

Heel de atmosfeer

Citation for published version (APA):

Kelder, H. M. (2000). *Heel de atmosfeer*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2000

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Heel de atmosfeer

Intreerede

prof.dr. H.M. Kelder

Intreerede

Uitgesproken op 27 oktober 2000
aan de Technische Universiteit Eindhoven

prof.dr. H.M. Kelder

Mijnheer de Rector Magnificus, Dames en heren,

De atmosfeer is een natuurlijk laboratorium waarin zich een grote variëteit van processen afspeelt. Onder het motto “heel de atmosfeer” wil ik U gaarne in vogelvlucht door de atmosfeer leiden. Daarbij wil ik U wijzen op verschillende aspecten van de atmosfeer met de nadruk op de atmosfeer als een samenhangend geheel. Ook hoop ik ik te illustreren hoe boeiend en fascinerend het atmosfeeronderzoek kan zijn.

Er is samenhang tussen het klimaat en de chemie van de atmosfeer, samenhang tussen de verschillende atmosferische lagen, samenhang tussen de circulatie in de tropen en in die van de hogere breedtes.

Het is een uitdaging te trachten inzicht te verkrijgen in het gecompliceerde gedrag van de atmosfeer als resultaat van verschillende processen en het verband tussen deze processen. Dit inzicht is belangrijk, aangezien het steeds duidelijker wordt dat de mens wezenlijke veranderingen in de atmosfeer veroorzaakt.

Tot honderd jaar terug werd de atmosfeer als een geheel beschouwd. Eind negentiende eeuw werd het echter mogelijk om met

bemande luchtballonnen op te stijgen tot boven de tien kilometer hoogte. Men ontdekte toen met behulp van metingen vanuit ballonnen dat de temperatuur in de atmosfeer eerst sterk daalde met de hoogte zoals de verwachting was op basis van temperaturen op bergtoppen. Echter boven de 10 kilometer bleken de temperaturen veel minder sterk te dalen en in sommige gevallen nam de temperatuur zelfs geleidelijk weer toe met de hoogte. Dit was een complete verrassing. Pioniers van dit onderzoek waren de Fransman Teisserenc de Bort en de Duitser Assmann. Aan Assmann werd in 1903, deels ook voor dit werk, de Buijs-Ballot medaille uitgereikt door de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen.

De eerste verklaring van deze temperatuurtoename bestond in de aanname van een warme luchtstroming van de equator naar de hoge breedtes. Geleidelijk aan groeide echter het inzicht dat het niet een warme luchtstroming was maar dat zich boven de 10 kilometer hoogte een laag bevond met wezenlijk andere eigenschappen. In 1902 stelde Teisserenc de Bort dan ook voor om de atmosfeer in twee lagen te verdelen, de troposfeer van tropos, “keren”, “wentelen”

en de stratosfeer van “stratus”, gelaagd. Wie nu als de ontdekker van de stratosfeer kan worden beschouwd is niet duidelijk. Doorbraken zijn wel vaker moeilijk precies te duiden, of om gepaste beeldspraak te gebruiken, ze hangen in de lucht. Het waarnemen van de atmosfeer vanuit ballonnen was een groot avontuur. Metingen werden door onderzoekers zelf verricht en dat liep niet altijd goed af. Door zuurstofgebrek belandden sommige onderzoekers bij terugkeer in coma en enkelen lieten zelfs het leven. Dat dit de nodige indruk wakte bij het grote publiek blijkt uit een illustratie uit een Frans boek uit die tijd.

Tot het einde van de negentiende eeuw was dus de atmosfeer boven de 10 kilometer hoogte grotendeels terra incognita. Het is opmerkelijk dat twee belangrijke ontwikkelingen voor de kennis van de hogere atmosfeer bijna gelijktijdig plaats vonden. De ontdekking van de stratosfeer zoals zojuist genoemd en daarnaast de ontdekking van de voortplanting van radiogolven in de atmosfeer door Marconi. Dit laatste wees op een gedeeltelijke ionisatie van de hogere atmosfeer.

Opbouw en samenstelling van de atmosfeer

Om de samenhang in de atmosfeer te kunnen verklaren is eerst een nadere beschrijving van de atmosfeer vereist.

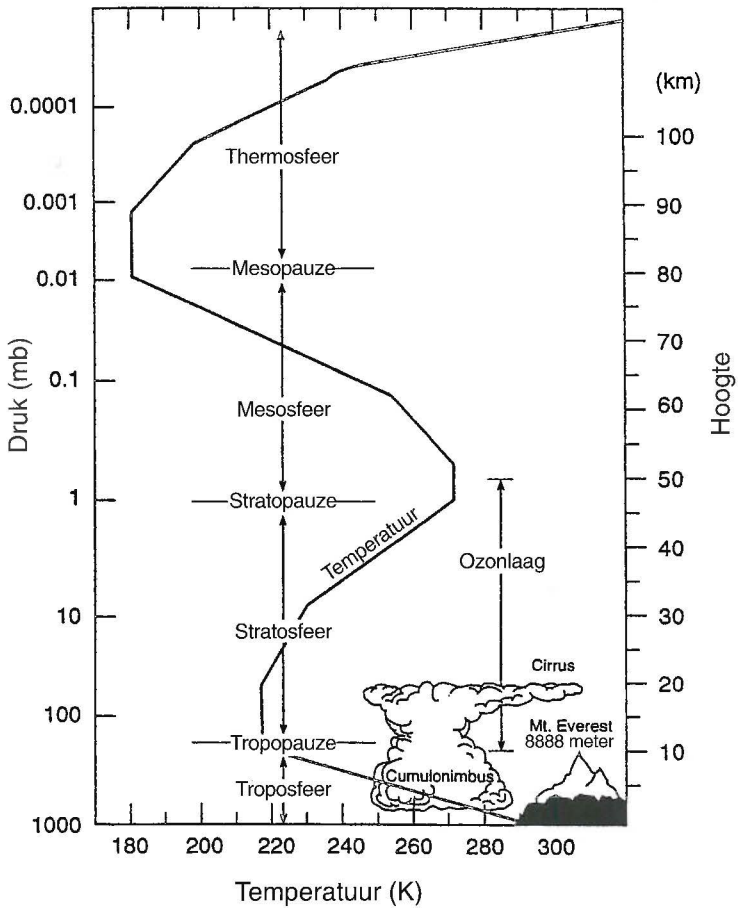
De atmosfeer is een dunne gasvormige schil die de aarde omhult en met de aarde verbonden is door de zwaartekracht. De massa van de atmosfeer is 5×10^{18} kg. Dat is slechts een tien miljoenste van die van de vaste aarde.



Figuur 1. Een rampzalig verlopen bemande ballonvlucht.

De atmosfeer kan op diverse wijzen worden ingedeeld. Beperken we ons tot een indeling op basis van het verticale verloop van de temperatuur dan leidt dat tot vier lagen:

de troposfeer, de stratosfeer, de mesosfeer en de thermosfeer.



Figuur 2. Verticaal profiel van de temperatuur in de atmosfeer tussen het oppervlak en 100 kilometer hoogte.

De troposfeer

De troposfeer is de onderste laag van de atmosfeer. In de troposfeer neemt de temperatuur tussen de 6 en 10 graden Celsius af per kilometer stijging tot ongeveer -50 graden Celsius. De troposfeer bevat 90 % van de totale massa van de aardatmosfeer. De troposfeer wordt begrensd door de tropopauze, die zich op een hoogte bevindt die afhankelijk van de geografische breedte varieert tussen de 8 en 18 kilometer. In de troposfeer vindt snelle verticale menging plaats met tijdschalen variërend van uren tot dagen.

De stratosfeer

In de stratosfeer neemt de temperatuur toe met de hoogte tot 0 graden Celsius. Dat wordt veroorzaakt doordat 90 % van de ozon in de atmosfeer zich in de stratosfeer bevindt. Ozon absorbeert ultraviolette zonnestraling en warmt daarmee deze laag op. De stratosfeer wordt aan de bovenzijde begrensd door de stratopauze die zich op ongeveer 50 kilometer hoogte bevindt. De stratosfeer is stabiel gelaagd met sterke

horizontale winden en trage verticale menging en dat leidt voor gassen, ingebracht in de stratosfeer, tot verblijftijden van 1 tot meer dan 6 jaar.

De mesosfeer

In de mesosfeer daalt de temperatuur tot waarden van ongeveer -120 graden Celsius en daarmee tot de laagste temperaturen van de hele atmosfeer. De verticale stabiliteit is gering en door veelvuldig optredende dynamische instabiliteit is er sterke verticale menging. De mesosfeer wordt aan de bovenzijde begrensd door de mesopauze die zich op gemiddeld 90 kilometer hoogte bevindt.

De thermosfeer

In de thermosfeer is sprake van een zeer sterke toename van de temperatuur met de hoogte tot waarden tussen 1000 en 2000 graden Celsius, afhankelijk van de zonnactiviteit. De thermosfeer is zeer stabiel en vertoont dus slechts geringe verticale uitwisseling. In de thermosfeer is ongeveer

een op de miljoen luchtmoleculen geïoniseerd en daarom wordt deze laag ook wel de ionosfeer genoemd.

De atmosfeersamenstelling

De atmosfeer bestaat uit een mengsel van gassen. De meest voorkomende gassen zijn stikstof en zuurstof.

In de atmosfeer bevindt zich ook een veelheid aan gassen in kleine hoeveelheden, zogenaamde sporengassen zoals waterdamp, kooldioxide, methaan en ozon. Deze sporengassen zijn uiterst belangrijk. Dit wil ik illustreren aan de hand van de verschillende rollen die ozon speelt. Ozon is ten eerste belangrijk door de afscherpende werking tegen de ultraviolette straling van de zon. Zonder de ozonlaag zou geen leven mogelijk zijn op het land. In de evolutie van het leven op aarde wordt de gang van leven vanuit de oceaan naar het vasteland ook gekoppeld aan het tijdstip dat de ozonlaag een kritische dikte overschreed. Een te hoge concentratie van ozon op leefniveau is echter schadelijk voor mens, dier en plant. Verder speelt ozon een essentiële rol in de chemie van de atmosfeer. Tenslotte is ozon ook

nog een belangrijk broeikasgas.

De atmosfeer wordt als kwetsbaar aangeduid en de geschiedenis van de laatste vijftig jaar heeft daarvoor overtuigende argumenten geleverd. Tot vijftig jaar terug werd de atmosfeer als chemisch inert beschouwd en bijvoorbeeld ozon in de troposfeer toegeschreven aan lekkage vanuit de stratosfeer. Maar geleidelijk aan groeide het inzicht dat de lokale productie van ozon in de troposfeer veel belangrijker is dan het transport vanuit de stratosfeer. Bovendien bleek dat menselijke activiteiten leidden tot toename van ozon in de troposfeer. In extreme vorm leidde dit tot optreden van smog. Ook werd vijftien jaar geleden de kwetsbaarheid van de stratosferische ozonlaag ontdekt in de vorm van het jaarlijks terugkerend ozongat. De laatste tien jaar werd ook duidelijk dat er sprake is van een geleidelijke wereldwijde ozonafname. Een belangrijke uitdaging voor atmosfeeronderzoekers is het verwerven van inzicht in de processen die ten grondslag liggen aan de kwetsbaarheid van de atmosfeer en in de samenhang tussen die processen.

Samenhang tussen de stratosfeer en de troposfeer

De troposfeer en stratosfeer worden vaak afzonderlijk beschouwd maar ze zijn dynamisch, chemisch en via straling met elkaar verbonden

- Dynamische koppeling
Atmosfeergolven die opgewekt worden in de troposfeer kunnen zich zowel horizontaal als verticaal voortplanten. Ze worden gereflecteerd maar ook geabsorbeerd in de stratosfeer, dit afhankelijk van temperatuur en windverloop in de stratosfeer. De troposferische golven bepalen daarvoor gedeeltelijk de stratosferische winden.
- Chemische koppeling. Door transport van sporengassen van de stratosfeer naar de troposfeer en in omgekeerde richting zijn de samenstelling van de troposfeer en de stratosfeer nauw met elkaar verbonden.
- Stralingskoppeling. De stralingsbalans van de stratosfeer is afhankelijk van die van de troposfeer en omgekeerd. Zo leidt de toename van kooldioxides in de atmosfeer tot opwarming van de troposfeer maar tot koeling van de stratosfeer.

Op deze koppelingen kom ik later nog uitgebreid terug.

Het scheidingsvlak tussen de troposfeer en de stratosfeer is de tropopauze. In 1926 werd voor het eerst de naam de tropopauze geïntroduceerd voor dit vlak. De definitie van de Wereld Meteorologische Organisatie van de tropopauze luidt als volgt: het is het vlak waarboven de temperatuur per kilometer met minder dan 2 graden afneemt over een dikte van meer dan 2 kilometer. Deze definitie kan leiden tot meervoudige tropopauzes en in die gevallen wordt de laagste hoogte als de tropopauze beschouwd.

De hoogte van de tropopauze op gematigde breedtes wordt in eerste benadering verklaard in termen van de stralingsbalans en convectie, maar dit leidt tot te lage hoogtes. Andere mechanismen zoals depressies blijken nodig om de tropopauze op middelbare breedtes naar grotere hoogte te duwen. De hoogte van de tropopauze is niet constant maar varieert op verschillende ruimtelijke en tijdschalen, een depressie bijvoorbeeld duwt aan de voorkant de tropopauze omhoog en aan de achterkant trekt hij hem naar beneden. Na passage tendeeft de tropopauze weer naar zijn gemiddelde

waarde via stralingsafkoeling, stralingsopwarming of convectie met tijdsschalen van dagen.

In de tropen leidt het concept van de tropopauze als de omhullende van de diepe convectie eveneens tot een te lage tropopauzehoogte. Maar door andere mechanismen zoals door de Brewer-Dobson circulatie, waarover zo dadelijk meer, wordt de tropopauze als het ware omhoog gezogen.

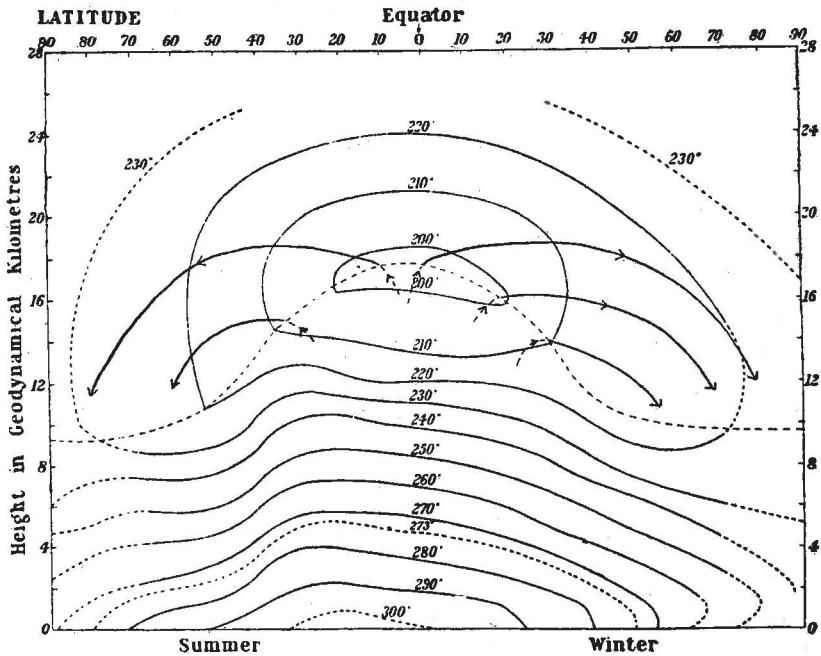
De tropopauze is een barrière voor verticaal transport. Uit metingen blijkt dat het zinnig is de tropopauze niet als een oneindig dun oppervlak te beschouwen. De tropopauze als overgangslaag met een dikte van enkele kilometers past beter bij de waarnemingen die duiden op een mengsel van lucht van afwisselend stratosferische en troposferische oorsprong. Op middelbare breedtes dragen depressies bij aan de menging in deze overgangslaag evenals statische en dynamische instabiliteiten, convectie en golven.

De Brewer-Dobson circulatie

Op middelbare breedtes is de ozonkolom groter dan de ozonkolom in de tropen, ter-

wijl de tropen het gebied met de grootste ozonproductie zijn. Om dit te verklaren stelde zeventig jaar geleden Dobson voor dat er in de hoge atmosfeer een grootschalige langzame stroming is van de tropen naar de middelbare breedtes.

Twintig jaar later bleek uit metingen dat de luchtvochtigheid boven Engeland veel lager was dan verondersteld mocht worden op basis van ter plekke in de stratosfeer opstijgende troposferische lucht. Om dit te verklaren stelde Brewer eveneens een langzame poolwaartse stroming voor in de hoge atmosfeer van de equator naar de polen. De droogte van de stratosferische lucht wordt daarmee verklaard. De lucht komt uit de tropische hoge troposfeer en door de passage door de koude tropische tropopauze wordt ze uitgedroogd. Sindsdien draagt deze stroming de naam Brewer-Dobson circulatie. Een verklaring in termen van een oplossing van de bewegingsvergelijkingen werd pas in de zeventiger en tachtiger jaren gevonden en deze zal ik hieronder kort schetsen. De Brewer-Dobson circulatie kan beschreven worden als een meridionale stroming. De bewegingsvergelijkingen voor een dergelijke circulatie bevatten twee termen die de zonaal gemiddelde overdracht van



Isotherms over the Globe
 A supply of dry air is maintained by a slow mean circulation from
 the equatorial tropopause.

Figuur 3. De Brewer-Dobson circulatie zoals door Brewer geschetst in 1949.

impuls en warmte door planetaire golven representeren. Het zonaal gemiddelde verticale snelheidsveld op een bepaalde hoogte wordt gegeven door de integraal over deze termen van die bepaalde hoogte tot oneindig. Dat betekent dat het snelheidsveld ook onder het gebied van impulsoverdracht wordt bepaald door deze overdracht in de middenstratosfeer. Dit is het zogenaamde neerwaartse sturingsprincipe. Deze zegt dat

de Brewer-Dobson circulatie en daarmee de grootschalige uitwisseling tussen stratosfeer en troposfeer wordt bepaald door de golfgeïnduceerde impuls en warmteflux van planetaire golven, die zijn opgewekt in de troposfeer. Het wordt ook wel uitgedrukt door te stellen dat de stratosferische circulatie wordt gedreven door een pomp die wordt aangedreven door de impulsoverdracht van golven. De laatste jaren heeft dit

inzicht geleid tot beeldende terminologie rond de deze circulatie, zoals hyper- en onderventilatie om uit te drukken in hoeverre de troposferische opwaartse circulatie overeenkomt met de Brewer-Dobson circulatie.

De Brewer-Dobson circulatie is traag, typische verticale snelheden bedragen enkele tienden van mms per seconde in de tropen en de transporttijd van de tropen tot middelbare breedtes is in de orde van jaren.

De Brewer-Dobson stroming is een voorbeeld van de dynamische samenhang tussen troposfeer en stratosfeer. De Brewer-Dobson circulatie is ook van belang voor de snelheid waarmee CFK's door de atmosfeer worden afgebroken en het chloor wordt verwijderd uit de atmosfeer. De traagheid van deze stroming leidt tot de verwachting dat het nog wel 50 jaar zal duren aler de chloorbelasting van de stratosfeer terug is op het oude niveau en het ozongat verdwenen zal zijn.

Transport door de tropopauze

Voor de samenstelling van zowel de troposfeer als van de stratosfeer is de uitwissel-

ing tussen deze lagen erg belangrijk. Dit zal ik aan de hand van enige voorbeelden illustreren.

Hoewel de ozonflux vanuit de stratosfeer klein is en van dezelfde orde als de vernietiging van ozon aan het aardoppervlak, bepaalt de waarde van de ozonflux of er een netto productie of een netto destructie van ozon in de troposfeer plaats vindt. Over de grootte van deze fluxen bestaat echter grote onzekerheid. De schattingen van de ozonfluxen door de tropopauze variëren met een factor vijf.

Ook voor andere budgetten, zoals bijvoorbeeld het NO_x budget in de hoge troposfeer, geldt dat deze sterk afhangen van de stratosferische flux. Het NO_x budget kent echter ook andere grote onzekerheden zoals de productie door bliksem en het transport vanuit de grenslaag. Een beter inzicht in het NO_x budget is het onderwerp van onderzoek voor twee Eindhovense promovendi.

Belangrijk voor de chemie en temperatuur van de stratosfeer is de waterdamp in de stratosfeer. De waterdamp in de stratosfeer is grotendeels afkomstig uit de troposfeer. Geschat wordt dat slechts ongeveer een kwart afkomstig is van in situ productie

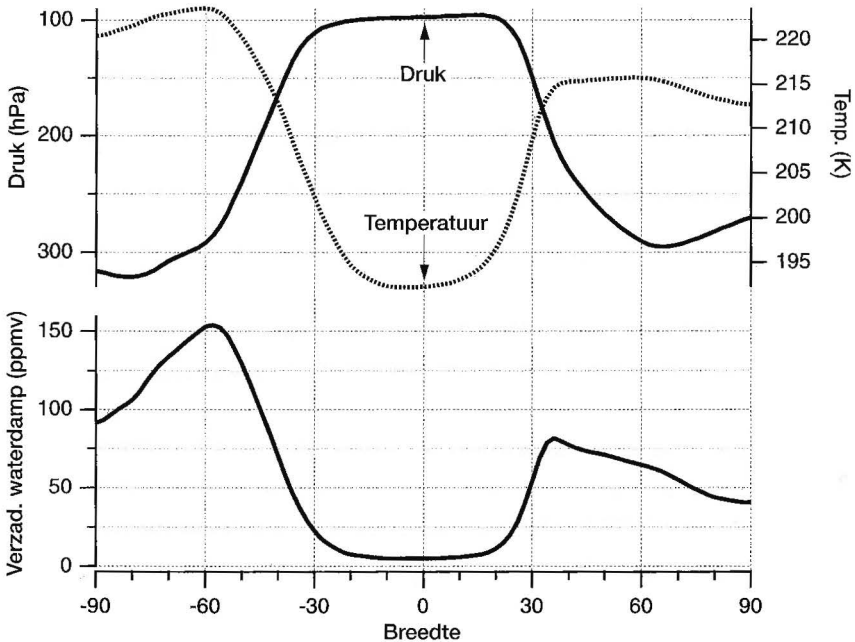
door oxidatie van methaan, eveneens afkomstig uit de troposfeer.

Het grootschalige transport van waterdamp tussen troposfeer en stratosfeer vindt plaats door de tropische tropopauze als deel van de Brewer- Dobson circulatie. Dat betekent een droge stratosfeer omdat de hoeveelheid waterdamp grotendeels bepaald wordt door de lage temperatuur van de tropische tropopauze, ongeveer -80 graden Celsius.

Deze temperatuur is echter te hoog om de

lage waarden van 4 ppmv te kunnen verklaren. Er zijn dus extra droogmechanismen nodig.

Danielsen stelde droging door diepe convectie voor. Deze diepe convectie leidt tot bewolking in de vorm van aambeelden in de hoge tropische troposfeer. Deze aambeelden worden aan de onderkant opgewarmd door absorptie van straling en aan de bovenkant afgekoeld door uitstraling naar de ruimte. Daardoor ontstaan er



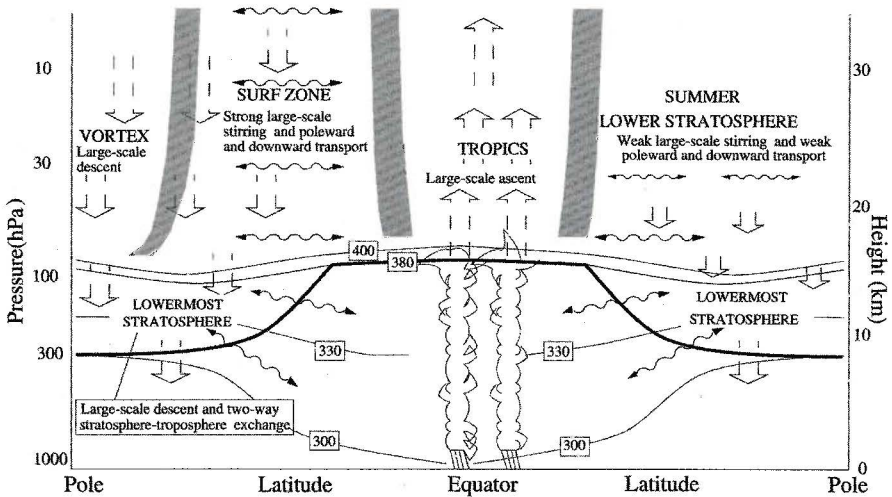
Figuur 4. Temperatuur, druk en mengverhouding van waterdamp op tropopauze hoogte.

convectieve instabiliteiten en in de stijgende lucht worden ijskernen mee omhoog genomen en door afkoeling groeien ze tot ze zo zwaar geworden zijn dat ze naar beneden vallen.

Ook atmosfergolven rond de tropopauze kunnen een rol spelen in de droging van de lucht. Door adiabatische afkoeling in de golf toppen vormen zich groeiende ijskristallen die vervolgens uitzakken, hetgeen eveneens leidt tot uitdroging van de lucht. Of deze twee uitwringmechanismen de enige zijn en het relatieve belang van de mechanismen zijn onopgeloste problemen.

Uit waarnemingen blijkt dat de stratosfeer natter wordt. Dat kan duiden op een stijging van de tropopauze temperatuur maar ook op veranderingen in de luchtstroming. De stijging van de hoeveelheid waterdamp in de stratosfeer leidt tot afkoeling en tot ozonafbraak in de stratosfeer.

Op middelbare breedtes wordt uitwisseling tussen stratosfeer en troposfeer onder meer veroorzaakt door depressies. Deze veroorzaken vouwen in de tropopauze. Deze vouwen zijn deels irreversibel wat tot transport leidt.



Figuur 5. Overzicht van de verschillende processen die een rol spelen bij de uitwisseling tussen de troposfeer en stratosfeer.

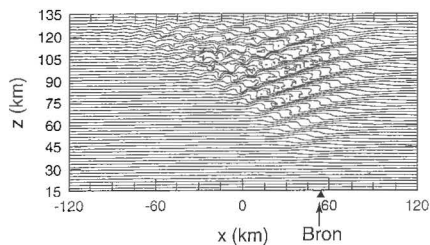
De uitwisseling tussen troposfeer en stratosfeer is een boeiend terrein van onderzoek, waarbij verschillen processen een rol spelen, zoals aangegeven in figuur 5. Een promovenda aan deze universiteit onderzoekt de bijdrage van de vouwen aan het transport van lucht en ozon door de tropopause.

Interne zwaartegolven in de atmosfeer

Een klasse van atmosfeergolven die een belangrijke rol speelt in de koppeling tussen de verschillende lagen in de atmosfeer is die van de interne zwaartegolven.

De eerste ideeën omtrent interne zwaartegolven werden rond 1883 geformuleerd door Rayleigh en Lamb. Zij ontdekten dat in een stabiele gelaagde atmosfeer een luchtpakketje dat uit zijn evenwicht verticaal wordt opgetild oscilleert met een periode van ongeveer 5 minuten. Met dit oscillatiemechanisme corresponderen de zogeheten interne zwaartegolven. Deze hebben periodes die variëren van vijf minuten tot vele uren. De golven planten zich zowel in de horizontale als in de verticale richting

voort. Door de afname van de luchtdichtheid met de hoogte volgt uit de wet van energiebehoud dat de amplitude met de hoogte toeneemt. Deze groei van de amplitude met de hoogte werd al door Rayleigh ontdekt maar merkwaardigerwijs was er geen interesse in het lot van deze groeiende golven. Rayleigh zelf wist ook niet goed raad met de exponentiele toename van de amplitude en merkte op dat die maar niet al te letterlijk moest worden opgevat.



Figuur 6. Potentiële temperatuur verstoord door een interne zwaartegolf.

In de zestiger jaren leefde het onderzoek van zwaartegolven sterk op. Uit ionosfeermetingen bleek het bestaan van zogenaamde travelling ionospheric disturbances. Deze verstoringen in de elektronendichtheid werden door Hines correct geïnterpreteerd als gevolg van interne zwaartegolven.

De golven werden in de lagere atmosfeer opgewekt en door de exponentiele groei van de amplitude hadden ze in de ionosfeer een grote amplitude en waren daardoor duidelijk detecteerbaar.

Vanaf eind zeventiger jaren is er door medewerkers van TU Eindhoven, het KNMI en radioastronomen van Dwingelo veel aandacht besteed aan zwaartegolven in de ionosfeer. Dit bleek een vruchtbaar onderzoeksterrein, resulterend in een aantal promoties aan deze universiteit.

Vanuit de kennis opgebouwd in de ionosfeer, herkende men ook in de lagere atmosfeer steeds meer verschijnselen die verklaard konden worden met behulp van zwaartegolven.

Een van de meest interessante verschijnselen die bij de voortplanting van zwaartegolven kan optreden is een zogeheten kritieke laag. Als in een atmosfeer met een hoogteafhankelijke achtergrondwind de fasesnelheid van de golf gelijk wordt aan de snelheid van de achtergrondwind is er sprake van een kritieke laag. De brekingsindex van de golf wordt dan oneindig groot en er treedt zogeheten resonantie op.

In 1969 werd door Booker en Bretherton de voortplanting van zwaartegolven door

een kritieke laag voor het eerst correct beschreven. Het gedrag van de golf in de kritieke laag bleek te worden bepaald door de waarde van het Richardson getal in deze laag. Het Richardson getal is een maat voor de dynamische stabiliteit van een vloeistofstroming. Booker en Bretherton hielden alleen rekening met waarden van het Richardson getal groter dan een kwart en vonden dat er dan absorptie van golfenergie door de achtergrondstroming op trad.

Enige jaren later vond men dat voor waarden van het Richardson getal kleiner dan een kwart er overreflectie en overtransmissie kan optreden. Dat wil zeggen dat de golf versterkt wordt in die kritieke laag. Dit gaat ten koste van de energie van de achtergrondstroming. Het lineaire probleem bleek elegante analytische oplossingen in termen van hypergeometrische functies zoals onder meer beschreven in publicaties en proefschriften van medewerkers van de TU Eindhoven en van het KNMI. De opwekking van zwaartegolven is ook een interessant terrein van onderzoek. Door luchtstroming over orografie, convectie gebieden maar ook door stromingsinstabiliteiten kunnen deze golven worden opgewekt.

Zwaartegolven zorgen voor een koppeling van de dynamica van de lagere atmosfeer met de dynamica van de hogere atmosfeer, een bottom-up sturing.

Op de TUE wordt promotieonderzoek gericht naar de invloed van zwaartegolven op de menging en het transport van sporengassen in de polaire atmosfeer.

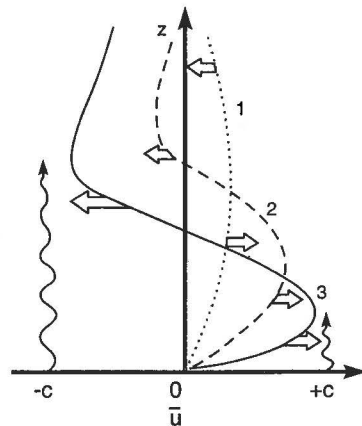
Koppeling tussen de lagere atmosfeer en hogere atmosfeer en de quasi-twee-jaarlijkse schommeling

De Brewer-Dobson circulatie was een voorbeeld van dynamische koppeling tussen de troposfeer en de stratosfeer en ook is de rol van interne zwaartegolven bij de dynamische koppeling besproken. Er zijn echter nog meer voorbeelden van deze koppeling te geven.

De circulatie in de stratosfeer, mesosfeer en lagere thermosfeer kent een sterke variabiliteit op tijdschalen van minuten tot vele jaren ook op heel verschillende ruimtelijke schalen. Een aanmerkelijk deel van deze variabiliteit wordt veroorzaakt door processen in de troposfeer.

Eliassen&Palm lieten in 1961 zien dat golven door dissipatie en breking impuls kunnen overdragen. De kritieke lagen van golven spelen daarbij een belangrijke rol, want daar worden de amplitudes zeer groot en golven breken en dissiperen sterk rond deze lagen.

Deze kennis bracht Lindzen in 1968 op een verklaring voor het optreden van de Quasi Biennial Oscillation (QBO) die voor het eerst in het begin van de zestiger jaren was waargenomen. De QBO is een periodieke omslag in de stratosferische windrichting van west naar oost met een periode van ongeveer 27 maanden.



Figuur 7. Het mechanisme van de quasi-tweejaarlijkse schommeling.

In de tropen bestaat een aantal karakteristieke golven zoals Kelvin en Rossby zwaarte golven en daarnaast ook zwaartegolven.

Al deze golven kunnen zich naar boven voortplanten en kunnen impuls overdragen. Deze overdracht leidt tot een ongeveer 27 maanden durende oscillatie in de windrichting in het gebied tussen de tropopauze en 30 kilometer hoogte.

De afhankelijkheid van de reflectie van planetaire golven van de wind en temperatuurvelden in de stratosfeer biedt de mogelijkheid van beïnvloeding van de troposferische circulatie door de stratosfeer. Hier is sprake van een top-down sturing.

Dit fascinerende onderzoeksveld is de laatste jaren sterk in ontwikkeling. Een promotieonderzoek aan deze Universiteit heeft als onderwerp de koppeling tussen de stromingen in de stratosfeer en de stromingen in de troposfeer.

Ozon en de koppeling met circulatie en klimaat

De Nederlander Van Marum staat te boek als degene die als eerste ozon heeft ontdekt. Hij rook in 1785 een sterke lucht na een

electriche ontlading teweeg gebracht te hebben in een zuurstofmengsel.

Zijn bedoeling was om na te gaan of de electriciteit zich met zuurstof verbond. En, zoals beschreven in de Annalen van het Teylers Genootschap, “wij bemerkten dat het mengsel een zeer sterke reuk had aangenomen die ons zeer duidelijk voorkwam de eigenaartige reuk der electriche stof te zijn”.

Van Marum was als medicus opgeleid. Hij werd gepasseerd voor hoogleraar in de geneeskunde in Groningen en zocht daarna zijn heil in de natuurkunde. In het ozononderzoek heeft hij dus de geschiedenisboeken gehaald.

Ruim 150 jaar later, in 1839, was Schönbein de tweede die rapporteerde over deze geur. Hij gaf bovendien ozon zijn naam, ozon naar Ozein dat het Griekse woord is voor ruiken.

Hij bouwde het eerste instrument om ozonconcentraties te meten. Ozon werd vervolgens een populair onderzoeksthema. Zo zeer zelfs dat in 1865 de Franse Nationale Academie van Wetenschap een commissie van 9 leden benoemde met als taak het aantal wetenschappelijke publicaties over het ozononderzoek in te perken.

Franse onderzoekers deden intussen uitstekend werk door vanaf 1876 in het park MontSouris in Parijs meer dan tien jaar lang ozon aan het aardoppervlak te meten. Deze metingen zijn recent opnieuw geanalyseerd en de resultaten duiden op een verdrievoudiging, van 20 naar 60 ppbv, van de ozonmengverhouding in de grenslaag in de laatste 120 jaar.

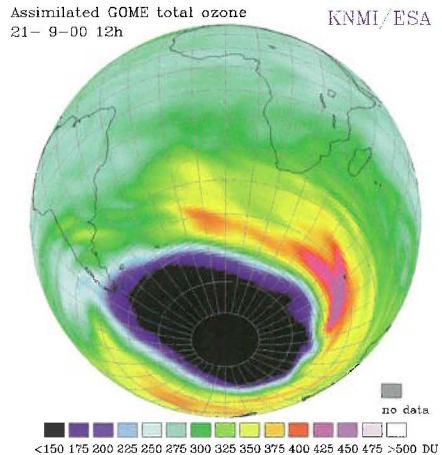
Chapman formuleerde in 1930 als eerste een model voor de ozonlaag. Zijn model gaf echter te hoge waarden voor de ozon doordat hij te weinig afbraak van ozon in rekening bracht. Later bleek dat er meerdere destructiecycli van ozon bestaan, zoals de NO_x -cyclus die eind zestiger jaren door de latere Nobelprijs winnaar, de Nederlander Paul Crutzen, werd ontdekt.

In de zeventiger jaren begon men zich toenemende zorgen te maken over de ozonlaag. Zo werd in 1971 door onderzoekers gewaarschuwd dat vliegen met supersonische vliegtuigen in de stratosfeer door uitstoot van stikstofoxides tot mogelijk versterkte katalytische afbraak van ozon kan leiden.

In 1974 werd de katalytische afbraak van ozon door chloor in verband gebracht met de chloortoevoeging aan de atmosfeer door CFK's en werden er door de latere Nobel-

prijs winnaars Molina en Rowland zorgen geuit over het toenemende gebruik van CFK's.

In 1985 werd melding gemaakt van een ozongat boven de Zuidpool en dat was een verrassing. Door onmiddellijk grootschalig onderzoek uit te voeren, in het bijzonder uitgebreide meetcampagnes in de atmosfeer van de zuidpool, hadden wetenschappers binnen enkele jaren de verklaring gevonden. Er bleken tal van onverwachte processen een rol te spelen.



Figuur 8. Het ozongat op 24 september 2000 waargenomen door het GOME instrument aan boord van de ESA ERS-2 satelliet.

Voor de vorming van een ozongat is een ruime hoeveelheid chloorverbindingen nodig in de stratosfeer. Maar nodig bleken ook zeer lage temperaturen. Die lage temperaturen ontstaan door de afsnoering van de polaire atmosfeer door de polaire wervel in de Antarctische winter. Bij die lage temperaturen ontstaan parelmoerwolken en op het oppervlak van de wolkendeeltjes wordt chloor uit reservoirverbindingen losgeweekt. Bij terugkeer van het zonlicht aan het begin van de Antarctische lente, leidt dit tot een snelle en vrijwel volledige afbraak van de ozon tussen de 12 en 18 kilometer. Bij de aanvang van de zomer breekt de wervel open en stijgt de temperatuur door aanvoer van warme lucht en stopt de afbraak. Aanvoer van ozonrijke lucht vanuit lagere breedtes vult het ozongat weer op. Het is dus de koppeling tussen chemie en klimaat die leidt tot het ozongat.

De laatste jaren vindt er ook sterke afbraak van ozon boven de Noordpool en boven het Noordelijk Halfrond plaats. Door het versterkte broeikas effect koelt de stratosfeer af. De lagere temperaturen in de arctische stratosfeer leiden tot vorming van parelmoerwolken en tot ozonafbraak. Dat leidt dan weer tot verdere koeling.

Bij ozonafbraak spelen interne zwaartegolven ook een belangrijke rol. Door adiabatische afkoeling ontstaan er in de ruggen van de golven parelmoerwolken en dat leidt tot chlooractivering. Figuur 9 toont parelmoerwolken en lijngolven boven Scandinavië.

Langzamerhand beginnen de contouren van de koppeling tussen ozon en klimaat duidelijk te worden. Elementen in deze koppeling zijn:

- Toename CO_2 leidt tot afkoeling stratosfeer
- Koeling stratosfeer leidt tot verdere afbraak stratosferisch ozon
- Afname ozon in stratosfeer leidt tot koeling
- Toename ozon in troposfeer leidt tot opwarming

Ozonafbraak en klimaatveranderingen werden tot enkele jaren terug nog als twee gescheiden processen beschouwd maar dat blijkt niet juist. Het een en ander onderstreept opnieuw dat de atmosfeer een samenhangend geheel vormt.



Figuur 9. Parelmoerwolken en lijgolven.

Waarnemingen van de atmosfeersamenstelling

Om de verschillende processen in de atmosfeer goed te onderzoeken is een samenhangend geheel van waarnemingen nodig. Voor ozon is recent onder auspiciën van de IGOS, the Integrated Global Observing System, een studie verricht naar een samenhangend waarneemsysteem. Ik zal in grote lijnen de huidige en toekomstige waar-

neemsystemen schetsen, mij hierbij deels baserend op de bevindingen van dit rapport.

Metingen vanaf de grond en in situ metingen

De pionier van het mondiale ozononderzoek, de Engelsman Dobson, heeft in de jaren dertig als eerste een instrument gebouwd om de dikte van de ozonlaag te

meten. Het meten van de intensiteiten van een aantal banden in het ultraviolette deel van het zonlicht en de bepaling van het frequentie-afhankelijke verschil in absorptie levert een maat voor de hoeveelheid ozon op. Dobson was een man met groot gezag.

Bij zijn afscheid eind vijftiger jaren hekelde hij de in zijn ogen moderne methoden waarmee zelfs vooraanstaande onderzoekers hun tijd verspilden – telefoon, secretarissen, bijeenkomsten, comité's en let wel er bestond toen nog geen e-mail. Hij echter werkte in de ochtend rustig en gestaag in zijn studeerkamer thuis en in de middag verzorgde hij zijn grote tuin.

Dobson begon met een vijftal instrumenten op verschillende plekken op aarde en dit is later uitgebouwd tot het Brewer-Dobson netwerk met 110 grondinstrumenten. Begin zestiger jaren werden metingen van de verticale verdeling van ozon mogelijk met behulp van ozonsondes gekoppeld aan een ballon. Er zijn nu ongeveer 40 ozonstations rond de wereld.

Nederland participeert in het wereldwijde netwerk met een Brewer instrument en ozonsonderingen in de Bilt. Het RIVM heeft in Bilthoven en in Lauder in Nieuw-Zeeland lidars voor atmosfeeronderzoek in operatie.

Het meetnet is niet goed verdeeld over de wereld en met name de tropen zijn schaars voorzien van meetstations. Echter, de tropische atmosfeer is voor de samenstelling van de mondiale atmosfeer zeer belangrijk. In zekere zin vormen de tropen de schoorsteen waardoor de troposferische lucht in de stratosfeer terecht komt waarna door afbraak van verschillende stoffen de lucht op hogere breedtes "gerecycled" de troposfeer weer binnen komt.

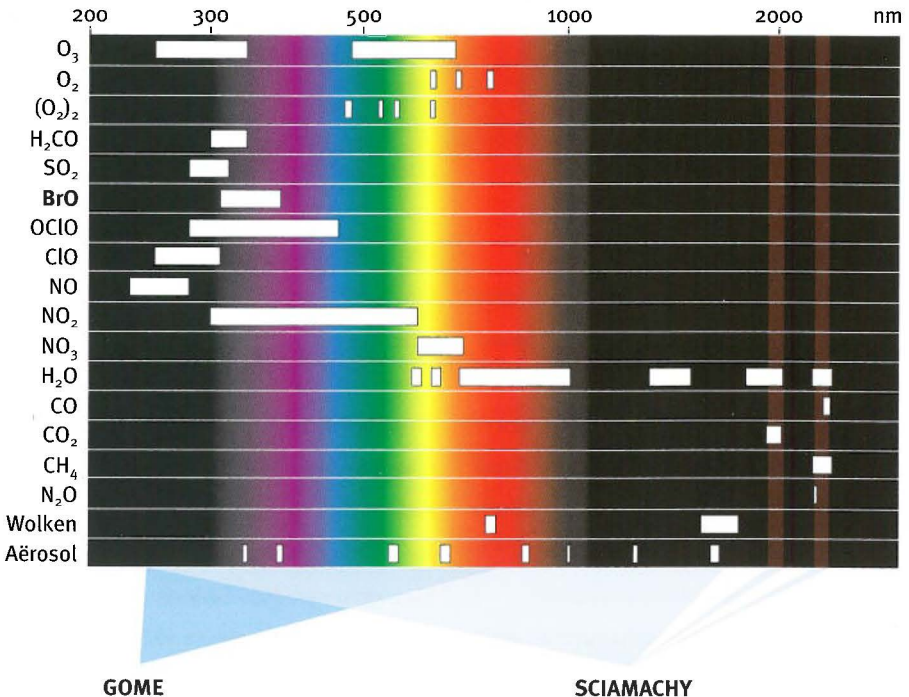
Met NWO steun hebben Nederlandse onderzoekers samen met de Surinaamse meteorologische dienst een ozonmeetstation in Suriname opgericht. Ook meetcampagnes zoals in het kader van het internationale Indian Ocean Experiment (INDOEX), waar Nederlandse onderzoekers intensief bij betrokken zijn, leveren een schat aan informatie op. Die kan dienen om de komende jaren meer inzicht te verkrijgen in de rol van de tropen in het mondiale klimaat.

Het netwerk van grondstations is essentieel voor de monitoring van de atmosfeer maar biedt geen mondiale dekking. Daarom zijn de waarnemingen vanuit satellieten erg relevant.

Waarnemingen van de atmosfeersamenstelling vanuit satellieten

Sinds 1978 worden door Amerikaanse onderzoekers ozonkolom metingen verricht vanuit de ruimte met behulp van het TOMS satellietinstrument. Deze inmiddels ruim twintig jaar lange meetreeks is van grote betekenis gebleken. In studies naar trends en het onderzoek naar de eigenschappen van het ozongat spelen deze metingen een sleutelrol.

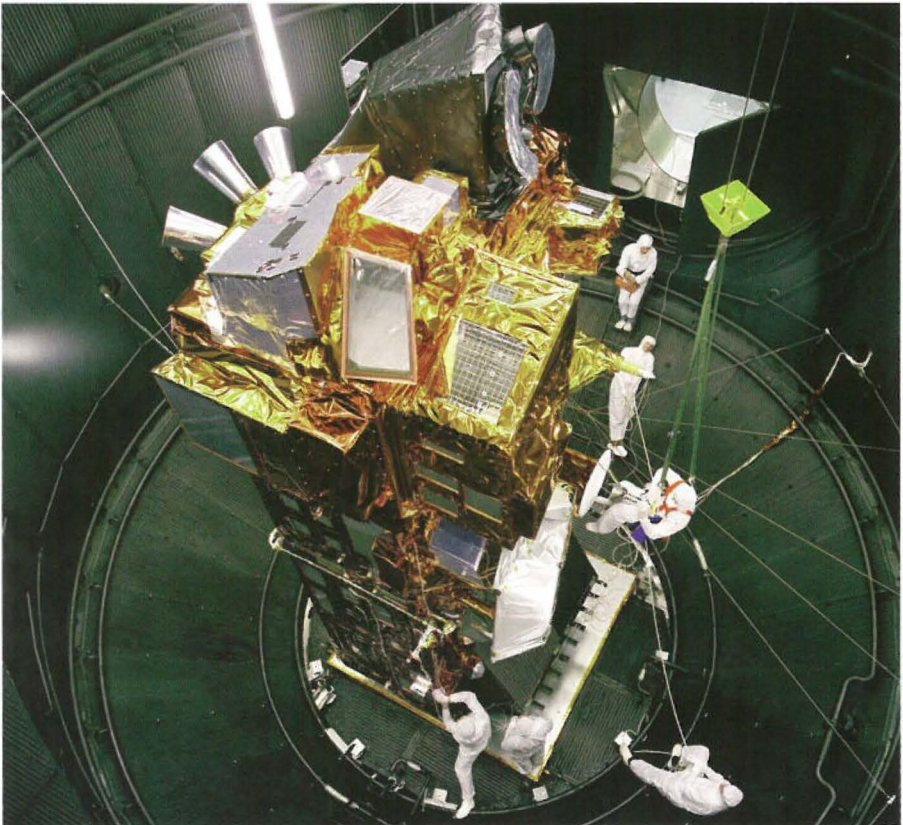
Sinds 1995 heeft de ESA de ERS-2 satelliet met aan boord het Global Ozone Measurement Experiment (GOME) instrument in de ruimte. Met het GOME instrument heeft Europa een leidende rol gekregen in het waarnemen vanuit de ruimte van de atmosfeersamenstelling. Naast ozonkolommen en profielen worden door GOME ook andere sporengassen en aerosolen gemeten. ESA zal in 2001 de Envisat satelliet lanceren met aan boord een Nederlands-Duits-



Figuur 10. Het door GOME en SCIAMACHY gemeten spectrum.

Belgisch instrument, SCIAMACHY genaamd. Met dit instrument zal onderzoek worden verricht naar de samenstelling en dynamica van de stratosfeer. GOME meet in het nadir het aan de aardatmosfeer en aan de aarde gereflecteerde zonlicht in het ultraviolet en zichtbare deel van het spectrum. SCIAMACHY betekent een geweldi-

ge stap voorwaarts ten opzichte van GOME met nadir en limb waarneem mogelijkheden en een hoge spectrale resolutie zowel in het ultraviolet, het zichtbare als in het nabije infrarood, zodat ook broeikasgassen kunnen worden waargenomen. Dit is geschetst in figuur 10.



Figuur 11. De ESA Envisat satelliet.

Europa investeert in de Envisat missie ongeveer 5 miljard gulden. Dat betekent dat Envisat, met een levensduur van 5 jaar, per dag meten 2,5 miljoen gulden kost. Nederland investeert in de orde van 100 miljoen gulden in het SCIAMACHY instrument. Daarnaast zijn er nog tientallen miljoenen voor de validatie, interpretatie en het gebruik van deze satellietmetingen gereserveerd. Dit alles biedt Europese en in het bijzonder Nederlandse onderzoekers een unieke kans tot baanbrekend atmosfeeronderzoek.

De Amerikaanse ruimte organisatie NASA zal in 2003 de EOS AURA missie met het Nederlands-Finse OMI instrument lanceren. OMI is het eerste grotendeels Nederlandse satellietinstrument voor onderzoek van de atmosfeersamenstelling. In 2006 zal EUMETSAT de METOP satelliet lanceren met GOME-2 aan boord. Voor 2010 is in voorbereiding de ESA Atmospheric Chemistry Explorer Mission met als onderzoekthema de koppeling tussen chemie en klimaat. Eveneens staat op de verlanglijst GEOSCIA, een OMI-achtig instrument op een geostationaire satelliet. Eind tachtiger jaren hebben een handjevol

pioniers in Nederland in het voetspoor van Paul Crutzen de eerste stappen gezet op het terrein van de satellietwaarnemingen van de atmosfeersamenstelling. Nederland heeft inmiddels een belangrijke plaats veroverd op dit terrein met een breed draagvlak van ruimtevaartindustrie tot onderzoeksgroepen die als gebruikers optreden. Aan deze universiteit wordt voor de komende jaren een drietal promoties voorzien op het gebied van het satellietonderzoek.

Chemische data assimilatie, een koppeling tussen model en waarneming

Het doel van chemische data assimilatie is het zo accuraat mogelijk beschrijven van de ruimtelijke verdeling van een of meerdere sporengassen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van waarnemingen en modellen. Deze vullen elkaar aan. Metingen geven de toestand weer op een aantal plaatsen en tijdstippen. Het model beschrijft de evolutie van de betrokken sporengassen in de tijd. In de negentiger jaren is op bescheiden schaal begonnen met de assimilatie van ozon in een twee dimensionaal transport-

model. Nu echter worden drie-dimensionale chemie transportmodellen gebruikt. Een voorbeeld van een geassimileerd ozonveld staat in figuur 12.

Veelbelovend zijn ontwikkelingen om de afleiding van de verdeling van sporengassen uit stralingsintensiteiten gemeten door satellietinstrumenten, de zogeheten retrieval, te koppelen aan de assimilatie.

Analoog aan de weersverwachting kan op basis van geassimileerde gegevens een verwachting voor de luchtkwaliteit voor de komende dagen worden gemaakt. Te voorzien valt dat dit zich in het komende decennium tot een belangrijk beleidsinstrument zal ontwikkelen.

Assimilatie van ozongegevens voor een betere bepaling van de wind- en temperatuurvelden in de hogere atmosfeer vindt sinds kort plaats op het Europese Centrum voor Middellange Weersverwachtingen, het ECMWF. Belangrijk voor het ECMWF is de tijdige levering van satellietgegevens van de ozonverdeling. Nederlandse onderzoekers hebben zowel in de ontwikkeling van methodieken voor snelle retrieval als van ozon data assimilatietechnieken een voraanstaande rol gespeeld.

Geassimileerde gegevens zijn zeer geschikt

voor processtudies, trendanalyse en validatie van numerieke modellen van de atmosfeersamenstelling.

In de nabije toekomst is er dringend behoefte aan een internationaal centrum voor retrieval en assimilatie van gegevens van de atmosfeersamenstelling. Nederland kan op basis van de aanwezige expertise en infrastructuur een dergelijk centrum uitstekend vorm geven.

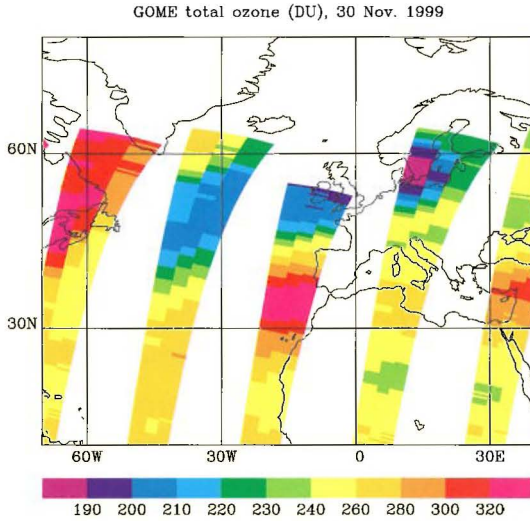
Atmosfeeronderzoek en de maatschappij

Het is inmiddels 15 jaar geleden dat het Nature artikel van Farman, Gardiner en Shanklin de wereld schokte met de constatering dat er een gat in de ozonlaag boven de Zuidpool was ontstaan.

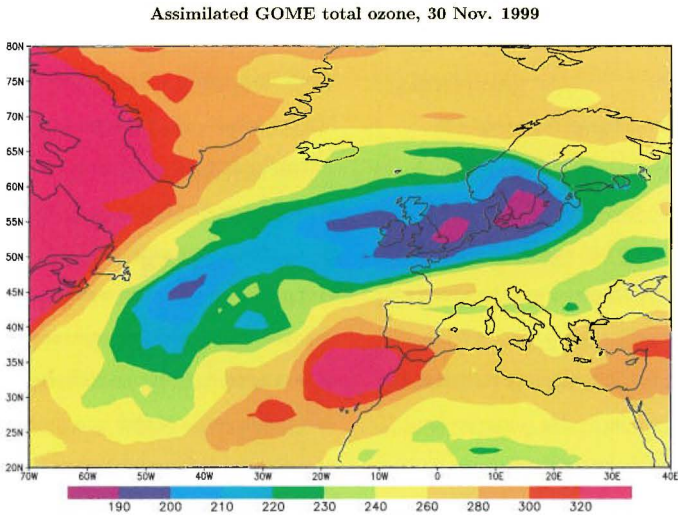
Het gat in de ozonlaag was een teken dat de mensheid in staat is de atmosfeer wezenlijk te veranderen. Ruim anderhalve eeuw geleden publiceerde Marsh een profetisch boek met als titel "Man and Nature" waarin hij de groeiende invloed van de mensheid op het aarde-atmosfeersysteem voorzag.

De huidige veranderingen zijn indrukwekkend.

a.



b.



Figuur 12.

a. Ozonverdeling gebaseerd op GOME metingen.

b. Geassimileerde ozonvelden.

In 3 eeuwen is de wereldbevolking vertienvoudigd tot 6 miljard. De veestapel is meegroeid tot 1400 miljoen dieren, een mondiaal gemiddelde van een dier per 4 personen. Opgemerkt kan worden dat in Nederland die verhouding aanmerkelijk hoger ligt. De concentraties van de belangrijke broeikasgassen kooldioxide en methaan zijn toegenomen met respectievelijk 30 % en 100 %. De uitstoot van stikstofoxiden door gebruik van fossiele brandstoffen en biomassa verbranding is inmiddels groter dan de natuurlijke uitstoot, leidend tot versterkte fotochemische ozonvorming in de troposfeer. Ook heeft de mensheid geheel nieuwe stoffen ontwikkeld zoals cfk's en deze in de atmosfeer gebracht, leidend tot een dramatisch versterkte ozonafbraak en een versterking van het broeikaseffect.

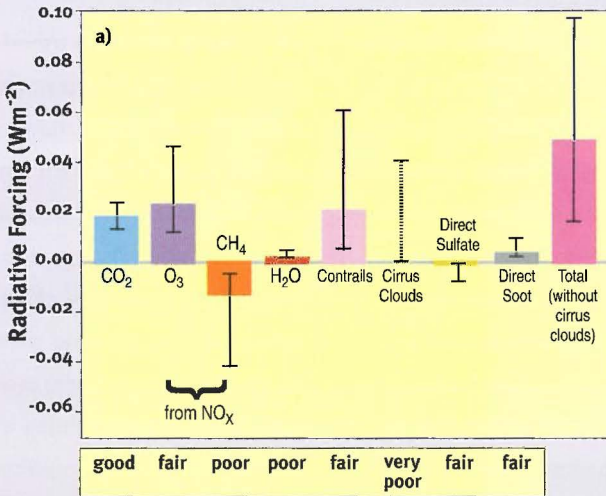
De grote invloed van de mensheid op het aarde-atmosfeer systeem hebben de Nederlandse Nobelprijswinnaar Paul Crutzen en Eugene Stoermer er recent toe gebracht voor te stellen het huidige en komende geologische tijdperk het Antropoceen te noemen. Dit Antropoceen volgt op het Holoceen. De overgang zou men in het midden van de negentiende eeuw kunnen situeren. Dat was de tijd van de opkomende indus-

trialisatie en de uitvinding van de stoommachine door Watt.

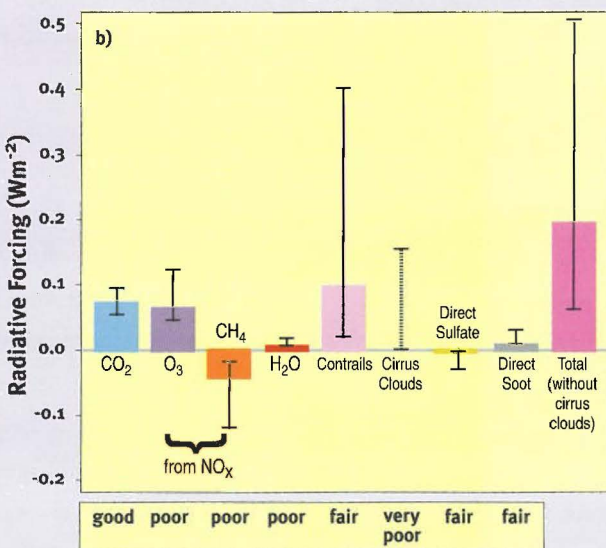
De uitdaging voor de mensheid in het Antropoceen is de kennis en technologische middelen in onze kennismaatschappij in te zetten voor het ontwikkelen van een wereldwijde strategie die leidt tot "sustainability" van het aardse ecosysteem tegen de menselijke invloed. De samenwerking tussen wetenschappers, industrie, milieubeweging en beleidsmakers is daarbij essentieel.

Een stap in de goede richting is recentelijk door de luchtvaartgemeenschap gezet. De International Civil Aviation Organisation, de ICAO, heeft het Intergovernmental Panel on Climate Change, de IPCC, een groep van vooraanstaande wetenschappers, gevraagd de stand van kennis omtrent de effecten van vliegtuigemissies op de atmosfeer te inventariseren. Daarnaast werd gevraagd op basis van scenario's studies te verrichten naar de toekomstige belasting van de atmosfeer. De luchtvaartbranche werd gevraagd te denken over mogelijke technische verbeteringen. De voornaamste conclusies waren dat vliegtuigemissies significante veranderingen teweeg brengen in de concentraties van broeikasgassen zoals ozon, methaan en kooldioxide. Belangrijk

Radiative Forcing from Aircraft in 1992



Radiative Forcing from Aircraft in 2050



Figuur 13. Stralingsforcering als gevolg van het vliegverkeer.

voor het klimaat zijn ook de vliegtuigsporen.

Het netto effect van het vliegverkeer is opwarming. De emissies leiden tot een stralingsforcering, dat is een maat voor het effect op het klimaat, van vijf honderdste Watt per vierkante meter. Dat is gelijk aan 3,5 % van de antropogene stralingsforcering. De schatting is dat dit in 2050 vier keer zo groot zal zijn, of wel 5 % van de voorspelde antropogene stralingsforcering voor die tijd. Deze stralingsforcering is geïllustreerd in figuur 13.

Het rapport is in 1999 in Nederland gepresenteerd aan de internationale luchtvaartexperts en beleidsmakers. De luchtvaart is de eerste bedrijfstak die een dergelijk onderzoek heeft laten verrichten. Dit voorbeeld verdient navolging door andere bedrijfstakken.

Met "heel de atmosfeer" kan ook de opdracht uitgedrukt worden de atmosfeer in een goede staat te houden dan wel te helen. Het verstandig omgaan met de atmosfeer vereist mogelijk een Wet op de Atmosfeer. In deze wet zouden de landen moeten erkennen dat de atmosfeer een gemeenschappelijk goed is en dat er een gemeenschappelijke verantwoordelijkheid

is voor de veranderingen die teweeg kunnen worden gebracht. Deze wet zou een paraplu kunnen vormen voor protocollen zoals Kyoto, Montreal en toekomstige verdragen.

Toekomst

Atmosfeeronderzoek biedt vele uitdagingen.

Ik zal er kort enkele nog eens samenvatten.

- De veranderingen in samenstelling van de atmosfeer en de respons van het klimaat en omgekeerd, het gevolg van klimaatveranderingen voor de samenstelling van de atmosfeer.
- In de komende tien jaar zullen er unieke gegevens van de atmosfeersamenstelling beschikbaar komen door satellietmissies. Grote vooruitgang kan hiermee geboekt worden in het onderzoek van de stratosfeer, de troposfeer en de uitwisseling tussen deze lagen.
- Met behulp van deze meetgegevens kunnen de numerieke chemie transport en chemie klimaatmodellen uitgebreid gevalideerd worden.
- Het toenemende gebruik van satellietwaarnemingen in de samenleving, bij

voorbeeld voor meerdaagse verwachting van de luchtkwaliteit en het “monitoren” van het intercontinentale transport van luchtvervuiling.

- Assimilatie van gegevens van de atmosfeersamenstelling zal een grote vlucht nemen.

Op de TU Eindhoven is onderzoek gaande op het gebied van theoretische aspecten van atmosfeerdynamica, opwekking en voortplanting van atmosfergolven en koppeling tussen troposfeer en stratosfeer.

Ook het gebruik van satellietwaarnemingen is een belangrijk thema. Daarnaast is onderzoek naar de toepasbaarheid van tomografische technieken in het satellietonderzoek voorzien.

Slot en dankwoord

Mijnheer de rector magnificus, geachte toehoorders, afsluitend wil ik graag degenen bedanken die tot mijn benoeming hebben bijgedragen. Op de eerste plaats dank ik het college van bestuur van deze universiteit voor mijn benoeming en het daarmee in mij gestelde vertrouwen.

Ik wil verdere dankwoorden uitspreken aan de hand van een korte terugblik.

Dertig jaar geleden ben ik op het KNMI begonnen met het verrichten van theoretisch onderzoek van de ionosfeer. Dat was een uitdaging voor een net afgestudeerde doctorandus in de theoretische natuurkunde. Sinds de tweede helft van de tachtiger jaren heb ik mij bekommerd over de samenstelling van de atmosfeer. Al die tijd heeft het KNMI mij grote vrijheid en interessante uitdagingen geboden. De vroegere en huidige hoofddirecteuren Harry Fijnaut en Joost de Jong en de vroegere en huidige hoofden Klimaatonderzoek en Seismologie Cor Schuurmans en Fons Baede wil ik hier graag als exponenten van de leiding van het KNMI bedanken.

Sinds tien jaar leid ik de sectie Atmosfeer Samenstelling, bestaande uit een gedreven groep medewerkers en ik voel me zeer bevoorrecht.

De goede samenwerkingsverbanden in Nederland met medewerkers van RIVM, IMAU, SRON, LUW, TNO wil ik hier ook graag vermelden.

Verder heb ik veel geleerd in de al twintig jaar durende samenwerking met onderzoekers van de Franse Centre National de

Recherche Scientifique met name met Hector Teitelbaum.

Mijn contacten met onderzoekers van de TUE dateren van de zeventiger jaren. Mijn eerste ontmoeting met Frans Sluijter vond plaats in Antwerpen en daarna zijn de contacten met de theoretische fysici van de TU Eindhoven in stand gebleven. In het onderzoek naar atmosfeergolven zijn deze zeer vruchtbaar gebleken. Ik koester dan ook grote verwachtingen van de intensieve samenwerking met de onderzoekers van de capaciteitsgroep klassieke theoretische natuurkunde. Ook samenwerking met collega's van de faculteit Technische Natuurkunde, met name met van Heijst en van Dongen, op het fascinerende onderzoeksterrein van de geofysische stromingen, vormt een aantrekkelijk perspectief.

Mijn gezin heeft altijd gefungeerd als bron van rust en warmte en zij hebben gezorgd dat ik als atmosfeeronderzoeker met beide benen op de grond ben gebleven.

Dames en heren studenten en promovendi. Atmosfeeronderzoek is een uitermate boeiend vak. Er is een grote behoefte aan jonge onderzoekers in dit vak. Kennis van de atmosfeer en de klimaat- en milieu-problematiek is ook zinnig in andere disciplines. De gevolgen van de menselijke activiteiten op de atmosfeer moet voortdurend worden meegewogen en daarmee kan er vorm worden gegeven aan een duurzame samenleving. Ik hoop vooral ook bij u interesse en enthousiasme voor het vak natuurkunde van de atmosfeer op te wekken.

Ik heb gezegd.

Referenties

- Brewer, A.W., Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapor distribution in the stratosphere, *Q. J. Roy., Meteorol. Soc.*, 75, 3531-363, 1949.
- Dobson, G.M.B., D.N. Harrison, J. Lawrence, Measurements of the Amount of Ozone in the Earth's atmosphere and its relation to other Geophysical conditions. *Proc. Roy. Soc.*, 122, 456-486, 1929.
- Crutzen, P.J. The influence of nitrogen oxide on atmospheric ozone content, *Q.J. Roy. Meteorol. Soc.*, 76, 7311-7327, 1970.
- Crutzen, P.J. and E. Stoermer, The "Antropocene", International Geosphere Biosphere Programme, Global Change Newsletter, May 2000.
- Farman, J.C., B.G. Gardiner and J.D. Shanklin, Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction, *Nature*, 315, 207-210, 1985.
- Flammarion, *l'Atmosphère*. 1891.
- Hamilton, K., Dynamical coupling of the lower and middle atmosphere: historical background to current research, *J. Atm. Terr. Phys.*, 61, 73-84, 1999.
- Hines, C.O., the Upper atmosphere in Motion, American Geophysical Union, 1974
- Intergovernmental Panel on Climate Change, Special Report, Aviation and the Global Atmosphere, 1999.
- Jeuken, A.B.M., Evaluation of chemistry and climate models using measurements and data assimilation, proefschrift TU Eindhoven, 2000.
- Kelder, H., P. van Velthoven and P. Siegmund, Stratosphere-troposphere exchange, "Atmospheric effects of aircraft emissions in the upper troposphere and lower stratosphere". I. Isaksen, ed. Nato Publication Series, 2000
- Lindzen R.S., Holton J.R., A theory of the quasi-biennial oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 25, 1095-1107, 1968.
- Marsh, G.P., "Man and Nature", 1864.
- Martinus van Marum, Een electriserend geleerde, Haarlem, 1987.

Molina, M.J. and F.S. Rowland, Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom catalyzed destruction of ozone, *Nature*, 249, 812-820, 1974.

The Report of The IGOS Ozone project, C. Readings et al., ESA/NASA publication, 2000.

World Meteorological Organisation/United Nations Environment Program, Scientific Assessment of Ozone Depletion, Geneva 1999.



Hennie Kelder (1944) studeerde theoretische natuurkunde aan de Katholieke Universiteit in Nijmegen. Hij promoveerde aan de Technische Universiteit Eindhoven. In 1970 trad hij in dienst bij het KNMI en werd verantwoordelijk voor het theoretisch ionosfeeronderzoek. Hij richtte zich vooral op voortplanting van golven in de ionosfeer. In samenwerking met onderzoekers van de TU Eindhoven en radioastronomen uit Westerbork werd gezamenlijk onderzoek naar de opwekking en voortplanting van golven in ionosfeer en de detectie met

behulp van radioastronomische waarnemingen en satellietmetingen verricht. In 1980-1981 bracht hij een sabbatjaar door bij de Service d'Aéronomie in Verrières-le-Buisson in Frankrijk.

In 1987 begon hij met onderzoek naar de samenstelling van de atmosfeer met name van sporengassen zoals ozon. Van eind tachtiger jaren dateert ook zijn betrokkenheid bij satellietwaarnemingen van de samenstelling van de atmosfeer. Sinds 1990 is hij op het KNMI, binnen de sector Klimaatonderzoek en Seismologie, hoofd van de sectie Atmosfeer Samenstelling. Hij maakt deel uit van de SCIAMACHY en OMI Science Advisory Groepen. Hij is voorzitter van de internationale SCIAMACHY validatie en interpretatie werkgroep. Hij is lid van de Internationale Ozon Commissie.