



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Ozonmetingen door OMI

Het meten van ozon met behulp van satellieten

E.T. Bol

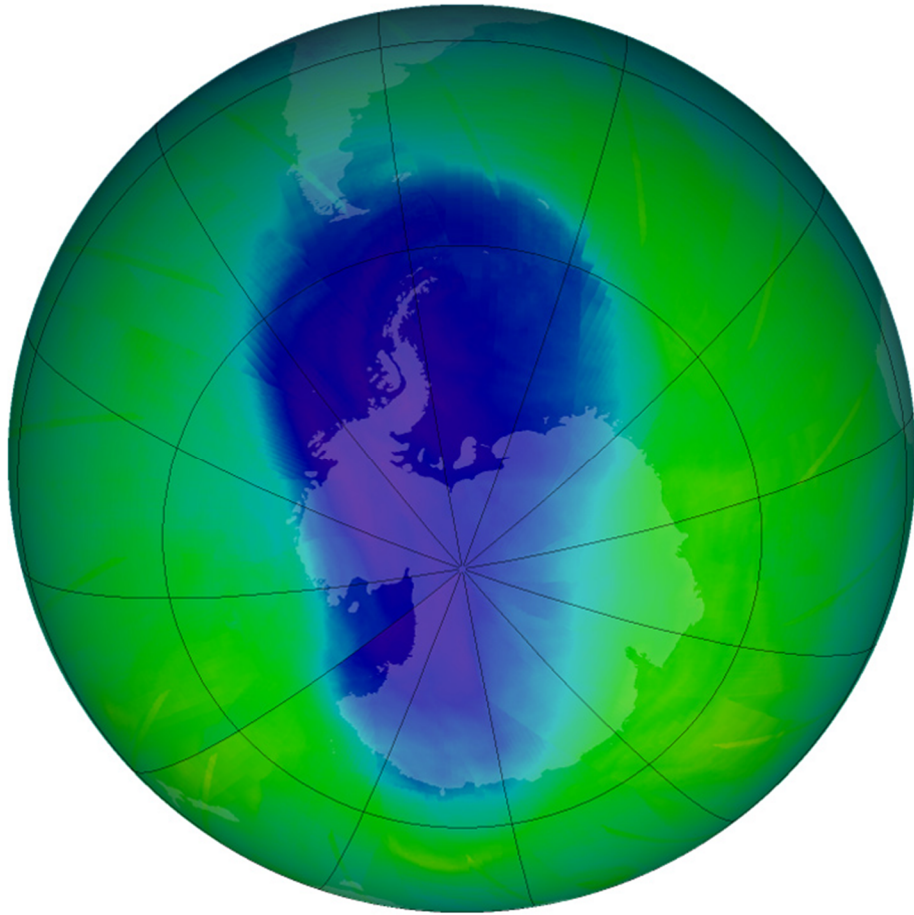
De Bilt, 2012 | Stageverslag

Ozonmetingen door OMI

Versie 1.0

Datum 15 juni 2012
Status Definitief

OZONMETINGEN DOOR OMI



30-5-2012

Het meten van ozon met behulp van satellieten

Praktijkstage, ET Bol

stagebegeleider: P Stammes (KNMI)

Instituutsbegeleider: H Poorthuis (HU)

ozonmetingen door OMI

HET METEN VAN OZON MET BEHULP VAN SATELLIETEN

Afbeelding titelpagina:

Het ozongat op 13 november 2009. Gedurende drie weken rekte het ozongat zich uit waarbij het zuidelijkste puntje van Zuid-Amerika een grote dosis UV te verwerken kreeg. (De Laat, 2010)

INHOUDSOPGAVE

1. SAMENVATTING	3
2. INLEIDING	4
3. OZON	7
4. INSTRUMENTEN.....	9
4.1 Dobson.....	9
4.2 Brewer	9
4.3 Satellietinstrumenten.....	9
4.4 OMI.....	10
5. OMI DATAVERWERKING	11
5.1 De missie	12
5.2 De data	12
5.3 De producten	15
6. EIGEN ONDERZOEK.....	17
7. DANKWOORD	21
8. BIBLIOGRAFIE.....	22
9. VERANTWOORDING FIGUREN:	23
10. BIJLAGE 1: AFKORTINGEN	24
11. BIJLAGE 2: OMI DATAFLOW	25
12. BIJLAGE 3: FOUT IN OMDOAO3 ALGORITME	26
13. BIJLAGE 4: LOGBOEK.....	27

1. SAMENVATTING

Al bijna een eeuw worden er metingen gedaan aan de hoeveelheid ozon in de atmosfeer. Vanaf 1926 wordt vanaf de grond de hoeveelheid ozon gemeten en vanaf 1978 vanuit de ruimte met TOMS als eerste satellietinstrument. Vanaf dat moment is het mogelijk boven de hele aarde de atmosfeer continu te meten.

Al snel werd duidelijk dat er boven Antarctica in oktober een extreme daling in de hoeveelheid ozon optrad. Niet veel later werd duidelijk dat dit door chloor- en broomhoudende gassen kwam. Een toename in de uitstoot van deze stoffen en een, vanwege de lage temperaturen, uniek proces boven Antarctica zorgt voor de afbraak van grote hoeveelheden ozon in de Antarctische lente. Na het Montreal akkoord in 1987 werd de afname van ozon minder en sinds 1995 is er weer een licht stijgende trend waar te nemen. Het zal waarschijnlijk nog zo'n 50 jaar duren voordat de ozonlaag dusdanig hersteld is dat het Antarctisch leven hiervan geen schade meer ondervindt.

Nederland levert al een tijd een grote bijdrage in het meten van ozon vanuit de ruimte. Onder andere met instrumenten als GOME, SCIAMACHY en nu OMI wordt ozon in de atmosfeer nauwkeurig in de gaten gehouden. Ook aan de opvolger TROPOMI wordt al hard gewerkt.

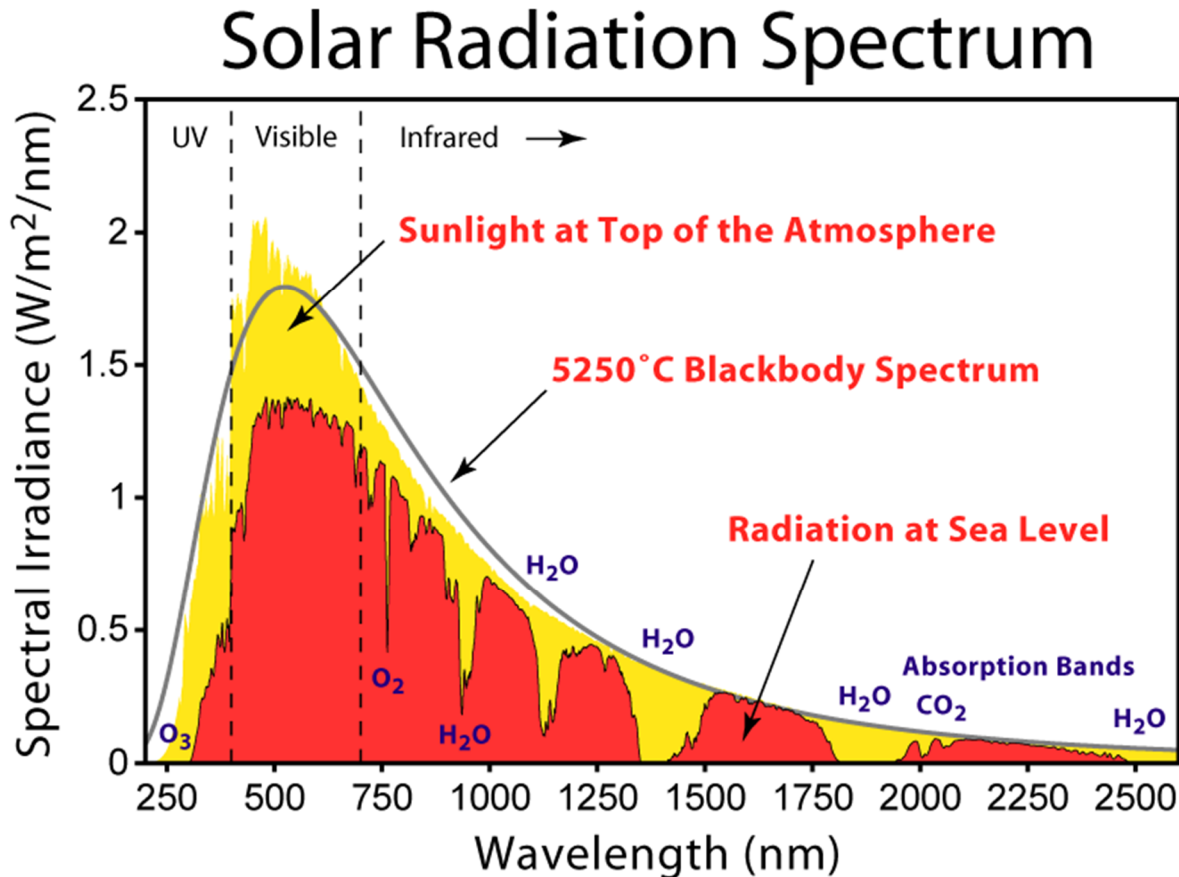
De ontwerpisen voor OMI wat betreft ozon worden over het algemeen gehaald. De resolutie en het op tijd beschikbaar maken van level 2 data is geen enkel probleem. Wel is de fout van 2% voor de hoeveelheid ozon in Dobson Units in sommige gevallen een probleem. Ook is het een probleem dat de fout in het Europese OMDAO3-algoritme in de loop van de tijd steeds groter wordt.

Daarnaast is er bij OMI het zogenaamde Row Anomaly Problem waarbij een deel van de detector onbruikbare data produceert. Hierdoor is wereldwijde dekking binnen 24 uur niet meer mogelijk.

Ook is er een studie gedaan naar de correlatie tussen satellietmetingen van ozon, temperatuur, zonkracht, ENSO en QBO in de periode van januari 1979 tot december 2011. Hierin komt een duidelijke correlatie tussen de zonkracht en de hoeveelheid ozon naar voren. Daarnaast laten de vele kleine correlaties zien dat de atmosfeer een complex systeem is waar verschillende grootheden elkaar beïnvloeden.

2. INLEIDING

In december van het jaar 1900 presenteerde Planck zijn beroemde wet voor het radiatie spectrum voor zwarte stralers. Hiermee verenigde hij de wetten van Wien en Rayleigh en loste de problemen op die deze wetten ondervonden bij respectievelijk lange en korte golflengtes.



FIGUUR 1 ZONNESPECTRUM BOVEN EN ONDER AAN DE ATMOSFEER

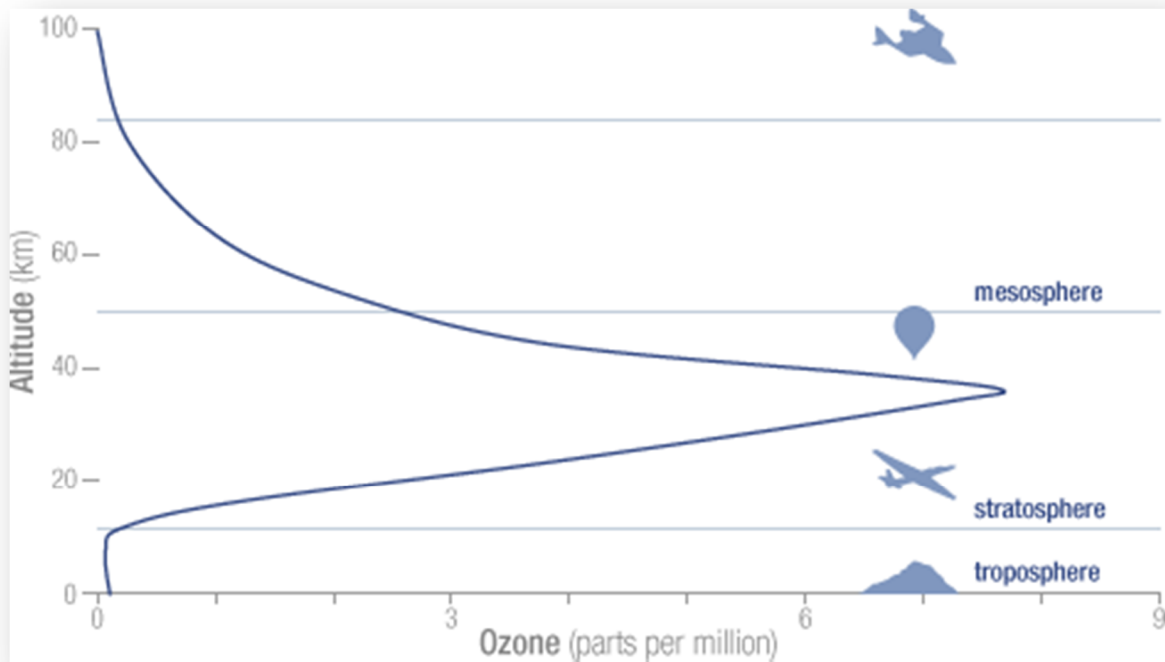
Aan het eind van de 19^e eeuw was al duidelijk geworden dat niet al het licht wat van de zon kwam ook op de aarde terecht kwam en dat, met name, in het UV-C gebied (zie bijlage 1 voor de betekenis van de afkortingen) er wel heel weinig licht op de aarde terecht kwam. Comu (1879) stelde toen al een hypothese op dat er in de atmosfeer één of meerdere gassen aanwezig waren die die UVB-straling absorbeerden en er voor zorgen dat het leven op aarde beschermd wordt.

In 1881 ontdekte Hartley dat het gas dat verantwoordelijk was voor het absorberen van de schadelijke straling ozon moest zijn. In 1913 zijn het Fabry en Buisson die aantonen dat de meeste ozon zich in de stratosfeer moet bevinden. Dobson is in 1926 degene die een eenvoudig maar effectief apparaat ontwikkelde wat in staat is de ozonkolom precies te meten.

Rond 1930 wordt de chemie van stratosferisch ozon onderzocht door Chapman. Dat dit proces nadelig beïnvloed kon worden door hydroxide (OH) wordt door Bates en Nicolet voorgesteld in 1950. Vanaf 1955 wordt er door het IOC en het WMO gewerkt aan het opzetten van een systeem dat het ozon wereldwijd moet gaan meten. In 1957 begint dit systeem, het Global Ozone Observing System, te draaien. De eerste ozonmeting hoger in de atmosfeer door Brewer en Milford, wordt gedaan met de elektrochemische ozonsonde die in 1960 omhoog wordt gestuurd.

Ozon (O_3) is een bijzondere stof. Voor de mens en het andere leven op aarde is ozon bijzonder schadelijk. Het is zeer reactief in combinatie met biologische moleculen waardoor deze beschadigd raken en deze niet meer hun functie kunnen uitvoeren. Gelukkig is de concentratie ozon in de troposfeer (0~15 km boven het aardoppervlak) waar wij leven vrij laag. Deze concentratie is medeafhankelijk van de luchtvervuiling, waarbij ozon kan ontstaan (Stammes & Piters, 1996).

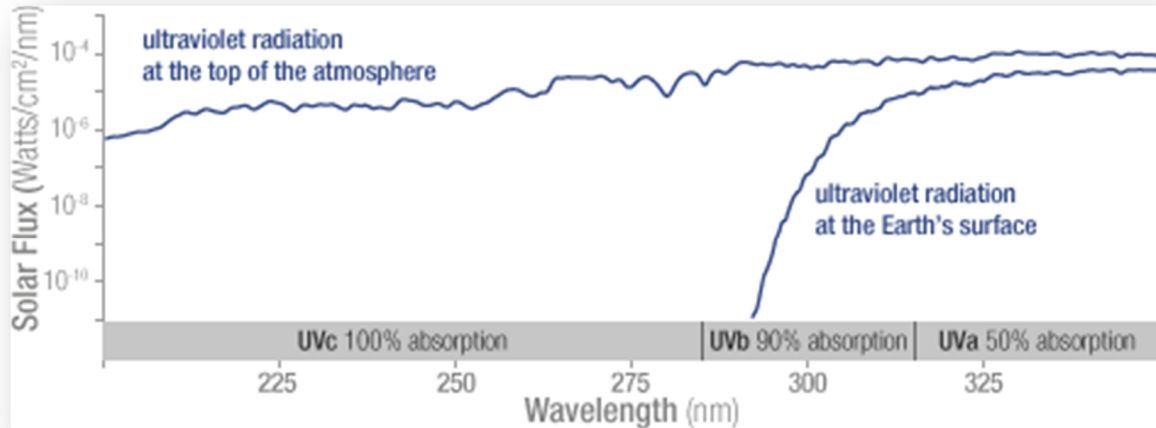
In de stratosfeer op (~15-35 km hoogte) is de concentratie ozon veel hoger. Hier is de concentratie enkele PPM. Het grootste gedeelte van de totale hoeveelheid ozon bevindt zich dan ook in de stratosfeer. Het maximum bevindt zich op een hoogte van ongeveer 32 kilometer. Op deze hoogte kan de concentratie ongeveer 15 PPM zijn.



FIGUUR 2 VERDELING OZONCONCENTRATIE OVER DE HOOGTE

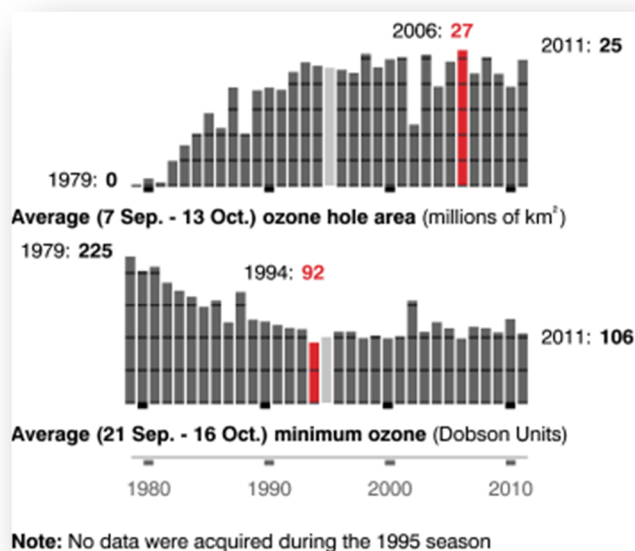
Sinds Gordon Dobson in 1926 de Dobson Spectrofotometer (Dobsonmeter) uitvond om metingen aan ozon te doen is er veel veranderd. De Dobsonmeter kijkt naar de verhouding tussen UVA-straling (325 nm) en UVB-straling (305 nm). De UVA-straling wordt niet geabsorbeerd door de atmosfeer en bereikt altijd de aarde. De UVB-straling wordt grotendeels geabsorbeerd door ozon. Als er geen ozon zou zijn zou de hoeveelheid UVA- en UVB-straling gelijk zijn. De verhouding tussen UVA- en UVB-straling is dan een maat voor de ozonkolom. Deze wordt dan uitgedrukt in Dobson Units (DU). De Dobson Unit is de kolomhoogte in 10 μm al zou de atmosfeer op die plek alleen uit ozon bestaan. Dit geeft gelijk een van de meetproblemen aan die horen bij het meten van ozon. In de totale luchtkolom neemt ozon gemiddeld slechts enkele millimeters in. Het gemiddelde percentage ozon is ongeveer 0,00006 % van de hele atmosfeer. De pieken liggen rond de 0,0015 %.

In de stratosfeer is ozon voor het leven op aarde onmisbaar als bescherming tegen UVB- en UVC-straling. Deze schadelijke straling wordt geabsorbeerd door ozon hoog in de atmosfeer en zorgt er op die manier voor dat het grootste gedeelte van de van de zon afkomstige UVB- en UVC-straling het aardoppervlak niet bereikt.



FIGUUR 3 ABSORPTIE VAN UV-STRALING DOOR DE ATMOSFEER

Sinds het begin van de satellietmetingen aan ozon is er veel veranderd. En niet alleen de ozonlaag zelf. In 1984 ontdekte Joe Farman dat er jaarlijks een ozongat ontstond boven de zuidpool en dat deze steeds groter werd. De waarden waren destijds al zo laag dat de eerste instrumenten die vanaf Antarctica de ozon moesten meten werden teruggestuurd om opnieuw gekalibreerd te worden. De eerste metingen van de satellieten werden 'weggegooid' omdat de hoeveelheden ozon onwaarschijnlijk laag waren. Na verificatie bleek er toch sprake te zijn van een ozongat (<220 DU) en bleek dat deze groter werd. (NASA, 2012)



FIGUUR 4 ONTWIKKELING VAN DE GROOTTE EN DIKTE VAN HET OZONGAT

er voor zorgde dat er sindsdien nauwelijks nog chloor- en broom-houdende stoffen in de atmosfeer worden gebracht.

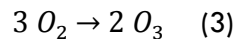
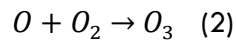
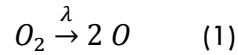
Al snel werd duidelijk dat de natuurlijke wisselwerking tussen ozon (O₃) en zuurstof (O₂) werd verstoord door de aanwezigheid van voornamelijk chloor en broom in de atmosfeer. Deze waren door de industrie in de atmosfeer gebracht door middel van blusmiddelen en drijfgassen.

Deze stoffen zorgden ervoor dat de hoeveelheid ozon onder de 220 DU kon komen waarmee de natuurlijke cyclus werd verstoord.

Deze onderzoeksresultaten leidden in 1989 tot het Montrealakkoord wat

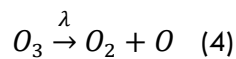
3. OZON

Ozon wordt voornamelijk in de stratosfeer gevormd onder invloed van UV-straling die een zuurstofmolecuul ontleedt in twee vrije zuurstof atomen (1). Deze vrije zuurstofatomen reageren met zuurstofmoleculen tot ozon (2). Op deze manier wordt er dus onder invloed van UV-straling uit 3 zuurstof moleculen 2 ozonmoleculen gecreëerd.

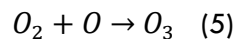


ozon cyclus

Ozon wordt onder invloed van UV-straling (240 tot 310 nm) afgebroken tot zuurstof en een zuurstofatoom.



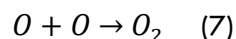
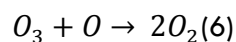
Het vrije zuurstof atoom reageert gelijk met een zuurstofmolecuul en tot ozon.



Deze cyclus zorgt ervoor dat de energie van de UV-straling wordt omgezet in kinetische energie van de ozonmoleculen die ontstaan. Op deze manier houdt 'de natuur' de hoeveelheid ozon constant en wordt de gevaarlijke UV-straling omgezet in warmte in de stratosfeer.

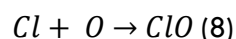
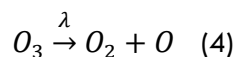
ozon afbraak

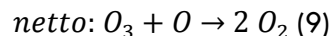
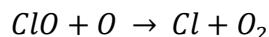
Het vrije zuurstofatoom kan ook reageren met ozon. Uit deze reactie ontstaan 2 zuurstof moleculen, zie (6). Of het zuurstofatoom reageert met een ander zuurstofatoom tot een zuurstof molecuul (7).



De processen (6) en (7) zorgen ervoor dat de zuurstofatomen, die ervoor moeten zorgen dat de hoeveelheid ozon gelijk blijft, geen nieuw ozon vormen.

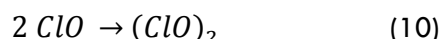
Naast deze natuurlijke verdwijning van ozon heeft ook de mens invloed op de verdwijning van ozon. Zogenaamde vrije radicalen (OH en NO) reageren graag met de vrije zuurstofatomen en voorkomen daarmee de aanmaak van nieuw ozon. Deze radicalen zijn van nature aanwezig maar de industrie levert ook een bijdrage door chloor- en broom-bevattende moleculen in de atmosfeer te brengen. Deze chloor- en broom-atomen kunnen in de stratosfeer voor een katalytische reactie zorgen waarbij ozon wordt afgebroken. (9) Dit proces kan zich vele malen herhalen en hierbij grote hoeveelheden ozon afbreken.





Proces (8) vindt vooral plaats in tropische en subtropische bandbreedtes waar het UV licht intenser is. (Fahey & Hegglin, 2011)

In de koudere regionen boven de polen zit het proces iets anders in elkaar. Daar wordt voorafgaand aan het proces chloor (of broom) eerst gebonden aan een zuurstofatoom. (8) Twee van deze moleculen vormen samen weer één molecuul (10). Dit molecuul kan alleen onder invloed van zonlicht worden ontbonden. Pas als het ontbonden is kan het weer met ozon reageren.

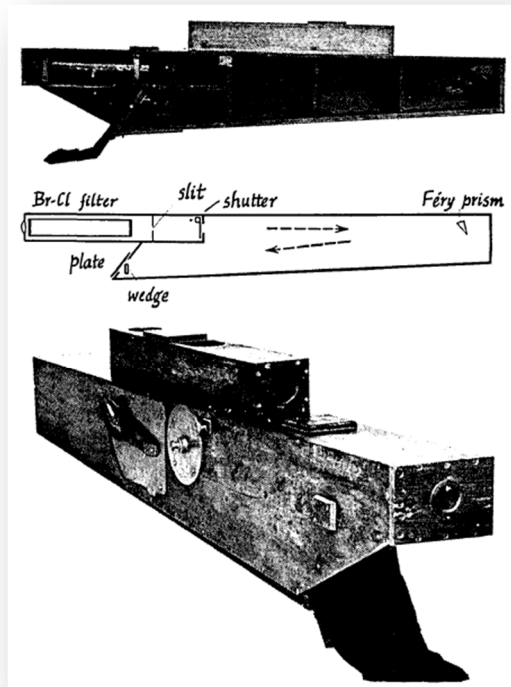


Het ontleden van $(\text{ClO})_2$ ligt dus stil gedurende Arctische winters. Wel wordt er een hoop $(\text{ClO})_2$ gevormd wat ervoor zorgt dat zodra de zon boven een poolgebied weer gaat schijnen de afbraak van ozon heel snel gaat door de ruime aanwezigheid van chloor en broom. Daarnaast kan ClO (en BrO) alleen gevormd worden op hele koude deeltjes in zogenaamde Polar Stratospheric Clouds (PSC). Deze wolken worden alleen gevormd in de stratosfeer als het daar koud genoeg is ($< -78^\circ\text{C}$). Meteorologische omstandigheden zorgen ervoor dat het boven de Zuidpool veel langer koud genoeg is dan boven de Noordpool. Daarom worden deze PSC's ook voor het grootste gedeelte gevormd boven de Zuidpool en dit zorgt ervoor dat de $(\text{ClO})_2$ die in de wolken gevormd worden ook zich voor het grootste deel boven de Zuidpool bevinden. Dat zorgt er op zijn beurt weer voor dat de ozon afbraak voornamelijk dan weer boven de zuidpool plaatsvindt. Dezelfde meteorologische omstandigheden zorgen er vervolgens voor dat het tekort aan ozon dat hier ontstaat, het ozongat, ook boven de Zuidpool blijft. Juist naast dit gat bevindt zich heel veel ozon dat gevormd wordt uit de grote hoeveelheden zuurstof dat zich op die hoogtetraden bevindt.

4. INSTRUMENTEN

Het meten van ozon vanaf de grond gebeurt al vanaf 1926. Gordon Dobson was de eerste die een eenvoudig maar doeltreffend instrument ontwikkelde om de hoeveelheid ozon te bepalen uit de intensiteit van het directe zonlicht. Daarna werden verbeteringen aangebracht, maar het

scheiden van de verschillende golflengtes gaat nog altijd met behulp van een prisma. Op deze manier kan er naar één of meerdere golflengtes binnen het zonnenspectrum gekeken worden. (Dobson, 1968). Het Br-Cl filter bij de opening voor het zonlicht (Figuur 5) diende ervoor alle overige golflengten tegenhouden. Deze oplossing was nagenoeg transparant voor UV golflengten.



FIGUUR 5 DOBSONS SPECTROMETER

4.1 Dobson

Dobson keek met behulp van zijn spectrometer (Figuur 5) naar zonlicht bij twee golflengtes. Eén golflengte in het UV-A (325 nm) gebied en één in het UV-B gebied (305 nm). Als deze twee intensiteiten gelijk zouden zijn, zou er geen ozon in de atmosfeer zijn. Omdat er wel ozon is en ozon bij 305 nm sterker absorbeert dan bij 325 nm is de intensiteit bij 305 nm kleiner dan bij 325 nm. Door te draaien aan een schijf (Figuur 5, onderste afbeelding in het midden) kan de intensiteit van de 325 nm golf worden aangepast. De mate waarin deze

veranderd moet worden, om de intensiteiten gelijk te krijgen, is een maat voor de hoeveelheid ozon.

4.2 Brewer

Later volgden allerlei aanpassingen en verbeteringen. Zo werd de fotografische plaat vervangen door een photomultiplier en werden steeds meer onderdelen elektrisch. Vandaag de dag worden ze nog steeds gebruikt, met name om satellietdata te valideren. Hoewel er meerdere uitvoeringen zijn, lijkt de Mk III (Figuur 6) op dit moment de meest betrouwbare en nauwkeurigste. (Van der A, Allaart, & Eskes, 2010)

4.3 Satellietinstrumenten

Sinds 1978 wordt ozon ook vanuit de ruimte gemeten. De eerste satelliet was de Amerikaanse TOMS-satelliet. Met behulp van deze satelliet werden de metingen op Antarctica bevestigd in hun relatief lage waarden, waarmee het ozongat tevens bevestigd werd. Na TOMS kwamen er andere en betere satellieten. Met name de resolutie is sterk verbeterd. Zo had TOMS een pixeloppervlak van 180x288 km. (NASA) De latere satellieten kregen een steeds kleinere



FIGUUR 6 BREWER MK III VANDAAG DE DAG

pixeloppervlak en konden steeds meer golflengten meten om zo ook andere stoffen in de atmosfeer te analyseren. Dit kunnen stoffen zijn die direct met de ozoncyclus te maken hebben, evenals andere stoffen die in andere processen een belangrijke rol spelen.

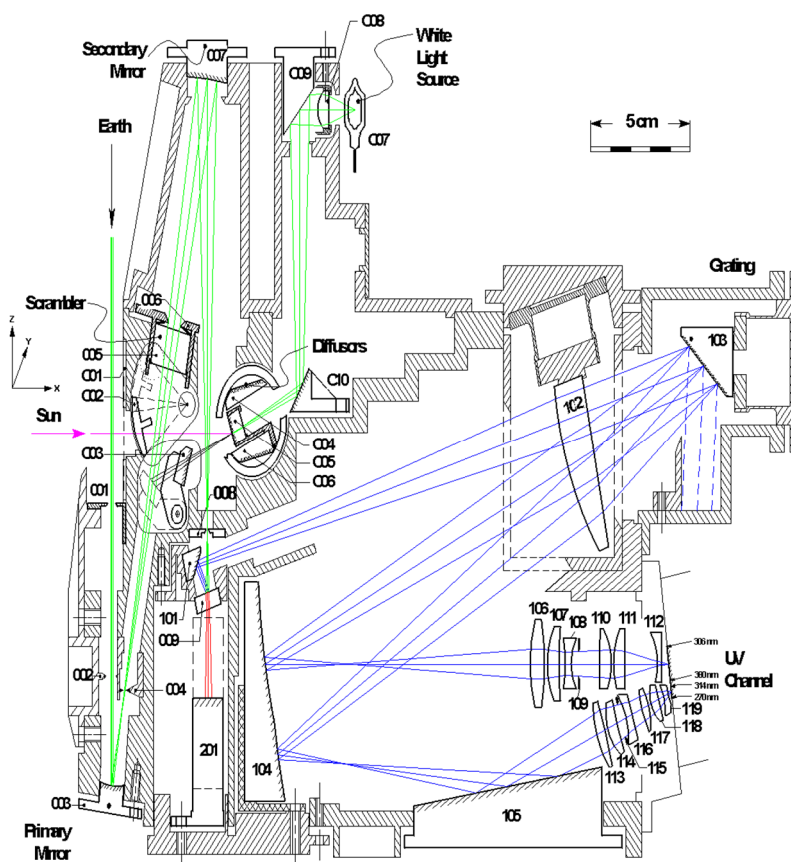
4.4 OMI

Een van de opvolgers van TOMS is OMI. Andere satellieten als SBUV, GOME en SCIAMACHY zijn OMI voorgedaan en hebben een belangrijke bijdrage geleverd in het continu meten van ozon in de atmosfeer.

De optische bank in de OMI is in wezen niet veel anders dan de uitvoering in het Brewer grondinstrument. Al wordt nu niet meer de intensiteit van UV-A aangepast om de intensiteiten van UV-A en UV-B gelijk te krijgen, maar worden er voor een heel scala aan golflengtes de intensiteiten bepaald en er wordt verstrooid zonlicht gemeten. De verschillen tussen de kenmerkende golflengtes blijven uiteraard een maat voor de hoeveelheid ozon.

Omdat de verschillen tussen de verschillende golflengtes groot zijn wordt er in meerdere kanalen gemeten. Het spectrum vanaf 264 tot 504 nm wordt gemeten in drie kanalen: een kanaal voor zichtbaar licht (VIS) (349-504 nm) en twee kanalen voor UV-straling (264-311 & 307-383 nm) (KNMI - OMI, 2008).

Daarnaast zijn er veel (polarisatie)filters, spiegels en lenzen om de ruis en strooilicht zo veel mogelijk te verminderen. Ook wordt er regelmatig gekalibreerd door het licht van een lamp (figuur 7, rechtsboven) met specifieke golflengten te analyseren om eventuele fouten eruit te halen.



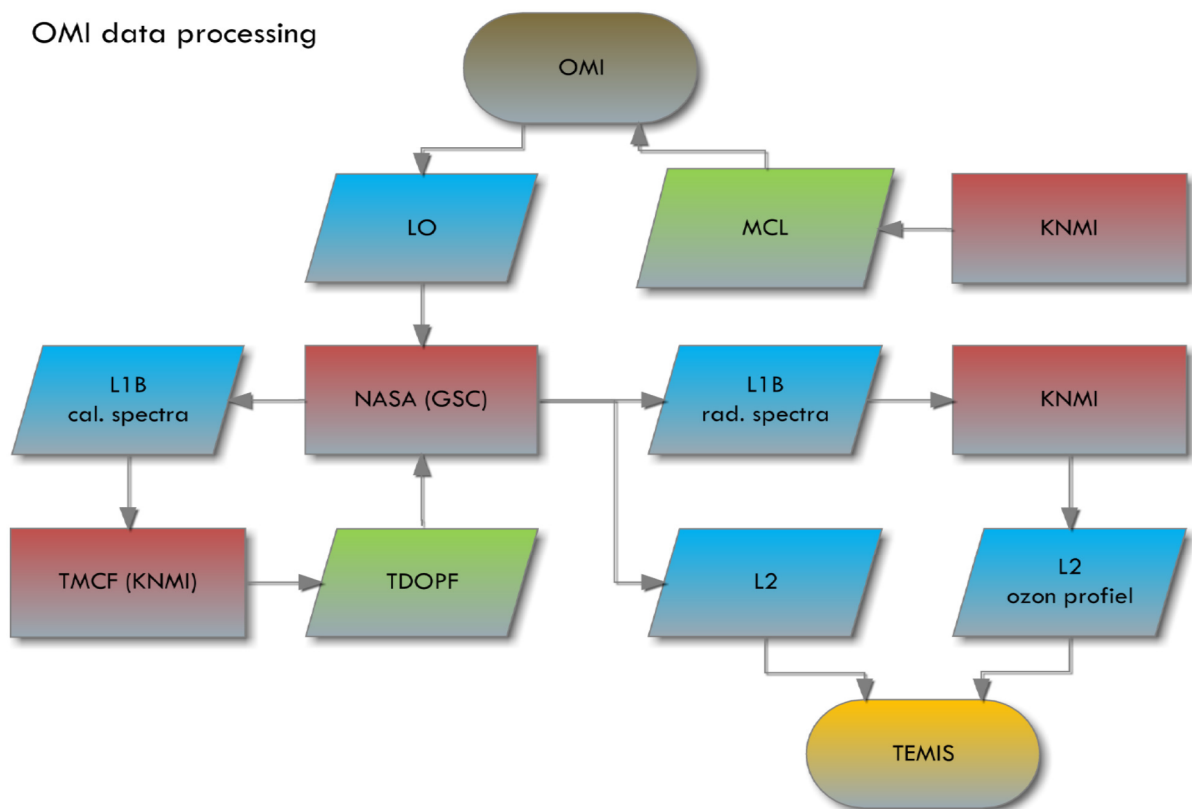
FIGUUR 7 OPTISCHE LAYOUT VAN HET UV KANAAL VAN OMI

5. OMI DATAVERWERKING

Het meten van spectra door een satelliet is één ding. Met deze data kunnen werken is iets heel anders. Deze data moet naar de aarde gestuurd worden en moet worden verwerkt tot nuttige datasets die wetenschappers kunnen gebruiken. Bij het KNMI zijn dan ook grofweg twee groepen bezig met OMI. De eerste groep is bezig om ervoor te zorgen dat de data tot stand komt. De tweede groep werkt met deze data en trekt daar conclusies uit.

Om de data te produceren moet de eerste groep voor een aantal dingen zorgen. Ten eerste moet het instrument bestuurd worden. Dit gebeurt door een opdracht die eens per dag naar de satelliet wordt verstuurd in een datapakket dat de Master Command Load (MCL) heet. Zie Figuur 8 en Bijlage 2 (met legenda). In dit pakket zitten allerlei opdrachten en instellingen voor het instrument.

OMI data processing



FIGUUR 8 DATAFLOW VAN OMI

Vervolgens meet OMI de verschillende spectra en stuurt eens per orbit deze informatie door naar NASA via het grondstation in het noorden van Finland. Dit heet de Level 0 data. (LO data, zie Figuur 8.) Deze data bestaat uit 2-3 pakketten. De twee pakketten die altijd aanwezig zijn, zijn de zogenaamde radiantie spectra en de calibratiespectra. De radiantie spectra zijn de metingen die verricht zijn aan de dagzijde van aarde en dit zijn de eigenlijke metingen.

De calibratiespectra zijn de metingen die verricht zijn aan de nachtzijde van de aarde. Daar is het donker en zo kan worden bekeken hoe het instrument er voor staat. Het instrument is uiteraard onderhevig aan slijtage of degradatie van allerlei aard, zoals:

- optisch
- electrisch
- mechanisch
- detector

Het derde pakket is 1x per dag, eens per 14 à 15 orbits, de irradiantiemetingen. Dit zijn de metingen waarbij niet naar het licht dat van de aarde komt gekeken wordt, maar wordt er rechtstreeks naar de zon gekeken. Hiermee wordt gekeken hoe het zonnenspectrum er voor die 'dag' uitziet. Vervolgens wordt weer gemeten hoe het weerkaaste zonlichtspectrum van de aarde eruit ziet en de verhouding tussen het radiantiespectrum van de aarde en het irradiatiespectrum van de zon. Deze verhouding (bij specifieke golflengten) bevat alle benodigde informatie over de atmosfeer, zoals de hoeveelheid ozon, stikstofdioxide en zwaveloxiden.

De calibratiespectra worden naar het KNMI gestuurd. (L1B cal spectra, zie figuur 8). Daar wordt door de Trend Monitoring and Calibration Facility bepaald hoe er naar de radiantiespectra gekeken moet worden. Deze informatie (Time Dependent Operational Parameter File, zie figuur 8) wordt weer naar NASA gestuurd. NASA gebruikt vervolgens deze data om de radiantie spectra te bekijken en te analyseren. Hier maakt NASA vervolgens de uiteindelijke L2 producten van. Voorbeelden van L2 producten zijn ozon kolommen, NO₂ kolommen en SO₂ kolommen. Daarnaast gaat er (een gedeelte van de) L1B radiantie spectra naar het KNMI. Daar wordt deze verwerkt tot L2 producten die betrekking hebben op de verdeling van ozon in de atmosfeer (het ozon profiel).

Vervolgens kan de tweede groep wetenschappers deze data analyseren en hier onderzoek mee doen. Bijvoorbeeld de ontwikkeling van het ozongat boven de Zuidpool onderzoeken of de uitstoot van NO₂ door de industrie in kaart brengen.

5.1 De missie

Een belangrijk doel van de Aura missie is het in kaart brengen van de atmosfeer. Een groot onderzoeksgebied is de ozonlaag en met als grote vraag of deze zich herstelt. Daarnaast onderzoeken de instrumenten op AURA de atmosfeer, de luchtkwaliteit, klimaatveranderingen en de samenstelling van de atmosfeer. OMI is het instrument op de Aura satelliet dat ozon meet. Het bijzondere aan OMI ten opzichte van voorgaande satellieten die ozon meten is dat de ruimtelijke resolutie nu veel beter is. Daarbij zijn de metingen ook werelddekkend binnen 24 uur. (Levelt, P. F. et al, 2000) Ook is de continuïteit belangrijk. Andere ozoninstrumenten degraderen en voor goed onderzoek zijn gegevens nodig met hoge kwaliteit en zo min mogelijk onderbrekingen.

5.2 De data

5.2.1 Rijen

Omdat OMI vanaf een hoogte van 705 km boven het aardoppervlak vliegt en een kijkhoek heeft van ongeveer 114° kan hij een breedte bekijken van ongeveer 2600 km. Deze 2600 km worden verdeeld over 576 rijen. Vanuit het instrument worden elke orbit grote hoeveelheden data verkregen. Deze data bestaan uit een aantal counts (binnengekomen fotonen) per golflengte per oppervlaktepixel. Omdat deze hoeveelheid data te veel is om over te sturen worden telkens 8 CCD-rijen bij elkaar opgeteld en gemiddeld. Zo wordt het oppervlak minder nauwkeurig maar

blijft de golflengteresolutie, die nodig is voor het bepalen van de hoeveelheid ozon, (en andere data) behouden. De breedte die hiermee wordt verkregen is ongeveer 24 km. Het instrument kan ook worden ingesteld dat het niet 8 maar 4 rijen optelt. De nauwkeurigheid wordt hiermee uiteraard groter, maar de hoeveelheid data ook.

De lengte van de grondpixel wordt bepaald door de vliegsnelheid en de meettijd. Als de meettijd is ingesteld op 2 seconden wordt de lengte van de grondpixel 13 km.

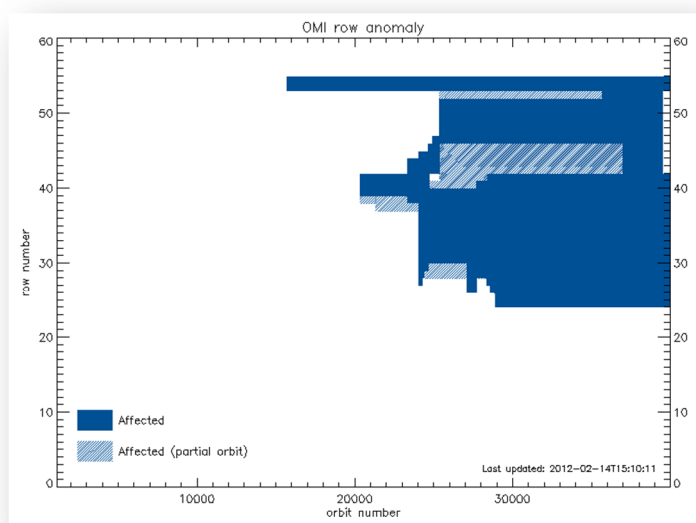
5.2.2 Kolommen

In de verschillende kolommen van de CCD worden de verschillende golflengtes gemeten. De golflengtes variëren van 270 – 380 nm voor de CCD die in het UV-gebied meet.

Deze data wordt eens per orbit (baan rond de aarde) naar een grondstation in Noord-Finland gestuurd. Dit kan omdat de satelliet in een polaire baan vliegt en elke orbit 1x over de Zuidpool en 1x over de Noordpool komt. Tijdens zijn vlucht over de Noordpool is er een kort moment waarop de satelliet Aura contact kan maken met het grondstation. In deze tijd moeten van alle instrumenten aan boord van Aura, waaronder ook OMI, hun meetgegevens naar dit grondstation sturen. Ook worden er nieuwe commando's en instructies naar de satelliet toe gestuurd.

5.2.3 Nauwkeurigheid van de ozonmetingen

Om te weten of de waarden die in de level 2 producten gegeven worden nu een beetje kloppen moet deze informatie worden vergeleken met andere onafhankelijke metingen. De eis bij het ontwerp van OMI was een nauwkeurigheid van 2%. (Levelt, P. F. et al, 2000) Hiermee vallen waarden binnen trends ook goed te analyseren. Als de verschillende metingen dicht bij elkaar in de buurt liggen zal de informatie wel kloppen. Liggen ze verder uit elkaar dan zal moeten worden bekeken welke dicht bij de werkelijke waarde zit en waarom. Zo werden de eerste grondinstrumenten die op Antarctica werden gebruikt teruggestuurd, om weer gekalibreerd te worden omdat de waarden onwaarschijnlijk laag waren. Later bleken deze lage waarden overeen te komen met metingen vanuit de eerste satelliet en bleken de eerste metingen toch de juiste waarden aan te geven.



FIGUUR 9 OMI ROW ANOMALY; KOLOMMEN MET PROBLEMEN

Sinds het begin van de OMI ozonmetingen worden de resultaten met elkaar vergeleken. (Van der A, Allaart, & Eskes, 2010). Hieruit blijkt dat er tussen de Brewer grondinstrumenten en de OMI producten verschillen zitten. Nu zijn er 2 OMI producten. Het verschil zit in de methode waarop de originele L1 data wordt omgezet in L2 data. Het bijbehorende bewerkingsprogramma heet een algoritme. Het eerste algoritme is het OMT03 algoritme. Dit algoritme is de Amerikaanse variant om de OMI data te analyseren. Het tweede algoritme is de Europese (Nederlandse) variant: OMDOAO3.

Een groot probleem waar beide algoritmen mee kampen is het “Row Anomaly Problem”. Sinds 2007-2008 bevat een groot gedeelte van de rijen foute waarden. Figuur 9 laat zien sinds wanneer de verschillende rijen niet meer de juiste waarde laten zien. Sinds 25 juni 2007 zijn rij 53 en 54 een probleem en het grote blok van rij 24-44 zijn vanaf 24 januari 2009 een probleem. 10.000 Orbits komt ongeveer overeen met 690 dagen.

NAUWKEURIGHEID OMTO3

Nu wordt de waarde van de Brewer grondinstrumenten beschouwd als de meest betrouwbare. Het verschil tussen de OMTO3 resultaten en de Brewer resultaten zijn klein. Het OMTO3 algoritme is dan ook zo geschreven, dat deze overeenkomen met de Brewer waarden. Volgens Van der A et al. (2010) is het verschil tussen de OMTO3 resultaten en de Brewer resultaten samen te vatten in de volgende functie

$$X_{cor} = X_{sat} - 0,282 \cdot (T_{eff} + 46,3) + 2,578$$

Hierin is X de gemeten ozon waarde in Dobson Units. Hieruit blijkt dus een kleine fout voor de temperatuur en een algemene afwijking. Zie Figuur 10. Er is hierbij (en hierna bij OMDOAO3) uitgegaan van een temperatuur van $-47,0^\circ\text{C}$ als effectieve temperatuur van ozon in de stratosfeer.

Hieruit blijkt dat volgens het OMTO3-algoritme de eis wat betreft nauwkeurigheid niet gehaald wordt als het waarden moet meten lager dan 120 DU. Dit is overigens wel een onwaarschijnlijk lage waarde die in de praktijk niet gemeten zal worden.

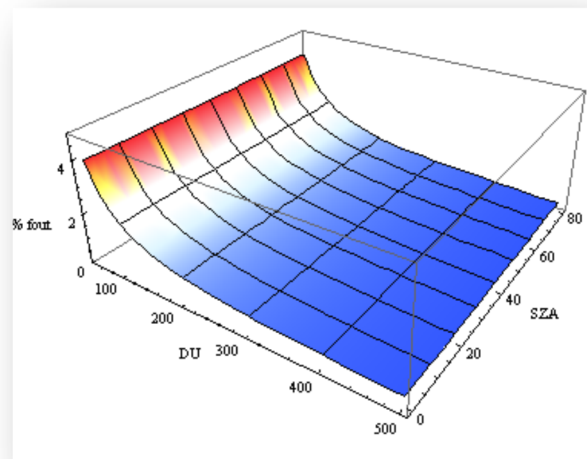
NAUWKEURIGHEID OMDOAO3

De relatie tussen de metingen van een Brewer grondinstrument en de metingen van OMI geanalyseerd door het OMDOAO3 algoritme is complexer. Hierin zit niet alleen een absolute en een temperatuurafhankelijke fout maar ook een fout, die afhangt van de hoek tussen de zon en het zenith (Solar Zenith Angle, SZA) en een fout die afhangt van de tijd.

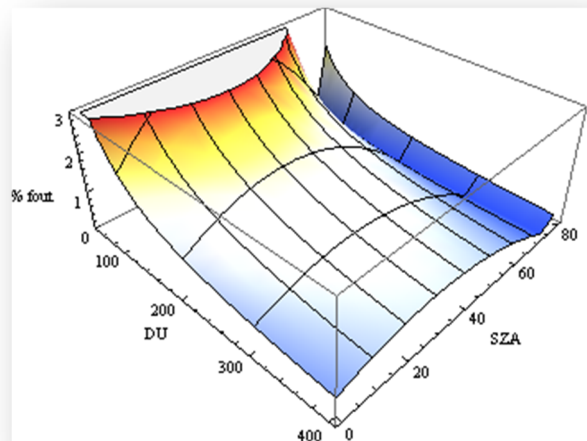
Hierin is MJD het aantal verstreken jaren sinds 2000 (Van der A, et al. 2010). Dit verband is voor 2004 (het begin van de metingen) weergegeven in Figuur 11 en voor 2012 en 2020 in bijlage 3. Ook in het onderstaande verband is de eenheid van X in DU.

$$X_{cor} = X_{sat} - 0,00189 \cdot (SZA - 30)^2 + 0,300 \cdot (T_{eff} + 46,3) - 0,358 \cdot MJD + 5,379$$

De fout is volgens dit algoritme een veel groter probleem. Zie de 2%-grens in de figuren aan de rechterkolom op bijlage 3. Hoe verder in de tijd hoe groter de onnauwkeurigheid bij lage hoeveelheden ozon onder een grote SZA.



FIGUUR 10 PROCENTUELE FOUT IN OMTO3 ALGORITME AFHANKELIJK VAN DE GEMETEN HOEEVEELHEID OZON GEMETEN (IN DOBSON UNITS)



FIGUUR 11 FOUT IN HET OMDOAO3 ALGORITME AFHANKELIJK VAN DE HOEEVEELHEID GEMETEN OZON IN DOBSON UNITS EN VAN DE SZA IN 2004

5.3 De producten

Naast de ozonkolom en ozonprofiel producten levert OMI nog veel meer gegevens. Aangezien het spectrum vanaf 264 tot 504 nm wordt gemeten over twee kanalen (zichtbaar licht (VIS) (349-504 nm) en UV (264-311 & 307-383 nm)) (KNMI - OMI, 2008), is er over alle gasen in de atmosfeer, die in dit spectrum hun sporen achterlaten, informatie te halen.

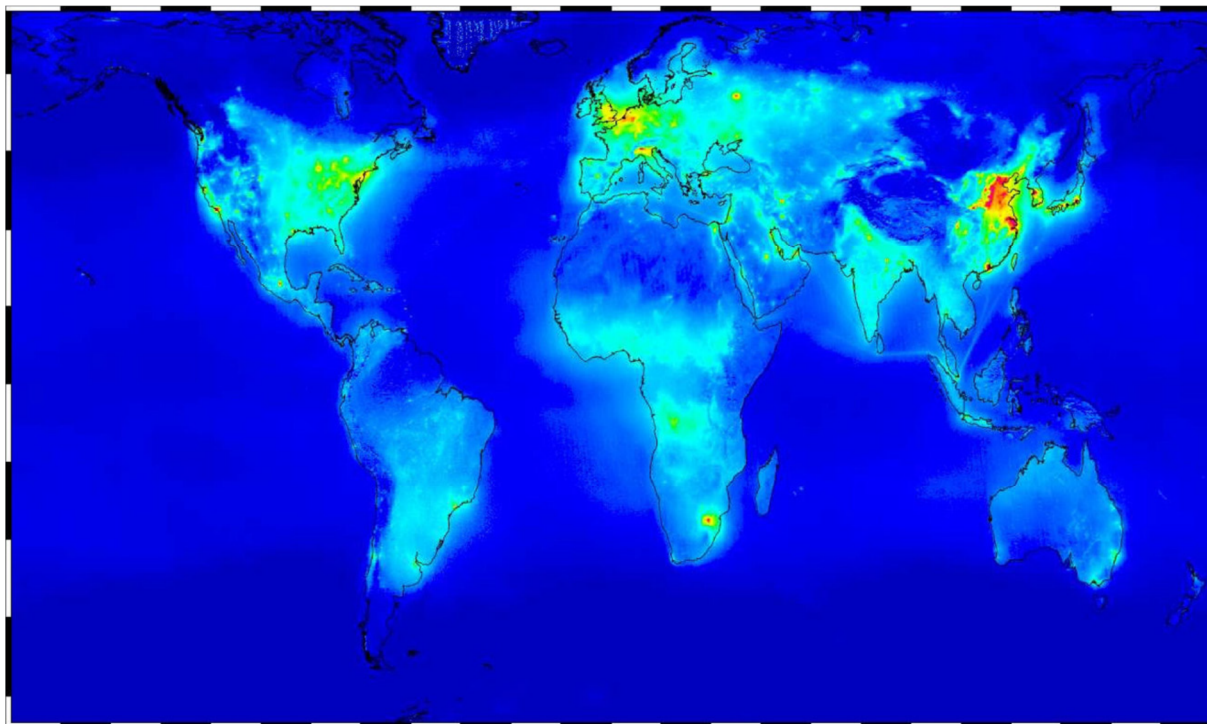
Op de TEMIS website (www.temis.nl, de data portal van satelliet producten) staan al deze gasen. Naast de ozon kolommen en profielen zijn hier ook resultaten van NO₂, SO₂, CH₂O, en BrO te vinden. Andere producten staan op de OMI-site (www.knmi.nl/omi) zelf, zoals O₂-O₂ en OCIO.

Veel van deze producten zeggen iets over bepaalde aspecten uit de ozoncyclus. Op deze manier kan er gekeken worden naar de correlatie tussen trends van bepaalde stoffen en naar de ontwikkeling van ozon.

5.3.1 NO₂

Stikstofdioxide (troposferisch) is naast ozon een van de belangrijkste producten van OMI. NO₂ in de troposfeer is een indicator voor milieuvervuiling door, voornamelijk, de industrie. Het ontstaat bij verbranding van brandstoffen met lucht als oxidator. Hierdoor wordt niet alleen de brandstof verbrand, maar ook de in de lucht aanwezige stikstof.

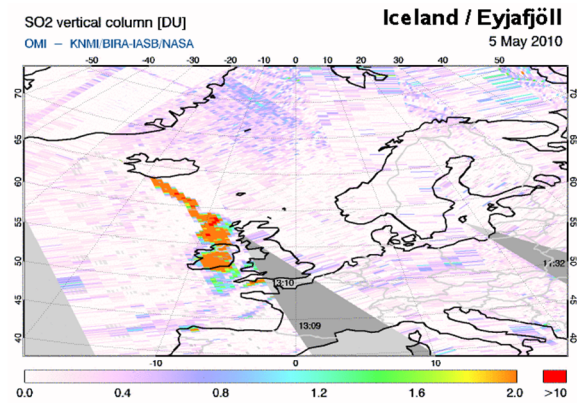
In Figuur 12 is de verdeling van troposferische NO₂ zichtbaar gemaakt. De grotere concentraties bevinden zich in geïndustrialiseerde gebieden. Ook zijn hier scheepvaartroutes zichtbaar, het duidelijkst van noord Indonesië naar het zuiden van India. Ook zijn er voor de westkust van Afrika hogere concentraties te zien door het verbranden van biomateriaal voor het vrijmaken van landbouwgrond in Afrika.



FIGUUR 12 NO₂ GEMETEN DOOR OMI GEMIDDELD OVER 2005-2010. OOK DE VERSCHILLENDE SCHEEPVAARTROUTES ZIJN DUIDELIJK ZICHTBAAR.

5.3.2 SO₂

Een ander gas waar veel onderzoek naar gedaan wordt is zwaveldioxide. Dit is een gas wat vrijkomt bij vulkaanuitbarstingen. Zie Figuur 13. Vulkanische aswolken zijn gevaarlijk voor vliegverkeer en daarom zijn deze metingen bijzonder belangrijk bij het omleiden van vliegverkeer na een vulkaanuitbarsting.



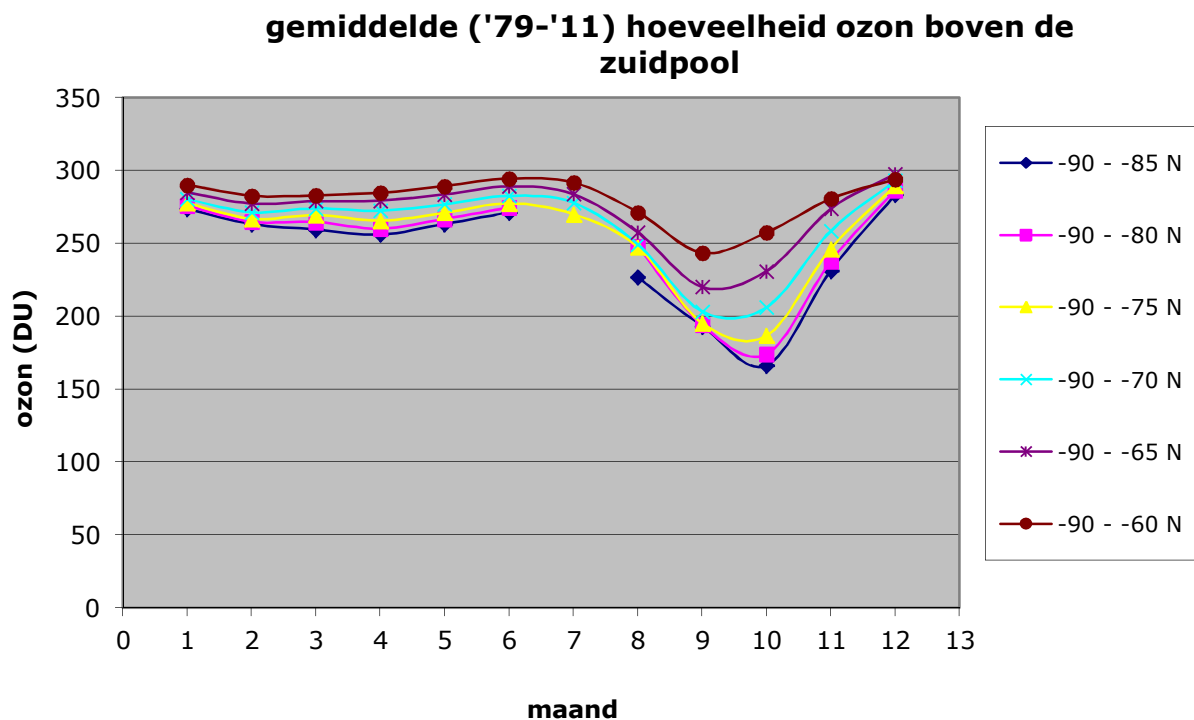
FIGUUR 13 ASWOLK MET ZWAVEL VAN DE IJSLANDSE VULKAAN EYJAFJÖLL IN MEI 2010

6. CORRELATIE ONDERZOEK

6.1 Inleiding

De atmosfeer is een bijzonder complex geheel van talloze processen. Deze processen zijn voor een groot deel afhankelijk van elkaar en afhankelijk van de zon. Daarnaast oefent ook de mens bewust en onbewust invloed uit op de atmosfeer. Door het uitstoten van allerlei stoffen wordt de chemie van de atmosfeer beïnvloed.

Daarnaast zijn er natuurlijke processen die variëren met de tijd. Zo is de hoeveelheid ozon, in het bijzonder boven Antarctica, afhankelijk van de hoeveelheid zonnestraling en daarmee seizoensafhankelijk.



FIGUUR 14 JAARLIJKSE GANG VAN DE HOEVEELHEID OZON GEMIDDELD OVER DE PERIODE 1979-2011, WEERGEGEVEN VOOR EEN TOENEMEND ANTARCTISCH GEBIED.

De seizoensafhankelijkheid van ozon is weergegeven in Figuur 14. Hierin is duidelijk te zien dat het ozongat in september en oktober het grootst is. Het ozongat is in november weer hersteld. Ook is duidelijk te zien dat hoe groter het gebied waarover wordt gemiddeld, hoe meer het ozongat wegvalt. Tussen -90 NB en -70 NB is het ozongat (< 220 DU) het duidelijkst zichtbaar.

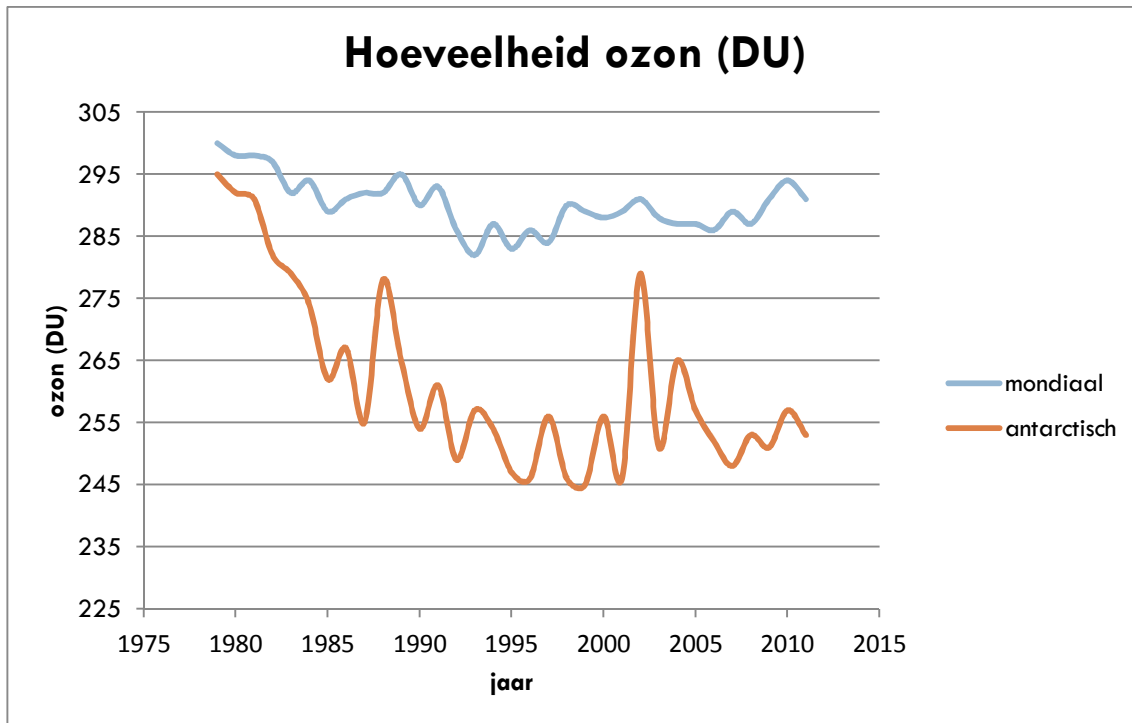
6.2 Theorie

VARIABELEN

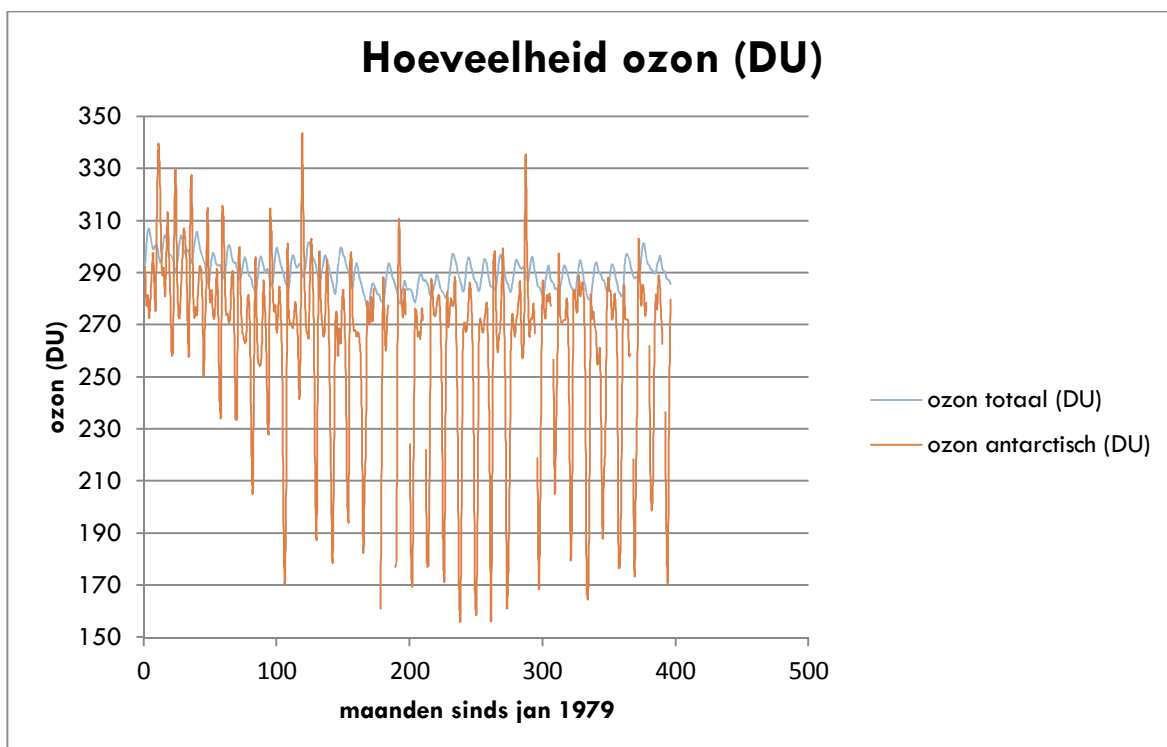
Er is gekeken naar de waarden van een aantal variabelen van 1979 tot en met 2011. Dit was de grootste mogelijke tijdspanne waarin alle gegevens beschikbaar waren binnen de Climate Explorer van het KNMI. Tenzij anders aangegeven komt de data uit de Climate Explorer van het KNMI.

OZON

Ozon wordt op een aantal verschillende gebieden bekeken. Als eerste is er het mondiale ozon (-90 – 90 NB). Dit omvat alle ozon in de atmosfeer. Vervolgens wordt dit opgesplitst in een aantal kleinere gebieden, het Antarctisch gebied (-90 - -70 NB), het tropisch gebied (-30 – 30 NB) en het Arctisch gebied (70 – 90 NB).



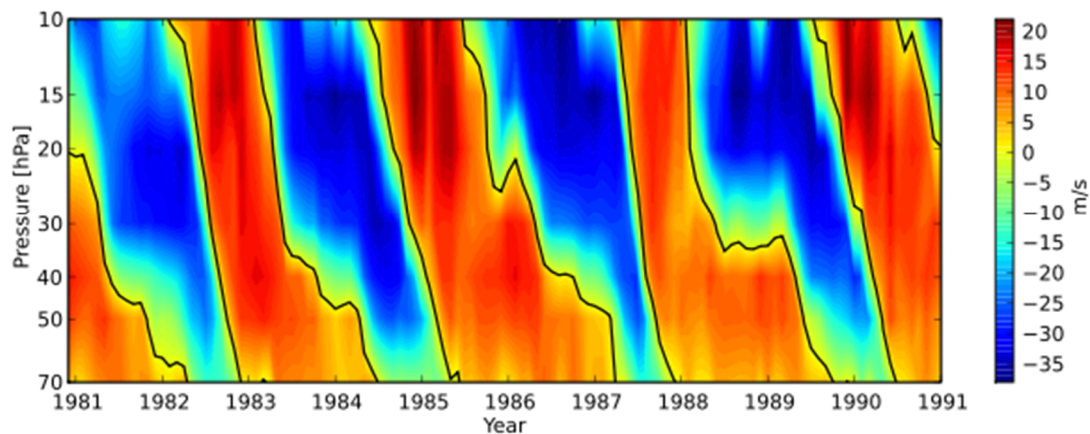
FIGUUR 15 JAARGEMIDDELDEN VAN DE GEMETEN HOEVEELHEID OZON IN DE PERIODE VAN 1979 -2011



FIGUUR 16 MAANDGEMIDDELDEN VAN DE HOEVEELHEID GEMETEN OZON IN DE PERIODE VAN 1979 TOTO 2011

QBO (NOAA, 2012)

Een andere parameter is QBO, wat staat voor Quasi Biennial Oscillation. De equatoriale winden laten een (ongeveer) 2-jarlijks verloop zien. Hierin zijn de verschillende windrichtingen duidelijk te zien. Daarnaast is er een verdeling in de hoogte. Zie Figuur 17. Daarbij valt op dat in de hogere luchtlagen de wind meer van oost naar west waait en op lager hoogtes meer van west naar oost.



FIGUUR 17 QBO: DE WINDRICHTINGEN OP VERSCHILLENDE HOOGTEN ZIJN DUIDELIJK ZICHTBAAR. EEN POSITIEVE WINDRICHTING STAAT VOOR WEST NAAR OOST.

ENSO (NOAA, 2012)

De El Niño Southern Oscillation (ENSO) is een maat voor de verandering in het zeewatertemperatuur van de Grote Oceaan in het gebied rond de evenaar. Deze varieert zonder echt een typische regelmaat. Een gemiddelde periode duurt 5 jaar.

ZONKRACHT

Veel processen in de atmosfeer zijn afhankelijk van de extra terrestrische zonne-intensiteit. Deze varieert lichtelijk en kent een 11-jarige periode.

TEMPERATUUR (NOAA, 2012)

Voor de verschillende gebieden (globaal, Antarctisch, tropisch en Arctisch) is ook gekeken naar de temperatuur. Dit is gedaan voor het gebied "upper air".

Van elke grootheid is het maandgemiddelde genomen. Bij elkaar waren dat vanaf januari 1979 tot en met december 2012 396 meetwaarden per grootheid. Hierbij is met behulp van Excel de correlatie vastgesteld.

6.3 Hypothese

Bodeker (Bodeker, Boyd, & Matthews, 1998) heeft een vergelijkbaar onderzoek uitgevoerd en hij laat daarin zien dat veranderingen in tropisch ozon samengaan met veranderingen in de QBO.

6.4 Resultaten

	ozon totaal (DU)	ozon antarctisch (DU)	ozon tropisch (DU)	ozon arctisch (DU)	QBO (m/s)	ENSO (K)	zonnekracht (W/m ²)	temp totaal (K)	temp tropisch (K)	temp arctisch (K)	temp antarctisch (K)
ozon totaal (DU)	1,00	0,37	0,33	0,48	-0,11	-0,03	0,33	0,02	-0,10	0,06	0,18
ozon antarctisch (DU)		1,00	-0,43	0,40	0,05	0,07	0,20	-0,07	-0,11	-0,08	0,27
ozon tropisch (DU)			1,00	-0,49	-0,04	-0,15	0,10	-0,03	-0,11	-0,02	-0,04
ozon arctisch (DU)				1,00	0,09	-0,01	0,07	0,11	0,05	0,23	-0,01
QBO (m/s)					1,00	0,04	0,04	-0,10	-0,05	-0,10	-0,06
ENSO (K)						1,00	0,01	0,26	0,53	-0,06	0,16
zonnekracht (W/m ²)							1,00	-0,03	-0,09	-0,10	0,15
temp totaal (K)								1,00	0,85	0,48	0,13
temp tropisch (K)									1,00	0,29	-0,05
temp arctisch (K)										1,00	-0,05
temp antarctisch (K)											1,00

FIGUUR 18 TABEL MET CORRELATIES

6.5 Conclusie

Tussen de verschillende grootheden zijn over het algemeen kleine correlaties aanwezig. De grootste correlatie tussen twee verschillende grootheden is die tussen ENSO en de tropische temperatuur. (0,53, Figuur 18) en de totale hoeveelheid ozon en de zonkracht (0,33, Figuur 18).

De relatie tussen tropisch ozon en de QBO die Bodeker vond komt terug in deze datareeks, maar met een correlatie van slechts -0,04.

7. DANKWOORD

Ik wil Jacques Claas, Mark Kroon, Remco Braak, Michiel van Weele en Marc Allaart bedanken voor de tijd die ze vrijgemaakt hebben om mij een inzicht te geven van hun rol in het proces van kwaliteitscontrole van OMI ozon-data, om deze geschikt te maken voor wetenschappelijk onderzoek.

Marc Allaart wil ik ook bedanken voor zijn rondleiding bij het KNMI en dat ik aanwezig mocht zijn bij het oplaten van een weerballon met een ozonsonde.

Ronald van der A wil ik bedanken voor het meedenken met het opzetten van een eigen onderzoek naar de correlatie tussen verschillende grootheden die gemeten zijn met behulp van satellieten en zijn feedback die ik tijdens dit onderzoek van hem heb gekregen.

Daarnaast wil ik ook Albert Oude Nijhuis bedanken voor het beantwoorden van allerlei vragen die tijdens het schrijven naar boven kwamen.

Als laatste wil ik het KNMI en in het bijzonder Piet Stammes bedanken voor de mogelijkheid dat ik deze praktijkstage bij het KNMI mocht doen en de begeleiding die ik hier heb gekregen om kennis te maken met de onderzoekswereld.

8. BIBLIOGRAFIE

- Bodeker, G. E., Boyd, I. S., & Matthews, W. A. (1998). Trends and variability in vertical ozone and temperature profiles measured by ozonesondes at Lauder, New Zealand: 1986–1996. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 103, NO. D22, PP. 28,661-28,681.
- De Laat, A. (2010). Extreme sunbathing: Three weeks of small total O₃ columns and high UV radiation over the southern tip of South America during the 2009 Antarctic hole season. *Geophysical Research Letters* Vol. 37, L14805, 6 pp.
- Dobson, G. (1968). Forty Years' Research on Atmospheric Ozone at Oxford: a History. *Applied Optics* Vol. 7, No. 3, 387-405.
- Fahey, D. W., & Hegglin, M. I. (2011). *Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2010 Update, Scientific Assessment of Ozone Depletion*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- KNMI - OMI. (2008, december 16). *Optical Assembly*. Opgeroepen op januari 6, 2012, van OMI Instrument: <http://www.knmi.nl/omi/research/instrument/optic.php?tag=full>
- Levelt, P. F. et al. (2000). *Science Requirements Document for OMI-EOS*. De Bilt: KNMI.
- NASA. (2012, januari 4). *Ozone Hole Watch: Latest status of Antarctic Ozone*. Opgeroepen op januari 4, 2012, van Ozone Hole Watch: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>
- NASA. (sd). *Antarctic Master Directory*. Opgeroepen op mei 25, 2012, van gcmd.nasa.gov: <http://gcmd.nasa.gov/KeywordSearch/Metadata.do?Portal=amd&KeywordPath=Projects|S+-+U|TOMS-M3&NumericId=25007&MetadataView=Full&MetadataType=0&lbnode=mdlb2>
- NOAA. (2012, mei 4). *ENSO data*. Opgeroepen op mei 30, 2012, van National Weather Services: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml
- NOAA. (2012, mei 4). *QBO data*. Opgeroepen op mei 30, 2012, van National Weather Services: <HTTP://WWW.ESRL.NOAA.GOV/PSD/DATA/CORRELATION/QBO.DATA>
- NOAA. (2012, mei 16). *temperature data*. Opgeroepen op mei 30, 2012, van National Weather services: http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/cmb/temp-and-precip/upper-air/rss_monthly_msu_amsu_channel_tmt_anomalies_land_and_ocean.txt
- Stammes, P., & Peters, A. (1996). GOME overview. *GOME validation at KNMI and collaborating institutes*, 7-15.
- Van der A, R. J., Allaart, M. F., & Eskes, H. J. (2010). Multi sensor reanalysis of total ozone. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10, 11277-11294.

9. VERANTWOORDING FIGUREN:

Figuur 1: http://en.wikipedia.org/wiki/image:Solar_Spectrum.png

Figuur 2 & Figuur 3: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/SH.html>

Figuur 4: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>

Figuur 5: (Dobson, 1968)

Figuur 6: <http://www.kipzonen.com/?product/5051/Brewer+MkIII.aspx>

Figuur 7: <http://www.knmi.nl/omi/research/instrument/optic.php?tag=full>

Figuur 8: eigen

Figuur 9: <http://www.knmi.nl/omi/research/product/rowanomaly-background.php>

Figuur 10: eigen

Figuur 11: eigen

Figuur 12: KNMI (2012). Kijk op klimaat. De Bilt: KNMI

Figuur 13: <http://sacs.aeronomie.be/info/omiso2.php>

Figuur 14: eigen

Figuur 15: eigen

Figuur 16: eigen

Figuur 17: http://en.wikipedia.org/wiki/Quasi-biennial_oscillation

Figuur 18: eigen

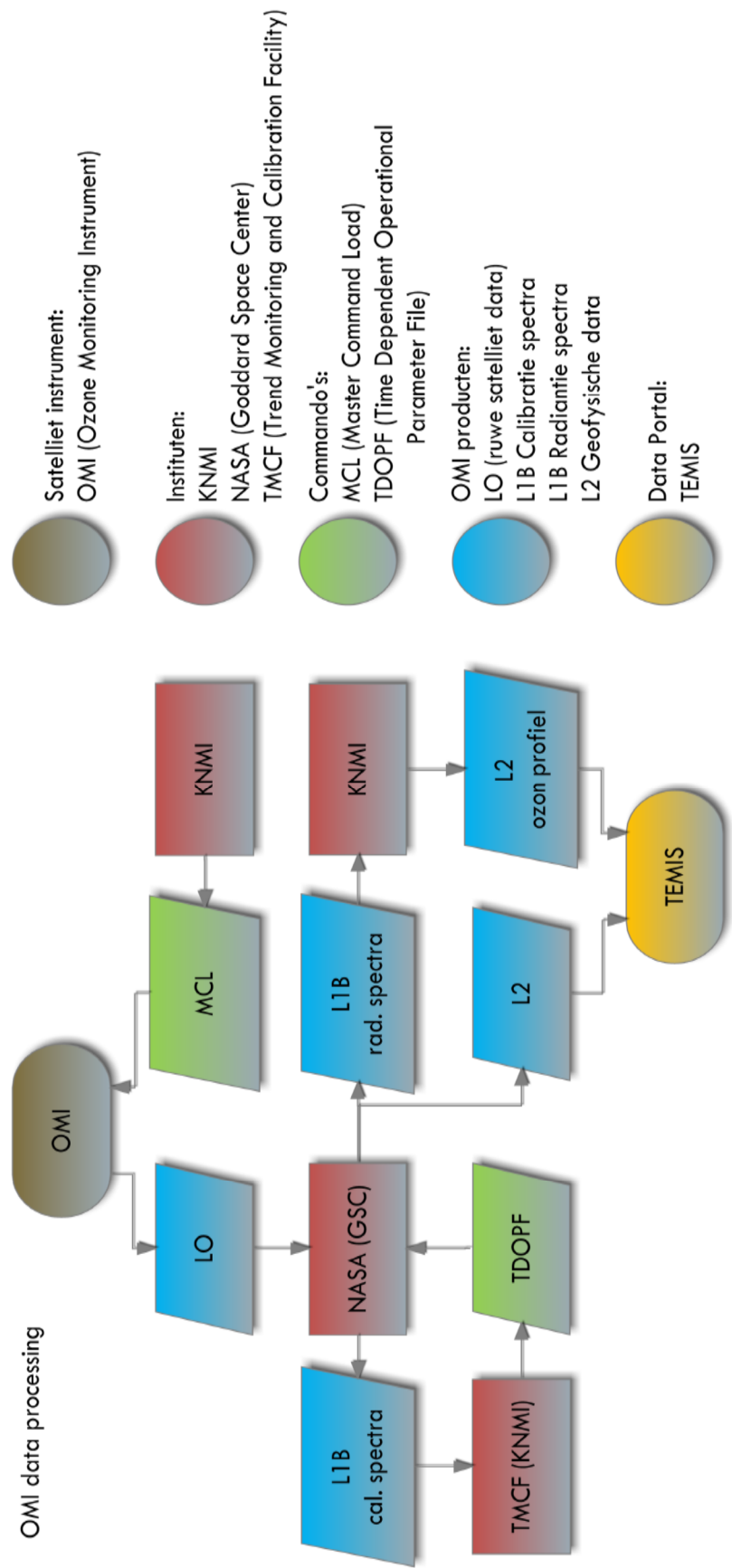
Figuren bijlage 2: eigen

Figuren Bijlage 3: eigen

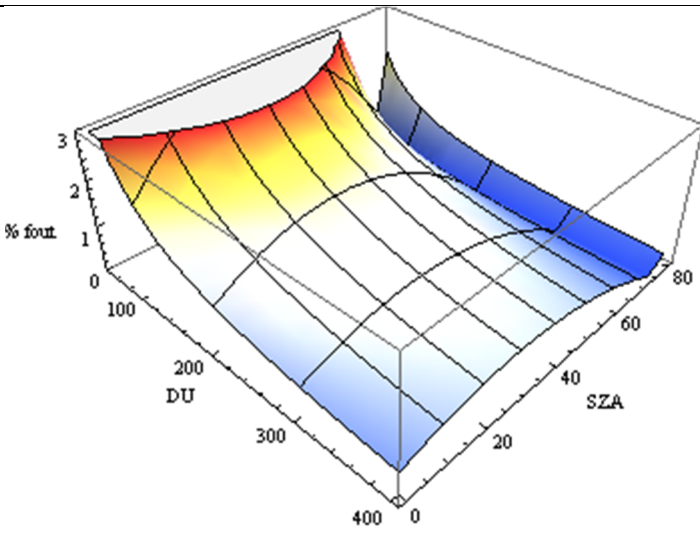
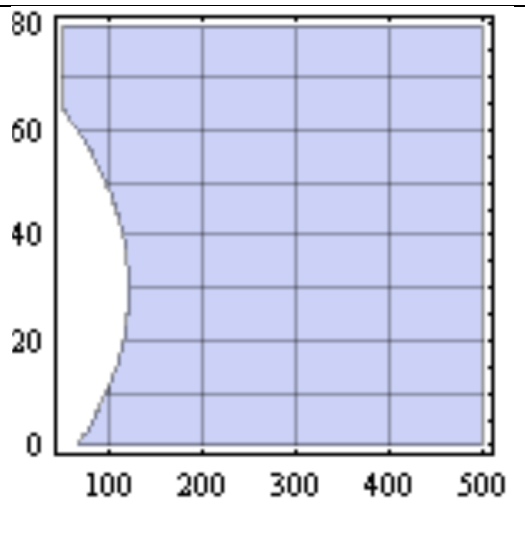
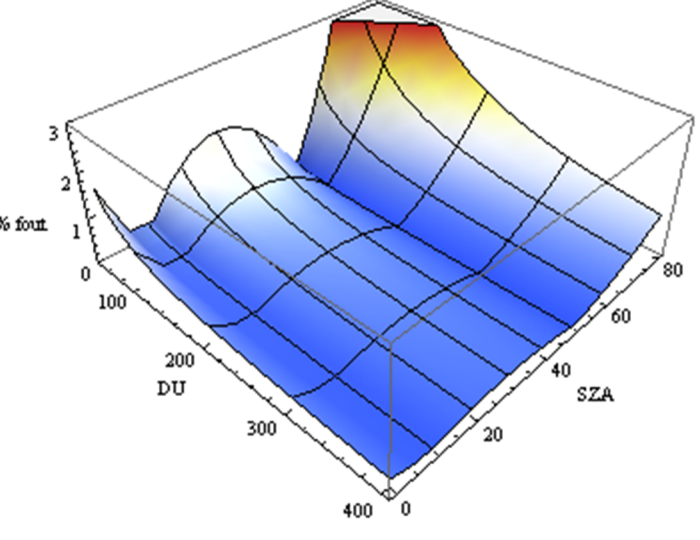
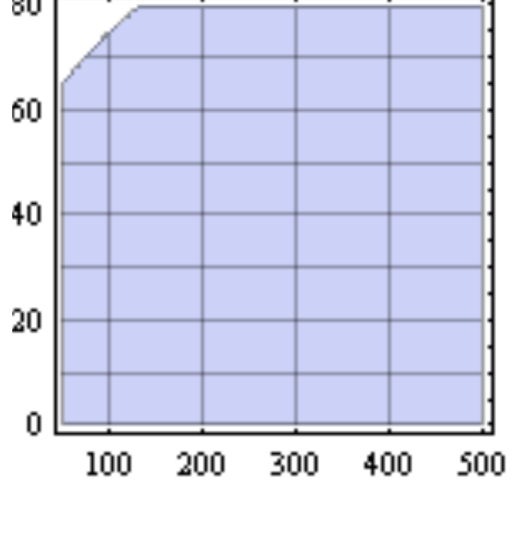
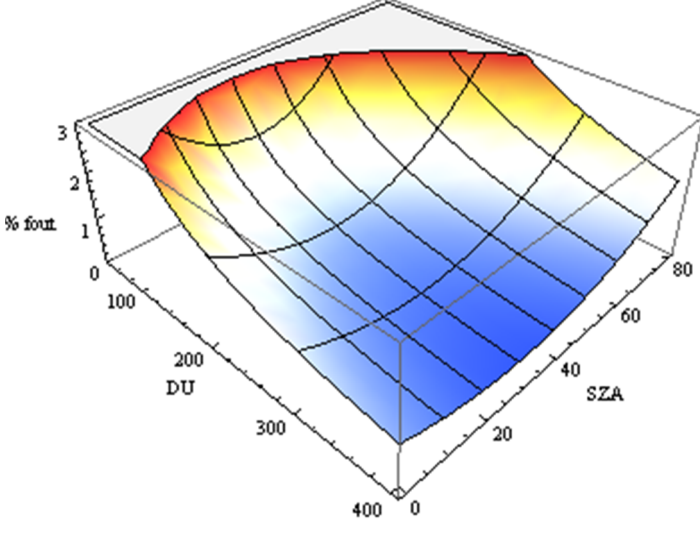
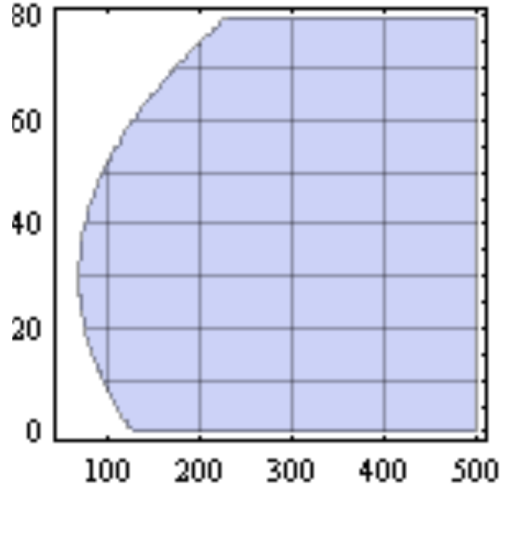
10. BIJLAGE 1: AFKORTINGEN

CE	Climate Explorer
DU	Dobson Unit
ENSO	El Niño Southern Oscillation
IOC	International Ozone Commission
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NB	Noorderbreedte
MCL	Master Command Load
MJD	Aantal jaren sinds 2000
OMI	Ozone Monitoring Instrument
PPM	Parts Per Million (een miljoenste deel)
PSC	Polar Stratospheric Clouds
QBO	Quasi Biennial Oscillation
SZA	Solar Zenith Angle
TMCF	Trend Monitoring and Calibration Facility
TDOPF	Time Dependent Operational Parameter File
UV	Ultra Violet
WMO	World Meteorological Organization

11. BIJLAGE 2: OMI DATAFLOW



12. BIJLAGE 3: FOUT IN OMDOAO3 ALGORITME

jaar	fout	2%-grens (SZA vert. tegen DU hor.)
2004		
2012		
2020		

13. BIJLAGE 4: LOGBOEK

Datum	van-tot	activiteiten	
24 aug 11	9:00-11:00	Onderzoeksvraag vastgesteld Enkele praktische zaken	
15 sep 11	19:00-22:00	Inlezen Onderzoeksvoorstel	thuis
21 sep 11	9:00-16:30	Kennismaken (09:00-10:45) Inlezen (10:45-16:30) : Voornamelijk de gekregen bronnen analyseren. Ik weet nu een beetje welke info ik in welk bron zou moeten vinden. Ozon systeem bekeken	
28 sep 11	9:30-16:30	Inlezen satellietontwikkeling	
5 okt 11	8:45-16:30	Inlezen satellietontwikkeling	
12 okt 11	9:00-16:30	ozoncyclus	
19 okt 11	8:30-16:30	ontwerpeisen satellieten	
26-okt 11	9:00-16:30	data levels	
2 nov 11	9:00-16:30	interview Jacques Claas verwerken interview	
9 nov 11	9:00-16:30		
16 nov 11	9:00-16:30	interview Mark Kroon interview Remco Braak	
23 nov 11	9:00-16:30	interview Michiel van Weele	
30 nov 11	9:00-16:30		
7 dec 11	9:00-16:30		
14 dec 11	9:00-16:30		
28 dec 11	8:30-16:30		
4 jan 12	9:00-16:30	interview Marc Allaart bezoek Brewer	
5 jan 12	9:00-16:00	oplaten weerballon met Marc Allaart	
6 jan 12	9:00-16:00		thuis
11 jan 12	9:00-14:00		
25 jan 12	8:45-16:30		
8 feb 12	9:15-16:00		op tijd weg ivm bustijden

15 feb 12	9:00-15:30		op tijd weg ivm bustijden
22 feb	8:30-14:30		
29 feb	9:00-15:30		
1 mrt	9:15-16:30		
7 mrt	8:30-15:00		
14 mrt	8:45-16:30		
21 mrt	9:00-16:00		op tijd weg ivm bustijden
28 mrt	9:00-15:00		ivm hertentamen
4 apr	9:00-15:00		ivm tentamens
6 apr	9:00-15:00		op hemelvaartsdag ipv 11 apr
18 apr	9:00-16:00		op tijd weg ivm bustijden
25 apr	9:00-16:00		
8 mei	9:00-16:00		
15 mei	9:00-11:30		thuis
23 mei	9:00-11:30		thuis
25 mei	19:00-24:00		thuis
30 mei	9:00-13:00		
6 juni	9:30-14:00		