10% van het atmosferische ozon bevindt zich in de troposfeer, het gebied het dichtst boven de oppervlakte van de Aarde, van de grond tot ongeveer 10-16 kilometer hoogte. Het resterende ozon (90%) komt voor in de stratosfeer, voornamelijk tussen de bovenkant van de troposfeer en ongeveer 50 kilometer hoogte. De hoge concentratie ozon in de stratosfeer wordt vaak aangeduid als de 'ozonlaag' omdat deze wereldwijd de Aarde omvat. Toch komt ozon relatief weinig voor in de atmosfeer. In de piek van de ozonlaag in de stratosfeer zijn er tot 12.000 ozonmoleculen voor elke miljard lucht moleculen. De meeste lucht moleculen zijn ofwel zuurstof (O_2 : 21%) of stikstof (N_2 : 78%) moleculen. In de troposfeer is veel minder ozon aanwezig, typisch 20 tot 100 ozonmoleculen voor elk miljard lucht moleculen.

Stel je voor dat alle ozon zich bevindt in een laag boven de grond op zeeniveau. Dan heeft de ozonlaag een gemiddelde dikte van 3 millimeter. Op grote hoogte is deze laag vele malen dikker maar toch spreken we graag van de 'dikte van de ozonlaag' om de hoeveelheid ozon in een verticale kolom boven je hoofd uit te drukken.

Figuur V1-1 Ozon en zuurstof. Een molecuul van ozon (O_3) bevat drie zuurstofatomen (O) die door elektronenparen met elkaar zijn verbonden. Zuurstofmoleculen (O_2), die 21% van de Aarde atmosfeer vormen, bevatten twee zuurstofatomen.



Figuur V1-2: Ozon is aanwezig in de lagere atmosfeer vlak boven het aardoppervlak, genaamd de troposfeer, en hoog boven het aardoppervlak, genaamd de stratosfeer. Het meeste ozon bevindt zich in de stratosfeer, in de 'ozonlaag'. Verhogingen van de ozonconcentratie in de buurt van het aardoppervlak treden op als gevolg van luchtvervuiling door menselijke activiteiten. Merk op dat men hier spreekt van de ozonconcentratie in termen van een verhouding (aantal ozonmoleculen per aantal lucht moleculen) en houdt rekening met het gegeven dat met toenemende hoogte de luchtdruk en dus de luchtdichtheid afneemt.



Vraag 2: Hoe wordt ozon gevormd in de atmosfeer?

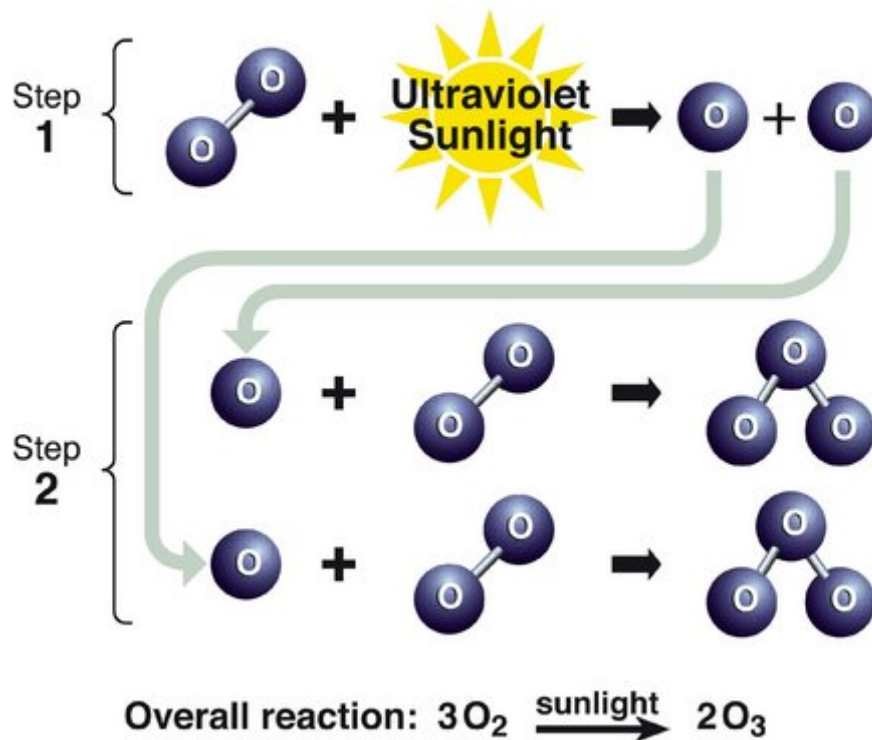
Ozon wordt in de hele atmosfeer gevormd in chemische processen die zonlicht nodig hebben.

Ozon in de stratosfeer wordt van nature gevormd in chemische reacties waarbij zuurstofmoleculen, die samen 21% van de atmosfeer vormen, en ultraviolet zonlicht betrokken zijn. In de eerste stap breekt de absorptie van zonlicht een zuurstofmolecuul (O_2) op in twee losse zuurstofatomen ($2 O$) (zie Figuur V2-1). In de tweede stap combineert elk los zuurstofatoom met een zuurstofmolecuul om zo een ozonmolecuul (O_3) te produceren. Deze chemische reacties treden voortdurend en overal op waar ultraviolet zonlicht aanwezig is in de stratosfeer. De grootste productie van ozon gebeurt daarom ook in de stratosfeer boven de tropische gebieden. De productie van ozon in de stratosfeer wordt gecompenseerd door de absorptie van ultraviolet zonlicht, waarbij ozon weer uiteenvalt in een zuurstofmolecuul (O_2) en een los zuurstof atoom (O), en in chemische reacties met vele andere stoffen in de atmosfeer. In deze rol fungeert ozon ook nog als een van de schoonmakers van de atmosfeer.

In de lagere atmosfeer (troposfeer) wordt ozon gevormd onder invloed van zonlicht in een reeks van chemische reacties van natuurlijk voorkomende gassen en gassen uit bronnen van luchtverontreiniging, zoals koolwaterstoffen en stikstofbevattende gassen. Deze stoffen komen vooral voor in uitlaatgassen van auto's, de uitstoot van gassen door industriële processen en door verbranding van fossiele brandstoffen. Troposferisch ozon is een onderdeel van luchtvervuiling genaamd 'smog' (de combinatie van de woorden 'smoke' en 'fog') en vormt een gezondheidsrisico voor mens en natuur. In deze rol fungeert ozon als een van de vervuilers van de atmosfeer.

Figuur V2-1. Ozonproductie in de stratosfeer. Ozon wordt in de stratosfeer geproduceerd in een twee-staps proces. In de eerste stap breekt de absorptie van ultraviolet zonlicht een zuurstofmolecuul op tot twee aparte zuurstofatomen. In de tweede stap ondergaat elk atoom een bindende botsing met een ander zuurstofmolecuul tot een ozonmolecuul. In het totale proces reageren drie zuurstofmoleculen plus zonlicht tot twee ozonmoleculen. Een los zuurstof atoom (O) is net als ozon (O_3) chemisch gezien zeer reactief. Zo'n stof wordt ook wel radicaal genoemd.

Stratospheric Ozone Production



Vraag 3: Waarom maken we ons druk over atmosferisch ozon?

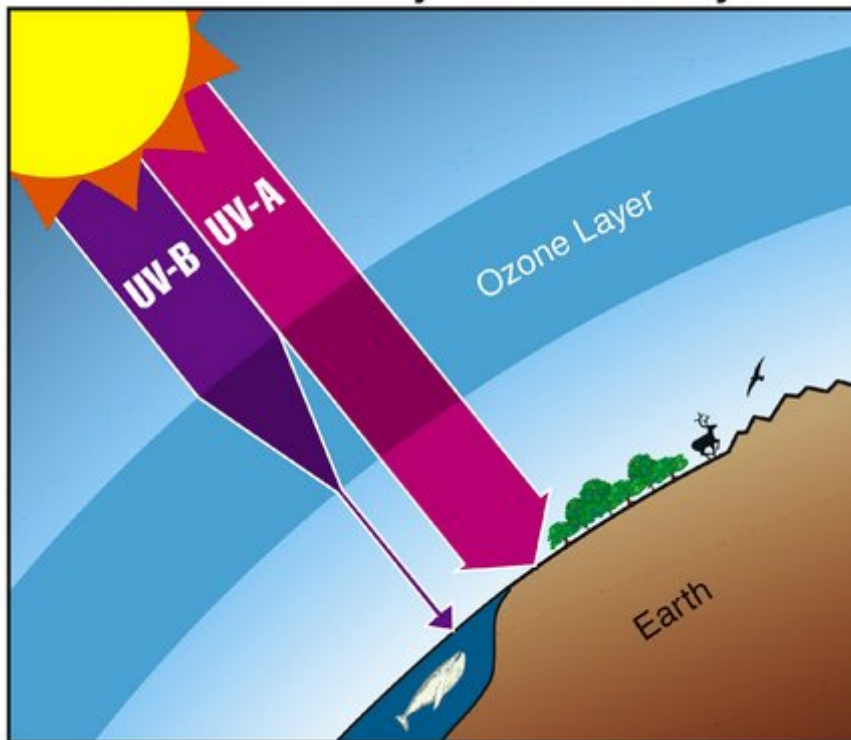
Ozon in de stratosfeer absorbeert een groot deel van de biologisch schadelijke ultraviolette straling van de zon. Blootstelling van de mens aan ultraviolette straling verhoogt het risico op huidkanker, staar, en een onderdrukt immuunsysteem. Deze blootstelling kan ook schade toebrengen aan het aardse leven van planten, eencellige organismen en aquatische ecosystemen. Vanwege deze waardevolle rol wordt ozon in de stratosfeer beschouwd als het 'goede' ozon.

Hier tegenover staat het 'slechte' ozon, een teveel aan ozon dichtbij het aardoppervlak dat wordt gevormd in de aanwezigheid van luchtvervuilende stoffen. Een sterk toegenomen concentratie van troposferisch ozon kan zeer schadelijk zijn voor mensen, planten en andere levende systemen, omdat in de chemische reactie met ozon de moleculen in celwanden en in DNA worden vernietigd of gewijzigd. Overmatige blootstelling aan ozon vermindert de opbrengst van gewassen en de groei van bossen. Bij de mens kan de blootstelling aan hoge ozonconcentraties de longcapaciteit verminderen; pijn op de borst veroorzaken; irritaties van de keel en hoesten veroorzaken; en reeds bestaande aandoeningen met betrekking tot de gezondheid van het hart en de longen verergeren.

Tenslotte is er nog het overal van nature en in lage concentraties voorkomende ozon dat helpt bij het verwijderen verontreinigende stoffen uit de atmosfeer.

Figuur V3-1. UV-B bescherming van de ozonlaag. De ozonlaag bevindt zich in de stratosfeer en omvat de gehele aarde. Daarom spreekt men van een 'ozonlaag', waarbij 'ozonschil(d)' wellicht een beter woord zou zijn. UV-B straling met een golflengte van 280-315 nanometer (nm) afkomstig van de Zon wordt gedeeltelijk geabsorbeerd door de ozonlaag. Als gevolg daarvan is de intensiteit van UV-B straling die het aardoppervlak bereikt sterk verminderd. UV-A straling (315-400 nm golflengte) en andere golflengten van zonnestraling worden niet sterk geabsorbeerd door de ozonlaag. Onder invloed van deze straling produceert de menselijke huid bijvoorbeeld vitamine-D.

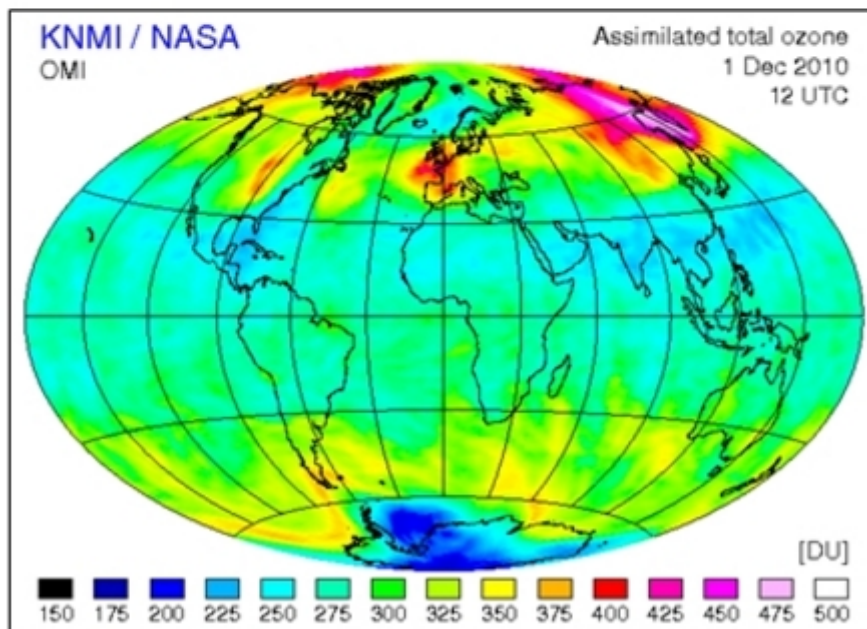
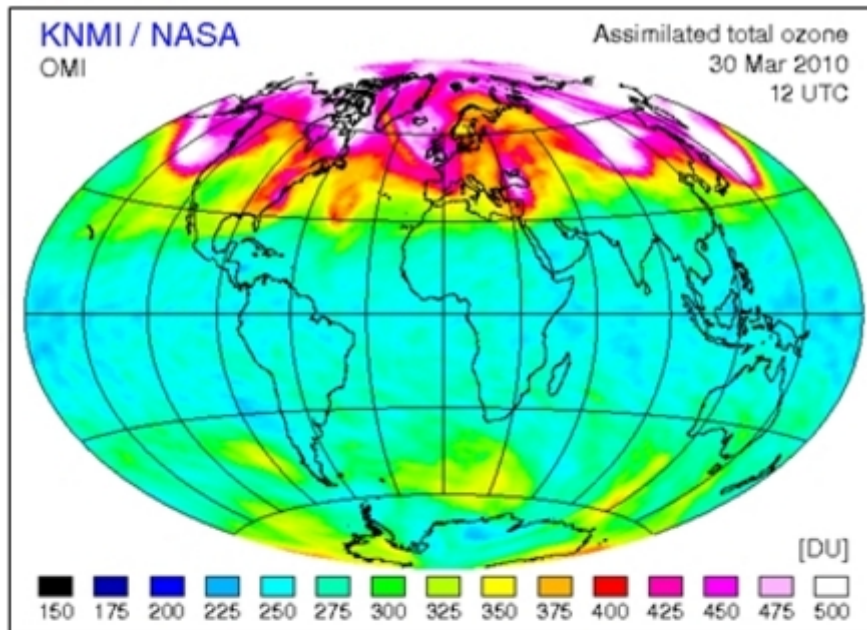
UV Protection by the Ozone Layer



Vraag 4: Is de dikte van de ozonlaag uniform over de hele wereld?

Nee, de dikte van de ozonlaag, oftewel de totale hoeveelheid ozon in een verticale kolom boven het oppervlak van de Aarde, varieert met de locatie op Aarde en op tijdschalen die variëren van een dag tot hele seizoenen en zelfs langer. Deze variaties worden vooral veroorzaakt door de stratosferische winden en de chemische productie en vernietiging van de ozonlaag. De ozonlaag is over het algemeen het dunst bij de evenaar en de dikst in de buurt van de polen vanwege de persistente windpatronen en dus ook de route van het transport van ozon in de stratosfeer. De totale hoeveelheid ozon in een kolom boven een willekeurige locatie op het aardoppervlak, ook wel de ozonkolom genoemd, wordt bepaald door het meten van alle ozon in de atmosferische kolom recht boven die locatie. Deze ozonkolom wordt uitgedrukt in Dobson Units, aangeduid als 'DU' ($1 \text{ DU} = 2.69 \times 10^{16}$ ozonmoleculen per vierkante centimeter). Typische waarden variëren tussen de 200 en 500 DU met een wereldwijd gemiddelde van ~ 300 DU. Een ozonkolomdikte van 300 DU is op zeeniveau gelijk aan een laag van zuiver ozongas met een dikte van slechts 3 millimeter.

Figuur V4-1. Totale hoeveelheid ozon. De totale hoeveelheid ozon, ook wel ozonkolom genoemd, wordt verkregen door het meten van al het ozon dat zich in de atmosfeer bevindt boven een bepaalde locatie op het aardoppervlak. Ozonkolom waarden worden gerapporteerd in 'Dobson Units [DU]', zoals bijvoorbeeld gemeten door het OMI satellietinstrument vanuit de ruimte. De ozonkolom varieert met de breedtegraad, de lengtegraad, en het seizoen, met de grootste waarden op hoge breedtegraden en de laagste waarden in tropische gebieden. Op de meeste locaties varieert de ozonkolom met de tijd op dagelijkse basis maar ook op tijdschalen van seizoenen wanneer ozonrijke lucht wordt verplaatst over de hele wereld door de stratosferische winden. De lage ozonkolomwaarden boven Antarctica in het plaatje van 1 december 2010 zijn onderdeel van het 'ozongat' van het Antarctische voorjaar van 2010 (zie Vraag 11).



Vraag 5: Hoe wordt ozon gemeten in de atmosfeer?

De concentratie van ozon in de atmosfeer wordt gemeten door een grote verscheidenheid aan technieken (zie figuur V5-1). Deze technieken maken gebruik van de unieke optische en chemische eigenschappen van ozon. Er zijn twee belangrijke categorieën van meettechnieken: (i) plaatselijke metingen oftewel lokale metingen en (ii) 'remote sensing' metingen oftewel metingen op afstand.

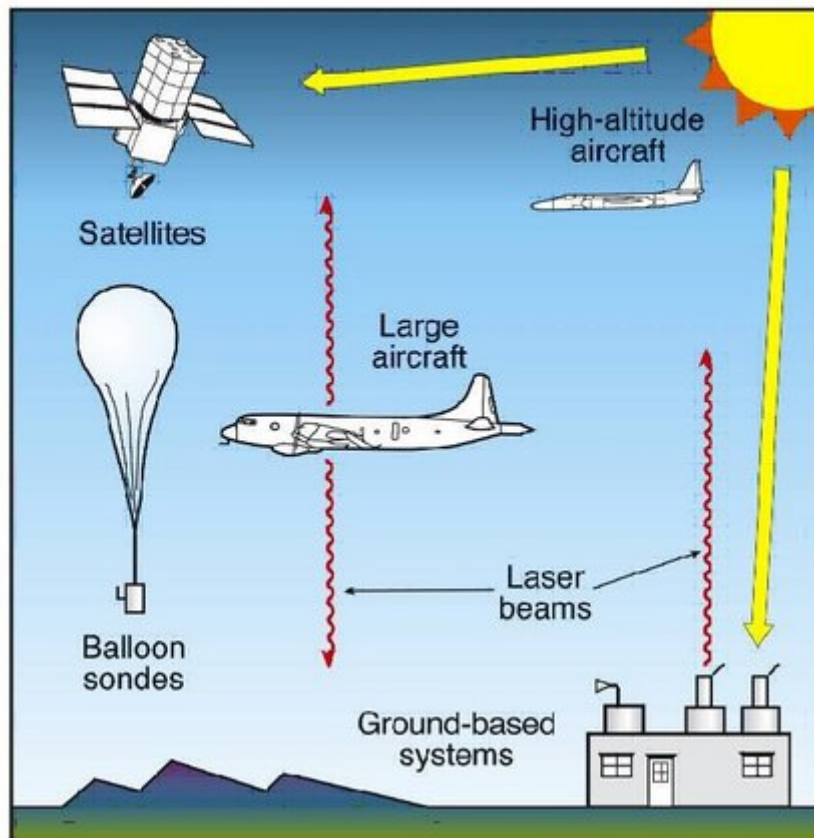
Plaatselijke metingen van atmosferisch ozon worden gedaan door het betreffende meetinstrument lucht te laten aanzuigen en deze te analyseren (i) door het meten van de absorptie van ultraviolet (UV) of (ii) door het meten van de elektrische stroom geproduceerd door een chemische reactie van ozon met kaliumjodide zout in een waterige oplossing. Op dit laatste principe is de zogenaamde 'ozonsonde' gebaseerd die de ozonconcentratie meet vanaf de lancering aan de grond tot een hoogte van 35 km of meer. Ozonsondes worden regelmatig gelanceerd op vele plaatsen over de hele wereld.

'Remote sensing' metingen zijn metingen van ozonconcentraties op grote afstanden van het betreffende instrument die worden verkregen door het optisch detecteren van de aanwezigheid van

ozon. Bijvoorbeeld, satellieten maken gebruik van de absorptie van UV-zonlicht door de atmosfeer om ozon te meten over bijna de hele wereld op een dagelijkse basis. Optische instrumenten aan de grond meten het zonlicht dat door de atmosfeer heen de grond heeft bereikt en analyseren deze als functie van de golflengte om zo de hoeveelheid ozon onderweg te bepalen. Voorbeelden zijn de optische spectrometers zoals ontworpen en gebouwd door Dobson en Brewer.

Figuur V5-1. Ozonmetingen. Ozon wordt overal in de atmosfeer bemeaten met instrumenten op de grond, aan boord van vliegtuigen en ballonnen, en vanuit satellieten. Op verschillende locaties over de hele wereld worden regelmatig bepalingen gedaan van de hoeveelheid ozon in de atmosfeer. Sommige instrumenten meten ozon in lokaal bemonsterde lucht zoals ballonsondes. Anderen meten ozon op afstand zoals satellieten. De meetinstrumenten verschillen sterk; de metingen op afstand worden gedaan met optische technieken, met de Zon en lasers als lichtbronnen. De plaatselijke metingen gebruiken chemische reacties die uniek zijn voor ozon.

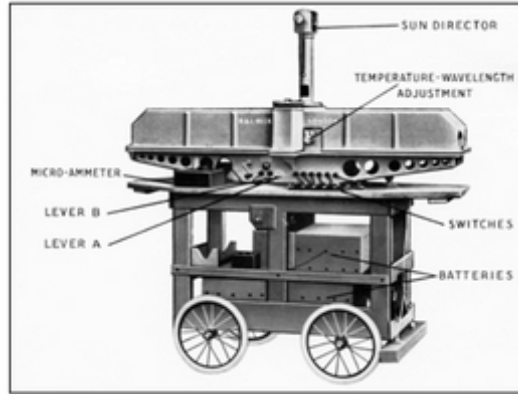
Measuring Ozone in the Atmosphere



Intermezzo I1 : Global Ozone Dobson Network

Het eerste instrument voor de routinematige bepaling van de totale hoeveelheid ozon werd ontwikkeld door Gordon M.B. Dobson in de jaren 1920. Het instrument, de zogenaamde Dobson spectrofotometer, meet de intensiteit van het zonlicht op twee ultraviolette golflengten: een die sterk wordt geabsorbeerd door ozon en een die zwak wordt geabsorbeerd. Het verschil in lichtintensiteit in de twee golflengten wordt gebruikt om de totale hoeveelheid ozon boven de meetlocatie te bepalen. In 1957 werd een wereldwijd netwerk van grondstations uitgerust met een Dobson instrument opgericht als onderdeel van het Internationaal Geofysisch Jaar. Vandaag de dag zijn er op ongeveer 100 locaties verspreid over de hele wereld Dobson instrumenten op grondstations aanwezig (van de zuidpool, Antarctica (90°S), tot op Ellesmere Island, Canada (83°N)) waarmee routinematig de totale ozonkolom wordt bemeaten. De metingen zijn begonnen voor het tijdperk van ozonmetingen vanuit de ruimte en zijn gebruikt voor de validatie van de satellietwaarnemingen. Baanbrekende wetenschappers worden van oudsher vereerd door het naar hen vernoemen van fysische eenheden. Vandaar dat de meeteenheid voor de totale hoeveelheid ozon de 'Dobson eenheid' is genaamd (zie V4).

Figuur I1-1 G.M.B. Dobson (25 februari 1889 - 11 maart 1976) en zijn mobiele Dobson spectrofotometer weergegeven op een prachtige industriële tekening.



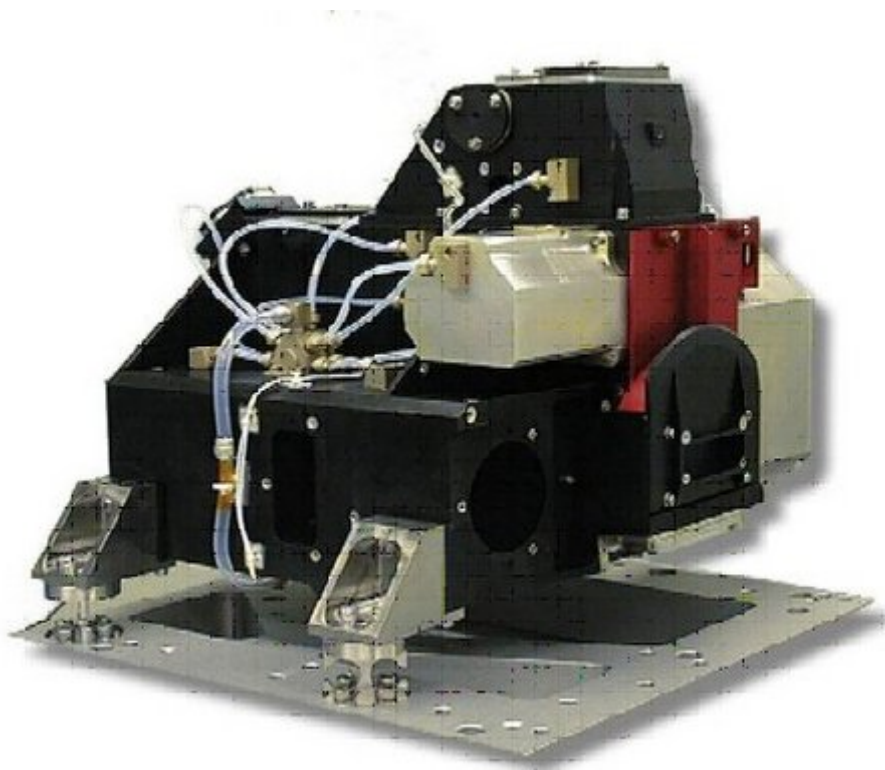
Figuur I1-2: Dobson instrument nummer 40 nog altijd werkzaam te Ukkel, België.



Intermezzo I2 : Het Nederlands-Finse Ozone Monitoring Instrument

Het Nederlands-Finse Ozone Monitoring Instrument (OMI) is een satellietinstrument dat dagelijks wereldwijd metingen doet aan de samenstelling van de atmosfeer. OMI is gericht op het observeren van de ozonlaag, luchtvervuiling, en gassen die een rol spelen bij klimaatveranderingen en meet ozon, stikstofdioxide, aërosolen, wolken en andere sporengassen. De concentraties van deze stoffen worden bepaald door een techniek genaamd absorptiespectroscopie: OMI meet heel nauwkeurig het door de Aarde en atmosfeer weerkaatste zonlicht en ook het zonlicht zelf. Wetenschappers vergelijken deze metingen met elkaar om zo de mate van absorptie door deze stoffen in de atmosfeer te bepalen. Zie als voorbeeld Figuur V4-1, waar dagelijkse satelliet-ozonkaartjes zijn weergegeven. Het unieke aan OMI is dat het in staat is om de volledige atmosfeer in één dag in kaart te brengen met uitzonderlijk veel detail: een onderscheidend vermogen van 20 km x 20 km, of anders gezegd, met een overzicht van de Aarde op de schaal van een gemiddeld grote stad als Rotterdam. De dikte van de ozonlaag in de stratosfeer maar ook de mate van luchtvervuiling in de troposfeer wordt met OMI dagelijks wereldwijd waargenomen. Meer informatie over OMI kunt u vinden in het recent verschenen artikel over OMI in het kenniscentrum, in de brochure 'OMI – oog voor detail' welke op internet beschikbaar is op, op de OMI website op de EOS-Aura website.

Figuur I2-1: Het optische gedeelte van het OMI instrument. Het OMI instrument bestaat uit drie delen. Het optische gedeelte (van Nederlandse makelij) zoals hiernaast afgebeeld vormt het hart van het instrument; de optische spectrometer bemeet de Aarde met een brede kijkhoek en ontrafelt het ingevangen licht als functie van de golflengte en kijkhoek. Het elektronische gedeelte (van Finse makelij) leest de detectorgegevens uit en geeft deze door aan het satellietplatform wat de OMI informatie klaarstoomt voor verzending naar grondstations op Aarde. Omdat EOS-Aura een Amerikaans platform is zit er nog een schakeldoos tussen (van Amerikaanse makelij) om de systemen met elkaar te laten communiceren. OMI zoals hier afgebeeld is ~100 liter groot en ~25 kg zwaar.



Lange meetseries van ozon en andere gassen zijn voor het doen van klimaatonderzoek erg belangrijk en OMI zet de bestaande reeksen voort met nog gedetailleerdere metingen. Zo zet OMI de unieke ruim 30 jaar lange ozonmeetreeks van de Amerikaanse instrumenten TOMS (Total Ozone Monitoring Spectrometer) en SBUV (Solar Backscatter Ultraviolet Instrument) voort. OMI is onderdeel van de NASA klimaat- en milieusatelliet EOS-Aura. Europese voorgangers van OMI zijn GOME op de ESA ERS-2 satelliet en SCIAMACHY op de ESA klimaat- en milieusatelliet ENVISAT. Ook in deze projecten speelt Nederland en het KNMI een belangrijke rol. OMI is de eerste van een nieuwe generatie ozonsatellietinstrumenten door het gebruik van een tweedimensionale detector, een zogenaamde CCD (zoals in een digitale camera). Door het geraffineerde optische ontwerp van TNO is OMI een klein en licht satellietinstrument van maar een paar schoendozen groot.

OMI Kenniscentrum (zie verder lezen)

http://www.knmi.nl/cms/content/94894/ozone_monitoring_instrument

OMI Brochure (zie verder lezen)

http://www.knmi.nl/omi/documents/pr/omi-folder_def.pdf

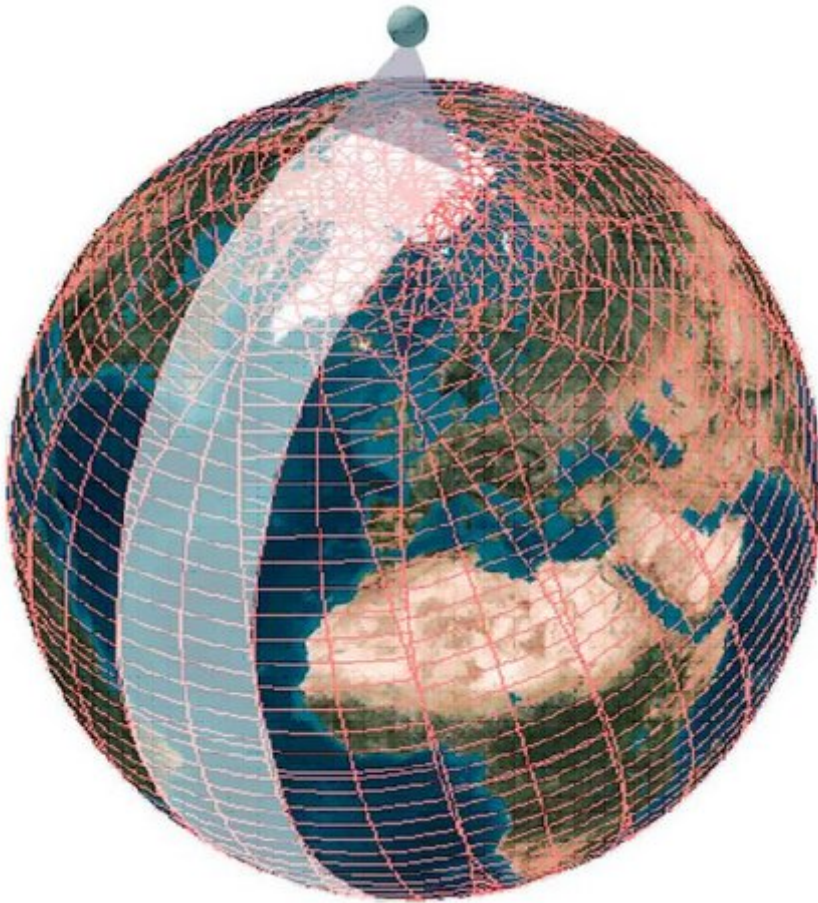
OMI Website (zie verder lezen)

<http://www.knmi.nl/omi>

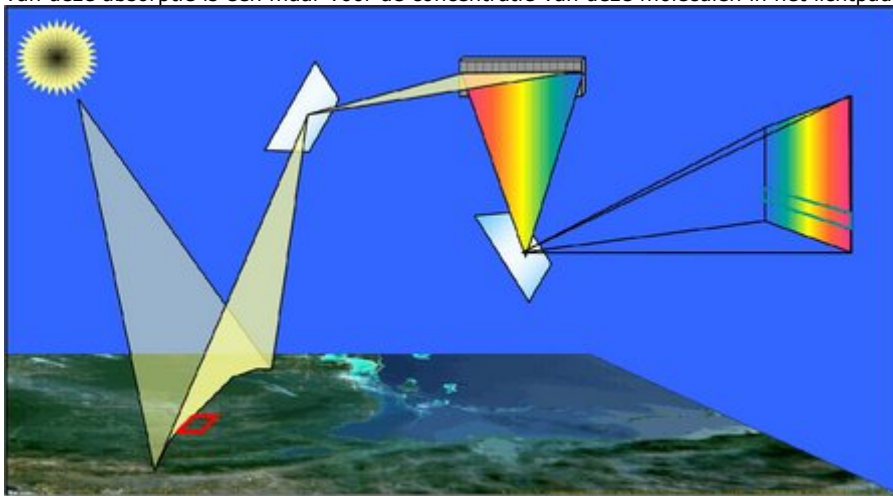
Aura Website (zie externe links)

<http://aura.gsfc.nasa.gov/instruments/omi.html>

Figuur I2-2: De dagelijkse wereldwijde bedekking door OMI geprojecteerd op de aarde. De NASA satelliet genaamd EOS-Aura waarop OMI meelift draait in een baan om de Aarde welke altijd over de polen voert. Aan de dagkant van de Aarde loopt deze baan van zuid naar noord. Bij elke omloop meet OMI aan de dagkant een strook met een breedte van 2600 km, waardoor elke plek op Aarde minstens één maal per dag gezien wordt. Bij de polen is er een grote overlap tussen opeenvolgende stroken en wordt dezelfde plek op Aarde meerdere malen bekeken. De strook van 2600 km is onderverdeeld in 60 individuele meetgebieden met een hoog ruimtelijk onderscheidend vermogen vanaf 20 km x 20 km. Elke baan duurt ongeveer 100 minuten, en na 14 banen (één dag) heeft OMI de gehele Aarde bekeken.



Figuur 12-3: Hyperspectrale waarnemingen. De zon schijnt 'wit' licht op planeet Aarde. Dit licht bevat vele kleuren waaronder het zichtbare gedeelte van het elektromagnetische spectrum maar ook kortgolvlige ultraviolette straling en langgolvlige infrarood straling. De moleculen, waterdruppeltjes en stofdeeltjes in de atmosfeer verstrooien dit licht en een deel keert terug naar de ruimte. De oppervlakte van de Aarde verstrooit en weerkaatst het zonlicht. Het OMI instrument vangt dit weerkaatste zonlicht in een brede kijkhoek op en ontrafelt het als functie van de golflengte en kijkhoek. Het rode vierkant geeft een positie op Aarde weer als satelliet grondpixel en de blauwe balk geeft de ontrafeling in golflengten weer van de intensiteit gemeten boven deze positie op Aarde. Ieder molecuul laat een unieke vingerafdruk achter in het gemeten spectrum door bij specifieke golflengten licht te absorberen. De sterkte van deze absorptie is een maat voor de concentratie van deze moleculen in het lichtpad.

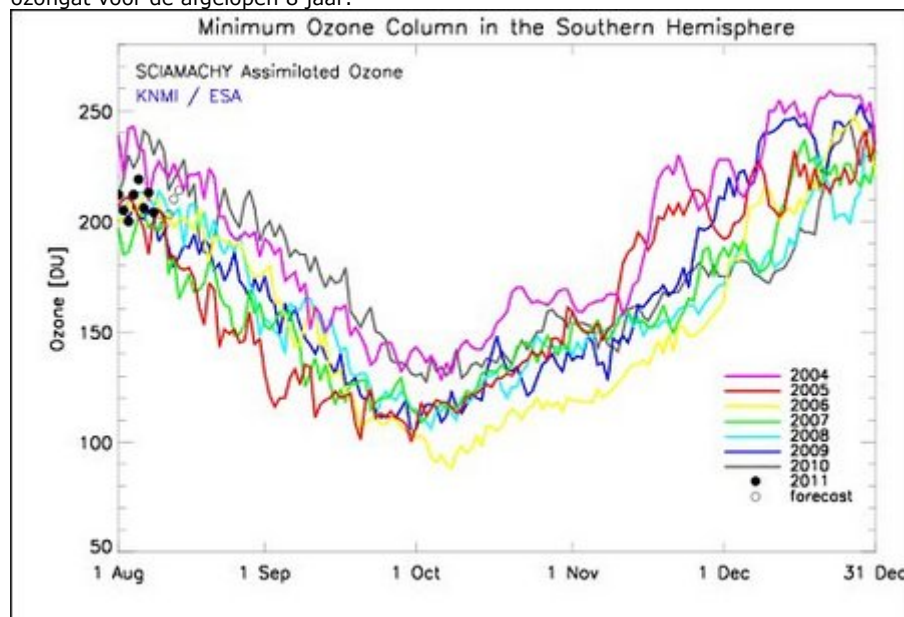


Intermezzo 13: TEMIS - Tropospheric Emission Monitoring Internet Service op het KNMI

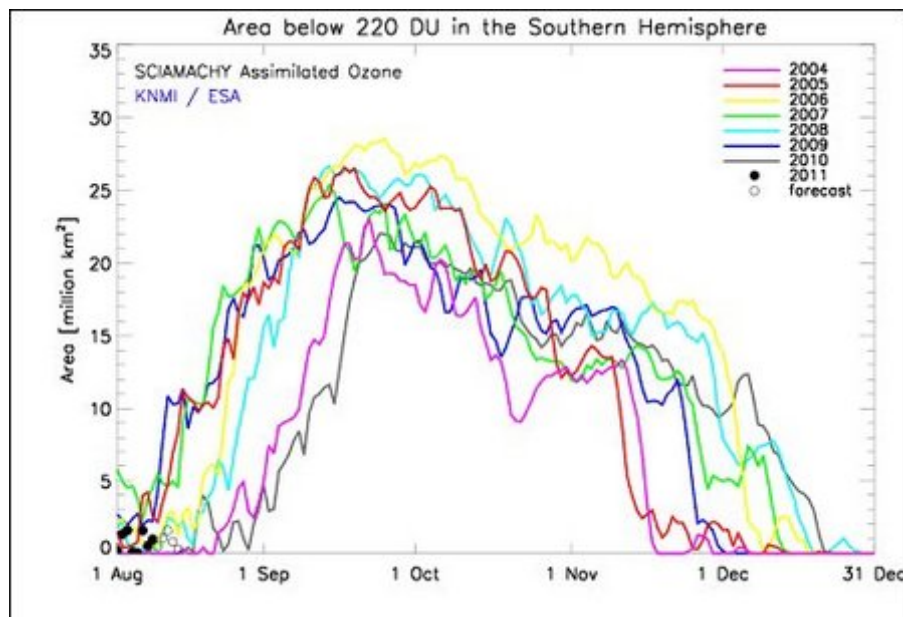
Het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) is hét nationale instituut voor weer, klimaat en seismologie. Het KNMI verstrekt weerinformatie ten behoeve van veiligheid, economie en duurzaam milieu aan het algemene publiek, de overheid, de luchtvaart en de scheepvaart. Voor de ontwikkelingen op lange-termijn verricht het KNMI onderzoek naar de veranderingen in het klimaat. Het beschikbaar stellen van aanwezige kennis, data en informatie is een kernactiviteit. Uiteraard kan dit slechts voor zover dit past binnen de geldende internationale overeenkomsten. Het instituut is een agentschap van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu. De taken van het KNMI zijn vastgelegd in de Wet op het KNMI (zie externe links)

Op het KNMI is veel kennis aanwezig over de samenstelling van de atmosfeer en vooral over het gebruik van satellietwaarnemingen voor het vaststellen van de concentraties van sporengassen in de atmosfeer. In dit intermezzo wordt als voorbeeld aangehaald de TEMIS website van het KNMI en ESA (<http://www.temis.nl> zie externe links), wat staat voor Tropospheric Emission Monitoring Internet Service. Via de TEMIS website worden satellietgegevens over de ozonlaag, over luchtvervuiling, over ultraviolette stralingsdoses aan de grond en over vulkaanuitbarstingen beschikbaar gesteld aan het algemene publiek. Zo houdt de TEMIS website ieder jaar de opkomst en ondergang van het Antarctische ozongat nauwkeurig bij op basis van de metingen van ondermeer de OMI en SCIAMACHY satelliet instrumenten. De twee plaatjes hieronder laten de gegevens zien van de minimale ozonkolom en de grootte van het ozongat voor de jaren 2004-2010. Het jaar 2006 was een jaar van twee records; Het grootste en diepste ozongat ooit gemeten. De spreiding tussen de diverse jaren laat zien dat het ozongat een bewegelijk en variabel fenomeen is. Afhankelijk van de meteorologische omstandigheden boven het zuidpoolgebied begint het vroeg of soms heel laat te ontstaan, breekt het vroeg op of pas heel laat en gaat het fenomeen door diverse pieken en dalen gedurende haar levensduur. Deze plaatjes maken ook duidelijk dat de vraag wanneer de ozonlaag zich heeft hersteld een lastige is. We zullen in de komende decennia de ozonlaag goed moeten blijven meten en onderzoeken om die vraag te kunnen beantwoorden.

Figuur I3-1: Minimale ozonkolomwaarde. Deze figuur geeft per dag de minimale waarde van de ozonkolom weer. De ozonkolom is een maat voor de ozonlaagdikte, zoals gemeten door satellieten in het gebied van het Antarctische ozongat voor de afgelopen 8 jaar.



Figuur I3-2: Afmeting van het Antarctische ozongat. In deze figuur wordt de afmeting van het Antarctische ozongat per dag weergegeven voor de afgelopen 8 jaar zoals gemeten door satellieten. De weergegeven grootte is het gebied uitgedrukt in km² waarboven de totale ozonkolom een waarde lager dan 220 DU heeft. Deze 220 DU is de laagste waarde zoals vroeger gemeten boven Antarctica voor het ontstaan van het ozongat. Waarden lager dan 220 DU duiden daarom op onnatuurlijk lage ozonkolomwaarden.



II. HET OZONAFBRAAK PROCES

Vraag 6: Wat zijn de belangrijkste stappen in het proces van de vorming van het ozongat in de stratosfeer zoals veroorzaakt door menselijke activiteiten?

De eerste stap in de afbraak van ozon in de stratosfeer door menselijke activiteiten is de emissie aan het oppervlak van de Aarde van ozonafbrekende gassen die chloor- en broom bevatten. Denk hierbij aan drijfgassen in spuitbussen en de koelvloeistoffen in airconditioningsystemen. Deze gassen hopen zich op in de lagere atmosfeer omdat ze niet reactief zijn (chemisch inert) met andere stoffen, en dus een lange levensduur hebben, en omdat ze niet goed oplosbaar zijn in regen of sneeuw, en dus niet neerslaan met neerslag. Uiteindelijk worden deze gassen in de tropische convectieve gebieden naar de stratosfeer getransporteerd door de atmosferische circulatie tot ver boven de ozonlaag, waar ze onder invloed van het ultraviolette licht van de Zon worden gekraakt tot meer reactieve gassen. Deze nieuwe gassen gaan dan deelnemen aan chemische reacties die de ozonlaag aantasten. Wanneer deze lucht tenslotte terugkeert naar de lagere atmosfeer als onderdeel van de grootschalige atmosferische circulatie, worden deze reactieve chloor- en broomgassen alsnog verwijderd uit de Aardse atmosfeer door regen en sneeuw; maar ook dit is weer een traag proces. Op basis van het bovenstaande is voor deze drijfgassen en koelvloeistoffen een lange levensduur in de atmosfeer te verwachten, wat een verklaring geeft voor het trage herstel van de ozonlaag wanneer er per direct geen van deze stoffen meer zou worden uitgestoten.

Intermezzo 14: CFK's Zijn Zwaarder Dan Lucht

Chloorfluorkoolwaterstoffen, afgekort CFK's, en andere halogeenbrongassen, genaamd halonen, bereiken de stratosfeer ondanks het feit dat ze zwaarder zijn dan lucht. De voornaamste brongassen worden allen uitgestoten in de lagere atmosfeer (troposfeer) en hopen zich daar op vanwege hun lange levensduur en chemische inertie. De verticale verdelingen van gassen in de troposfeer en de stratosfeer zijn niet heel sterk bepaald door het moleculair gewicht van de gassen omdat de lucht waar zij deel van uitmaken voortdurend in beweging is, als gevolg van wind en convectie, over veel grotere afstanden dan sedimentatie in dezelfde tijd. Luchtbewegingen zorgen ervoor dat de meeste brongassen binnen een paar maanden na uitstoot horizontaal en verticaal goed gemengd worden in de troposfeer. Het is deze goed gemengde lucht die de lagere stratosfeer binnenkomt door de opwaartse stroming van lucht in de convectieve delen van de tropen, waarbij het tegen die tijd niet meer uitmaakt op welke locatie deze gasmoleculen zijn uitgestoten op het Aardoppervlak.

Metingen bevestigen dat halogeenbrongassen met een lange atmosferische levensduur goed gemengd zijn in de troposfeer en aanwezig zijn in de stratosfeer (zie figuur V8-2). De concentraties van deze gassen in deze gebieden komen overeen met de schattingen van de emissies zoals gerapporteerd door bedrijven en overheden. Metingen tonen ook aan dat gassen die 'lichter dan lucht' zijn, zoals waterstof (H_2) en methaan (CH_4), ook goed gemengd zijn in de troposfeer, zoals kan worden verwacht. Alleen op hoogtes ruim boven de troposfeer en de stratosfeer, zeg op meer dan 85 kilometer hoogte, waar de lucht bijzonder ijl is, neemt de invloed van wind en convectie af tot het punt waar zware gassen zich beginnen te scheiden van lichtere gassen als gevolg van sedimentatie door de zwaartekracht. Waterstof, maar ook helium, zijn twee van de weinige gassen die aan de zwaartekracht van de Aarde

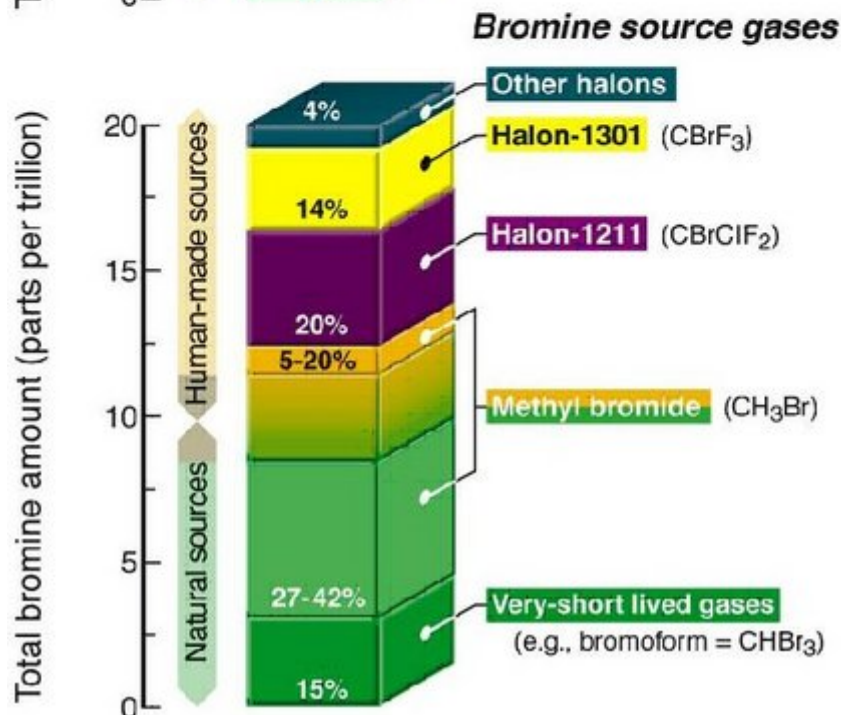
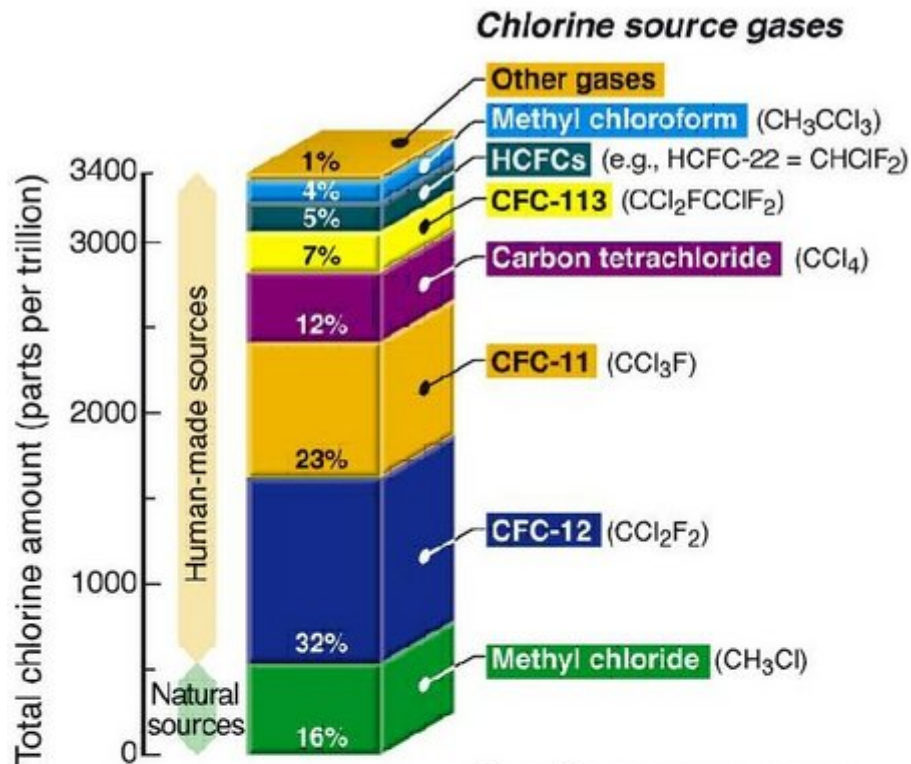
kunnen ontsnappen naar de interstellaire ruimte.

Vraag 7: Welke uitstoot door menselijke activiteiten leidt tot afbraak van de ozonlaag?

Bepaalde industriële processen en consumentenproducten zijn de oorzaak van de uitstoot van 'halogene brongassen' naar de atmosfeer. Deze gassen brengen chloor- en broom in de stratosfeer, die de afbraak van de ozonlaag veroorzaken. Bijvoorbeeld, chloorfluorkoolwaterstoffen (CFK's), ooit gebruikt in bijna alle koel- en airconditioningsystemen, bereiken uiteindelijk de stratosfeer, waar ze door ultraviolet zonlicht worden gekraakt en zo de ozonafbrekende chlooratomen vrijgeven. Andere voorbeelden van door de mens geproduceerde ozonlaagaantastende stoffen zijn de 'halonen' die worden gebruikt in brandblussers en die ozonafbrekende broomatomen bevatten. De productie en consumptie van alle belangrijke halogeenbrongassen door menselijke activiteiten zijn wereldwijd gereguleerd onder het Protocol van Montreal.

Figuur V7-1. Stratosferische brongassen. Een verscheidenheid van gassen brengt chloor- en broom naar de stratosfeer. Deze zogenaamde halogene brongassen worden uitgestoten door natuurlijke bronnen, maar vooral door menselijke activiteiten. De kolommen laten zien hoe de belangrijkste chloor- en broombrongassen bijdragen aan de totale hoeveelheden chloor- en broom in de stratosfeer zoals gemeten in 2004. Merk het grote verschil in de verticale schalen op: totaal chloor in de stratosfeer is 160 keer meer dan totaal broom. Menselijke activiteiten zijn verantwoordelijk voor het meeste chloor dat de stratosfeer bereikt. De CFK's zijn de meest voorkomende chloorhoudende gassen die vrijkomen door menselijke handelen. Methylchloride is de belangrijkste natuurlijke bron van chloor. HCFK's, de vervangers van CFK's die ook worden geregeld door het Protocol van Montreal, vormen een klein maar groeiend deel van chloorhoudende gassen. De categorie van 'andere gassen' omvat enkele kleine CFK's en gassen van een korte levensduur. Voor broom dat de stratosfeer bereikt zijn halonen en methylbromide de grootste bronnen. Beide gassen komen vrij bij menselijke activiteiten. Methylbromide heeft ook een sterke natuurlijke bron en de natuurlijke bronnen vormen een grotere fractie van het totale broom dan van het totaal chloor. (De eenheid 'deeltjes per triljoen' wordt hier gebruikt als een maat voor de concentratie van een gas in de lucht: 1 deel per triljoen (miljoen maal miljoen maal miljoen) duidt op de aanwezigheid van één molecuul van een gas per triljoen andere luchtmoleculen.)

Primary Sources of Chlorine and Bromine for the Stratosphere in 1999



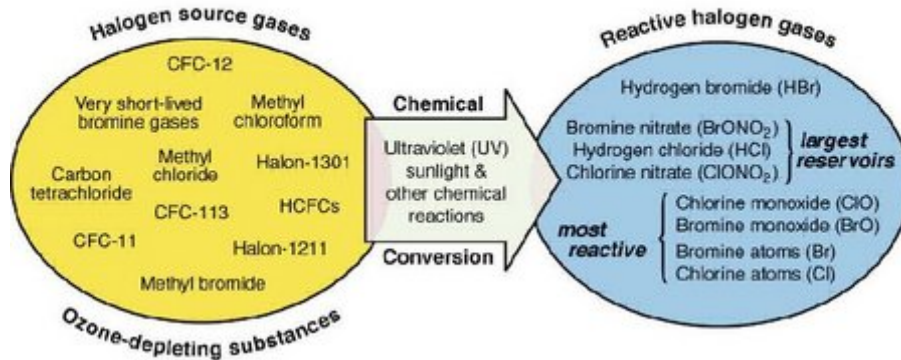
Vraag 8: Wat zijn de reactieve halogeengassen die ozon in de stratosfeer vernietigen?

De uitstoot door menselijke activiteiten en natuurlijke processen zijn de grote bronnen van chloor- en broombevattende gasen die uiteindelijk in de stratosfeer belanden. Wanneer ze blootgesteld worden aan de ultraviolette straling van de Zon, worden deze halogeen brongassen omgezet tot meer reactieve gasen die dan nog steeds chloor- en broom bevatten. Belangrijke voorbeelden zijn chlooroxide (ClO)

en broomoxide (BrO). Deze reactieve gassen nemen deel aan gekatalyseerde reactiecycli die efficiënt ozon vernietigen. Vulkanen kunnen ook chloorhoudende gassen uitstoten, maar deze gassen zijn goed oplosbaar in regenwater en ijs en zijn meestal 'uitgeregend' uit de atmosfeer voordat deze lucht de stratosfeer heeft bereikt.

Figuur V8-1. Omzetting van halogene brongassen. Halogene brongassen worden hoog in de stratosfeer chemisch en fysisch omgezet in de reactieve gassen die ozon afbreken. Deze omzetting vereist ultraviolet zonlicht en een aantal chemische reacties. De kortstondig levende gassen ondergaan enkele conversies in de troposfeer en regenen veelal uit. De reactieve halogene gassen bevatten al het chloor- en broom dat oorspronkelijk aanwezig was in de brongassen. De reactieve gassen worden onderverdeeld in reservoirgassen, die ozon niet vernietigen, en in de reactieve gassen, die deelnemen aan de afbraak van ozon in katalytische cycli (zie V9).

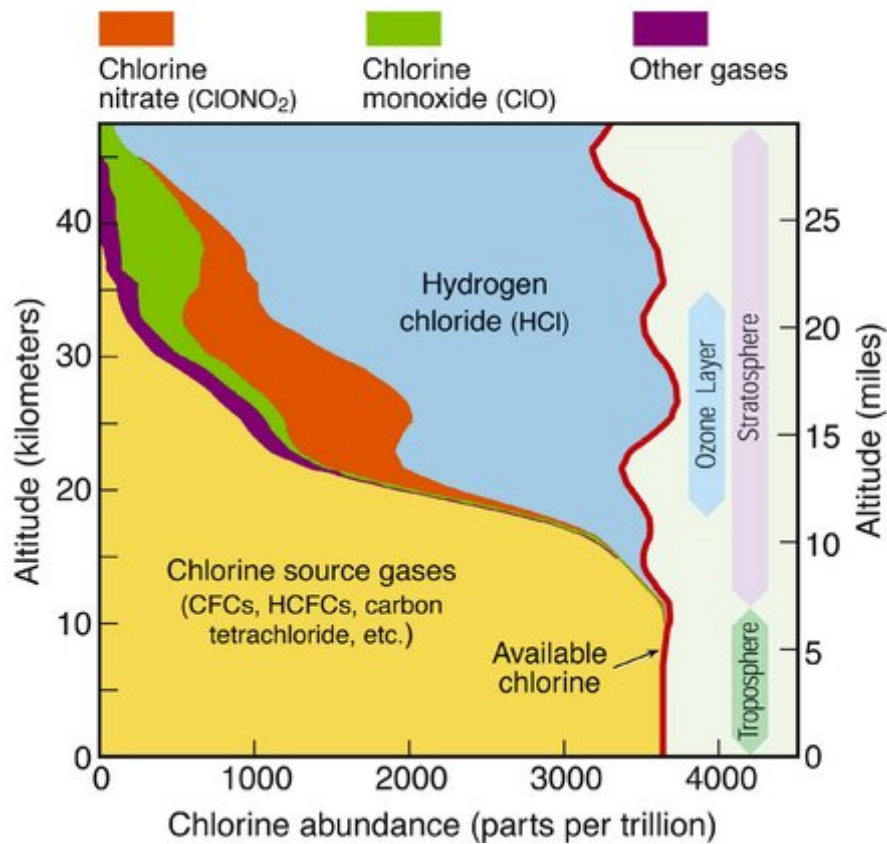
Stratospheric Halogen Gases



Figuur V8-2. De waarnemingen van reactief chloorgas. De figuur toont de concentratie van de reactieve chloorgassen en de brongassen van chloor als functie van de hoogte boven een locatie op Aarde op gematigde breedten. Deze gegevens worden vanuit de ruimte gemeten door satellietinstrumenten. In de troposfeer, beneden de 10 km hoogte is er geen reactief chloor aanwezig en is alle chloor vervat in de brongassen. Echter, in de stratosfeer (boven de troposfeer) is er veel meer reactief chloor aanwezig terwijl de concentratie van de brongassen duidelijk minder is als gevolg van de chemische reacties waarbij ultraviolet zonlicht deze stoffen omzet. (Zie Figuur V8-1). De reactieve gassen HCl, ClONO₂, en ClO worden dan gemaakt. De som van reactief en passief chloor is de totale hoeveelheid beschikbaar chloor en deze is nagenoeg constant in concentratie tot boven de 50 km hoogte. Op de hoogte van de ozonlaag komen helaas ook de ozonafbrekende stoffen het meest voor. (De eenheid "deeltjes per triljoen" is gedefinieerd in het bijschrift van figuur Q7-1.).

Measurements of Chlorine Gases from Space

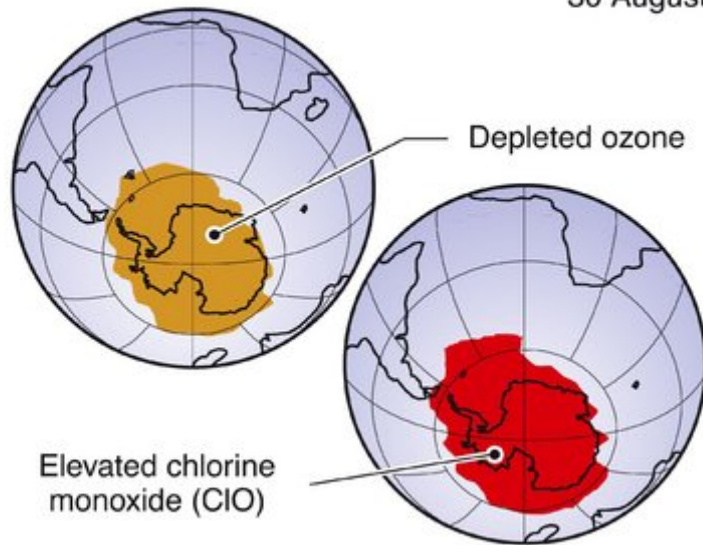
November 1994 (35°-49°N)



Figuur V8-3. Chloormonoxide en ozon gemeten boven Antarctica. Satellietinstrumenten meten de concentratie van ozon en de reactieve chloorgassen in de stratosfeer wereldwijd. Deze resultaten zijn hier weergegeven voor de Antarctische winter in het hooggebied van de ozonlaag. In de winter bereikt de concentratie van chloormonoxide (ClO) zeer hoge waarden (1500 deeltjes per triljoen), veel hoger dan elders waargenomen in de stratosfeer, omdat ClO wordt geproduceerd door chemische reacties op de oppervlakten van de deeltjes van de polaire stratosferische wolken (zie V10 voor uitleg). Deze hoge ClO concentraties houden gedurende 1 tot 2 maanden aan en bestrijken een gebied dat vaak groter is dan heel Antarctica zelf. Tegelijkertijd nemen de satellietinstrumenten een sterke afname van de concentratie aan ozon waar. De ozonlaag wordt dus dun daar waar ozonafbrekende stoffen talrijk aanwezig zijn.

Satellite Observations in the Lower Stratosphere

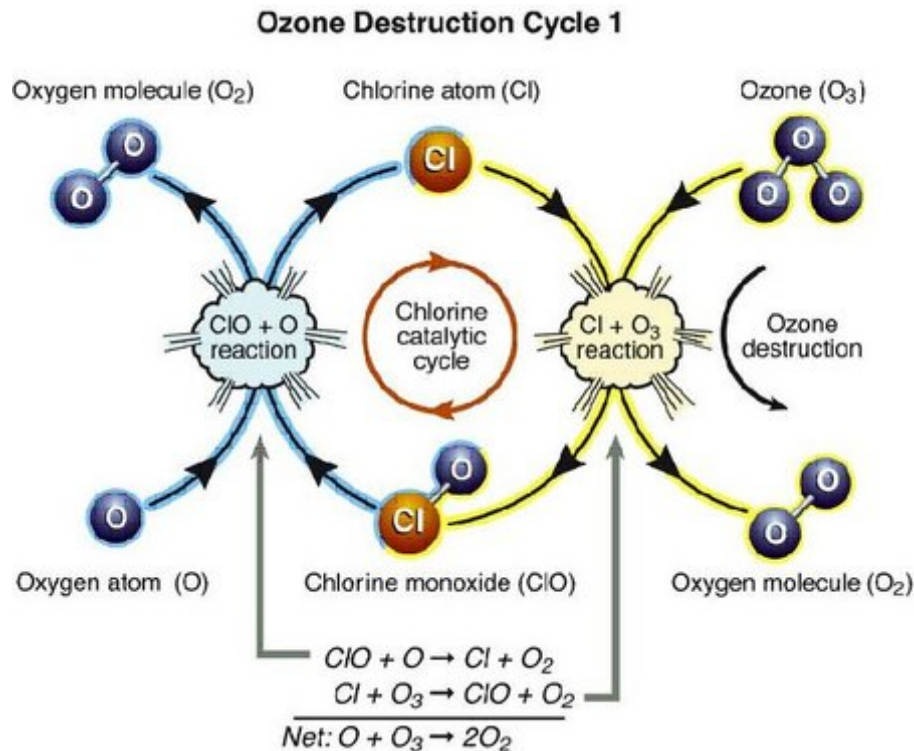
30 August 1996



Vraag 9: Wat zijn de reacties van chloor- en broom die de stratosferische ozonlaag vernietigen?

De reactieve gassen met chloor- en broom vernietigen ozon in de stratosfeer in katalytische cycli die uit twee of meer afzonderlijke chemische reacties bestaan. Als gevolg daarvan kan een enkel chloor- of broomatoom vele honderden ozonmoleculen vernietigen, voordat het reageert met een ander gas om zo de cyclus te doorbreken. Op deze manier heeft een kleine hoeveelheid reactieve chloor of broom een grote uitwerking op de ozonlaag. Bepaalde chemische reacties van ozonafbraak worden het meest effectief in de poolgebieden omdat het reactief gas chlooroxide daar zeer hoge niveaus bereikt in de late winter en het vroege voorjaar.

Figuur V9-1. Afbraak van ozon; Cyclus 1. De vernietiging van ozon in cyclus 1 bestaat uit twee afzonderlijke chemische reacties met als netto uitkomst de chemische reactie van atomair zuurstof met ozon waarbij twee zuurstofmoleculen worden gevormd. De cyclus begint met ClO of Cl. Bij het starten met ClO is de eerste chemische reactie die van ClO met O om Cl en O₂ te vormen. Cl reageert vervolgens met, en vernietigd, ozon met ClO en O₂ als resultaat. Deze cyclus begint dan weer met een nieuwe chemische reactie van ClO met O. Omdat Cl of ClO terugkeert elke keer dat een ozon molecuul wordt vernietigd, wordt chloor beschouwd als een katalysator voor de afbraak van ozon. Atomaire zuurstof (O) wordt gevormd bij de absorptie van ultraviolet zonlicht door ozon of door zuurstof moleculen. Cyclus 1 is het belangrijkste in de stratosfeer op tropische en gematigde breedtegraden, waar ultraviolet zonlicht het meest intens is.



Figuur V9-2. Polaire afbraak van ozon; Cycli 2 en 3. De meer uitgebreide vernietiging van ozon vindt plaats in de poolgebieden, omdat daar de ClO concentraties hoge waarden bereiken. Nu wordt de cyclus geïnitieerd door de chemische reactie van ClO met een ander ClO molecuul (cyclus 2) of door de chemische reactie van ClO met BrO (cyclus 3). Beide cycli zijn uiterst efficiënt in het vernietigen van ozon. De netto chemische reactie in beide gevallen is twee ozonmoleculen vormen drie zuurstofmoleculen. De chemische reactie van ClO met BrO heeft twee routes naar de productgassen Cl en Br. Ozonvernietigingscycli 2 en 3 zijn katalytische chemische reacties, zoals geïllustreerd voor cyclus 1 in figuur V9-1, omdat chloor- en broomgassen reageren, maar ook weer worden gevormd in elke cyclus. Zonlicht is nodig om elke cyclus te voltooien en uiteindelijk weer ClO te vormen.

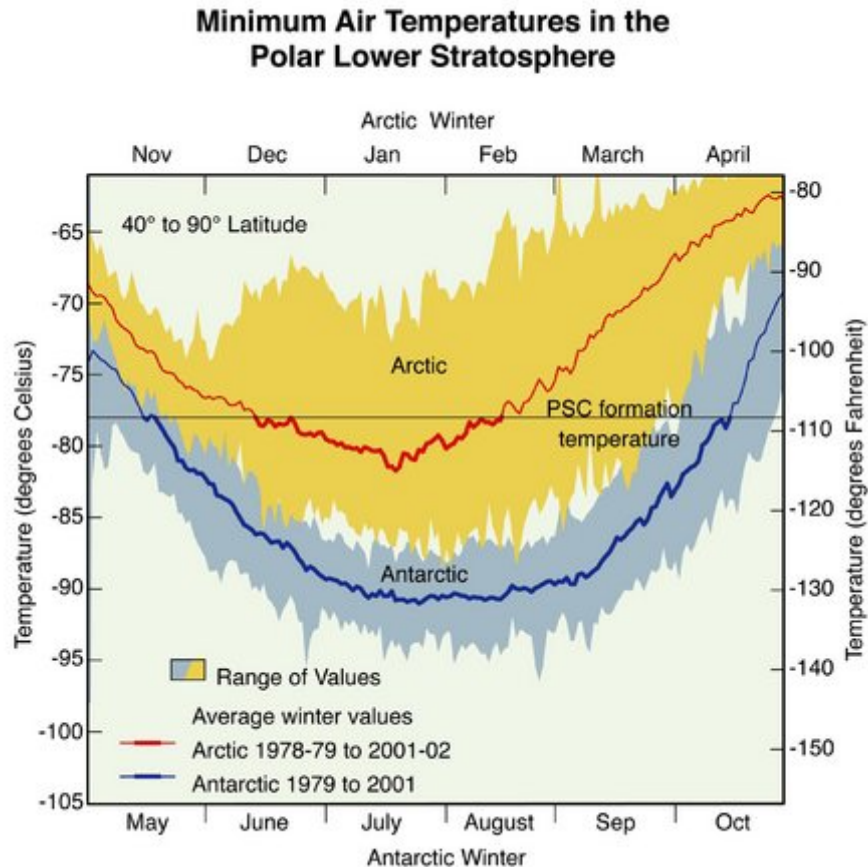


Vraag 10: Waarom is het 'gat in de ozonlaag' verschenen boven Antarctica terwijl de ozonlaag aantastende stoffen wereldwijd aanwezig zijn in de stratosfeer?

De ozonlaag aantastende stoffen zijn wereldwijd aanwezig in de stratosfeer en dus ook in de ozonlaag, omdat ze worden vervoerd over grote afstanden door de atmosferische luchtbewegingen. De ernstige afbraak van de ozonlaag boven Antarctica, beter bekend als het 'gat in de ozonlaag' boven de zuidpool, is het gevolg van de bijzondere meteorologische omstandigheden die daar heersen en nergens anders op de wereld voorkomen. De Antarctische stratosfeer is namelijk bijzonder koud en heeft vanwege de omringende polaire straalstroom slechts beperkte uitwisseling met de relatief warmere weersystemen op meer gematigde breedtegraden. Door de zeer lage temperaturen van de Antarctische stratosfeer komen daar unieke ijswolken voor, genaamd polaire stratosferische wolken (PSC). Op het oppervlak van de PSC deeltjes vinden bijzondere chemische reacties plaats die vrije chloor- en broomradicalen produceren, die het ozongat in de Antarctische lente veroorzaken zoals omschreven bij Vraag 9.

Figuur V10-1. Arctische en Antarctische temperaturen van de lagere stratosfeer. De luchttemperaturen van de lagere

stratosfeer in de noord- en zuidpoolgebieden bereiken hun minimale waarden in het lokale winterseizoen. De gemiddelde temperatuur boven Antarctica bereikt de -90°C in juli en augustus. Boven de noordpool komt deze in de buurt van de -80°C in januari en februari. De zogenaamde polaire stratosferische wolken (PSC) worden gevormd wanneer de winterminimumtemperaturen dalen tot onder de vormingstemperatuur van -78°C . Dit gebeurt gemiddeld gedurende één tot twee maanden boven de noordpool en maar liefst vijf tot zes maanden boven Antarctica (zie de dikke rode en blauwe lijnen). Chemische reacties op de oppervlakken van PSC deeltjes veroorzaken de vorming van het zeer reactieve chloorgas ClO, hoofdverantwoordelijke voor de vernietiging van ozon (zie Vraag 9). De winterminimumtemperaturen boven het Arctische gebied zijn veel hoger dan boven Antarctica omdat de lucht boven het noordpoolgebied vaker wordt gemengd met warmere lucht afkomstig van gematigde breedtegraden door weersystemen. In sommige jaren wordt in het noordpoolgebied de PSC vormingstemperatuur niet eens bereikt, en een sterke afbraak van de ozonlaag blijft dan ook uit. In het Antarctische gebied zijn de PSC's gedurende vele maanden aanwezig en komt de ernstige afbraak van de ozonlaag in elk winterseizoen voor.



Figuur V10-2. Polaire stratosferische wolken. Deze foto van een Arctische polaire stratosferische wolk (PSC) werd genomen vanaf de grond bij Kiruna, Zweden (67°N), op 27 januari 2000. PSC's vormen zich tijdens de lokale winter op grote hoogte (20-24 km) in de stratosfeer van het noord- en zuidpoolgebied. De wolkendeeltjes groeien door de condensatie van waterdamp, stikstofverbindingen en zwavelgassen onder zeer lage temperaturen. De PSC deeltjes zijn groot en talrijk en daarom zijn de wolken goed zichtbaar met het blote oog, vooral als de Zon nabij de horizon staat. De getoonde kleuren zijn is het gevolg van optische breking en geven de wolken de naam 'parelmoerwolken'. Chemische reacties op de PSC deeltjes zorgen ervoor dat het uiterst reactieve chloorgas ClO worden gevormd, dat zeer efficiënt is in chemische vernietiging van de ozonlaag.

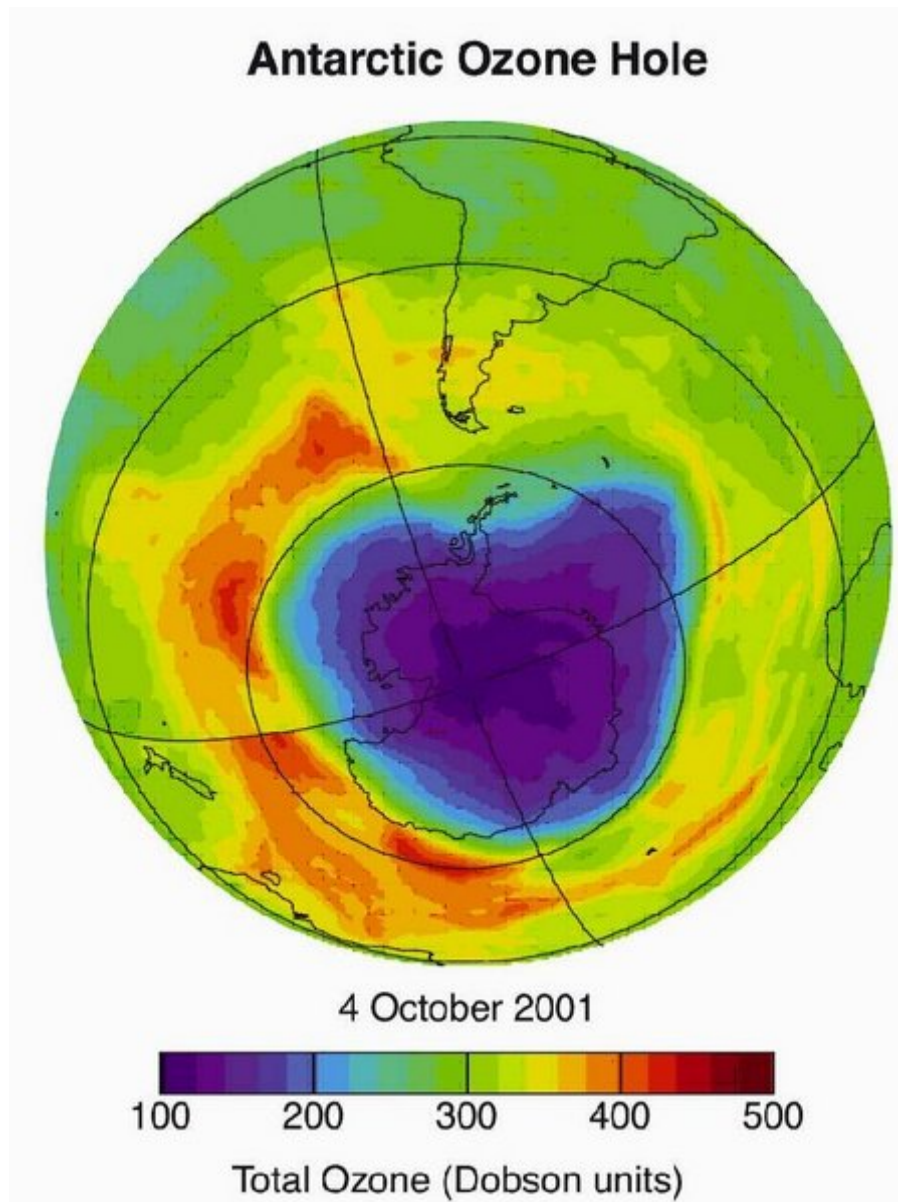


III. STRATOSFERISCHE OZONAFBRAAK

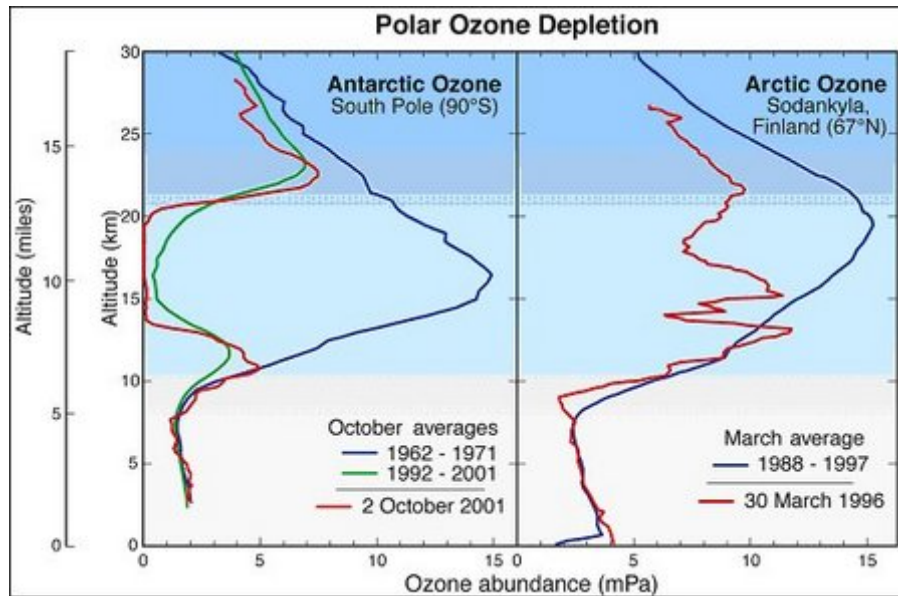
Vraag 11: Hoe ernstig is de afbraak van de Antarctische ozonlaag?

De ernstige afbraak van de Antarctische ozonlaag werd voor het eerst waargenomen in de vroege jaren 1980 en is sinds die tijd nauwlettend gevolgd. Deze afbraak is seizoensgebonden en vindt plaats in de late winter en het vroege voorjaar in de periode augustus-november. De maximale afbraak van de ozonlaag treedt op in begin oktober waarbij de ozonlaag vaak volledig wordt verwoest over een groot hooggebied, waardoor de overgebleven totale ozonkolom veelal niet meer is dan een derde tot een kwart van de gemiddelde ozonkolom. Het grote gebied dat deze bijzonder ernstige afbraak ondergaat wordt het 'ozongat' genoemd, zoals zichtbaar gemaakt op de satellietbeelden van het Antarctisch totale ozon. In de meeste jaren is de maximale oppervlakte van het ozongat aanzienlijk groter dan de landoppervlakte van het Antarctische continent.

Figuur V11-1. Het Antarctische 'gat in de ozonlaag'. In deze figuur worden de waarden van de totale ozonkolom getoond voor de hoge Zuidelijke breedtegraden en Antarctica zoals gemeten door een satellietinstrument. De donkergekleurde gebieden boven het Antarctische continent laten de afmetingen zien van de ernstige afbraak van de ozonlaag zoals deze elk voorjaar terugkeert. Het ozongat wordt gedefinieerd als de gebieden met een totale ozonkolom minder dan 220 DU. Minimale waarden van de totale hoeveelheid ozon in het ozongat zijn rond de 100 Dobson eenheden (DU); ter vergelijking, de normale waarden in het voorjaar zijn ongeveer 300 DU (zie V4) en piekwaarden zijn rond de 500 DU. In het late voorjaar of de vroege zomer (november- december) verdwijnt het ozongat wanneer de ozonarme lucht wordt vermengd met ozonrijke lucht afkomstig van buiten het ozongat.



Figuur V11-2. De verticale verdeling van ozon in de Arctische en Antarctische ozonlaag. De stratosferische ozonlaag bevindt zich over de gehele wereld ongeveer tussen de 10 en 50 kilometer hoogte boven het aardoppervlak. In deze figuur worden de verticale profielen van ozon vergeleken op basis van lange meetreeksen van de ozonlaag gedaan door middel van ballonsondes in de winter in Antarctica en de Arctische gebieden. De figuur maakt duidelijk dat vanaf de jaren 1980 de ozonlaag boven Antarctica stelselmatig is vernietigd. Vóór die periode was de ozonlaag hier duidelijk nog aanwezig zoals is weergegeven door de gemiddelde waarden van ozonconcentraties uit ballonsondemetingen gemaakt tussen 1962-1971. In meer recente jaren, zoals hier getoond voor 2 oktober 2001, is de ozonlaag volledig verwoest tussen de 14 en 20 km hoogte. Ten opzichte van pre-1980 waarden is de ozonlaag hier verminderd met maar liefst 90%. Boven de noordpool is de ozonlaag nog steeds aanwezig in het lokale voorjaar, zoals blijkt uit het gemiddelde ozonprofiel voor de maand maart, gemeten boven Finland tussen 1988-1997. Echter, de recent vastgestelde ozonwaarden vallen vaak onder het 'normale' gemiddelde. In deze jaren zijn de winterminimumtemperaturen van de stratosfeer vaak gedurende lange perioden lager dan de vormingstemperaturen van PSC's. Opmerking; de ozonconcentraties zijn hier weergegeven als partiële druk in de eenheid 'milli-pascal' (mPa), wat een maat is voor de absolute druk (100 miljoen mPa = atmosferische druk op zeespiegelniveau.) die door ozon wordt ingenomen.

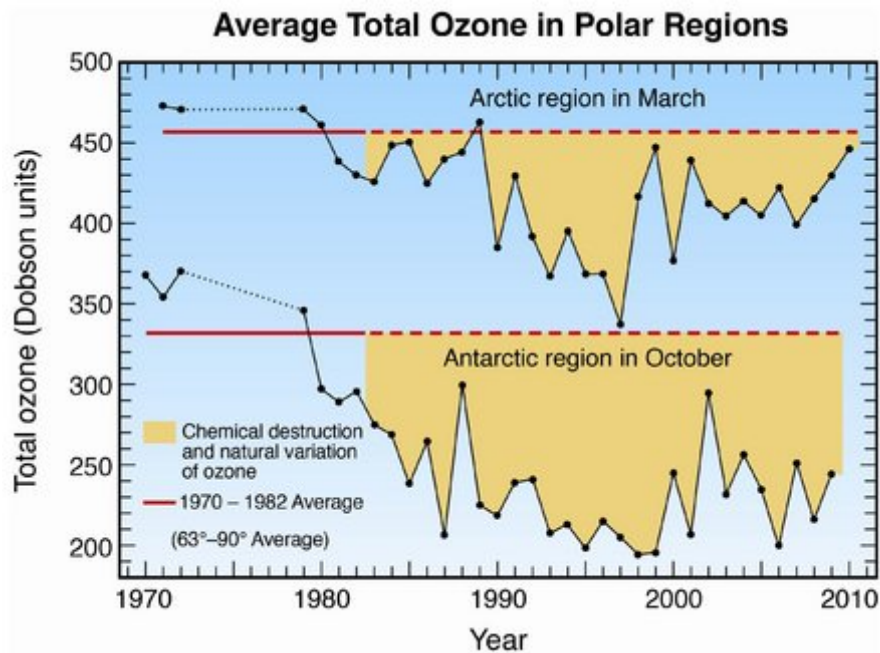


Vraag 12: Is er ook sprake van afbraak van de ozonlaag boven de noordpool?

Het antwoord is Ja. Er is niet elk jaar sprake van afbraak van de ozonlaag boven de noordpool, maar een significante afbraak komt in sommige jaren wel degelijk voor en wel in de late winter of het vroege voorjaar (januari-april). Echter, de maximale afbraak is minder ernstig dan waargenomen boven Antarctica en is meer variabel van jaar tot jaar. Het grote en met regelmaat terugkerende 'gat in de ozonlaag' zoals gevonden in de Antarctische stratosfeer, komt tot op heden niet voor in het noordpoolgebied.

De voornaamste reden hiervoor is dat de Arctische winterstratosfeer over het algemeen warmer is dan de Antarctische tegenhanger (Figuur V10-1). Hogere temperaturen verkorten de periode van de vorming van polaire stratosferische wolken (PSC). Het minder voorkomen van PSC's verkleint de mate van omzetting van halogeengassen in reactieve gassen zoals chlooroxide (ClO), en als gevolg daarvan treedt een relatief kleinere afbraak van de ozonlaag op (zie V10). Bovendien zijn in de stratosfeer boven het noordpoolgebied de temperatuur en de wind veel meer variabel van winter tot winter en zelfs binnen een winterseizoen dan boven Antarctica. Ook verschillen de Arctische minimumtemperaturen, en daarmee de periode van PSC-vorming, sterk van jaar tot jaar. In sommige Arctische winters is de minimumtemperatuur niet laag genoeg voor PSC's om zich te vormen. Samen leiden deze factoren tot een zeer variabele afbraak van de ozonlaag boven het noordpoolgebied van jaar tot jaar, met enkele jaren van weinig tot geen afbraak van de ozonlaag.

Figuur V12-1. Gemiddelde polaire ozonwaarden. De totale hoeveelheid ozon boven de poolgebieden wordt gemeten door goed gekalibreerde satelliet instrumenten. Hier wordt een vergelijking getoond van de gemiddelde totale ozonkolom in de lente, gemeten tussen 1970 en 1982 (rode lijn), met de metingen in latere jaren. Elk punt vertegenwoordigt een maandelijks gemiddelde, boven het zuidpoolgebied in oktober of boven het noordpoolgebied in maart. Na 1982 wordt een significante afbraak van de ozonlaag zichtbaar voor de meeste jaren in het noordpoolgebied en voor alle jaren in het zuidpoolgebied. De grootste afbraak heeft zich voorgedaan boven Antarctica in de periode 1990-2000. Natuurlijke variaties in de meteorologische omstandigheden zijn van invloed op de veranderingen in de afbraak, die van jaar tot jaar plaatsvinden, in het bijzonder in het noordpoolgebied. Nagenoeg alle afbraak boven Antarctica en de meeste afbraak boven het noordpoolgebied is te wijten aan de chemische vernietiging van de ozonlaag door reactieve halogene gassen. De gemiddelde hoeveelheid ozon in de winter/lente boven het Arctische gebied is van oorsprong altijd groter dan die boven Antarctica, omdat de atmosferische stromingspatronen meer ozon naar het Noordelijk halfrond dan naar het Zuidelijk halfrond vervoeren.



Intermezzo 15: Compensatie van het verlies van ozon in de stratosfeer

De natuurlijke dikte van de ozonlaag weerspiegelt een natuurlijk evenwicht in de stratosfeer tussen de continue productie en vernietiging van ozon door de absorptie van zonlicht en de van nature voorkomende chemische reacties (zie V2). De toevoeging van chloor- en broomverbindingen aan de stratosfeer, afkomstig van menselijke activiteiten, heeft de afbraak van ozon doen toenemen en heeft daarmee de dikte van de ozonlaag verminderd. Soms wordt het idee geopperd dat de mens het verlies van de wereldwijde hoeveelheid ozon in de stratosfeer zou kunnen aanvullen door het maken van ozon en dit naar de stratosfeer te transporteren.

Vanuit chemisch en fysisch oogpunt zou het toevoegen van industrieel vervaardigd ozon aan de stratosfeer het nu bestaande evenwicht verstoren. Als gevolg daarvan zal de meeste toegevoegde ozon binnen enkele weken tot maanden vernietigd worden in chemische reacties om zo het bestaande evenwicht te herstellen. Het is daarom niet praktisch om te overwegen om het verlies van ozon in de stratosfeer wereldwijd aan te vullen omdat dit een inspanning vergt voor onbepaalde tijd, of net zo lang als verhoogde chloor- en broomconcentraties blijven bestaan. Moderne voorspellingen duiden op een tijdvak van nog minstens 50 jaar.

Een meer praktisch probleem bij het aanvullen van stratosferisch ozon is de enorme hoeveelheid benodigde ozon en de methode van aanlevering. De totale hoeveelheid atmosferisch ozon bedraagt ongeveer 3.000 Mton = 3.000.000.000.000 kg (1 Mton = 1 miljard kg) waarvan verreweg het meeste zich in de stratosfeer bevindt. Ter vervanging van het mondiaal gemiddelde ozonverlies van 3% zou 90 Mton = 90.000.000.000 kg ozon in de stratosfeer moeten worden verdeeld op een hoogte van vele kilometers boven het aardoppervlak. De energie benodigd om deze hoeveelheid ozon te produceren vergt een aanzienlijk deel van de elektrische energie zoals opgewekt in de Verenigde Staten, wat ongeveer 5000 miljard kilowattuur bedraagt. Deze energiebehoefte neemt verder toe door de strenge eisen voor verwerking en opslag van ozon, wat in hoge concentraties een explosief en giftig gas is. Bovendien zijn er nog geen geschikte methoden ontwikkeld voor het afleveren en distribueren van grote hoeveelheden ozon in de stratosfeer. Denkbare methoden voor een dergelijk 'global delivery system' zou een aanzienlijke additionele hoeveelheid energie gebruiken met onvoorziene gevolgen voor het milieu in het algemeen, terwijl het nut sterk wordt betwijfeld.

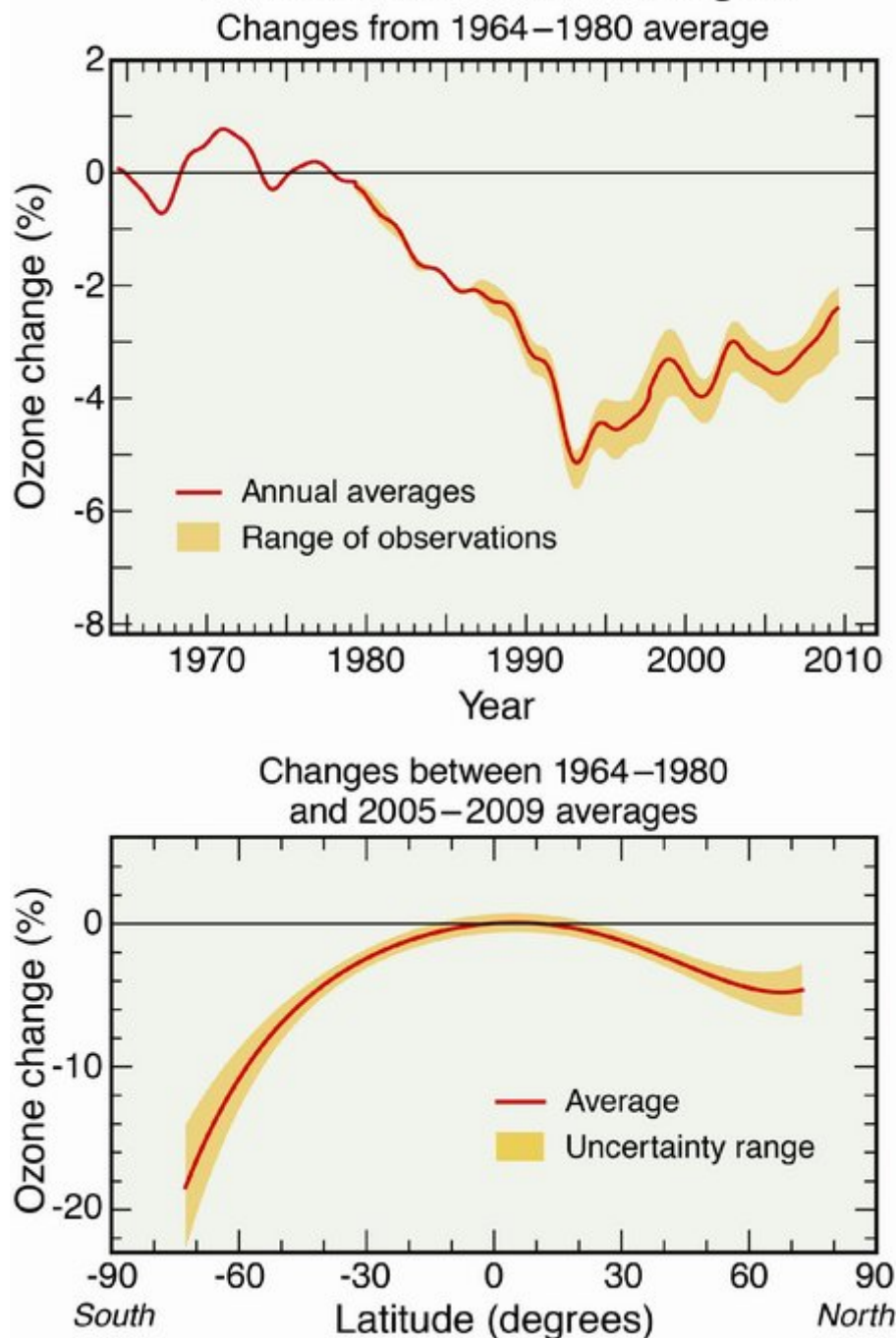
Vraag 13: Hoe groot is de afbraak van de wereldwijde ozonlaag?

De dikte van de ozonlaag is geleidelijk afgenomen sinds 1980 en is in de eerste decade van de 21ste eeuw gemiddeld ~3% lager dan vòòr 1980. Deze afname is groter dan de natuurlijke variabiliteit van de ozonlaag zoals veroorzaakt door meteorologische invloeden. Het ozonverlies is het kleinste in de buurt van de evenaar en neemt toe met de breedtegraad in de richting van de polen. De grotere polaire afbraak van de ozonlaag is voornamelijk een gevolg van de chemische afbraak van ozon

waarvan ieder jaar sprake is in de late winter / vroege voorjaar.

Figuur V13-1. De totale hoeveelheid ozon wereldwijd verandert. Satellietwaarnemingen laten zien dat de afbraak van de wereldwijde totale hoeveelheid ozon begint in de jaren 1980. Het bovenste paneel vergelijkt jaargemiddelden van de wereldwijde hoeveelheid ozon met het gemiddelde uit de periode 1964-1980 voordat het ozongat boven Antarctica verscheen. De invloeden van seizoenen en de zon zijn verwijderd uit de waarnemingen. Tussen 1980 en 1990 daalde de wereldwijde gemiddelde hoeveelheid ozon elk jaar. Na 1991 verslechterde de ozonafbraak gedurende een paar als gevolg de vulkanische aerosolen zoals uitgestoten door Mt. Pinatubo uitbarsting. De wereldwijde gemiddelde hoeveelheid ozon voor de periode 2005-2009 is ongeveer 3,5% lager dan het 1964-1980 gemiddelde. Het onderste paneel toont hoe het verschil voor de periode 2005-2009 met 1964-1980 met de breedtegraad varieert. De grootste dalingen hebben zich voorgedaan op de hoogste breedtegraden op beide halfronden vanwege de grote winter / lente afbraak van ozon in de poolgebieden. De verliezen op het Zuidelijk halfrond zijn aanzienlijk groter dan die op het Noordelijk halfrond als gevolg van de grotere verliezen die zich elk jaar voordoen in de Antarctische stratosfeer. De lange-termijn veranderingen in de tropen zijn veel kleiner, omdat de reactieve halogene gassen niet voldoende aanwezig zijn in de tropische lagere stratosfeer en omdat deze te warm is voor de vorming van PSC's.

Global Total Ozone Changes

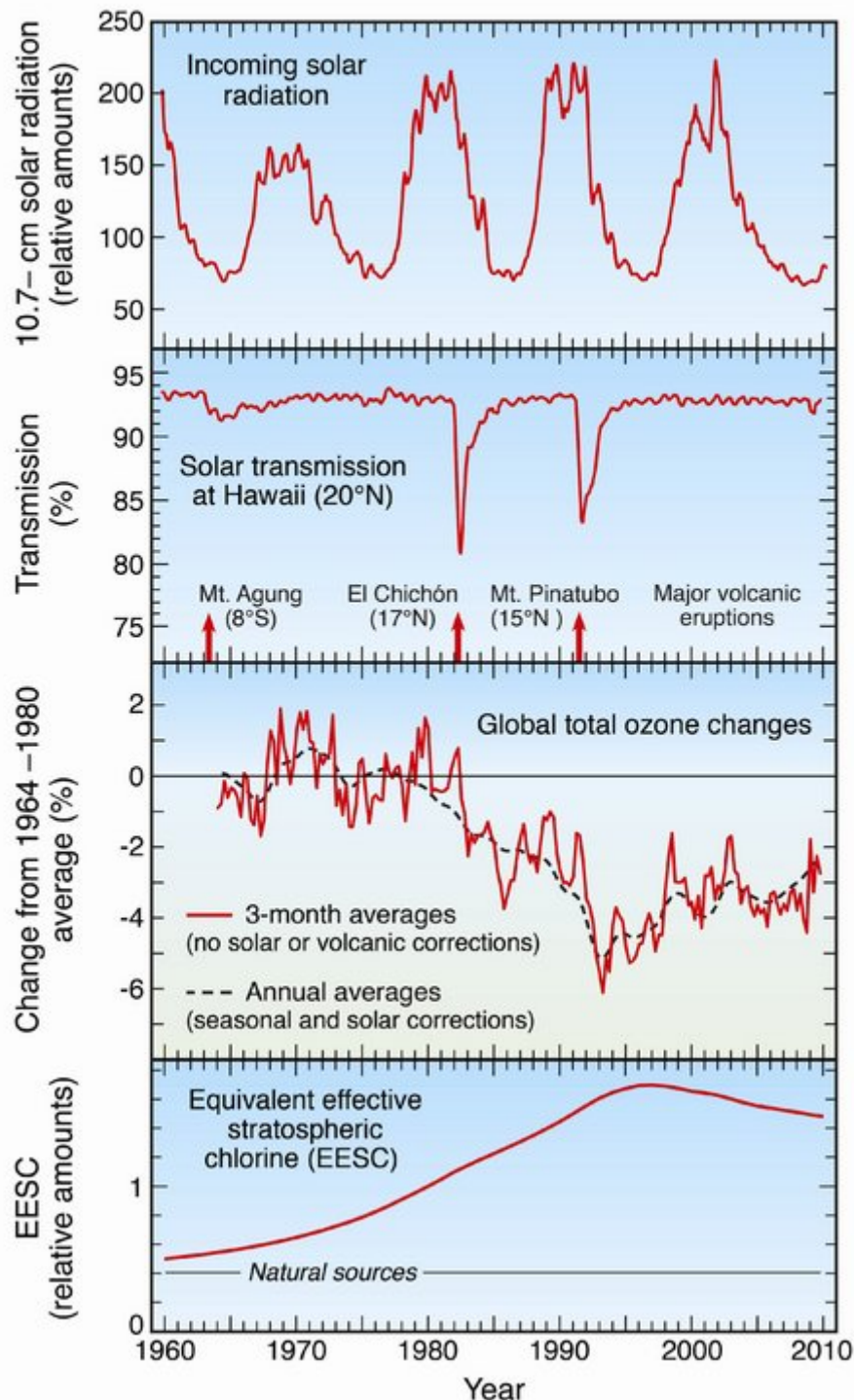


Vraag 14: Hebben veranderingen in de Zon en vulkaanuitbarstingen invloed op de ozonlaag?

Ja, factoren zoals veranderingen in de intensiteit van kortgolvlige zonnestraling en de vorming van hoge concentraties van stofdeeltjes in de stratosfeer na vulkaanuitbarstingen beïnvloeden de dikte van de ozonlaag. Echter, geen van beide factoren kan de gemiddelde vermindering van de ozonlaagdikte verklaren zoals waargenomen in de afgelopen twee decennia in de wereldwijde totale hoeveelheid ozon. Wanneer grote vulkaanuitbarstingen zich voordoen in de komende decennia zal de afbraak van de ozonlaag worden versterkt gedurende een beperkt aantal jaren na de uitbarsting.

Figuur V14-1. Ozon, vulkanen en de zonnecyclus. Het derde kaderfiguur toont de kwartaalgemiddelde ozonlaagdikte, zonder correcties voor de zonnecyclus, zoals getoond in het eerste kaderfiguur, of seizoenseffecten en ook niet voor de effecten van vulkanen, zoals getoond in het tweede kaderfiguur. De wereldwijde gemiddelde dikte van de ozonlaag is sinds het begin van de jaren 1980 gedaald. Deze lange-termijn van de ozonlaagdikte is voornamelijk toe te schrijven aan de concentratie van ozon afbrekende stoffen uitgedrukt in de effectieve hoeveelheid stratosferisch chloor (EESC). Deze is toegenomen in dezelfde periode. De figuur laat ook duidelijk zien dat de toename van EESC is gestopt en een lichte daling is ingetreden. De intensiteit van de zonnestraling die in de stratosfeer ozon produceert verandert volgens een 11-jarige zonnecyclus. Zonnestraling bij een golflengte van 10.7 cm wordt gebruikt om periodes van maximale en minimale zonnestraling aan te geven (zie bovenste paneel). De data laat duidelijk de recente periode van minimale en maximale zonneactiviteit zien. Een vergelijking van het eerste en derde paneel toont aan dat de cyclische verandering in zonnestraling geen verklaring geeft voor de lange-termijn afname van de ozonlaag. Vulkanische uitbarstingen kwamen vaak voor in de periode 1965 tot 2002. De grootste recente uitbarstingen zijn El Chichón (1982) en Mt. Pinatubo (1991) (zie de rode pijlen) waarna dalingen in de transmissie van zonlicht door de aardse atmosfeer werden waargenomen, zoals getoond in het tweede kaderfiguur voor het meetstation op Hawaï. De dalingen treden op omdat er in de stratosfeer aerosoldeeltjes worden gevormd uit de vulkanische uitstoot van zwavelgassen (zie onderste paneel). Deze deeltjes verhogen tijdelijk de ozonafbraak, maar verblijven relatief kort (een paar jaar) in de stratosfeer en regenen elders gemakkelijk uit. Een vergelijking van de panelen geeft aan dat ook de grote vulkanische uitbarstingen niet de lange-termijn afname in de wereldwijde totale hoeveelheid ozon kunnen verklaren.

The Solar Cycle, Volcanic Eruptions, Global Ozone, and Equivalent Effective Stratospheric Chlorine



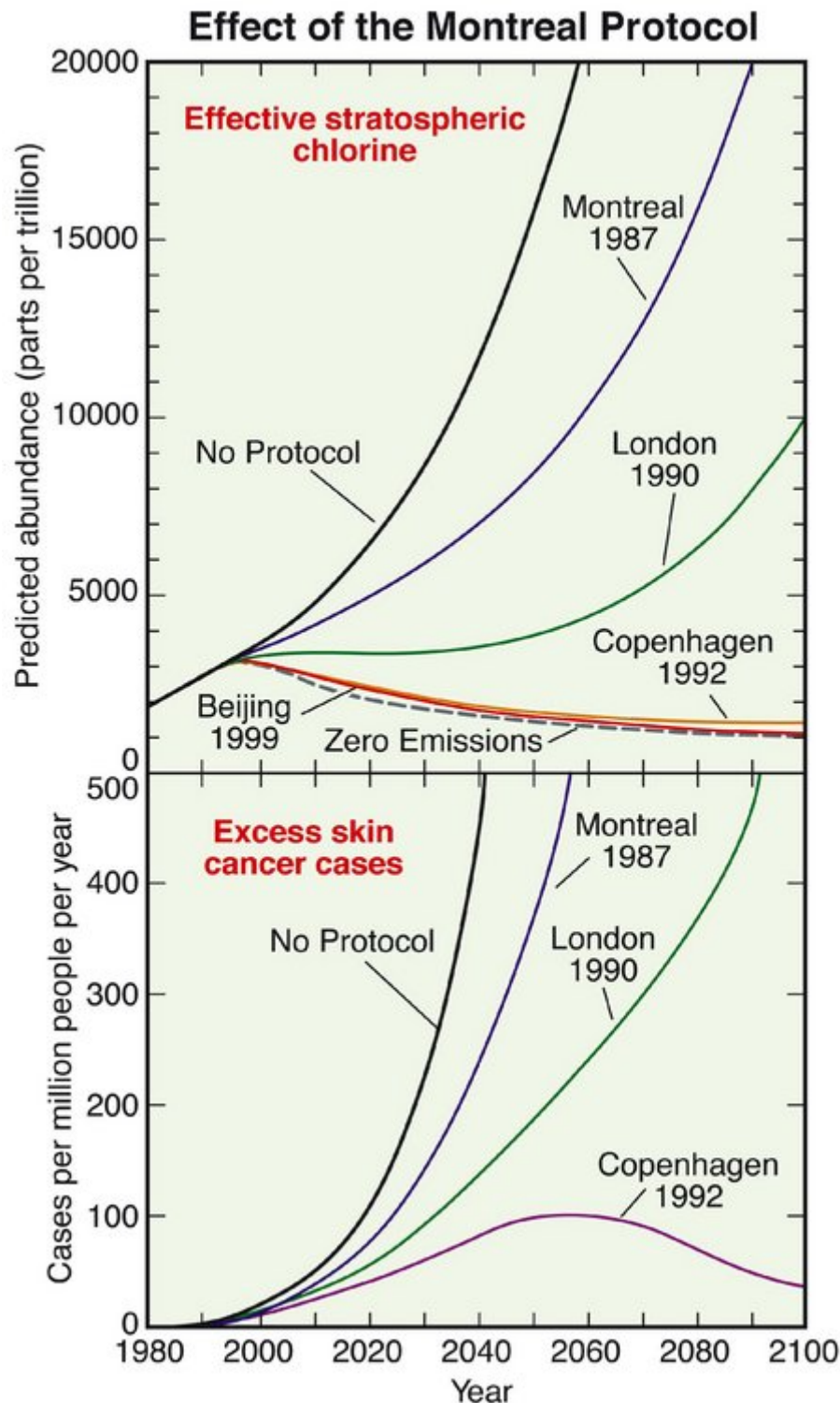
IV. CONTROLE OP OZONLAAG AANTASTENDE STOFFEN

Vraag 15: Zijn er voorschriften voor de productie van ozonlaag aantastende stoffen?

Ja, de productie van ozonlaag aantastende stoffen wordt gereguleerd door een internationale overeenkomst van 1987, beter bekend als het 'Protocol van Montreal betreffende stoffen die de

ozonlaag afbreken' en de latere wijzigingen en aanpassingen. Het protocol, nu geratificeerd door meer dan 190 landen, spreekt wettelijk bindende controles af op de nationale productie en consumptie van ozonafbrekende gassen. De productie en consumptie van alle belangrijke halogeenhoudende gassen door de ontwikkelde landen en ontwikkelingslanden zal aanzienlijk worden afgebouwd voor het midden van de 21^{ste} eeuw.

Figuur V15-1. Effect van het Protocol van Montreal. Het doel van het Protocol van Montreal is het reduceren van de stratosferische concentraties van chloor- en broomhoudende verbindingen. Deze reducties volgen op de beperkingen op productie en verbruik van halogeenhoudende brongassen. In het bovenste paneel worden voorspellingen van de effectieve stratosferische chloorconcentratie weergegeven in de veronderstelling dat (1) er geen protocolregelgeving bestaat, (2) er de regelgeving in het oorspronkelijke Montreal Protocol uit 1987 wordt nageleefd, en (3) er wordt voldaan aan de aanvullende voorschriften uit de latere wijzigingen en aanpassingen. De namen van de steden en jaren vermelden waar en wanneer de wijzigingen in de oorspronkelijke bepalingen van het Protocol werden overeengekomen. De stratosferische concentratie van effectief chloor houdt rekening met het gecombineerde effect van chloor- en broomgassen. Zonder een protocol zouden al vroeg in de 21ste eeuw de concentraties van stratosferische halogeengassen aanzienlijk hoger zijn geweest. De 'zero-emissions' lijn toont de stratosferische concentraties wanneer alle uitstoot begin 2003 tot nul gereduceerd zou zijn. Het onderste paneel laat zien hoe het aantal extra gevallen van huidkanker (zie V17) verhoogd zou zijn zonder de voorschriften en hoe ze zullen worden verlaagd onder de bepalingen van het Protocol. (De eenheid 'deeltjes per triljoen' is gedefinieerd in het bijschrift van figuur V7-1). Vraag 16: Is het Protocol van Montreal geslaagd in het verminderen van ozonafbrekende gassen in de atmosfeer? Ja, als gevolg van het Protocol van Montreal is de concentratie van ozonafbrekende gassen in de atmosfeer begonnen te dalen in de recente jaren. Als de naties van de wereld de bepalingen van het Protocol blijven volgen, zal deze daling zich voortzetten gedurende de 21ste eeuw. Sommige gassen, zoals halonen en chloorfluorkoolwaterstoffen (HCFK's), zijn dan nog steeds aanwezig in de atmosfeer, maar met naleving van het Protocol zullen ook deze gaan dalen. De verwachting op dit moment is dat rond het midden van de 21ste eeuw de ozonconcentraties afbrekende gassen gedaald moet zijn tot waarden zoals aanwezig waren vóór het Antarctisch 'ozongat' zich begon te vormen in de vroege jaren 1980. Uiteindelijk zouden deze concentraties de natuurlijke achtergrondwaarden bereiken zoals die in evenwicht zouden ontstaan zonder menselijke uitstoot.



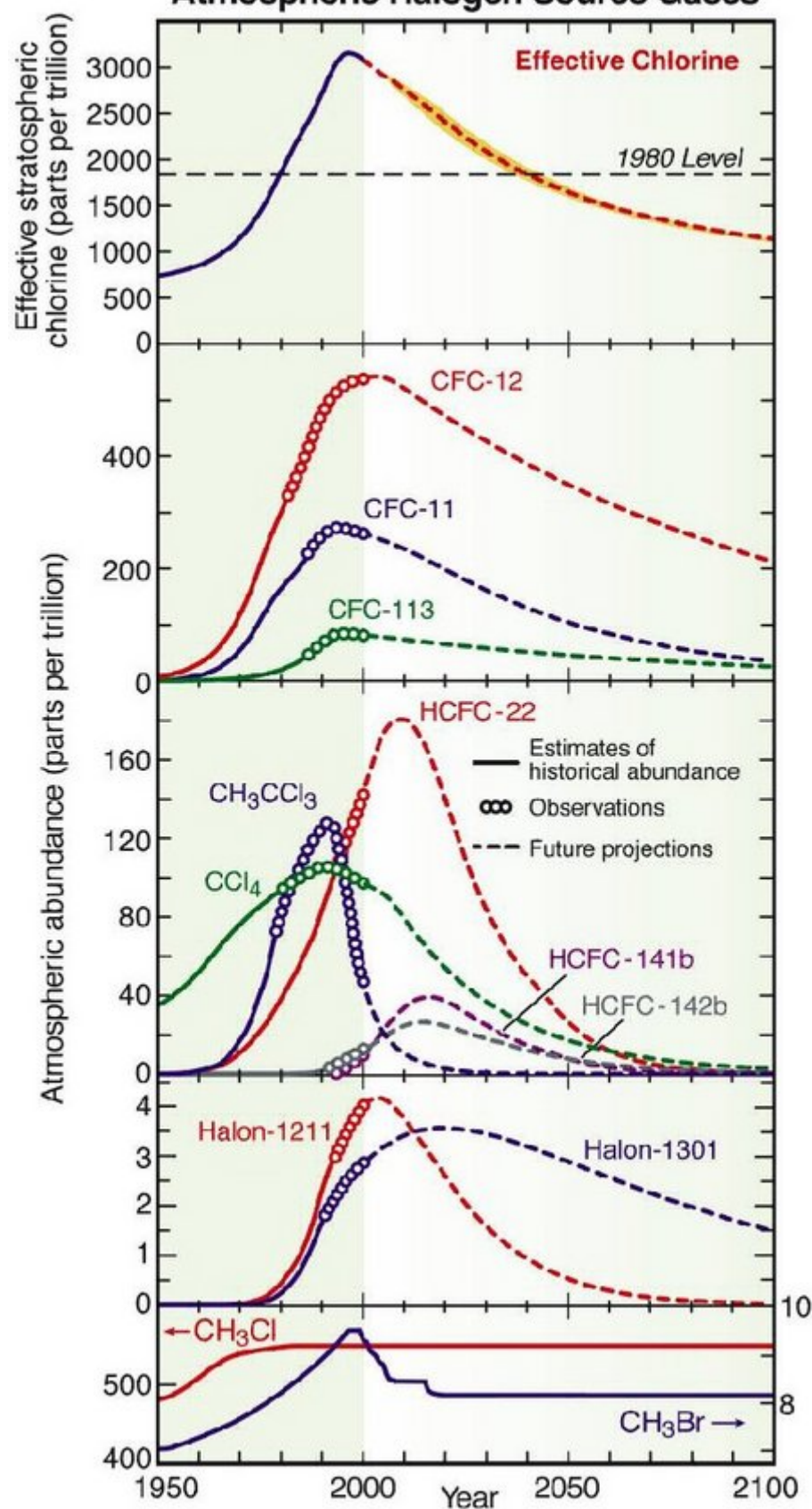
Vraag 16: Is het Protocol van Montreal geslaagd in het verminderen van ozonafbrekende gassen in de atmosfeer?

Ja, als gevolg van het Protocol van Montreal is de concentratie van ozonafbrekende gassen in de atmosfeer begonnen te dalen in de recente jaren. Als de naties van de wereld de bepalingen van het Protocol blijven volgen, zal deze daling zich voortzetten gedurende de 21ste eeuw. Sommige gassen, zoals halonen en chloorfluorkoolwaterstoffen (HCFK's), zijn dan nog steeds aanwezig in de atmosfeer, maar met naleving van het Protocol zullen ook deze gaan dalen. De verwachting op dit moment is dat rond het midden van de 21^{ste} eeuw de ozonconcentraties afbrekende gassen gedaald moet zijn tot

waarden zoals aanwezig waren vóór het Antarctisch 'ozongat' zich begon te vormen in de vroege jaren 1980. Uiteindelijk zouden deze concentraties de natuurlijke achtergrondwaarden bereiken zoals die in evenwicht zouden ontstaan zonder menselijke uitstoot.

Figuur V16-1. Halogeen brongas veranderingen. De stijging van de effectieve stratosferische chloorwaarden in de 20ste eeuw is vertraagd en omgekeerd in de periode 1990-2000 (bovenste paneel). Effectieve chloorwaarden combineren de gemeten of verwachte concentraties van chloorhoudende gassen met die van broomhoudende gassen om rekening te houden met de grotere effectiviteit van broom in de afbraak van de ozonlaag. Omdat effectief chloor afneemt in de 21ste eeuw zal de afbraak van de ozonlaag door halogeengassen ook afnemen. De daling van de effectieve chloorwaarden is een gevolg van de verminderde uitstoot van halogeengassen. Deze uitstoot daalde als gevolg van het Protocol van Montreal, dat de productie en het verbruik van halogene gassen beperkt. De veranderingen in de atmosferische concentratie van diverse gassen is weergegeven in de onderste panelen als resultaat van een combinatie van atmosferische metingen, schattingen van historische concentraties en toekomstige prognoses van concentratie. De toenames van CFK's, samen met die van CCl₄ en CH₃CCl₃, zijn ofwel sterk vertraagd of juist omgekeerd tot afnames in de periode 1990-2000. HCFC's die worden gebruikt als vervangers van CFK's zullen blijven toenemen in de komende decennia. De concentraties van sommige halonen zullen ook in de toekomst nog blijven toenemen, terwijl de huidige halonreserves uitgeput raken. Relatief kleinere dalingen worden verwacht voor CH₃Br ten gevolge van de beperkingen omdat het aanzienlijke natuurlijke bronnen kent. CH₃Cl heeft grote natuurlijke bronnen en wordt niet geregeld in het Protocol van Montreal. (Zie Figuur V7-1 voor chemische namen en formules. De eenheid 'deeltjes per triljoen' is gedefinieerd in het bijschrift van de figuur V7-1.)

Past and Future Abundance of Atmospheric Halogen Source Gases



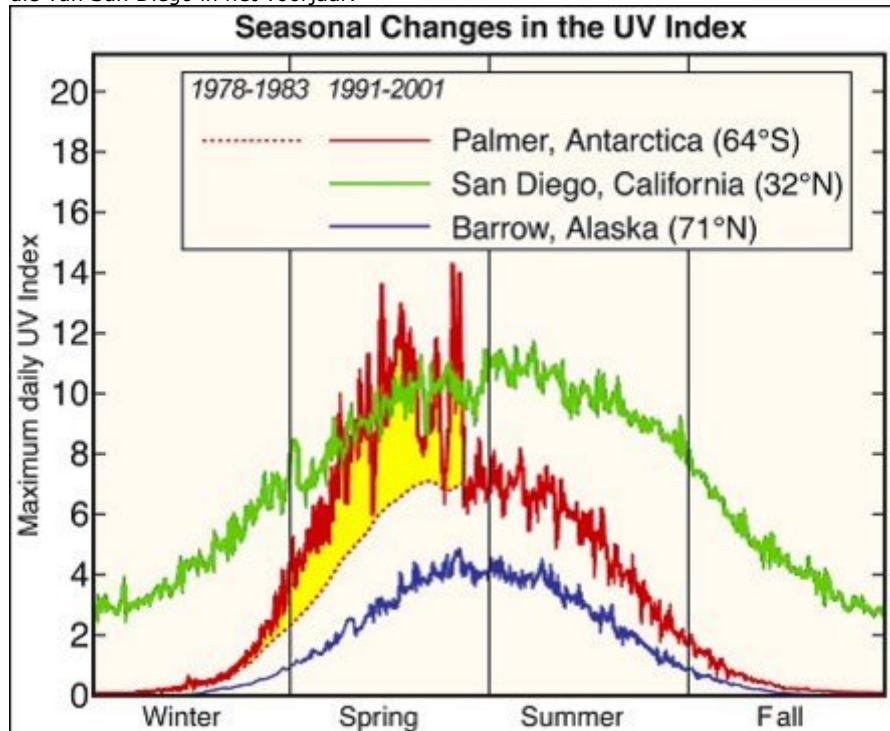
V. GEVOLGEN VAN OZONAFBRAAK

Vraag 17: Zorgt de afbraak van de ozonlaag voor een verhoogde intensiteit aan ultraviolette straling op het aardoppervlak?

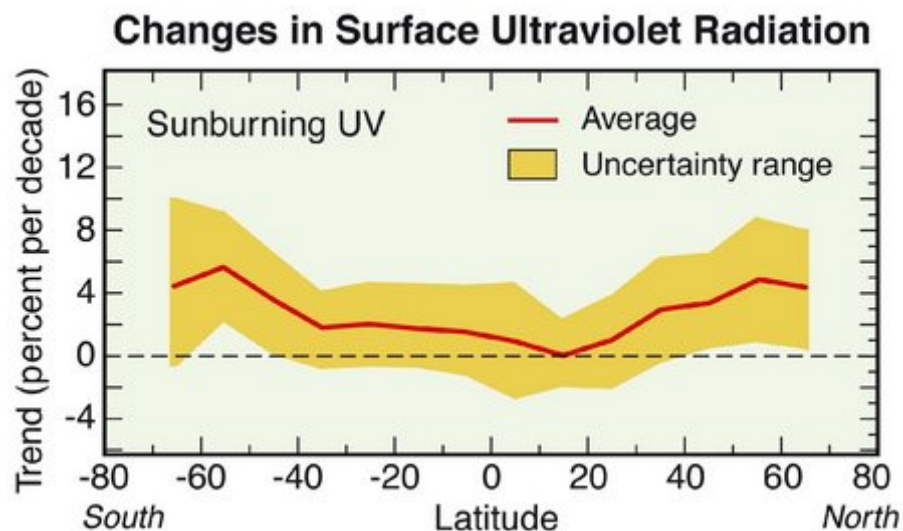
Ja, de intensiteit aan ultraviolette straling op het aardoppervlak stijgt naarmate de hoeveelheid ozon in de atmosfeer boven het aardoppervlak afneemt, omdat ozon ultraviolette zonnestraling absorbeert.

Metingen door instrumenten op de grond en schattingen gemaakt met behulp van moderne satellietgegevens hebben bevestigd dat de intensiteit van ultraviolette straling aan de aardoppervlakte is toegenomen in de gebieden waar afbraak van de ozonlaag wordt waargenomen.

Figuur V17-1. Veranderingen in de UV-index. De maximale dagelijkse UV-index is een maat voor de piek in zonnebrand veroorzakende UV-straling voor een bepaalde locatie. De UV-B straling die in de atmosfeer deels wordt geabsorbeerd door ozon, is een belangrijk onderdeel van zonnebrand veroorzakende UV-straling. De UV-index varieert met de breedtegraad en het seizoen, omdat daarmee het pad van het zonlicht door de atmosfeer varieert. De hoogste waarden van de maximale dagelijkse UV-index komen voor in de tropen, omdat daar de middagzon het hele jaar door hoog aan de hemel staat en de ozonlaag het dunst is. Ter vergelijking blijkt uit de figuur dat de UV-index in San Diego, California het hele jaar door hoger is dan in Barrow, Alaska. De UV-index is nul op hoge breedtegraden in de permanente duisternis van de poolnacht. Het effect van de afbraak van de ozonlaag op de UV-index wordt aangetoond door de vergelijking van de datareeksen van meetstation Palmer op de zuidpool en San Diego. De normale waarden zoals geschat voor Palmer voor de periode 1978-1983 periode van vóór het 'ozongat' zijn weergegeven met de rode stippellijn. In de periode 1991-2001 heeft de afbraak van de ozonlaag geleid tot een verhoging van de maximale UV-index waarde in Palmer in de lente (zie geel gearceerde gebied) tot waarden boven die van San Diego in het voorjaar.



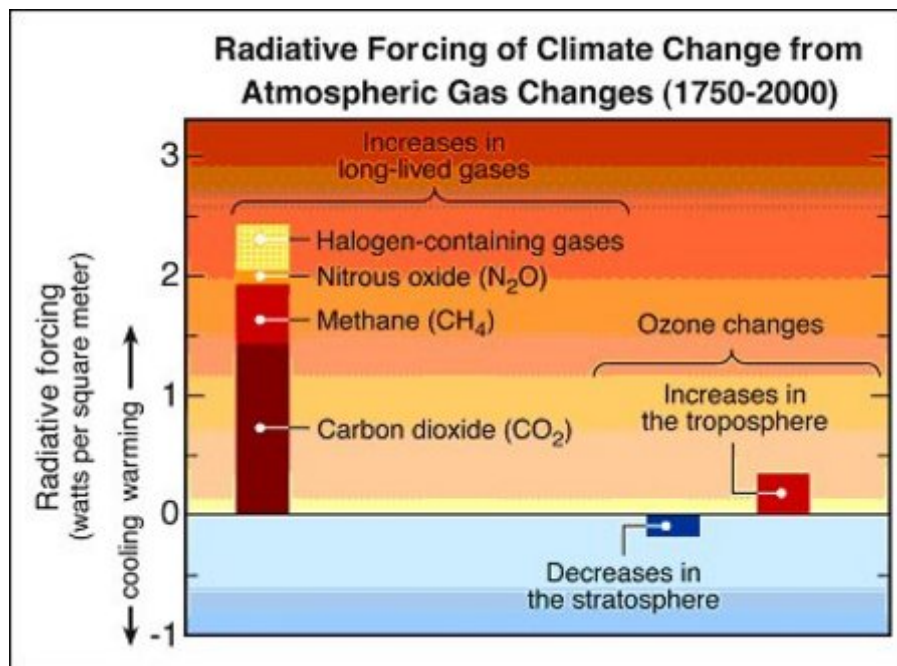
Figuur V17-2. Veranderingen in de intensiteit van UV-straling aan het aardoppervlak. De intensiteit van de ultraviolette (UV) straling aan het aardoppervlak die huidverbranding veroorzaakt is tussen 1979 en 1992 over de hele wereld toegenomen. Deze UV straling, beter bekend als de 'erythemale straling', is schadelijk voor alle levensvormen. De toename zoals hier weergegeven is gebaseerd op waargenomen dalingen in de ozonlaag en de relatie tussen ozon en de intensiteit van UV-straling aan het aardoppervlak die is vastgesteld op diverse locaties op Aarde. De veranderingen zijn het kleinst in de tropen omdat daar de waargenomen veranderingen in de ozonlaagdikte het kleinst zijn. De veranderingen zijn het grootst in de gebieden met gematigde breedtegraden, zoals de westerse wereld op het noordelijk halfrond.



Vraag 18: Is afbraak van de ozonlaag de voornaamste oorzaak van klimaatverandering?

Nee, de afbraak van de ozonlaag is niet de voornaamste oorzaak van klimaatverandering. Echter, omdat ozon zonne-energie in de vorm van ultraviolette straling absorbeert, en deze energie uitstraalt in de vorm van infrarode straling en deze afgeeft als thermische energie aan de lokale omgeving, is het weldegelijk een broeikasgas. Veranderingen in de ozonlaag en klimaatverandering zijn in belangrijke opzichten verbonden. De afbraak van de ozonlaag in de stratosfeer en de wereldwijde toename van de ozonconcentraties in de troposfeer die zich hebben voorgedaan in de afgelopen decennia, hebben beide bijgedragen aan de klimaatverandering. Deze bijdragen zijn aanzienlijk maar klein in vergelijking met de totale bijdrage van alle andere broeikasgassen. Ozon en klimaatverandering zijn indirect verbonden, omdat zowel de ozonafbrekende gassen als de vervangende gassen bijdragen aan klimaatverandering. Omgekeerd kan klimaatverandering leiden tot veranderingen in de wereldwijde atmosferische stromingspatronen, wat weer invloed heeft op de verdeling van stratosferisch ozon over de Aarde.

De term 'stralingsforceringen', zoals uitgelegd bij Figuur V18-1, betekent dat er van het natuurlijke evenwicht van inkomende en uitgaande straling wordt afgeweken door een onnatuurlijke kracht (Engelse 'force' = kracht), d.i., een 'antropogene' kracht. De grootste stralingsforcering wordt veroorzaakt door kooldioxide, gevolgd door methaan, ozon in de troposfeer, de halogeenvatende gassen (zie figuur V7-1), en dan lachgas. De toename van ozon in de troposfeer is het gevolg van toenemende luchtvervuiling door menselijke activiteiten. Al deze forceringen zijn positief, wat leidt tot een opwarming van het aardoppervlak. De afname van de stratosferische ozonlaag geeft een kleine en negatieve forcering vanwege een toegenomen nachtelijke uitstraling van langgolvlige thermische straling, wat leidt tot een afkoeling van het aardoppervlak. In de komende decennia zullen de concentraties van halogeengassen en de omvang van het ozongat in de stratosfeer naar verwachting worden teruggebracht, samen met de bijbehorende stralingsforcering. Het verband tussen deze twee termen is een belangrijk aspect van de stralingsforcering die leidt tot klimaatverandering. Figuur V18-1. Klimaatverandering veroorzaakt door veranderingen in de concentraties van de atmosferische gassen. Menselijke activiteiten sinds 1750 veroorzaken stijgingen in de concentraties van verschillende langlevende gassen in de atmosfeer die de stralingsbalans van de aardse atmosfeer veranderen. Deze gassen, beter bekend als 'broeikasgassen', resulteren in zogenaamde stralingsforceringen die kunnen leiden tot klimaatverandering.

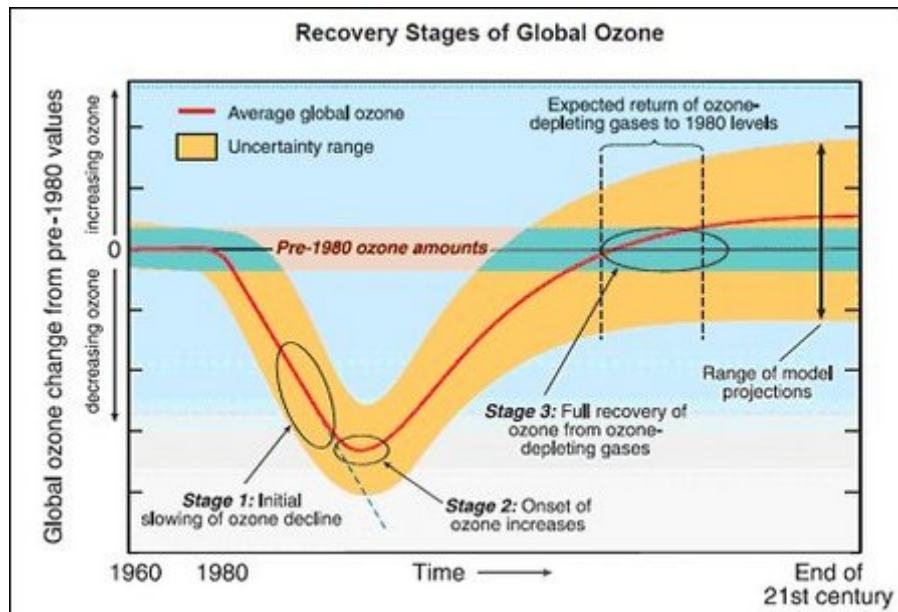


VI. OZON IN DE STRATOSFEER IN DE TOEKOMST

Vraag 19: Hoe zal het herstel van de ozonlaag worden geïdentificeerd?

Wetenschappers verwachten het herstel van de ozonlaag te identificeren met gedetailleerde metingen van de daadwerkelijke dikte van de ozonlaag in de atmosfeer en met de voorspelling van de wereldwijde verdeling van ozon in rekenkundige modellen. De wereldwijde toename van de dikte van de ozonlaag en substantiële reducties in de omvang en de ernst van de Antarctische 'gat in de ozonlaag' zijn belangrijke factoren bij het vaststellen en volgen van dit herstel. De natuurlijke variaties in de hoeveelheid ozon zullen echter het vroeg herkennen van het herstel bemoeilijken.

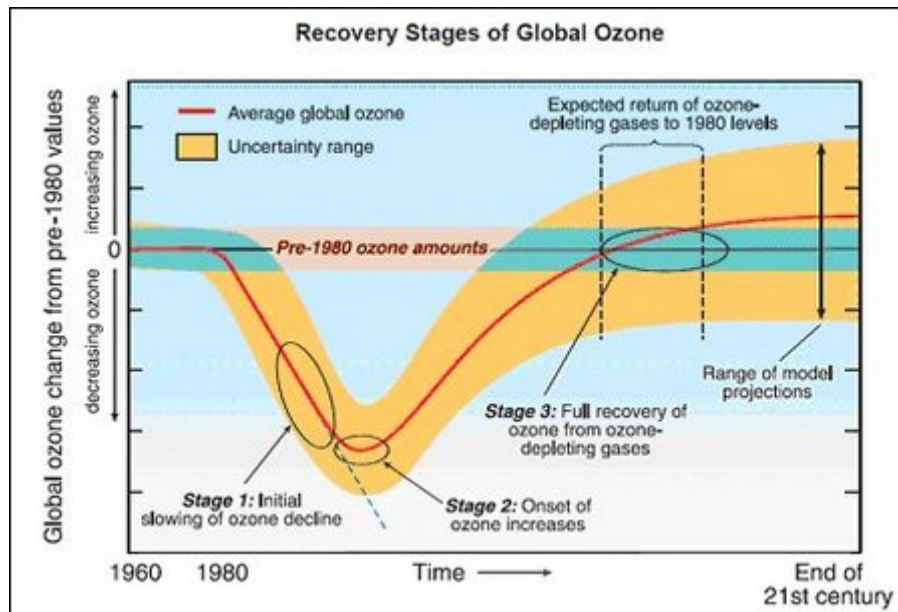
Figuur V19-1. Stadia van herstel van de wereldwijde ozonlaag. De significante afbraak van de ozonlaag door de introductie van ozonlaagaantastende stoffen door menselijke activiteiten werd voor het eerst erkend in de jaren 1980. De bepalingen van het Protocol van Montreal zullen naar verwachting de concentraties van deze gassen in de komende decennia verminderen en uiteindelijk elimineren wat zal leiden tot de terugkeer van ozonlaag naar waarden van voor 1980. De tijdlijn van het herstelproces is schematisch weergegeven met drie geïdentificeerde fasen: (1) Vertraging van de afname van ozon, omschreven als het optreden van een statistisch significante vermindering van de mate van achteruitgang in ozon. (2) Toename van het ontstaan van ozon (omkering), geïdentificeerd als het optreden van een statistisch significante toename in de ozonlaag boven de eerdere minimale waarden. (3) Het volledige herstel van de ozonlaag, aangemerkt als de fase wanneer de ozonlaag niet langer significant wordt beïnvloed door ozonlaagaantastende stoffen afkomstig van menselijke activiteiten. De grote onzekerheidsmarge (gele zone) illustreert de natuurlijke variabiliteit van ozon zoals waargenomen in het verleden en de mogelijke onzekerheden in de wereldwijde modelprojecties van ozon in de toekomst. Wanneer de ozonlaag volledig is hersteld kan de ozonlaagdikte hoger of lager uitvallen dan de pre-1980 waarden. Dit is afhankelijk van andere veranderingen in de atmosfeer (zie Vraag 20), zoals klimaatverandering.



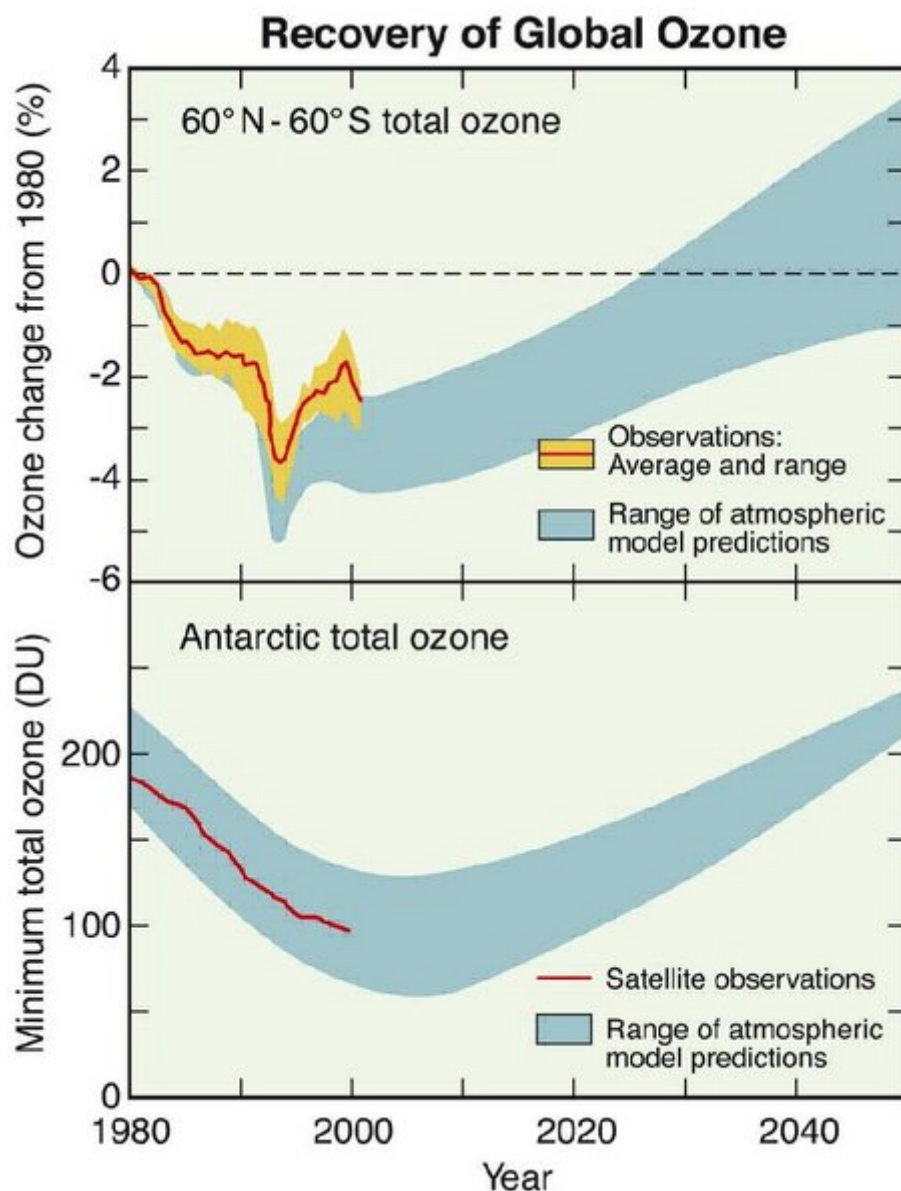
Vraag 20: Wanneer is de ozonlaag naar verwachting volledig hersteld?

Een substantieel herstel van de ozonlaag wordt verwacht in het midden van de 21ste eeuw, waarbij wordt uitgegaan van een wereldwijde naleving van het Protocol van Montreal. Dit herstel zal optreden wanneer de concentratie aan chloor- en broombevattende gassen, die de afbraak van de ozonlaag veroorzaken, in de komende decennia afnemen onder de bepalingen van het protocol. Echter, de invloed van klimaatveranderingen en andere atmosferische parameters kunnen dit herstel versnellen of vertragen, en vulkanische uitbarstingen die mogelijk in de komende decennia kunnen voorkomen, kunnen tijdelijk de hoeveelheid ozon voor meerdere jaren verlagen.

Figuur V19-1. Stadia van herstel van de wereldwijde ozonlaag. De significante afbraak van de ozonlaag door de introductie van ozonlaagaantastende stoffen door menselijke activiteiten werd voor het eerst erkend in de jaren 1980. De bepalingen van het Protocol van Montreal zullen naar verwachting de concentraties van deze gassen in de komende decennia verminderen en uiteindelijk elimineren wat zal leiden tot de terugkeer van ozonlaag naar waarden van voor 1980. De tijdlijn van het herstelproces is schematisch weergegeven met drie geïdentificeerde fasen: (1) Vertraging van de afname van ozon, omschreven als het optreden van een statistisch significante vermindering van de mate van achteruitgang in ozon. (2) Toename van het ontstaan van ozon (omkering), geïdentificeerd als het optreden van een statistisch significante toename in de ozonlaag boven de eerdere minimale waarden. (3) Het volledige herstel van de ozonlaag, aangemerkt als de fase wanneer de ozonlaag niet langer significant wordt beïnvloed door ozonlaagaantastende stoffen afkomstig van menselijke activiteiten. De grote onzekerheidsmarge (gele zone) illustreert de natuurlijke variabiliteit van ozon zoals waargenomen in het verleden en de mogelijke onzekerheden in de wereldwijde modelprojecties van ozon in de toekomst. Wanneer de ozonlaag volledig is hersteld kan de ozonlaagdikte hoger of lager uitvallen dan de pre-1980 waarden. Dit is afhankelijk van andere veranderingen in de atmosfeer (zie Vraag 20), zoals klimaatverandering.



Figuur V20-1. Voorspellingen van het herstel van de ozonlaag. De figuur toont dat de waargenomen waarden van de ozonlaagdikte op gematigde breedtegraden (bovenste paneel) en de minimale ozonlaagdikten boven Antarctica in september-oktober ten tijde van het ozongat (onderste paneel) beide zijn gedaald sinds de vroege jaren 1980. Door de daling van de concentratie halogeengassen zullen de ozonwaarden naar verwachting op een gegeven moment herstellen in de richting van pre-1980 waarden. Rekenkundige computermodellen van de atmosfeer die, rekening houden met veranderingen in de concentraties van halogeengassen en met andere atmosferische parameters, worden gebruikt om te voorspellen hoe de ozonlaag zich zal herstellen. Deze modelresultaten laten zien dat op gematigde breedtegraden een volledig herstel kan worden verwacht rond het jaar 2050. Het herstel boven Antarctica zal later pas plaatsvinden. De spreiding van de modelprognoses komt voort uit het gebruik van verschillende scenario's van de toekomstige atmosfeer.



Verantwoording

TEMIS afbeeldingen worden met toestemming van de TEMIS projectleiding gereproduceerd. De inhoud zoals verwoord in de tekst en weergegeven in de figuren wordt gebruikt met toestemming van Dr. David F. Fahey van NOAA ESRL Chemical Sciences Division, Boulder, Colorado, USA <http://esrl.noaa.gov/csd> (zie externe links). Op Internet kunt u het Engelstalige origineel vinden onder <ftp://ftp.nilu.no/pub/NILU/geir/assessment-2006/10%20Q&AsChapter.pdf> (zie verder lezen). De bijgewerkte 2010 versie van het WMO/UNEP 'Scientific Assessment of Ozone Depletion' rapport kunt u op Internet vinden onder http://ozone.unep.org/Assessment_Panels/SAP/Scientific_Assessment_2010/SAP-2010-FAQs-update.pdf (Zie externe links)

Nieuwsbrief

Via http://www.knmi.nl/maillinglists/kenniscentrum/maillinglist_aanmelden.html kunt u zich kosteloos abonneren op het kenniscentrum. Eens per maand ontvangt u een e-mail met een overzicht van de artikelen die de afgelopen maand op het Kenniscentrum zijn verschenen.

Eerste uitgave: 30-08-11