

50 JAAR OZONPEILINGEN MET WEERBALLONNEN IN UKKEL

Een historisch overzicht en het belang van deze peilingen voor de wetenschap

Opgestart in Ukkel in 1969 als hulp bij weersvoorspellingen, hebben de metingen van de ozonconcentraties door ozonsondes aan boord van weerballonnen een opmerkelijke weg in hun toepassingsgebied afgelegd. Hoewel deze meettechniek nu niet fundamenteel anders is dan toen, blijven deze metingen onontbeerlijk voor de studie van de langetermijnvariatie in de ozonconcentraties, voor de kalibratie en validatie van satellietwaarnemingen van ozon en voor het bestuderen van specifieke processen die een hoge verticale resolutie vereisen.

ROELAND VAN MALDEREN, DIRK DE MUER,
HUGO DE BACKER, DENIZ POYRAZ, WILLEM W.
VERSTRAETEN, VEERLE DE BOCK, ANDY
DELCLOD, ALEXANDER MANGOLD, QUENTIN
LAFFINEUR, MARC ALLAART, FRANS FIERENS,
VALÉRIE THOURET

| Ozon

We vinden ozon (O₃), opgebouwd uit drie zuurstofatomen, terug in de atmosfeer vanaf de oppervlakte van de aarde tot op een hoogte van ongeveer vijftig kilometer. Echter, ongeveer 90% van de ozonhoeveelheden bevindt zich in de stratosfeer, tussen zo'n tien en vijftig kilometer hoogte op onze breedtegraden, waar het gevormd en afgebroken wordt door reacties, waarbij de absorptie van het UV-licht van de

zon door molecuair zuurstof (O₂) en ozon centraal staat. Deze 'ozonlaag' houdt daarbij de voor ons schadelijke UV-straling van de zon (gevaar voor huidkanker, oogziektes zoals cataract, e.d.) tegen en warmt de stratosfeer op. De ozonconcentraties in de troposfeer (de onderste laag van de atmosfeer), de overige 10% van de totale ozonhoeveelheid, zijn afkomstig van interactie tussen het UV-licht en uitstootgassen van verkeer en industrie, zoals NO en NO₂ (kortweg NO_x), Vluchtige Organische Componenten (VOC) en koolstofmonoxide (CO). Op ademhoogte kan ozon ademhalingsproblemen veroorzaken en is het een bestanddeel van smog. Ozon in de troposfeer is bovendien ook een broeikasgas. Door de verschillende impact die ozon heeft op het leven op aarde als

functie van de plaats van voorkomen in de atmosfeer, is de kennis van de ozonconcentraties (en de variabiliteit ervan) in functie van de hoogte onontbeerlijk.

| Ozonsondes

Ozonsondes die meegestuurd worden met weerballonnen leveren die kennis van de verticale verdeling van de ozonconcentraties in de atmosfeer. Eigenlijk is het concept van een ozonsonde heel simpel: een stabiel pompje, waarvoor vroeger het motortje van een cassettespeler werd gebruikt, zuigt de lucht in de atmosfeer aan en leidt deze naar twee met elkaar verbonden cellen, waarin een positief en een negatief geladen vloeistof zit (zie figuur 1). Deze vloeistoffen reageren (bijna) alleen met de ozonmoleculen aan-



Figuur 1: Foto van een ozonsonde [© <http://www.en-sci.com>].

wezig in de atmosfeer. Deze reactie wekt een stroom op; de cellen en vloeistoffen fungeren als het ware als een natte batterij. Indien ook nog de temperatuur en het debiet van de pomp gekend zijn, kan de gemeten stroom omgezet worden naar een ozonconcentratie. Doordat de ozonsonde gekoppeld is met een radiosonde, een mini-weerstation dat temperatuur, vochtigheid, druk, windsnelheid- en richting opmeet en doorstuurt via radiogolven, krijgen we dus in realtime een ozonprofiel in functie van de hoogte of de druk (een voorbeeld van een ozonprofiel is gegeven in figuur 4, pag. 23). Met een stijgsnelheid van ongeveer 5 à 6 m/s en een responstijd van de ozoncellen van ongeveer 25 seconden, bedraagt de werkelijke verticale resolutie van een ozonprofiel ongeveer 150 meter.

| Start ozonpeilingen door het KMI in 1969

Aangezien men in het midden van de zestiger jaren van de vorige eeuw al wist dat de ozonconcentraties in de stratosfeer en de troposfeer sterk verschillen, wilde men

aan het Koninklijk Meteorologisch Instituut (KMI) van België ozonmetingen in beide atmosferelagen gebruiken om troposferische en stratosferische circulaties van elkaar te onderscheiden, om zo de weersvoorspellingen te kunnen verbeteren. Na enkele campagnes met ozonsondes, de eerste in de jaren 1965-1966, werd uiteindelijk besloten om in januari 1969 te starten met operationele ozonsonde-waarnemingen te Ukkel. Dit gebeurde drie keer per week. Buiten enkele onderbrekingen in de jaren 1983-1985 wegens gebrek aan financiële middelen, is het KMI er in geslaagd om de tijdreeks met deze frequentie uit te voeren. Deze hoge temporele frequentie van metingen is redelijk uniek in de wereld: enkel in Payerne (Zwitserland) wordt er eveneens drie keer per week een ozonpeiling uitgevoerd. Neem daarbij de lengte van de tijdreeks – enkel in Resolute Bay (Canada), Hohenpeissenberg (Duitsland), en Payerne werd er al voor 1969 aan ozonpeilingen gedaan – en je begrijpt het belang van de Ukkel ozonsonde tijdreeks voor het ozononderzoek. Bovendien wordt

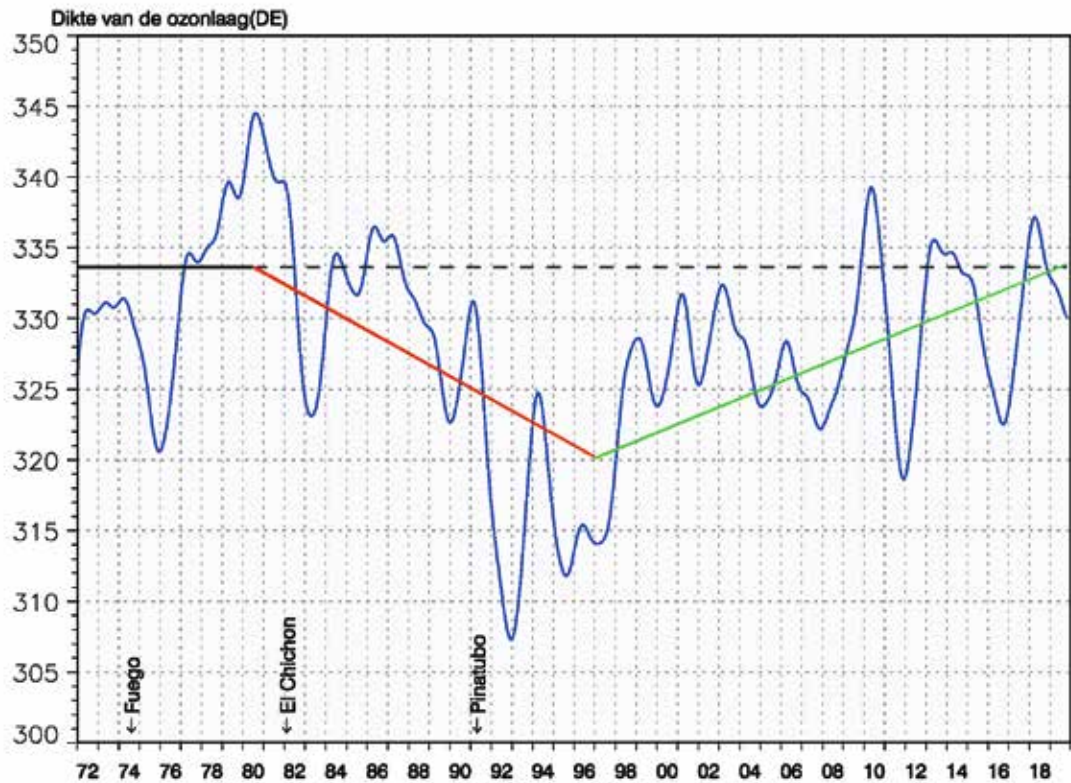
sinds 1971 ook de totale kolomhoeveelheid ozon – zeg maar de dikte van de ozonlaag – opgemeten te Ukkel met een UV-spectrofotometer.

| De evolutie van de ozonlaag

Bij de opstart van de ozonpeilingen in 1969 was er nog niets bekend over de aantasting van de ozonlaag door in de atmosfeer aanwezige chloor- en broomverbindingen. In 1974 pas verscheen een studie in *Nature*¹, die de hypothese naar voren bracht dat de chlooratomen, afkomstig uit de courant gebruikte Chloorfluorkoolwaterstoffen (Cfk's), in de stratosfeer ozon op grote schaal zouden kunnen afbreken. De studie die de eerste waarnemingen van een ozongat boven Antarctica presenteerde, verscheen pas in 1985, ook in *Nature*². Kort daarna werd de urgentie van het probleem internationaal erkend en werd de industriële uitstoot van Cfk's aan banden gelegd door het protocol van Montreal. Een protocol dat door praktisch alle leden van de Verenigde Naties werd ondertekend in 1987. In figuur 2 (zie pag. 22) is heel mooi te zien hoe de dikte van de ozonlaag afnam tot ongeveer 1997, toen de maximale hoeveelheden ozonafbrekende substanties zich in de stratosfeer bevonden. Sindsdien nemen de concentraties van de ozonafbrekende substanties langzaam af en volgt de hoeveelheid ozon een positief groeipad. Let ook op de lokale minima in de figuur na de aangeduide vulkaanuitbarstingen. Op de oppervlaktes van asdeeltjes verlopen de reacties die ozon afbreken (met chloor-, broom-, NO_x-verbindingen) immers nog efficiënter, met lagere ozonconcentraties tot gevolg. Hetzelfde mechanisme is trouwens ook verantwoordelijk voor de vorming van het ozongat boven de Zuidpool. Dan fungeren de ijskristalletjes van stratosferische polaire wolken (of parelmoerwolken) als ideale voedingsbodem voor de efficiënte ozonafbraak met vooral chloorverbindingen.

'Ozonsondes nog steeds onontbeerlijk voor inzicht in atmosferische ozonconcentraties'

Figuur 2: Evolutie van de totale kolomhoeveelheid ozon te Ukkel. Lineaire trends gedurende de periode 1980-1997 en 1997-2019 worden respectievelijk weergegeven in rood en groen. De horizontale zwarte lijn toont de gemiddelde hoeveelheid ozon in de periode 1972-1980, die in stippellijn wordt verlengd tot het einde van de tijdreeks. De tijdstippen van belangrijke vulkaanuitbarstingen worden eveneens aangeduid.



Variabiliteit van troposferisch ozon

De ozonconcentraties in de stratosfeer, zoals al gezegd verantwoordelijk voor 90% van de totale hoeveelheid ozon in de atmosfeer, volgen de variabiliteit van de dikte van de ozonlaag. Wanneer we nu kijken naar de trend van de ozonconcentraties in de troposfeer (zie figuur 3) zien we een toename van de ozonhoeveelheden sinds 1969. De meest uitgesproken toename in de menglaag situeert zich boven het aardoppervlak. In de hogere troposfeerlagen zijn er indicaties van een afname van de ozonconcentraties. Deze evolutie heeft een negatieve impact op onze gezondheid en is te wijten aan de toegenomen emissies van ozonvormende stoffen (NO_x , VOC en CO) door transport en industrie. De trends sinds 1995 zijn bijna dezelfde en verschillen bovendien amper van de (positieve) trends die waargenomen werden door meetinstrumenten onder de cockpit van vliegtuigen die land-

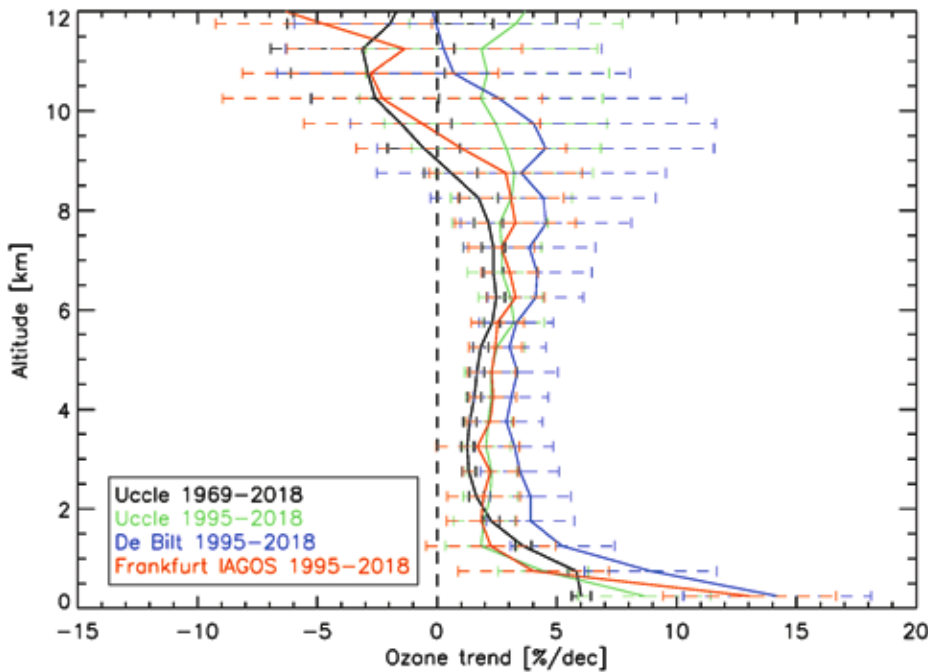
den of opstegen boven de luchthaven van Frankfurt. De toename in ozonconcentraties in De Bilt (dicht bij Utrecht), ook gemeten met ozonpeilingen, is dan weer iets groter dan die in Ukkel en Frankfurt. De onzekerheid is wel groter gezien de lagere frequentie (wekelijks) van de metingen. Deze drie onafhankelijke datareeksen vertonen wel een consistent grotere toename van de oppervlakteconcentraties. Deze toename van de ozonwaarden aan de grond, afgeleid uit de ozonpeilingen, kan geverifieerd worden door de ozonmetingen die het Brussels Milieuagentschap op dezelfde site te Ukkel uitvoert sinds 1986. Deze laatste metingen, die uitgevoerd worden in het kader van de controle van de luchtkwaliteit, geven zelfs nog een sterkere toename (25% meer) te zien in de gemiddelde ozonwaarden. Uit de analyse van deze grondwaarnemingen blijkt wel dat de toename in de gemiddelden vooral te wijten is aan een toename in de lagere ozonwaarden

(achtergrondwaarden), die vooral optreden in de winter, terwijl de hoge zomerse piekwaarden onder vergelijkbare meteorologische omstandigheden eerder afnemen de laatste decennia. Deze trends zijn compatibel met de reductie van de (relatieve hoge, stedelijke) NO_x -emissies die eveneens te Ukkel werden waargenomen.

Uitwisseling tussen stratosfeer en troposfeer

Stratosferische en troposferische lucht hebben verschillende chemische en dynamische eigenschappen en meestal verhindert de thermische gradiënt aan de tropopause dat deze twee luchtmassa's vermengd worden³. Onder sommige omstandigheden, zoals bij turbulentie rond de straalstroom kan stratosferische lucht, zeer rijk aan ozon en zeer droog, toch in de troposfeer terechtkomen. Aangezien de radiosonde- en ozonsondeprofielen gelijktijdig en in zeer hoge verticale resolutie de verdeling van ozonconcentraties, vochtigheid en de windvelden weergeven, kunnen deze tropopause uitzakkingen ('tropopause folds' in het Engels) geïdentificeerd worden in de 50-jarige tijdreeks van ozonsondemetingen te Ukkel volgens een methode ont-

'Langjarige meetreeks te Ukkel illustreert effect Cfk's op afname ozonlaag'

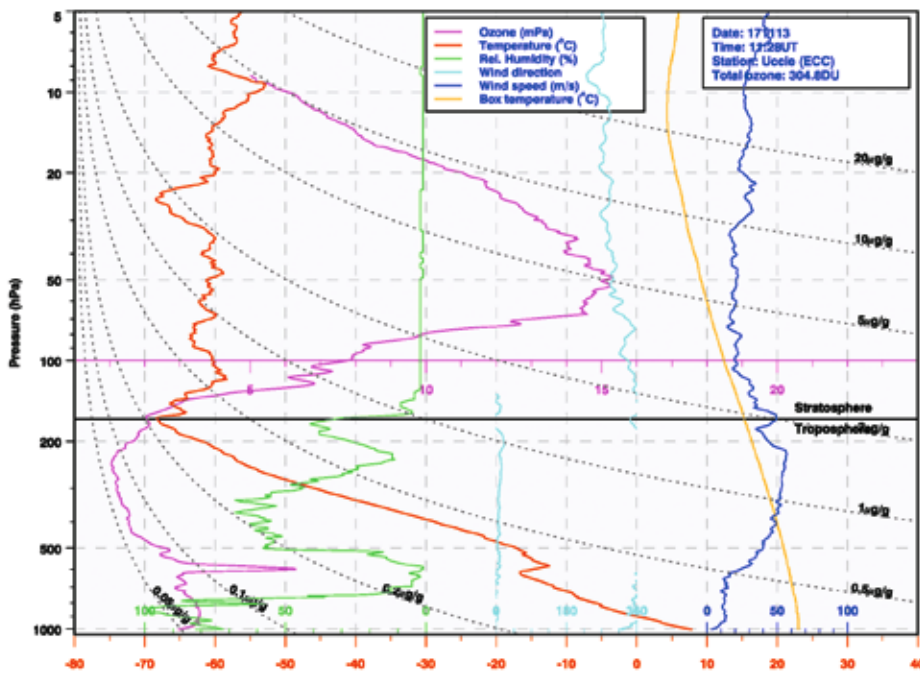


Figuur 3: Verticale verdeling van de relatieve trends in troposferisch ozon concentraties (in %/decennium) te Ukkel voor twee verschillende periodes, te De Bilt (ozonsondegegevens) en Frankfurt luchthaven (In-Service Aircraft for a Global Observing System, IAGOS, dus vliegtuiggegevens) voor de periode 1995-2018.

wikkeld door Van Haver et al. ⁴ (zie figuur 4). Dit is een relatief zeldzaam fenomeen (komt ongeveer voor in 4,4% van de profielen te Ukkel), maar hun frequentie steeg wel zeer sterk en significant over de periode ($0,14 \pm 0,02$ %/jaar). Deze stijging van de frequentie van tropopauze uitzakkingen zou gelinkt kunnen zijn aan de opwarming van het aardoppervlak waardoor ook de stratosferische circulatie versneld wordt. Dit heeft een verhoogd transport tussen de stratosfeer en de troposfeer tot gevolg ⁵.

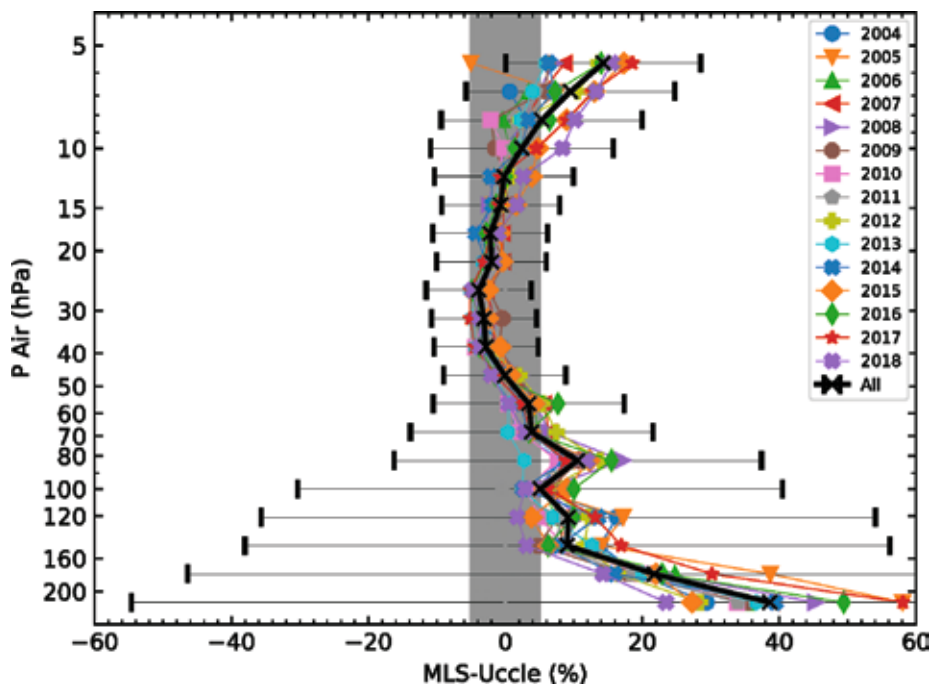
Validatie van satellietwaarnemingen van ozon

Hoewel de techniek van ozonsondes al meer dan vijftig jaar oud is en eigenlijk amper veranderd is doorheen de jaren, blijft het tot op vandaag het enige instrument dat in staat is om het volledige ozonprofiel met grote nauwkeurigheid op te meten vanaf de oppervlakte van de aarde tot in het midden van de stratosfeer (ongeveer dertig kilometer hoogte). En dit met een hoge verticale resolutie en onder alle weersomstandigheden. Satellieten geven wel een globaal beeld van de verticale ozonverdeling, maar de gebruikte sensoren zijn gevoelig voor het meten van ofwel stratosferisch ozon, ofwel troposferisch ozon. Bovendien belemmert de aanwezigheid van wolken de detectie van troposferisch ozon door deze instrumenten of hebben deze instrumenten moeite met het opmeten van de lagere ozonwaarden onder de piekwaarden van de ozonlaag. Ook leveren vele satellietinstrumenten, in tegenstelling tot de ozonsondes, geen absolute meting van de ozonconcentraties op. Omwille van al deze redenen worden ozonsondewaarnemingen gebruikt als referentie of ijkpunten van satellietwaarnemingen. Een voorbeeld van een dergelijke validatie van de Microwave Limb Sounder (MLS) ozonmetingen aan boord van de AURA-satelliet bij zijn passages boven Ukkel is gegeven →



Figuur 4: Een voorbeeld van een tropopauze uitzakking rond ongeveer 600 hPa (iets hoger dan vier km) in het ozonprofiel te Ukkel van 13 november 2017. Deze kan duidelijk geïdentificeerd worden door zijn uitgesproken ozonmaximum (roze kleur), zeer lage relatieve vochtigheid (lichtgroene kleur), zijn sterke verticale stabiliteit [zie de thermische inversie of lokaal temperatuurminimum in het rood] en de nabijheid van een straalstroom (hoge windsnelheden en hoge verticale windgradiënt bij de uitzakking).

Figuur 5: Relatieve verschillen tussen MLS en Ukkel ozonsondeprofielen voor de periode 2004-2018 (in het zwart), met standaardafwijkingen (één sigma) als foutbalken. De relatieve verschillen voor de verschillende jaren zijn in kleur weergegeven.



in figuur 5. Hierin tonen we de relatieve verschillen tussen de ozonsonde en MLS-metingen op de verticale resolutie van de satellietwaarnemingen (variërend tussen 3 en 6 km, afhankelijk van de hoogte). Deze relatieve verschillen bedragen minder dan 5% tussen 10 en 70 hPa (respectievelijk 30 en 18 km hoogte), met grotere verschillen daarboven en daaronder door respectievelijk minder accurate metingen door de ozonsondes en de satelliet.

Bovendien variëren de verschillen weinig van jaar tot jaar, wat er op duidt dat beide instrumenten ook zeer stabiel zijn ten opzichte van elkaar. Ook de ozonmetingen van andere satellieten worden op een gelijkaardige manier gevalideerd met ozonsondepeilingen, zowel in een operationele context als in wetenschappelijke analyses met bewerkte data.

Conclusie

Toen ongeveer vijftig jaar geleden besloten werd tot het uitvoeren van operationele ozonpeilingen door het KMI te Ukkel, had men totaal niet het vermoeden wat het belang en de verschillende toepassingen van deze meetreeks zouden kunnen zijn. Eerst en vooral illustreert de tijdreeks de impact van het toenemend gebruik van Cfk's op de verdunning van de ozonlaag in de stratosfeer (het 'ozongat').

Maar evenzeer hoe een wereldwijde inspanning als het bannen van Cfk's in de industrie door het Montreal Protocol kan bijdragen aan het, zij het zeer langzame, herstel van de ozonlaag. De strijd is dus nog niet gestreden en dat geldt evenzeer voor de troposferische ozonconcentraties die ondanks dalende emissies van NO_x ,

VOC's en CO toch blijven toenemen in Ukkel. Hier speelt mogelijk ook de klimaatopwarming een rol aangezien er tekenen zijn dat stratosferische ozon vaker getransporteerd wordt naar de troposfeer. En dan moeten we nog de kanttekening maken dat (troposferisch) ozon zelf ook een broeikasgas is!

Ondanks de veelheid aan gesofisticeerde meetinstrumenten voor ozon aan boord van satellieten, blijft een techniek uit de vorige eeuw zoals ozonsondes ook vandaag nog zeer relevant. ■

'Montreal Protocol werkt, maar de strijd is nog niet gestreden'

Roeland Van Malderen, Dirk De Muer, Hugo De Backer, Deniz Poyraz, Willem W. Verstraeten, Veerle De Bock, Andy Delcloo, Alexander Mangold, Quentin Laffineur zijn onderzoekers bij het Koninklijk

Meteorologisch Instituut (KMI, België). Marc Allaart is onderzoeker bij het Koninklijk Nederlandse Meteorologisch Instituut (KNMI). Frans Fierens is wetenschappelijk medewerker bij de Belgische Intergewestelijke Cel voor het Leefmilieu (IRCEL). Valérie Thouret is onderzoekster bij het laboratorium voor Aerologie aan de Universiteit van Toulouse.

Referenties

1. Molina, M., Rowland, F. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature* 249, 810-812, <https://doi.org/10.1038/249810a0>, 1974.
2. Farman, J., Gardiner, B. & Shanklin, J. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction. *Nature* 315, 207-210, <https://doi.org/10.1038/315207a0>, 1985.
3. Reid, H.J. and Vaughan, G.: Convective mixing in a tropospheric fold, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 130, 1195-1212, doi: 10.1256/qj.03.21, 2004.
4. Van Haver, P., De Muer, D., Beekmann, M., Mancier, C., *Climatology of tropopause folds at midlatitudes*, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1033-1036, doi: 10.1029/96GL00956, 1996.
5. Tarasick, D.W., Carey-Smith, T.K., Hocking, W.K., Moeini, O., He, H., Liu, J., Osman, M.K., Thompson, A.M., Johnson, B.J., Oltmans, S.J., and Merrill, J.T., *Quantifying stratosphere-troposphere transport of ozone using balloon-borne ozonesondes, radar windprofilers and trajectory models*, *Atmospheric Environment*, Volume 198, Pages 496-509, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.040>, 2019.