



# Ontwikkeling van een spectraal UV-meetinstrument

*Frank Helderman*

Koninkrijk Nederlands Meteorologisch Instituut



## Technisch rapport TR-182

De Bilt, 1995

Postbus 201  
3730 AE De Bilt  
Wilhelminalaan 10  
Telefoon 030-220 69 11, telefax 030-221 04 07

JDC: 551.501.721  
551.521.17  
ISSN: 0169-1708  
ISBN: 90-369-2094-9



# Ontwikkeling van een spectraal UV-meetinstrument

verslag afstudeerstage KNMI/VU  
Frank Helderman



September 1995

Foto titelpagina:    **proefpersoon op het strand van Scheveningen  
tijdens het onderzoek “met de billen bloot”**

# Inhoud

Voorwoord.....	3
Introductie.....	5
<b>1 Ultraviolette Straling en Ozon in de Atmosfeer.....</b>	<b>7</b>
1.1 UV-straling.....	7
1.1.1 UV-straling op grondniveau.....	8
1.2 Ozon.....	10
1.3 Effecten van UV-straling.....	11
1.4 Metingen.....	12
1.4.1 Ozonmetingen.....	13
1.4.2 UV-metingen.....	15
1.5 Concluderende opmerkingen.....	17
<b>2 De Optical Multichannel Analyzer (OMA).....</b>	<b>19</b>
2.1 Opbouw van de OMA.....	20
2.2 Theorie van de OMA.....	20
2.3 Instrumentkarakteristieken.....	23
2.4 Opbouw, ijkingen en metingen.....	25
2.5 De OMA inbouwen in een kist.....	25
2.6 Golflengteijking.....	28
2.7 Irradiantieijking.....	29
2.8 Strooilichtcorrectie.....	32
<b>3 EU meetcampagne Ispra.....</b>	<b>35</b>
3.1 Inleiding.....	35
3.2 Meetprotocol.....	37

3.3 De OMA in de meetcampagne.....	37
3.4 Conclusies .....	40
<b>4 Appendix.....</b>	<b>43</b>
<b>5 Referenties .....</b>	<b>47</b>

## Voorwoord

Binnen de studie Natuurkunde/Milieuwetenschappen aan de VU moet een afstudeerstage buiten de universiteit gelopen worden. Ik heb de stage bij het KNMI mogen lopen. Dit verslag beschrijft de verrichtte werkzaamheden en resultaten die daaruit zijn voortgekomen.

De volgende personen wil ik hartelijk bedanken.

Foeke Kuik (begeleider op het KNMI) van wie ik veel geleerd heb en die voor zeer goede begeleiding gezorgd heeft, Rob Cornet van de werkplaats die een belangrijke bijdrage aan de ontwikkeling van het meetinstrument heeft geleverd, Casper Hofman die samen met mij metingen heeft verricht tijdens de meetcampagne in Ispra en mij veel geleerd heeft met betrekking tot computers, Wim Vassen (begeleider VU) die geholpen heeft een stageplaats op het KNMI te krijgen en voor de beoordeling van de verslagen. Wouter Knap met wie ik vergelijkende metingen heb uitgevoerd (zie appendix). Ik wil ook Wiel Wauben, Andre van Londen en Marjan Onrust bedanken voor hun adviezen. Mijn kamergenoten op het KNMI: Ad Stoffelen, Ad Jeuken en Fred Grootentraast ben ik dankbaar voor de leuke tijd en gezelschap op het KNMI.

## Introductie

In het kader van de studie Natuurkunde/Milieuwetenschappen moet er zowel een milieustage als een afstudeerstage gelopen worden. De milieustage vindt gewoonlijk in de eigen vakgroep plaats en de afstudeerstage wordt buiten de universiteit gelopen. Bij het zoeken naar een stageplaats buiten de universiteit kwam een mogelijkheid bij het KNMI naar voren. In de groep Klimaatscenario's en Ozon van de afdeling Wetenschappelijk Onderzoek van het KNMI was het mogelijk om mijn afstudeerstage te vervullen. Deze groep bood mij de gelegenheid om een bijdrage te leveren aan het onderzoek naar relaties tussen UV-straling enerzijds en ozon, bewolking en andere atmosferische variabelen anderzijds. Dit onderzoek vereist kennis van fysische processen in de atmosfeer en is door de huidige milieuproblematiek met betrekking tot de ozonlaag geschikt als afstudeerstage in het kader van de studie Natuurkunde/Milieuwetenschappen. In overleg met de universiteit is besloten om de milieustage en de afstudeerstage niet te scheiden en ze beiden op het KNMI te laten plaatsvinden.

De stage begon met een literatuurstudie over de atmosfeer in z'n algemeen, zonnestraling, UV-straling, ozon en over het meten van UV-straling. Een experimenteel gedeelte bestond hoofdzakelijk uit het opbouwen en testen van een UV-meetinstrument dat in mei '95 mee moest doen aan een EU UV-meetcampagne in Ispra (Italië). De basis van het meetinstrument is een OMA (Optical Multichannel Analyzer) dat in zijn 'kale' vorm veel last had van strooi-licht en temperatuurgevoelig was. Beide problemen zijn door de nieuwe opbouw verholpen.

Het verslag bestaat uit drie hoofdstukken. In hoofdstuk 1 wordt achtergrondinformatie gegeven omtrent ultraviolette straling en ozon. In hoofdstuk 2 wordt de OMA besproken waarna ook de opbouw van het nieuwe UV-meetinstrument behandeld wordt. Hoofdstuk 3 gaat over de EU meetcampagne in Ispra waarin het nieuwe meetinstrument vergeleken wordt met andere instrumenten.

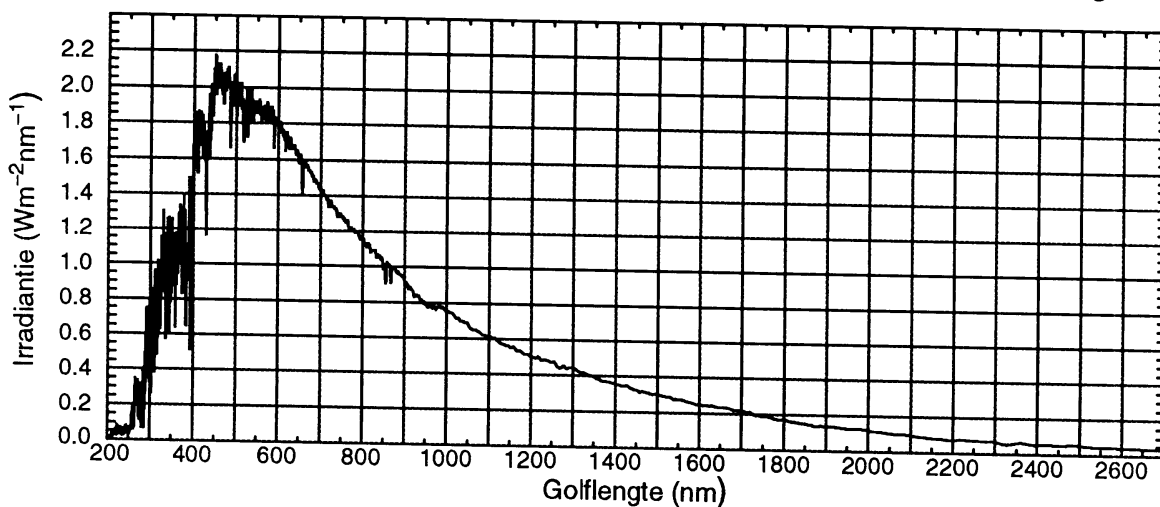


# 1 Ultraviolette Straling en Ozon in de Atmosfeer

In dit hoofdstuk worden algemene zaken betreffende UV-straling en ozon besproken. Met name worden definities gegeven, de afhankelijkheid van UV-straling van ozon, bewolking, aërosolen, zonshoogte, etc., komt ter sprake en de relevantie van ozon en UV-straling voor het milieu wordt uiteen gezet. Hiervoor is voornamelijk gebruik gemaakt van twee rapporten: *Ozon en UltraViolette straling* (Eggink et al. 1995) en *Spectral Ultraviolet Radiation Measurements and Correlation with Atmospheric Parameters* (Kuik en Kelder 1994).

## 1.1 UV-straling

De zon emitteert elektromagnetische straling. In figuur 1.1 is het zonnenspectrum te zien zoals die aan de top van de aardatmosfeer waargenomen kan worden. Horizontaal staat de golflengte, verticaal de irradiantie in  $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$ . De irradiantie is hier de hoeveelheid stralingsenergie die per seconde door een bepaald oppervlak gaat. In het geval van figuur 1.1 is dit oppervlak loodrecht op de richting van de zonnestraling genomen en spreekt men ook wel van de 'normale' irradiantie. Aan de top van de atmosfeer is er alleen straling afkomstig vanuit de richting van de zon en is er sprake van een goed gedefinieerde parallelle bundel straling.



Figuur 1.1 Extraterrestrisch zonnenspectrum.

Een gebruikelijke type stralingsmeting dat op de grond gedaan wordt, is de irradiantiemeting, of globale stralingsmeting. In dit geval meet de sensor met een entree-opening parallel aan het aardoppervlak ('horizontaal'). Dit soort meetinstrumenten meten dus de straling afkomstig van de halve hemelbol boven de sensor. Dit kan spectraal gebeuren (per golflengte) of in bepaalde golflengtebanden.

Ultraviolette straling is elektromagnetische straling in een golflengtegebied van 100 tot 400 nm. Ter vergelijking, zichtbare straling bestaat uit licht met golflengten tussen 400 en 700 nm.

UV-straling kan onderverdeeld worden in drie golflengtegebieden:

**UVC**-straling is het golflengtegebied van 100 tot 280 nm.

**UVB**-straling is het golflengtegebied van 280 tot 315 nm.

**UVA**-straling is het golflengtegebied van 315 tot 400 nm.

De zon emitteert ongeveer 8.4% van zijn energie in de vorm van UV-straling. Aan de top van onze atmosfeer is er 0.5% UVC, 1.4% UVB en 6.5% UVA.

### **1.1.1 UV-straling op grondniveau**

Wanneer zonnestraling de atmosfeer binnendringt en zich naar het aardoppervlak begeeft, vinden er een aantal processen plaats die vorm van het spectrum en de intensiteit beïnvloeden. De totale verzwakking van de zonnebundel wordt extinctie genoemd, wat weer de som is van absorptie en verstrooiing van het licht.

Hoeveel UV-straling door de atmosfeer heen de grond bereikt wordt voornamelijk door de volgende vier parameters bepaald: zonshoogte, bewolking, ozon en aërosolen.

#### **Zonshoogte**

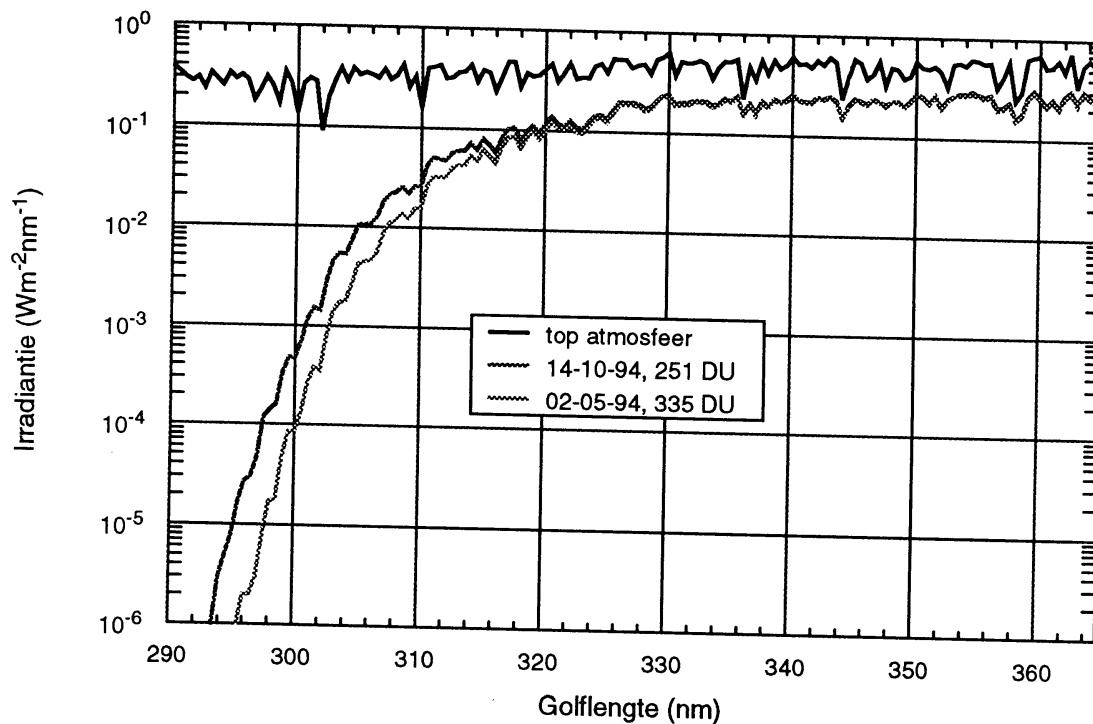
De afgelegde weg door de atmosfeer is bij een hoge zonnestand korter dan bij een lage zonnestand. Als de zon hoog aan de hemel staat bereikt daardoor veel meer UV-straling de grond dan wanneer hij net boven de horizon staat ('s ochtends en 's avonds). Zomers staat de zon midden op de dag veel hoger aan de hemel dan in de winter (op 21 juni maximaal 61°, op 21 december maximaal 15°). De hoeveelheid UV-straling die de grond bereikt is dan dus (gemiddeld) ook veel groter.

#### **Bewolking**

De invloed van wolken op de hoeveelheid UV-straling op de grond is veel moeilijker te kwantificeren. De invloed van bewolking (verstrooiing, absorptie) op UV-straling verschilt behoorlijk van die op visuele straling doordat water(damp) UV-straling in mindere mate absorbeert. Doordat wolken straling van de zon kunnen afschermen zal bij een volledig (dik) bewolkte hemel minder UV-straling de grond bereiken dan bij een wolkenloze hemel. Het type bewolking heeft echter ook invloed op de grondniveau's van UV-straling. Bij een gedeeltelijk bewolkte hemel kan door reflectie aan cumulusbewolking de hoeveelheid UV-straling tijdelijk oplopen tot zo'n 150% van de niveau's bij een onbewolkte hemel. Bij afscherming van de zon kan dit teruglopen tot zo'n 20 à 30 van de onbewolkte niveau's

## Ozon

Ozon absorbeert UVC en UVB-straling. Het laat UVA straling ongehinderd door (zie figuur 1.2 en 1.3). In figuur 1.2 is de invloed van ozon op UV-straling goed te zien. Het toont een gedeelte van het zonnenspectrum zoals aan de top van de aardatmosfeer gemeten wordt en twee zonnenspectra voor dezelfde zonshoogte die op verschillende dagen op de grond gemeten zijn (KNMI; Brewer#100). Eén spectrum is gemeten bij een ozonkolom van 335 Dobson Units ( $\text{DU}^1$ ) en één bij een ozonkolom van 251 DU. De hoeveelheid UVA-straling is voor beide spectra gelijk omdat dit niet in de atmosfeer geabsorbeerd wordt. Bij kortere golflengten is een toenemend verschil in hoeveelheid straling te zien als gevolg van het verschil in ozonkolom. Een variatie van 1% ozon veroorzaakt 1.3 tot 2% verandering in de hoeveelheid UV-straling (hoewel dit sterk golflengte afhankelijk is). De verzwakking van de irradiantie in het UVA-gebied (waar ozon niet absorbeert) komt door Rayleighverstrooiing. In paragraaf 1.2 wordt uitgebreider op ozon ingegaan.



**Figuur 1.2** Drie UV-spectra: de doorgetrokken zwarte lijn is de spectrale UV-irradiantie aan de top van de atmosfeer (parallel aan het aardoppervlak), de twee andere lijnen zijn gemeten UV-spectra (KNMI, Brewer#100) voor dezelfde zonshoogtes maar op twee dagen met verschillende ozonkolommen. De afkapping van de korte golflengtes wordt veroorzaakt door absorptie van UV-straling door ozon. Duidelijk te zien is het verschil in UV-absorptie bij verschillende ozonkolommen. De extinctie voor de langere golflengtes komt door o.a. Rayleighverstrooiing in de atmosfeer, niet door ozon.

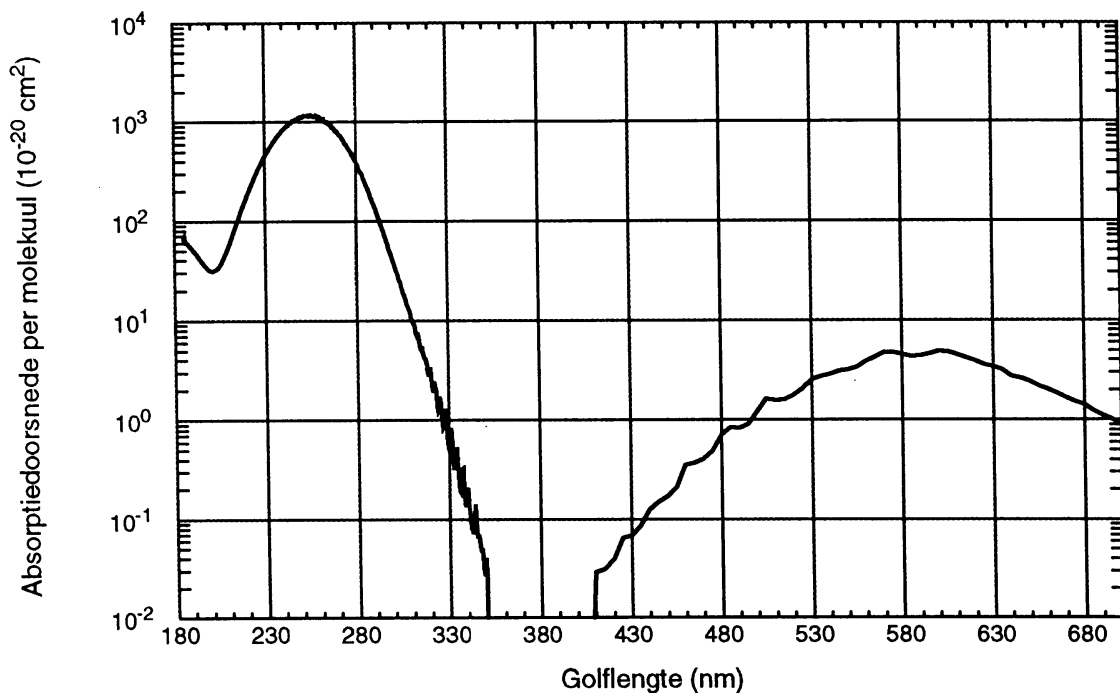
1. 1 DU is een laagje ozon van 0.01 mm dikte bij STP, ook wel mili-atmosfeer-centimeter genoemd.

## Aërosolen

Aërosolen is een aanduiding voor allerlei kleine vaste en vloeibare deeltjes die in de atmosfeer voorkomen. Deels zijn ze van natuurlijke oorsprong (b.v. vulkaanstof), deels zijn ze door menselijk handelen in de atmosfeer gebracht (industriële activiteiten, antropogeen aërosol). Aërosolen hebben in het algemeen invloed op de stralingsbalans, maar ook specifiek op de hoeveelheid UV-straling die de grond bereikt. Net als wolken is hun invloed niet triviaal te beschrijven. Zo maakt een hoge of lage zonshoogte verschil of er minder of meer UV-straling de grond bereikt. Bovendien beïnvloeden ze ook op een indirecte manier de hoeveelheid UV-straling doordat aërosolen als condensatiekernen dienen bij wolkenvorming en aërosolen een rol kunnen spelen in de ozonchemie. De hoeveelheden aërosol in de atmosfeer zijn daarnaast erg variabel en hangen samen met de windrichting.

## 1.2 Ozon

Ozon is een molecuul dat bestaat uit drie zuurstofatomen ( $O_3$ ). Het komt in de atmosfeer als sporegas voor. De hoeveelheid ozon in de atmosfeer wordt bepaald door een evenwicht tussen aanmaak, transport en afbraak. Ozon is een belangrijk gas in de aardatmosfeer omdat het o.a. UVB-straling absorbeert en zo het leven op aarde mogelijk maakt. In figuur 1.3 is het absorptiespectrum van ozon weergegeven. Hierin is te zien is dat zowel UVC als UVB-straling sterk



**Figuur 1.3** Absorptiespectrum van ozon.

geabsorbeerd worden. Ook in het visuele gebied vindt absorptie plaats, maar UVA-straling wordt vrijwel niet geabsorbeerd.

In de troposfeer, ruwweg de onderste 12 km van de atmosfeer, bevindt zich zo'n 10% van al het atmosferische ozon. Troposferisch ozon wordt voornamelijk gevormd door chemische processen waarbij stikstofoxyden en koolwaterstoffen een rol spelen. Deze gassen komen vrij bij verbrandingsprocessen zoals die bijvoorbeeld plaatsvinden in de motor van een auto. Onder bepaalde omstandigheden (weinig wind, hoge temperaturen, veel staling) kan hierdoor een verhoogde ozonconcentratie optreden en spreken we van (zomer)smog. Doordat ozon erg reactief is kan dit irritatie en een schadelijk effect in de longen veroorzaken. Bij vegetatie kan zichtbare beschadiging en een verminderde groei het gevolg zijn. Een verhoogde ozonconcentratie kan de voedselopbrengst dus nadelig beïnvloeden.

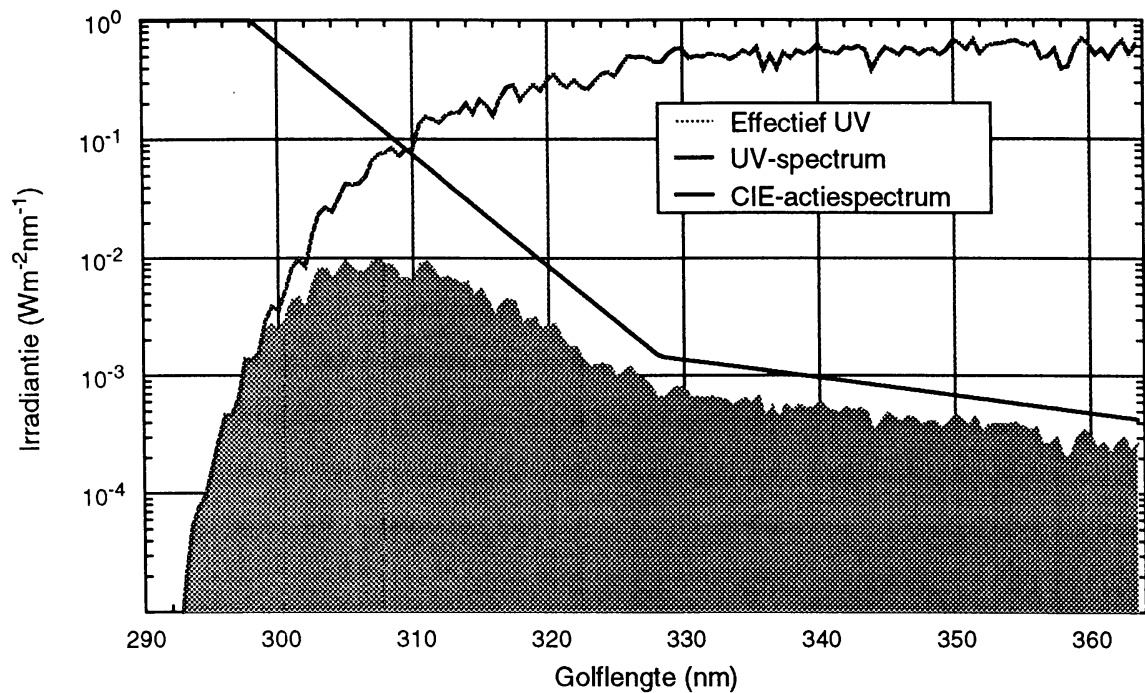
In de jaren '70 nam op het noordelijk halfrond het troposferisch ozon met 0.5 tot 2% per jaar toe. Doordat troposferisch ozon ook absorbeert in het infrarood draagt het ook nog bij aan het broeikaseffect (Iqbal 1983, Fortuin *et al.* 1995).

In de stratosfeer (ongeveer 12 tot 50 km hoogte) bevindt zich zo'n 90% van het atmosferisch ozon. De hoogste concentratie ozon bevindt zich tussen de 15 en 35 km hoogte. Dit wordt ook wel de ozonlaag genoemd. In de ozonlaag wordt veel UVB-straling geabsorbeerd. Deze absorptie van UV-straling heeft invloed op de temperatuuropbouw van de stratosfeer: er treedt een temperatuurmaximum op in de ozonlaag.

### **1.3 Effecten van UV-straling**

UVB-straling is schadelijk voor mens, dier en plant. Effecten op de mens van overmatige blootstelling aan UV-straling zijn o.a. staar, hoornvliesontsteking, zonnebrand, versnelde huidveroudering, verschillende vormen van huidkanker en een verminderde weerstand tegen infectieziekten. Planten groeien minder goed bij een verhoogde hoeveelheid UV-straling. Een toename van UV-straling kan daardoor de voedselvoorziening van de mens nadelig beïnvloeden.

Om de biologische effectiviteit van UV-straling vast te stellen wordt de UV-irradiantie bij de verschillende golflengten vermenigvuldigd met weegfactoren. Het totaal van de weegfactoren bij de verschillende golflengten vormen het zogenaamde actiespectrum. Het actiespectrum hangt van het organisme af en verschilt per effect. Zo bestaan er voor de mens b.v. actiespectra voor huidkanker, staar, zonnebrand, etc. Het product van een UV-spectrum en een actiespectrum wordt ook wel effectief UV genoemd. Dit effectief UV wordt vervolgens geïntegreerd



**Figuur 1.4** Een UV-spectrum, het CIE-actiespectrum en hun product. CIE staat voor Commission International de l'Eclairage, dit is een commissie die belast is met de terminologie op het gebied van verlichting.

over het hele (UV) golflengtegebied, zodat per spectrum één getal verkregen wordt: het zogenaamde schadelijk UV (SUV). In figuur 1.4 is het CIE-actiespectrum, een UV-spectrum en hun product te zien.

## 1.4 Metingen

Sinds het midden van de jaren '70 is over een groot deel van de wereld een continue ozonafname geconstateerd. Boven Europa nam de ozonkolom in de jaren '80 trendmatig af met 15 DU per decennium.

De wereldwijde ozonafname wordt zeer waarschijnlijk mede veroorzaakt door de emissie van door mensen geproduceerde chloorfluorkoolwaterstoffen (CFK's).

Om de afbraak van de ozonlaag door CFK's te verminderen is in 1987 door 25 landen besloten de productie van CFK's sterk te verminderen in het Montreal Protocol. Deze afspraken zijn later aangescherpt in de Londen- en Kopenhagen amendementen (1990 en 1992). Het vinden van milieuvriendelijke alternatieven lukt echter maar gedeeltelijk.

Gezien de grote belangen die er spelen bij industrieën, de kosten die alternatieven met zich meebrengen, de wereldvoedselvoorziening en risico's voor de volksgezondheid is het belang-

rijk dat er onderzoek gedaan wordt naar alle factoren die te maken hebben met de ozonlaag en UV-straling.

Een belangrijk deel van het onderzoek naar de ozonlaag en de relatie met UV-straling, bestaat uit het meten van ozonkolommen, ozonprofielen en UV-spectra.

### 1.4.1 Ozonmetingen

Er bestaat al enige tientallen jaren een wereldwijd netwerk van grondstations waar zowel de dikte van de ozonlaag als het ozonprofiel gemeten wordt. De methoden die hiervoor gebruikt worden, worden nu besproken.

#### Metingen van de ozonkolom

Ozonkolommen kun je zowel vanaf de grond als vanuit de ruimte meten. Metingen vanaf de grond hebben een grote nauwkeurigheid (ongeveer 1%). De ozonkolom kan dan echter alleen lokaal bepaald worden. Metingen vanuit de ruimte kunnen in korte tijd de ozonkolom over de hele aardbol bepalen. De nauwkeurigheid is wat minder groot.

#### Ozonkolommetingen vanaf de grond

De metingen vanaf de grond worden uitgevoerd met spectrofotometers. Deze meetinstrumenten meten de UV-straling afkomstig uit de richting van de zon. Het absorptiespectrum van ozon is goed bekend (zie figuur 1.3). Er zijn nog andere stoffen die in de atmosfeer effect hebben op de UV-irradiantie. Door naar de verhoudingen van de gemeten irradiaties te kijken worden effecten van andere stoffen geëlimineerd en blijft de ozonkolom over. De met deze methode gemeten ozonkolom heeft een nauwkeurigheid van ongeveer 1%. De bekendste (en beste) instrumenten voor dit type meting zijn de Dobson spectrofotometer (in bedrijf sinds de jaren '30) en de modernere Brewer (begin jaren '80 in bedrijf). Voor het bepalen van de ozonkolom wordt van de volgende vergelijking gebruik gemaakt (wet van Lambert-Beer)

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) e^{-\beta_\lambda m_\beta - \delta_\lambda m_\delta - \alpha_\lambda O_3 \mu_{O_3} - \xi_\lambda SO_2 \mu_{SO_2}}$$

In deze vergelijking is  $I(\lambda)$  de irradiantie die gemeten wordt voor golflengte  $\lambda$ .  $I_0(\lambda)$  is de irradiantie aan de top van de atmosfeer. De extinctie van straling in de atmosfeer wordt beschreven door de e-macht. Hierin komen vier golflengteafhankelijke termen voor:  $\beta_\lambda$  (Rayleigh verstrooiingscoëfficiënt),  $\delta_\lambda$  (aërosol verstrooiingscoëfficiënt),  $\alpha_\lambda$  (ozon absorptiecoëfficiënt),  $\xi_\lambda$  (zwaveldioxyde absorptiecoëfficiënt) en vier golflengteonafhankelijke termen:  $m_\beta$  (airmass voor Rayleighverstrooiing),  $m_\delta$  (airmass voor aërosolverstrooiing),  $O_3 \mu_{O_3}$  (ozonkolom in de

richting van de zon),  $SO_2\mu_{SO_2}$  (zwaveldioxydekolom in de richting van de zon). De ratio's  $\mu_{O_3}$  en  $\mu_{SO_2}$  geven de verhouding aan tussen de kolommen in de richting van de zon ( $O_3\mu_{O_3}$ ,  $SO_2\mu_{SO_2}$ ) en de verticale kolommen ( $O_3$ ,  $SO_2$ ). De Brewer gebruikt vier golflengten voor de ozonmeting: 310.1 nm, 313.5 nm, 316.8 nm en 320.1 nm. De metingen worden op elkaar gedeeld en van deze ratio's wordt de logaritme genomen. Het verkregen stelsel vergelijkingen wordt gebruikt om de invloeden van Rayleighverstrooiing, aërosolverstrooiing en absorptie door zwaveldioxyde te elimineren.

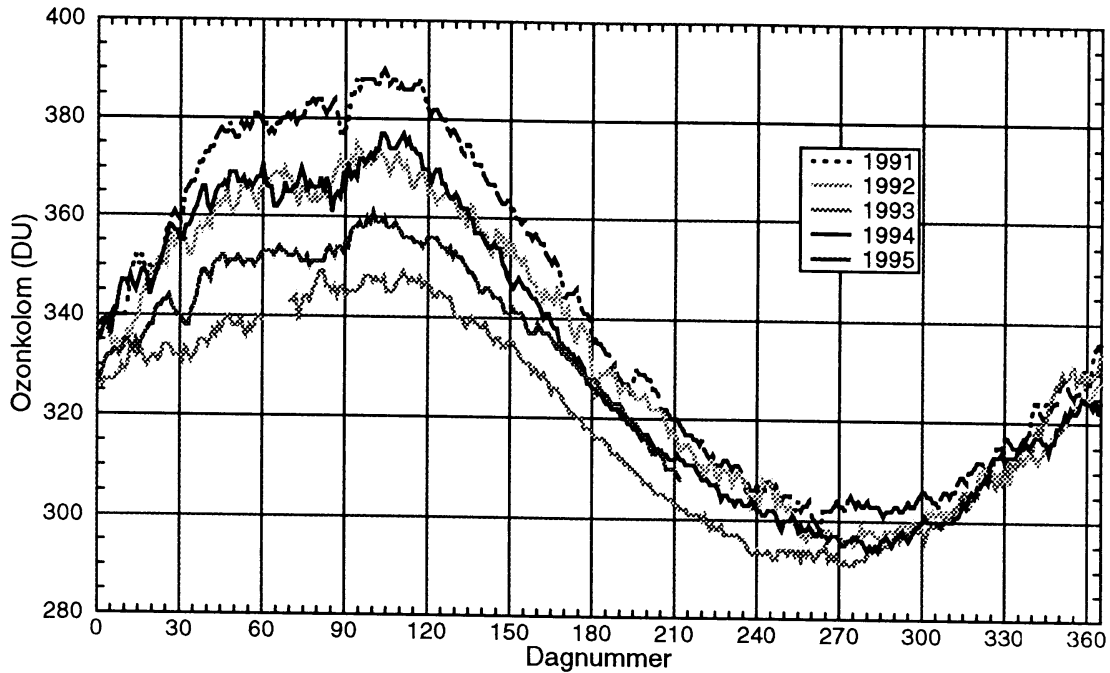
### **Ozonkolommeting vanuit de ruimte**

Metingen vanuit de ruimte maken gebruik van gereflecteerde zonnestraling en van geëmitteerde straling door de aarde. Er kan gebruik gemaakt worden van UV- en IR-straling (9.7 $\mu$ m), waar ozon ook absorbeert. UV-straling werd o.a. gemeten door het TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) instrument aan boord van de NASA satelliet Nimbus-7. Doordat dit instrument vrijwel een volledige ruimtelijke bedekking van de aarde geeft zijn deze metingen geschikt om globale trends in de ozonkolom te vinden.

IR-straling wordt gemeten door het TOVS (Tiros Operational Vertical Sounder) instrument. Het grote voordeel is dat hiermee ook de nachtzijde van de aarde bekeken kan worden en ook gedurende de poolwinters zijn metingen mogelijk.

In figuur 1.5 staan de resultaten van TOVS metingen voor het noordelijk halfrond boven de dertigste breedtegraad. Verticaal staat de zonaalgemiddelde ozonkolom in Dobson Units uit. Horizontaal staat het dagnummer, 1 januari is dagnummer 1, etc. Ten opzichte van 1991 werd de ozonkolom minder in 1992 en 1993. Dit wordt in verband gebracht met de uitbarsting van de vulkaan Pinatubo (Filippijnen) in juni 1991. Het zwavelhoudende vulkaanstof dat in de stratosfeer terecht kwam kon ozonafbrekende reacties stimuleren. Een resultaat hiervan was een verdunning van de ozonlaag op globale schaal. Doordat na twee jaar praktisch al het stof weer uit de atmosfeer verdwenen is, zou in 1994 de ozonkolom weer moeten toenemen. Voor 1994 is dit ook gebeurd maar het herstel zette in 1995 niet door. Op 1993 na is 1995 het jaar met de laagst gemeten waarden. Een sluitende verklaring hiervoor ontbreekt nog. Mogelijk hebben "Polar Stratospheric Clouds" (PSC) extra ozon afgebroken. PSC's zijn wolken in de stratosfeer die verschillende zwavel- en salpeterzuurverbindingen bevatten. Ze ontstaan alleen bij zeer lage temperaturen en hebben door chemische reacties met en op de wolkendeeltjes ozonafbraak tot gevolg. De benodigde lage temperaturen in de stratosfeer werden in het voorjaar van '95 vaak gemeten, zowel bij de Noordpool als op lagere breedtes.





**Figuur 1.5** Ozonkolommen gemiddeld over 30-90° N, gemeten door TOVS.

### Metingen van het ozonprofiel

De meest directe manier om een ozonprofiel te meten is door ozonconcentraties op verschillende hoogten ter plekke te meten. Dit wordt gedaan door aan een ballon een ozonsonde te hangen. Deze sonde maakt gebruik van een chemische reactie om de hoeveelheid ozon te bepalen. Tijdens de vlucht wordt ook de temperatuur en luchtvochtigheid gemeten.

Het ozonprofiel kan ook vanaf de grond met een LIDAR (Light Detection And Ranging) gemeten worden. Dit instrument zendt laserlicht verticaal omhoog de atmosfeer in. Er worden twee of meer verschillende golflengten gebruikt: één die sterk door ozon geabsorbeerd wordt en één die niet door ozon geabsorbeerd wordt. Op de grond wordt het gereflecteerde licht weer gedetecteerd. Uit de verhouding van de signalen bij deze twee golflengten kan weer de hoeveelheid ozon bepaald worden. De bijbehorende hoogte volgt uit het verschil in tijd tussen emissie en detectie van het licht.

### 1.4.2 UV-metingen

Er zijn twee typen UV-meetinstrumenten te onderscheiden: spectrale en bandmeetinstrumenten. Daarnaast zijn er drie typen UV-metingen gebruikelijk: globale, directe en diffuse metingen. Bij globale metingen wordt straling afkomstig van de halve hemelbol (inclusief de zonneschijf) boven de horizontaal geplaatste sensor gemeten. Deze metingen leveren de irra-

diantie. Bij directe metingen wordt de straling afkomstig uit de richting van de zon gemeten. Daarbij wordt meestal een openingshoek van  $5^\circ$  gebruikt. Dit soort metingen worden o.a. gebruikt om de ozonkolom te bepalen (zie 1.4.1). Diffuse metingen zijn identiek aan globale metingen, behalve dat de zonneshijf wordt afgeschermd (vaak een schijf die ook  $5^\circ$  van de hemel bedekt). Met deze metingen bepaal je de diffuse straling en kun je de directe en globale metingen controleren wegens de volgende relatie

$$G = \text{Dif} + \cos\theta_0 \text{Dir}$$

Hierin staan  $G$ ,  $\text{Dif}$ ,  $\text{Dir}$  voor respectievelijk globale, diffuse en directe straling ( $\text{Wm}^{-2}$ ) en  $\theta_0$  is de zenithhoek van de zon.

### **Spectrale metingen**

Bij spectrale metingen wordt bij een groot aantal golflengten de irradiantie gemeten. Meestal wordt er een scan gemaakt. Er wordt dan begonnen met de kleinste golflengte en geëindigd met de grootste golflengte. Zo'n scan neemt enkele minuten in beslag. Gedurende de scan kunnen de atmosferische omstandigheden veranderen, zodat de gevonden irradianties bij de verschillende golflengten niet goed gecorreleerd zijn.

Een spectrale meting kan ook zonder te scannen genomen worden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een diode array of een CCD dat een heel spectrum in één keer kan opnemen. Deze manier van meten wordt de laatste jaren steeds vaker gebruikt. Meetinstrumenten (zoals GOME en SCIAMACHY) aan boord van satellieten maken ook van deze methode gebruik.

Spectrale metingen zijn noodzakelijk omdat gemeten spectra met een willekeurig actiespectrum vermenigvuldigd kunnen worden. Voor verschillende effectstudies zijn dus spectrale UV-metingen nodig.

### **Bandmetingen**

Bij bandmetingen wordt gebruik gemaakt van een filter dat straling in een bepaald golflengtegebied doorlaat. Sommige filters hebben een karakteristiek die overeen komt met een actiespectrum (voor b.v. zonnebrand). Bij bandmetingen hoeft niet gescand te worden. Het voordeel hiervan is dat er snel achter elkaar gemeten kan worden zodat atmosferische veranderingen te volgen zijn. Deze methode geeft o.a. informatie over de invloed van variërende bewolking op UV-straling.

## **1.5 Concluderende opmerkingen**

Om de hoeveelheid UV-straling waaraan mens, dier en plant in Europa worden blootgesteld en de trend hierin te bepalen, is een UV-meetnetwerk nodig. Om de metingen over een lange periode en van verschillende lokaties met elkaar te kunnen vergelijken is het van groot belang te weten hoe de meetinstrumenten t.o.v. elkaar presteren. Om hier achter te komen worden regelmatig internationale UV-meetcampagnes gehouden. Tijdens de meetcampagnes worden de meetinstrumenten op één lokatie bijeengebracht en worden synchroon UV-spectra opgenomen.

De Europese meetcampagnes vanaf 1991 hebben grote verbeteringen opgeleverd voor veel van de instrumenten. Op dit moment variëren de metingen niet meer dan enkele procenten van elkaar, terwijl dit in de begin jaren wel tot 30% was.

Voor de ozonmetingen geldt eveneens dat de kwaliteit ervan gedurende jaren gegarandeerd moet zijn. Immers, trends liggen voor onze regio in de orde van 0.6% ozonafname per jaar en om dit vast te kunnen stellen moet de meetnauwkeurigheid minstens zo goed zijn. Daarbij bedenkend dat 'trendmetingen' vaak looptijden hebben van 20, 30 jaar of langer, worden er hoge eisen gesteld aan de instrumenten en hun ijking. Ozonmetingen worden echter al tientallen jaren gedaan en er is op dit gebied veel meer ervaring dan met de UV-metingen.

## 2 De Optical Multichannel Analyzer (OMA)

Bij het KNMI is begin jaren '90 een Optical Multichannel Analyzer, ook wel OMA genoemd, aangeschaft om UV-metingen te doen. Dit is een instrument dat spectrale UV-metingen uitvoert zonder een scannend mechanisme te hebben. Bij het testen van het instrument bleken een aantal problemen op te treden.

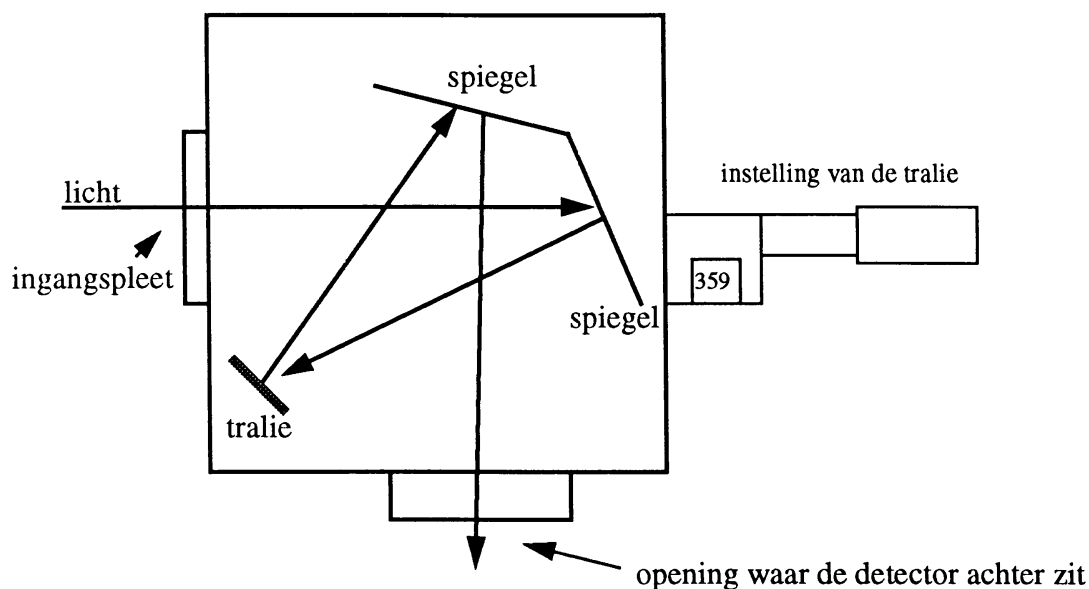
In de eerste plaats bleek er een grote temperatuurgevoeligheid te zijn. Daarnaast was het instrument niet volledig lichtdicht en tot slot bleek strooilicht een grote foutenbron te zijn.

Er bestaat geen absolute referentie om UV-metingen te controleren. Daarom is het een goede check om UV-meetinstrumenten onderling te vergelijken. De verschillen tussen de metingen wil men daarbij zo klein mogelijk hebben, en ook wil men kunnen verklaren wat de oorzaak van de verschillen is. Voor verschillende spectrale meetinstrumenten is het goed als de meetwaarden 5% of minder van elkaar verschillen. De OMA voldeed niet aan dit criterium door de hierboven genoemde problemen.

Tijdens mijn stage heb ik de OMA verbeterd. In de paragrafen 2.1 en 2.2 zullen de opbouw en werking van de OMA behandeld worden. In paragraaf 2.3 worden de instrumentkarakteristieken besproken.

## 2.1 Opbouw van de OMA

De OMA bestaat uit een monochromator en een detector. De monochromator is een Jarrell Ash MonoSpec 18, gebaseerd op de “crossed Czerny-Turner” spectrometer. Een schematisch weergave hiervan is te zien in figuur 2.1.



**Figuur 2.1** De monochromator van de OMA.

De monochromator heeft een ingangsspleet (25  $\mu\text{m}$  bij 2 cm) en een uitgangsoopening waar de detector aan bevestigd is. Voor de ingangsspleet zit een diffuser bestaande uit een dun teflon plaatje. In de monochromator bevinden zich twee spiegels en een (draaibare) tralie. De tralie is verwisselbaar en degene die gebruikt wordt heeft 1200 lijnen per mm.

De detector is een Reticon diode array (EG&G type M1453A) met 1024 dioden. De array is 25 mm breed en 2.5 mm hoog zodat één diode ongeveer 25  $\mu\text{m}$  breed is. De temperatuur wordt constant op 5  $^{\circ}\text{C}$  gehouden door een Peltierelement. Condensvorming op de dioden wordt voorkomen door continu een beetje stikstofgas tussen de dioden en het kwartsvenster voor de dioden te laten stromen.

## 2.2 Theorie van de OMA

Licht dat op de diffuser valt wordt gedepolariseerd en gedeeltelijk naar de ingangsspleet verstrooid. Licht dat door deze spleet de monochromator binnentreedt, wordt daar door een spiegel gereflecteerd naar de tralie. De tralie splitst het licht op in de verschillende golflengten. De tralie is draaibaar en is zo in te stellen dat licht uit een gekozen golflengtebereik met het eerste maximum op de tweede spiegel valt. Deze spiegel reflecteert het licht op de diode

array. Met de optische configuratie van de OMA levert dit op de diode array een golflengtebereik van ongeveer 130 nm. Eén diode representeert dus ongeveer een gebied van 0.13 nm.

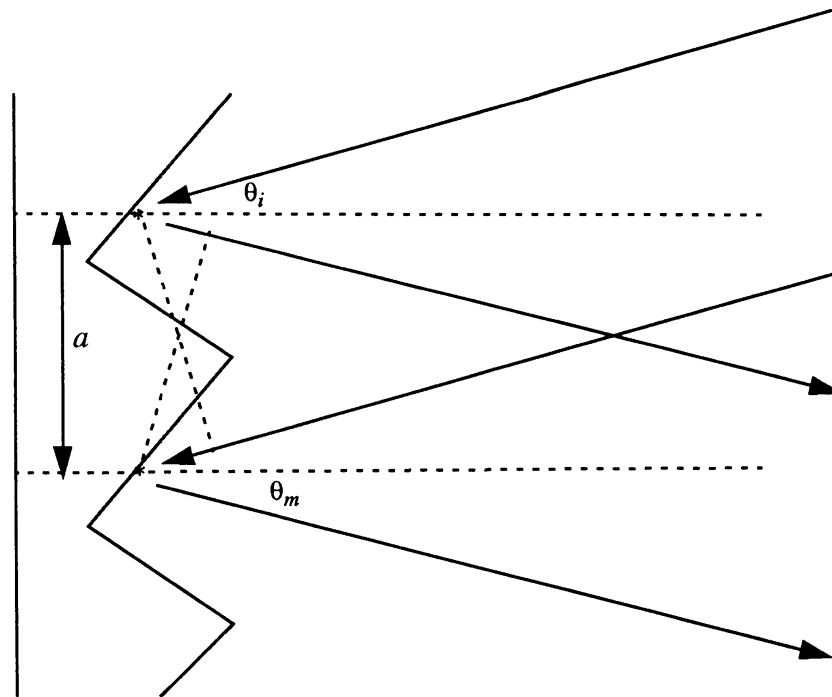
Op de werking van de tralie zal hier wat dieper ingegaan worden. Voor de theorie is gebruik gemaakt van het boek *Introduction to Optics* (Pedrotti en Pedrotti 1993). Voor de duidelijkheid zullen veel begrippen in de Engelstalige vorm gebruikt worden i.p.v. deze te vertalen naar het Nederlands.

### **De “grating equation”**

Er bestaan verschillende type tralies. In de OMA zit een reflecterende tralie. Het oppervlak van een reflecterende tralie bestaat uit een zaagtandprofiel met veel evenwijdige en op gelijke afstand aangebrachte “tanden” of lijnen. Licht van gelijke golflengte ( $\lambda$ ) zal door de periodiciteit van de reflecties een interferentiepatroon vormen. Maxima treden op als het weglengteverschil van lichtgolven een veelvoud ( $m$ ) van de golflengte is. In figuur 2.2 is schematisch een stukje van een reflecterende tralie te zien met de symbolen die de werking van de tralie beschrijven. De afstand tussen de “tanden” of lijnen is de tralieconstante en wordt aangegeven met de letter  $a$ . De hoek waaronder het licht invalt t.o.v. de normaal op het tralieoppervlak wordt aangegeven met  $\theta_i$  en de hoek van reflectie met  $\theta_m$ . In figuur 2.2 is te zien dat het weglengteverschil gelijk is aan  $a \sin \theta_i - a \sin \theta_m$ . De hoek  $\theta_m$  heeft een negatief teken als hij aan de andere kant van de normaal op de tralie ligt dan  $\theta_i$ . Hieruit volgt de vergelijking die bekend staat als de “grating equation”

$$a(\sin \theta_i + \sin \theta_m) = m\lambda$$

Deze vergelijking beschrijft de positie van de golflengtemaxima voor de verschillende opties bij bepaalde golflengtes (eerste ordemaxima voor  $m=1$ , etc.).



**Figuur 2.2** Detail van de reflecterende tralie.  $\theta_i$  en  $\theta_m$  zijn de hoek van inval en reflectie,  $a$  is de tralieconstante.

### Oplossend vermogen (“dispersion”)

De “dispersion” geeft aan hoe ver golflengten uit elkaar getrokken worden. Hoe goed twee nabij gelegen golflengten nog van elkaar te onderscheiden zijn wordt bepaald door de resolutie van de tralie. Dit is aan te geven met het oplossend vermogen. De algemene uitdrukking hiervoor is.

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

$R$  is het oplossend vermogen (resolving power) en  $\Delta\lambda$  is het kleinst te onderscheiden golflengteverschil bij golflengte  $\lambda$  volgens het Rayleigh criterium. Volgens dit criterium zijn twee naburige pieken van een diffractiepatroon nog te onderscheiden indien het minimum van de ene piek samenvalt met het maximum van de andere piek. Een minimum treed op als het weglengteverschil  $(m+1/N)\lambda$  is met  $N$  het aantal “tanden” of lijnen op de tralie. Bij golflengte  $(\lambda+\Delta\lambda)$  een maximum en een minimum bij  $\lambda$  vinden we

$$R = mN$$

Het oplossend vermogen neemt dus toe met de orde  $m$  en met het aantal lijnen op de tralie.

### “Free spectral range”

Golflengtes uit verschillende orde maxima overlappen elkaar zoals in de “grating equation” te zien is. Immers  $m\lambda$  levert voor veel combinaties van  $m$  en  $\lambda$  dezelfde waarde. Stel  $\lambda_1$  is de kleinste golflengte die nog te detecteren is voor een bepaalde orde  $m$ . Dan is er een grotere golflengte  $\lambda_2$  in dezelfde orde  $m$  die samenvalt met golflengte  $\lambda_1$  van orde  $m+1$ . Voor de orde  $m$  wordt  $\lambda_2 - \lambda_1$  de “free spectral range” genoemd. De “free spectral range” hangt van de orde af, er geldt

$$F = \frac{\lambda_1}{m}$$

$F$  neemt af bij toename van orde  $m$ , wat wil zeggen dat hogere orde spectra sneller overlappen. Spectrale UV-metingen kunnen alleen binnen de “free spectral range” gebeuren, waar opéénvolgende ordes elkaar niet overlappen.

### “Blaze angle”

Daar waar de hoek van inval gelijk is aan de hoek van reflectie wordt het nulde orde maximum gevonden. De tralie gedraagt zich dan als een spiegel. Het is mogelijk de lijnen van de tralie een zodanige vorm te geven dat niet het nulde orde maximum het intenst is maar een hogere orde maximum. Het spiegelvlak is bij zo’n tralie gekanteld. De hoek t.o.v. de normaal waaronder dit is gebeurt heet de “blaze angle”. Een tralie is ook vaak “geblazed” voor een bepaalde golflengte of golflengtegebied. Dit houdt in dat het gereflecteerde signaal maximaal is voor die golflengte(s).

## 2.3 Instrumentkarakteristieken

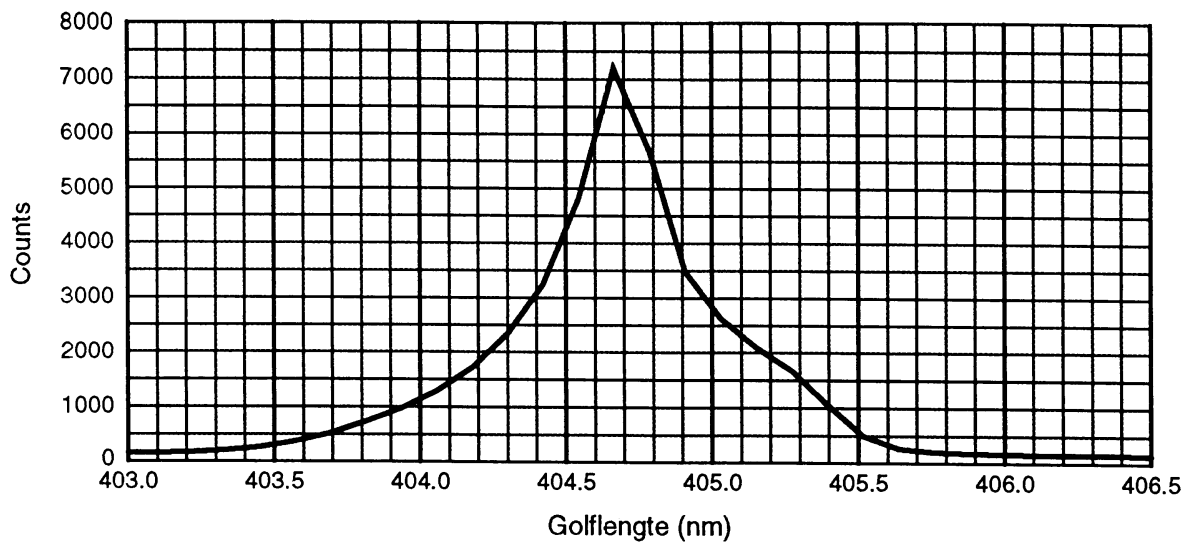
### Slitfunctie

Wanneer een spectraal meetinstrument een scan uitvoert, zou bij meting van de irradiantie bij een bepaalde golflengte alleen licht met die golflengte gemeten moeten worden. In werkelijkheid meet het instrument echter een klein golflengtebandje. Dit bandje heeft een voor dat instrument karakteristieke vorm. Deze staat bekend als de slitfunctie en is experimenteel te bepalen.

Wil men verschillende UV-meetinstrumenten vergelijken, dan moeten effecten tengevolge van verschillen in de slitfuncties gecorrigeerd worden. Het is daarom belangrijk de slitfunctie goed te bepalen.



Bij experimentele bepaling van de slitfunctie wordt een lijnenspectrum b.v. van een kwiklamp of een laser, gemeten. Het instrument maakt een scan over de lijn en het gemeten signaal rondom de centrale golflengte beschrijft de slitfunctie.



**Figuur 2.3** Meting van een kwiklijn (404.66 nm).

In figuur 2.3 is een meting met de OMA aan de kwiklijn van 404.66 nm te zien. De slitfunctie wordt verkregen door de centrale golflengte (404.66 nm) van de golflengtes af te trekken.

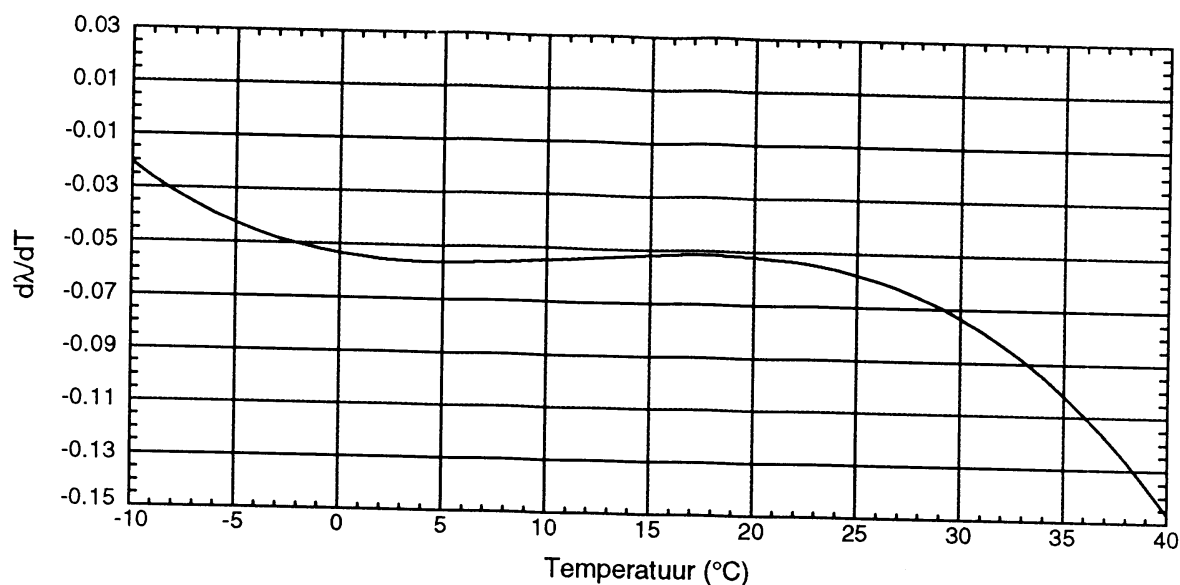
### **Cosinus response**

Wanneer een parallelle bundel licht op de diffuser valt, hoort alleen de verticale component gemeten te worden. Stel dat een bundel loodrecht op het oppervlak valt dan is het gemeten signaal  $I_0$ . Als de bundel onder een hoek  $\theta$  invalt t.o.v. het normaal op het diffuseroppervlak dan hoort het gemeten signaal  $I_0 \cos\theta$  te zijn. Dit is met een stabiele ijk lamp te controleren. Wanneer de gemeten cosinus response erg afwijkt van de ideale moet er op de metingen een correctie uitgevoerd worden. De cosinus response van de OMA in de vernieuwde uitvoering is nog niet bepaald. Hiervoor moet eerst een constructie gemaakt worden waarbij de OMA in een vaste positie blijft staan en een stabiele lamp bewogen kan worden.

### **Temperatuurgevoeligheid**

Een meetinstrument bestaat uit een aantal optische componenten die in meer of mindere mate vervormen bij een temperatuurverandering. De tralie en de spiegels in de OMA zullen b.v. uitzetten wanneer de temperatuur verhoogd wordt. Indien er metingen gedaan worden bij een andere temperatuur dan waarbij de golflengteijking van het instrument plaats vond, zal dit voor een bepaalde fout zorgen. De OMA blijkt erg temperatuurgevoelig te zijn wat zich duidelijk uit in een golflengteverschuiving (F. Helderma 1995). In figuur 2.4 is voor temperaturen

, van -10 tot 40 °C de golflengteverschuiving als gevolg van een temperatuurverandering weergegeven.



**Figuur 2.4** Golflengteverschuiving als functie van de temperatuur.

## 2.4 Opbouw, ijkingen en metingen

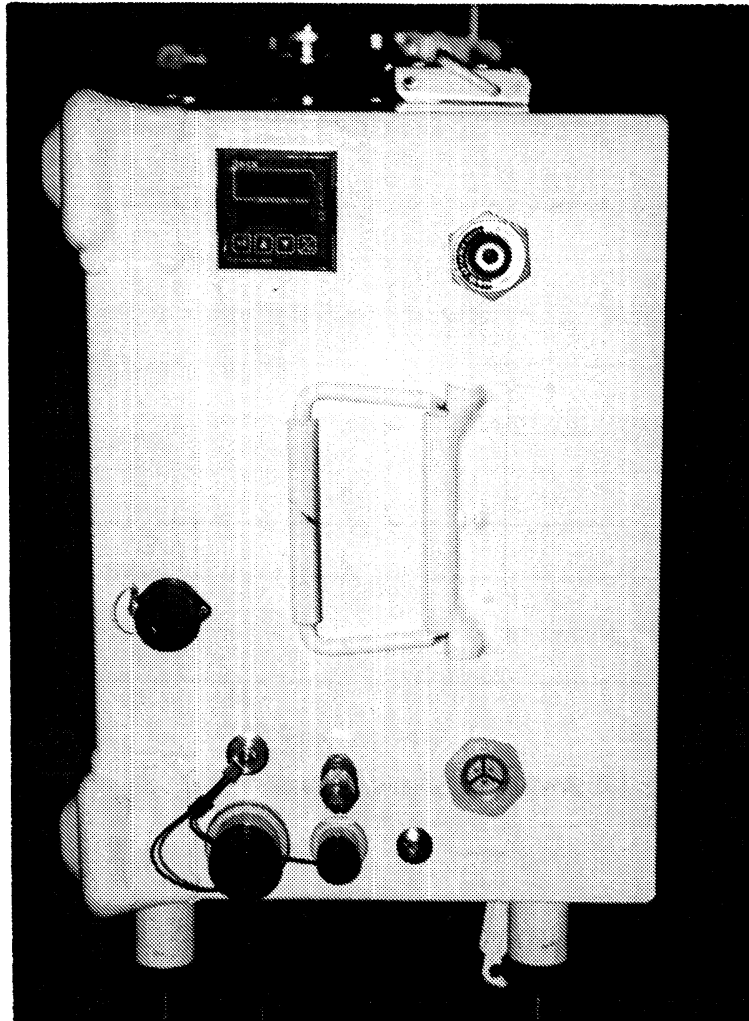
Er zijn een aantal punten aan de OMA die verbeterd moeten worden omdat de verschillen tussen metingen van de OMA en andere spectrale UV-meetinstrumenten meer dan 5% bedraagt. In de eerste plaats is het instrument erg temperatuurgevoelig. Daarnaast veroorzaakt strooi-licht een ongewenste component in de meting. Tot slot heeft de OMA last van lichtlekage. De praktische uitvoering van deze verbeteringen wordt hieronder beschreven. Het resultaat is feitelijk een nieuw meetinstrument, met de oorspronkelijke OMA als belangrijkste onderdeel.

## 2.5 De OMA inbouwen in een kist

Uit verschillende oplossingen om de golflengteijkingen stabiel te krijgen, is gekozen om de OMA in een licht en luchtdichte kist in te bouwen, tezamen met een koel/verwarmingselement.

De temperatuurstabilisatie wordt gerealiseerd met een koel/verwarmings element (Teca AHP-1201 FFHC). Deze wordt aangestuurd door een controle-eenheid (Teca serie 965). De luchtdichte kist is zo groot gekozen dat deze apparatuur er in past tezamen met een elektronische filterwisselaar.

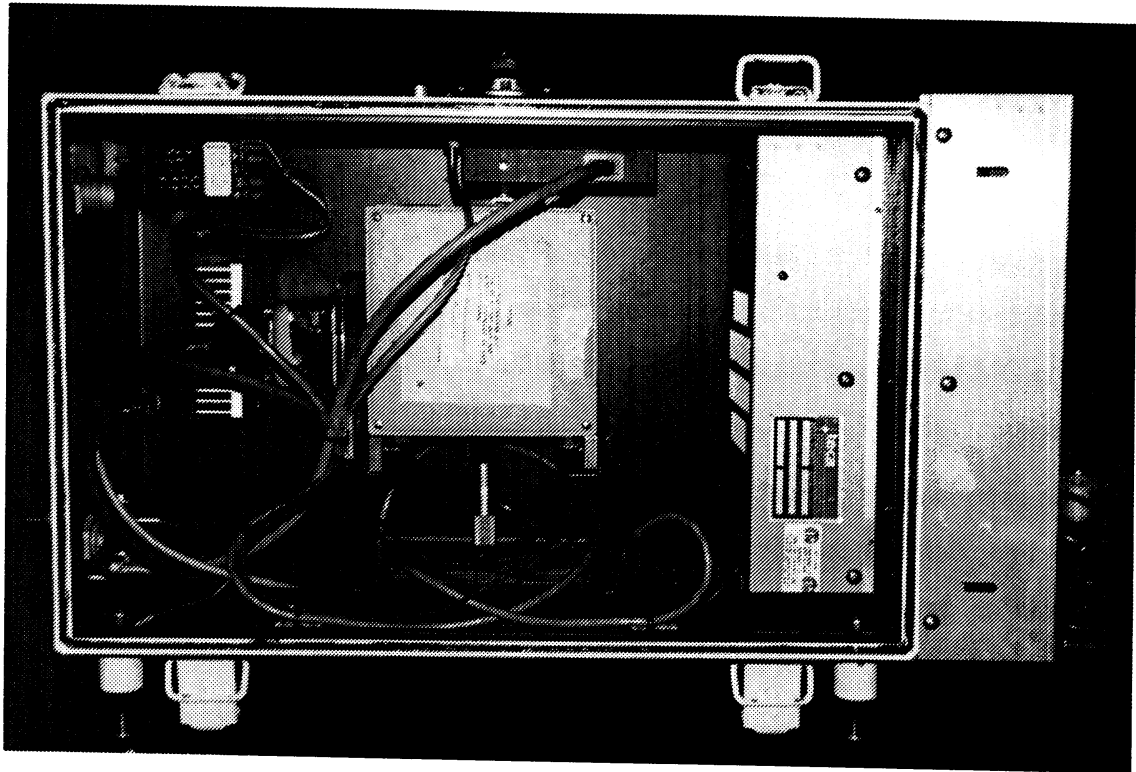
Er zijn een aantal kisten met standaard formaat bekeken. Hierbij was de indeling van de onderdelen mede bepalend voor de keuze van de kist. De kist mocht niet te groot zijn opdat



**Figuur 2.5a** De kant van het instrument waar de aansluitingen zitten. Bovenaan is de display van de controle-eenheid te zien.

het geheel makkelijk vervoerbaar moest blijven. Daarnaast is de inhoud van de kist is makkelijker op een bepaalde temperatuur te stabiliseren als deze niet te hoog is. Uiteindelijk is gekozen voor een waterdampdichte kist met binnenafmetingen van 56×36×26 cm. Vervolgens is bepaald waar aansluitingen voor verschillende kabels moeten komen, hoe het koel/verwarmings element, controle-eenheid en de OMA erin geplaatst moesten worden. Bovenop de kist is een kwartskoepel aangebracht, waaronder de diffuser zich bevindt. In de werkplaats van het KNMI is de kist met apparatuur volgens dit ontwerp opgebouwd. In de figuren 2.5a t/m 2.5c is de indeling van het nieuwe meetinstrument te zien.

Indien er op de detector van een meetinstrument geen licht valt wordt er toch een signaal gemeten dat donkerstroom genoemd wordt. De donkerstroom is te beperken door de diode array te koelen. Bij de OMA wordt deze gekoeld tot 5 °C. Voor de donkerstroom moet gecor-



**Figuur 2.5b** Indeling van het meetinstrument. Linksboven de controle-eenheid voor het koel / verwarmings element (geheel rechts). In het midden de oorspronkelijke OMA. Tussen de OMA en de kwartskoepel (boven) zit de filterwisselaar.



**Figuur 2.5c** Zijaanzicht van het instrument

rigeerd worden. Hiertoe wordt het signaal dat de donkerstroom veroorzaakt van de metingen afgetrokken.

Doordat de OMA nu op constante temperatuur gehouden wordt is het probleem van de temperatuurgevoeligheid verholpen. Ook is de donkerstroom veel stabielier zodat er beter voor gecorrigeerd kan worden. Er is gekozen is voor een stabilisatietemperatuur van 40 °C. Wanneer de OMA in de zon staat kan de temperatuur namelijk tot deze hoge temperatuur stijgen en dan is het makkelijk om de stabilisatietemperatuur te bereiken.

Er zijn twee nadelen van stabilisatie op hoge temperatuur. Ten eerste is het temperatuurverschil met de Peltier-gekoelde detector (5 °C) vrij groot. Ten tweede is de temperatuurgevoeligheid van de golflengteijking bij hogere temperaturen groter. Als de temperatuur in de kist verandert, is de golflengteverschuiving groter dan bij een lagere temperatuur.

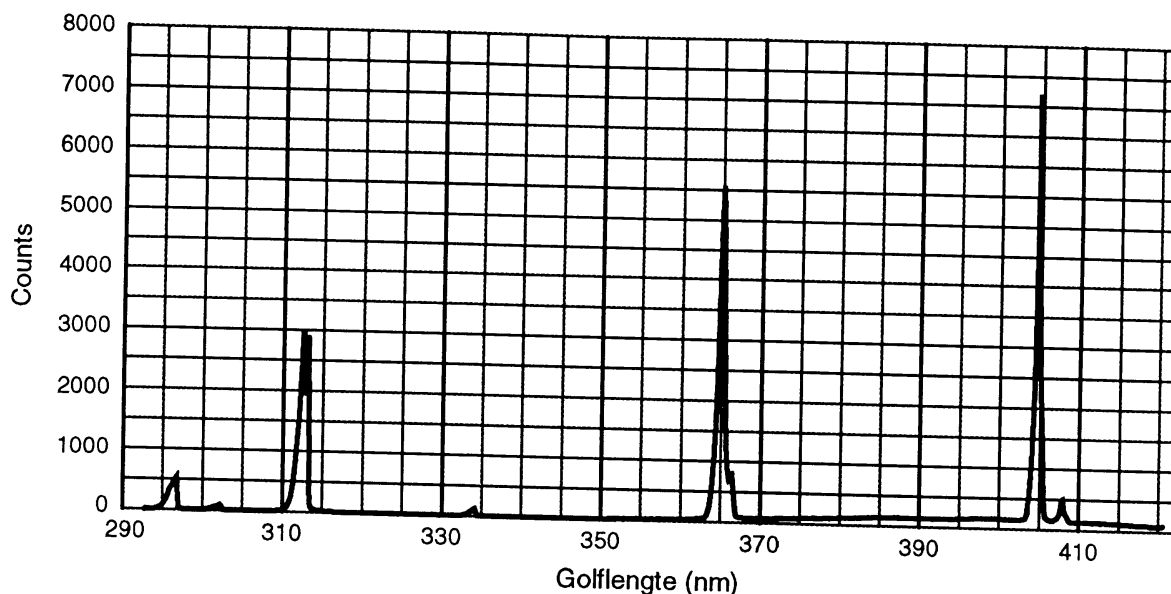
Doordat de OMA in een lichtdichte kist zit is het probleem van lichtlekage verholpen.

## **2.6 Golflengteijking**

Bij spectrale meetinstrumenten is het nodig een goede golflengteijking uit te voeren. Bij een golflengteijking bepaal je waar (plaats op diode array of instelling van een tralie) het meetinstrument licht met een bepaalde golflengte meet.

Bij de golflengteijking van het meetinstrument wordt vlak boven het kwartskoepeltje een kwiklamp gehangen. Dit is een lamp die kwikdamp bij lage druk bevat en licht bij een aantal specifieke golflengten uitzendt (lijnspectrum). Door aan deze lamp een meting te doen zal bij een aantal dioden een scherpe piek verschijnen. Het nemen van de spectra gebeurt in een volledig donkere kamer. De kwiklijnen zijn goed herkenbaar en hiermee is voor een aantal dioden de golflengte bekend. Een programma maakt een interpolatie, zodanig dat de golfleng-

ten van de kwiklijnen bij dezelfde dioden vastgehouden wordt en de golflengteintervallen tussen de dioden zonder sprongen verloopt.



**Figuur 2.6** Kwikspectrum: de kwiklijnen bij 296.73 nm, 302.15 nm, 312.57 nm, 334.15 nm, 365.02 nm en 404.66 nm worden gebruikt voor de ijking van de OMA

Figuur 2.6 laat een meting aan een kwiklamp zien nadat de OMA geijkt is.

## 2.7 Irradiantieijking

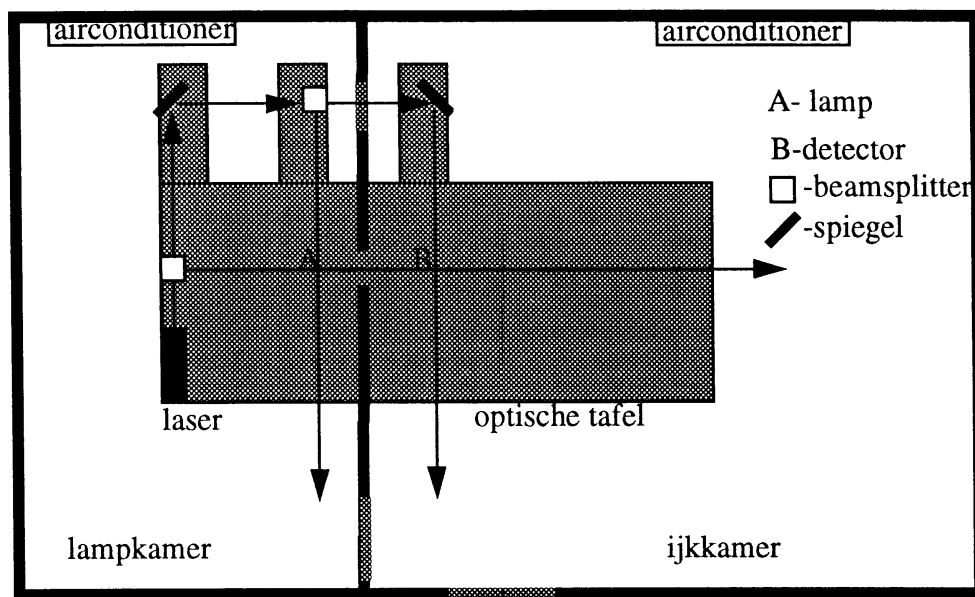
Om de irradiantie bij de verschillende golflengten te weten, moet er een irradiantieijking uitgevoerd worden. Hiervoor is een ijklamp nodig waarvan spectraal de irradiantie bekend is op een bepaalde afstand. Door op die bepaalde afstand een meting aan de ijklamp te doen is de relatie tussen gemeten signaal en bijbehorende irradiantie gelegd.

Het uitvoeren van een goede irradiantieijking voor een spectraal meetinstrument in het UV-gebied is een lastige opgave. De ijklampen en ook de zon zenden veel meer licht uit in het zichtbare en het infrarode deel van het spectrum dan in het UV-gebied. Het meetinstrument, gebaseerd op een enkele monochromator, moet een goede strooilichtcorrectie hebben. Daarnaast zijn de vorm van het spectrum en ook de irradianties van de ijklamp anders dan die van de zon. De ijklamp moet stabiel zijn en de ijkingen moeten reproduceerbaar zijn binnen 1 à 2%. Een goede uitlijning van de ijkopstelling en constante omstandigheden zijn daarbij een vereiste.

Op het KNMI is een voor Nederland uniek UV-calibratie laboratorium gebouwd. Een schematisch plaatje van dit laboratorium staat in figuur 2.7. Het laboratorium wordt door een tussenwand in tweeën gedeeld. In de lampruimte bevindt zich de ijklamp, in de ijkkamer het te ijken

meetinstrument. Deze configuratie met slechts twee gaten van 10 cm Ø in de tussenwand beperkt de hoeveelheid strooilicht. Eén gat in deze wand zorgt ervoor dat het meetinstrument het licht van de lamp opvangt. In elk van de twee gedeelten bevindt zich een airconditioner. Verder zijn de wanden, vloeren, plafond en meubilair zwart.

Boven de lamp hangt een afzuiginstallatie. Deze zorgt ervoor dat de lucht rondom de lamp een constante temperatuur behoudt en ozon, dat o.i.v. het UV van de ijk lamp geproduceerd wordt verwijderd wordt.



**Figuur2.7** Schematisch overzicht van het UV-calibratie laboratorium.

Deze ijkoopstelling is bedoeld voor UV-meetinstrumenten die “op hun kant” geijkt kunnen worden aan een horizontale bundel. Met de OMA is dit echter niet mogelijk: deze moet in de normale meetstand geijkt worden aan een verticale lampbundel. Hier worden speciaal horizontaal geijkte lampen voor gebruikt. De ijk lamp wordt daarbij verticaal boven de diffuser geplaatst. De afstand van het centrum van de lamp tot de diffuser moet 50 cm zijn.

## Uitlijning opstelling

De lamphouder wordt op een verticale optische rail, die bovenop de optische tafel staat, bevestigd. Het meetinstrument staat naast de optische tafel onder de lamphouder op een kleinere tafel. De afstand van de diffuser tot het midden van de lamphouder wordt op 50 cm afgeregeld. Na de uitlijning wordt de ijkclamp in de houder geplaatst.

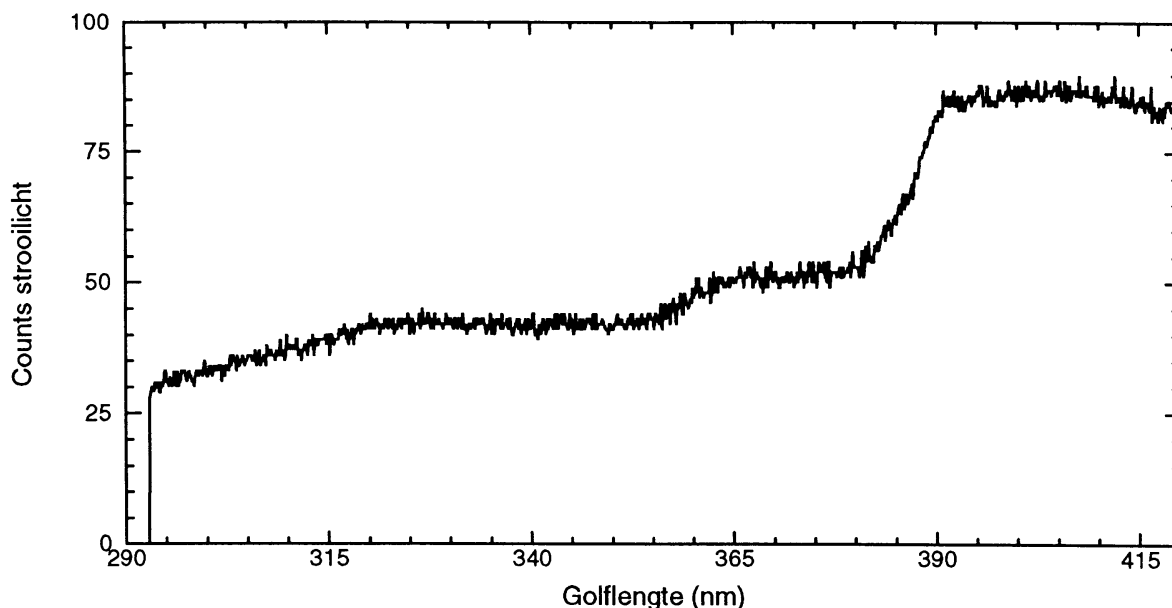
De ijkclamp is een 1000 W kwarts tungsten halogeenlamp (DXW) die voor verticale calibraties gebruikt wordt. Van deze lamp is de spectrale irradiantie bekend op 50 cm afstand. Door de lamp gaat een stroom van  $8.000 \pm 0.0005$  A en er staat ongeveer 116 V DC op. De lamp moet 20 minuten branden voor dat de spanning voldoende stabiel is en er metingen gedaan kunnen worden. Het ijkcertificaat van zo'n lamp is 50 branduren of één jaar geldig. Na een jaar kan hij nog wel gebruikt worden om de cosinus response of andere relatieve metingen te doen, of hij kan opnieuw geijkt worden.

Wanneer de lamp stabiel is, kan de ijking verricht worden. De metingen aan de lamp worden precies zo uitgevoerd zoals buitenmetingen ook gebeuren. Tijdens een meting telt het meetinstrument een aantal counts per tijdseenheid bij elke diode. Door de golflengteijking is bekend welke golflengten bij de dioden horen. De irradianties van de lamp (van het ijkcertificaat) bij de verschillende golflengten worden gedeeld door het aantal gemeten counts per seconde.

Dit levert voor iedere diode de ijkfactor, die de gemeten counts per seconde converteert naar  $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$ . De buitenmetingen worden vermenigvuldigd met de verkregen ijkfactoren zodat irradianties verkregen worden in  $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$ .



## 2.8 Strooilichtcorrectie



**Figuur 2.8** Strooilichtspectrum van de OMA bij een meting aan zonlicht.

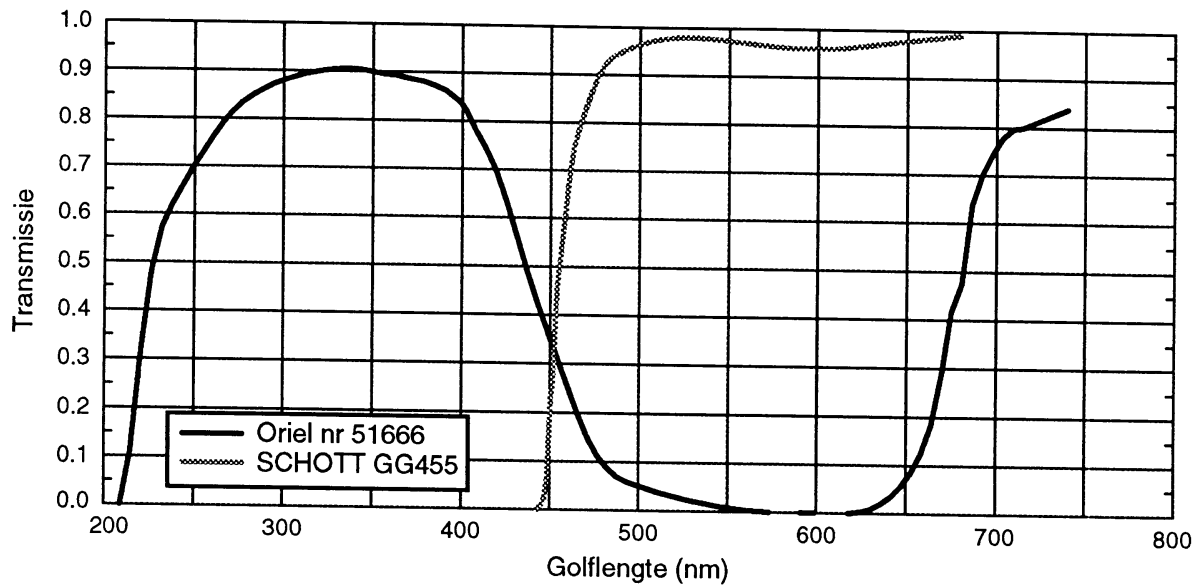
Doordat de OMA een enkele monochromator bevat, is strooilicht een groot probleem bij metingen in het UV-gebied. Dit probleem kan gedeeltelijk met filters verholpen worden. Er zijn twee methoden om m.b.v. filters te corrigeren voor strooilicht.

Bij de eerste methode wordt gebruik gemaakt van een filter dat het te detecteren golflengtegebied doorlaat en andere golflengten blokt. Bij een perfect filter is al het strooilicht van buiten het te meten golflengtegebied dan weg. In de filterwisselaar is een filter (Oriol nr 51666) geplaatst dat UV-straling doorlaat van ongeveer 227 tot 443 nm. Dit filter laat bij 700 nm wel weer straling door (zie figuur 2.9) en de detector is gevoeliger voor licht van 700 nm dan in het UV-gebied.

Dit filter is getest, maar op basis van betere resultaten verkregen met de hieronder beschreven methode, is dit filter niet gebruikt.

Bij de tweede methode wordt het strooilicht (zie figuur 2.8) apart gemeten en van het gemeten UV-spectrum afgetrokken. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een filter dat het te detecteren golflengtegebied blokt en andere golflengten ongehinderd doorlaat. Er worden twee metingen verricht, één zonder filter en één met filter. De meting met filter (alleen strooilicht) wordt daarna van de andere meting afgetrokken. Hierbij mag geen groot tijdverschil tussen de metingen zitten. In de filterwisselaar is een SCHOTT GG 455 filter geplaatst die een soortgelijk

gedrag vertoont (zie figuur 2.9). Het filter blokt korte UV-golflengten en heeft 50% transmissie bij 455 nm. Het gemeten strooilicht zal alleen afkomstig zijn van golflengten langer dan die in het UV-gebied. In de filterwisselaar is één plek open gehouden om metingen zonder filter te kunnen doen.

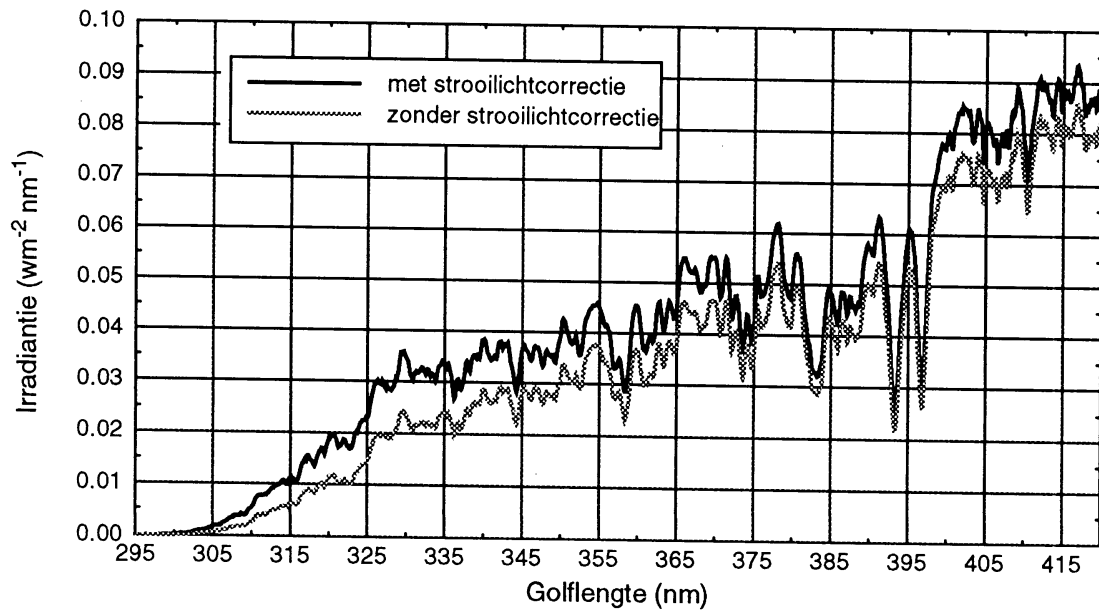


**Figuur 2.9** Filterkarakteristieken van de SCHOTT GG 455 en Oriel nr 51666.

Verticaal staat de fractie van het opvallende licht dat het filter door komt.

De strooilichtcorrectie wordt toegepast bij de irradiantie-ijking en bij metingen van zonlicht.

In figuur 2.10 is het verschil te zien van dezelfde metingen met en zonder strooilichtcorrectie.



**Figuur 2.10** Twee UV-spectra verkregen met de OMA. Eén spectrum is verkregen zonder een filter te gebruiken, de ander toont het resultaat met strooilichtcorrectie van meting en ijking.

De buitenmetingen kunnen nog extra voor strooilicht gecorrigeerd worden. Doordat op grondniveau geen straling onder de 290 nm terecht komt, wordt het signaal dat bij die korte golflengten gemeten wordt als strooilicht beschouwd. Het gemiddelde signaal van de eerste 20 dioden ( $\lambda < 295.3$  nm) wordt van het gehele spectrum afgetrokken worden als zijnde strooilicht.

Op het dak van het KNMI zijn met de OMA gelijktijdig metingen uitgevoerd met een ander UV-meetinstrument, de Brewer (spectrofotometer). Beide strooilichtcorrectiemethodes zijn hierbij getest.

Op basis van de betere overeenkomst met de Brewer bij de kortste golflengten (rond de 300 nm) is besloten om voorlopig de metingen volgens de tweede methode (strooilicht meten en aftrekken) te doen. Het nadeel is dat bij de tweede methode steeds twee metingen verricht moeten worden en dus meer tijd vergen en data opleveren.

## 3 EU meetcampagne Ispra

### 3.1 Inleiding

Om de metingen door verschillende instrumenten over een lange periode en van verschillende lokaties met elkaar te kunnen vergelijken is het nodig om te weten hoe de meetinstrumenten onderling vergelijkbaar zijn. Er is enige jaren geleden een EU project opgezet met de naam *Determination of standards of a UV-B monitoring network*. Het doel van dit project was om meettechnieken te verbeteren en evenzo de methoden en criteria betreffende het verkrijgen van betrouwbare absolute metingen van UV-zonnestraling. In verband met dit project zijn er al UV-meetcampagnes gehouden in Griekenland (Panorama 1991, 1992) en later in Duitsland (Garmisch-Partenkirchen 1993, EU-project CAMSSUM). Van 22 mei t/m 2 juni 1995 is een UV-meetcampagne gehouden in het "Joint Research Center" EURATOM bij het plaatsje Ispra (Italië, 45° 49' N, 8° 37' O), gelegen aan het Lago Maggiore.

De deelnemers aan de meetcampagne worden hieronder vermeld. Achter de namen is het instituut vermeld waarvan ze afkomstig zijn. Tussen haakjes staat de code voor het meegebrachte instrument.

Ann Webb	Universiteit van Reading, Groot Britanië (GB)
Didier Gillotay Willy DeCuyper David Bolsée	Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique, België (BE)
Alkiviadis Bais Charoula Meleti	Universiteit van Thessaloniki, Griekenland (GR)
Brian Gardiner Peter Kirsch	Britisch Antarctic Survey Cambridge, Groot Britanië
Trond Svenøe	Universiteit van Tromsø, Noorwegen (NO)
Mario Blumthaler	Universiteit van Innsbruck, Oostenrijk (ATI)
Foeke Kuik Casper Hofman Frank Helderma	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, Nederland (NLK) en (OMA)
Gunther Seckmeyer Robert Erb Germar Bernhard	Fraunhofer-Institut, Duitsland (DEG)
Henk Reinen Harry Slaper	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Nederland (NLD)

Tapani Koskela Fins Meteorologisch Instituut, Finland (FIN)

Francesco Cappellani Joint Research Center, Italië (IT)

Jacqueline Lenoble Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Frankrijk (FR)  
 Colette Brogniez  
 Jean Louis Bocquet

De technische informatie en verdere gegevens van de verschillende instrumenten zijn in het tabel hieronder te vinden. De instrumenten worden met hun code aangegeven.

	ATI	BE	DEG	FIN	FR	GB
Spectrometer	Bentham	JY	Bentham	Brewer	JY	Bentham
Type	DM150	DH10	DM300	MK3	DH10	DM300
Tralies	2	2	2	2	2	2
vlak/concaaf	vlak	concaaf	vlak	vlak	concaaf	concaaf
holografisch	ja	ja	ja	ja	ja	ja
lijnen/mm	2400	1200	2400	3600	1200	1200
Bandbreedte (nm)	0.9	0.5	1.0	0.6	1.2	1.6
Diffuser	teflon	teflon	kwarts	teflon	kwarts	teflon
Detector	PM	PM	PM	PM	PM	PM
type	EMI 9250Q	Haman R292	EMI 9250Q	EMI 9789QA	Haman 1P28	S-20
Weerbestendig	nee	ja	ja	ja	nee	nee
Automatisch	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Temp. stabilisatie	ja	nee	ja	nee	nee	ja
Donkerstroom corr.	ja	ja	ja	ja	nee	ja
Strooilicht corr.	nee	ja	nee	ja	nee	ja

	GR	IT	NLK	NLD	NO	OMA
Spectrometer	Brewer	Optronic	Brewer	Dilor	JY	EG&G
Type	MK3	753	MK3	XY	HR320	M1229
Tralies	2	2	2	2	1	1
vlak/concaaf	vlak	concaaf	vlak	vlak	vlak	vlak
holografisch	ja	ja	ja	ja	ja	ja
lijnen/mm	3600		3600	2400	1200	1200
Bandbreedte (nm)	0.6		0.6	0.35	0.35	0.43
Diffuser	teflon	integ.sf.	teflon	integ.sf.	teflon	teflon
Detector	PM		PM	PM	PM	diode
type	EMI 9789QA		EMI 9789QA	EMI 9883QB	Haman 1P28	array M1453A
Weerbestendig	ja	nee	ja	ja	ja	nee
Automatisch	ja		ja	ja	ja	nee
Temp. stabilisatie	nee	nee	nee	ja	nee	ja
Donkerstroom corr.	ja		ja	ja	nee	ja
Strooilicht corr.	ja		ja	nee	nee	ja

### 3.2 Meetprotocol

Om de spectrale metingen zo goed mogelijk met elkaar te kunnen vergelijken, is er een meet-schema gemaakt zodat alle instrumenten synchroon het UV-spectrum opnemen. Elk heel en half uur moest een scan gemaakt worden. De scan moest beginnen bij 290 nm en in stappen van 0.5 nm doorgaan tot 365 nm. De tijd tussen de stappen van 0.5 nm is 3 seconde. De resultaten van de metingen mogen de hele dag niet met andere deelnemers besproken worden. Dit wordt een “blind day” genoemd en deze regel wordt toegepast om er zeker van te zijn dat de deelnemers niet tussendoor de meetresultaten op elkaar afstemmen.

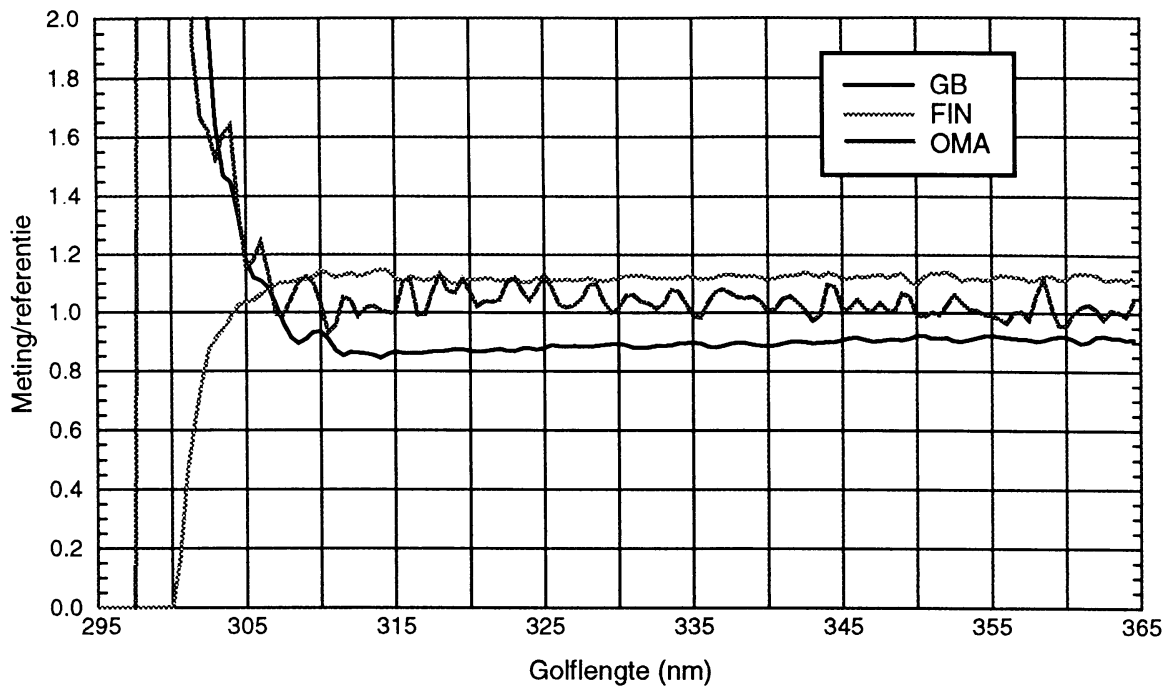
Elke “blind day” werd er uit alle meetinstrumenten een referentie bepaald. De referentie werd bepaald uit het gemiddelde van minimaal drie en maximaal vijf instrumenten via een set goed gedefinieerde maar ingewikkelde regels. Alle andere metingen werden vergeleken met deze referentie.

### 3.3 De OMA in de meetcampagne

Doordat de OMA het hele spectrum in een keer opneemt, is het niet mogelijk aan het protocol te voldoen. Er zou dan elke drie seconde een heel spectrum opgenomen moeten worden waarvan slechts één golflengte gebruikt wordt. Afgezien van de problemen die de verwerking van zoveel data met zich meebrengt, is drie seconden een te korte tijd om een meting met en één zonder filter te doen. Er werd daarom besloten dat de OMA gedurende de scan drie keer een spectrum zou opnemen. De drie tijdstippen zijn zo gekozen dat de andere instrumenten dan bij respectievelijk 300, 330 en 360 nm meten. De golflengtes waarbij de OMA meet liggen bovendien niet op 0.5 nm van elkaar. De OMA data ondergingen voor vergelijking met andere instrumenten daarom een interpolatie om wel de irradianties om de 0.5 nm te verkrijgen.

Er zijn twee “blind days” geweest. De eerste was op 24-05-1995 en werd de referentie gevormd door de instrumenten van ATI, GR, GB, DEG en FIN. De tweede was op 25-05-1995 en werd de referentie gevormd door de instrumenten van ATI, GR, GB en NLK.

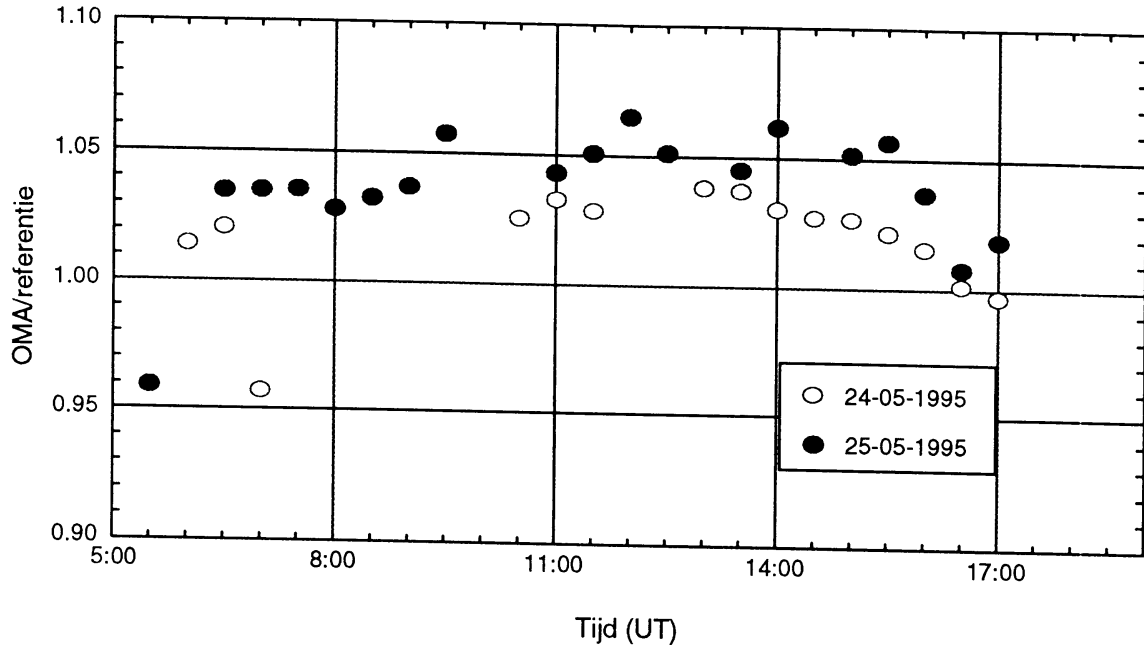
In figuur 3.1 staat het resultaat van de eerste meting (24-05-1995, 0600 UT). De metingen van de OMA zijn gedeeld door de referentie. De verhouding staat verticaal uitgezet, de golflengten horizontaal. Ook zijn de metingen van twee tot de referentie behorende instrumenten weergegeven. Die van GB en FIN waren respectievelijk de laagste en hoogste van de referentie. De zon stond nog vrij laag waardoor de kortste golflengtes met de OMA nog niet gemeten konden worden.



**Figuur 3.1** Ratios van de eerste meting (24-05-1995, 0600 UT).

In figuur 3.1 is te zien dat er meer structuur in de OMA-curve zit dan in de overige 2 curves. Dit kan mede veroorzaakt worden door de andere slitfunctie van de OMA. Met een brede slitfunctie is minder structuur in het UV-spectrum te onderscheiden dan met een smalle slitfunctie. De metingen van de OMA in figuur 3.1 zijn alleen echt vergelijkbaar met de referentie bij 330 nm. Het meetmoment bij 330 nm is voor de drie metingen gelijk. In figuur 3.2 worden daarom alleen de ratio's bij 330 nm gegeven. Alle ratio's van de twee "blind days" staan erin. Er ontbreken een aantal ratio's als gevolg van een gemiste meting door de OMA of door een instrument uit de referentie.

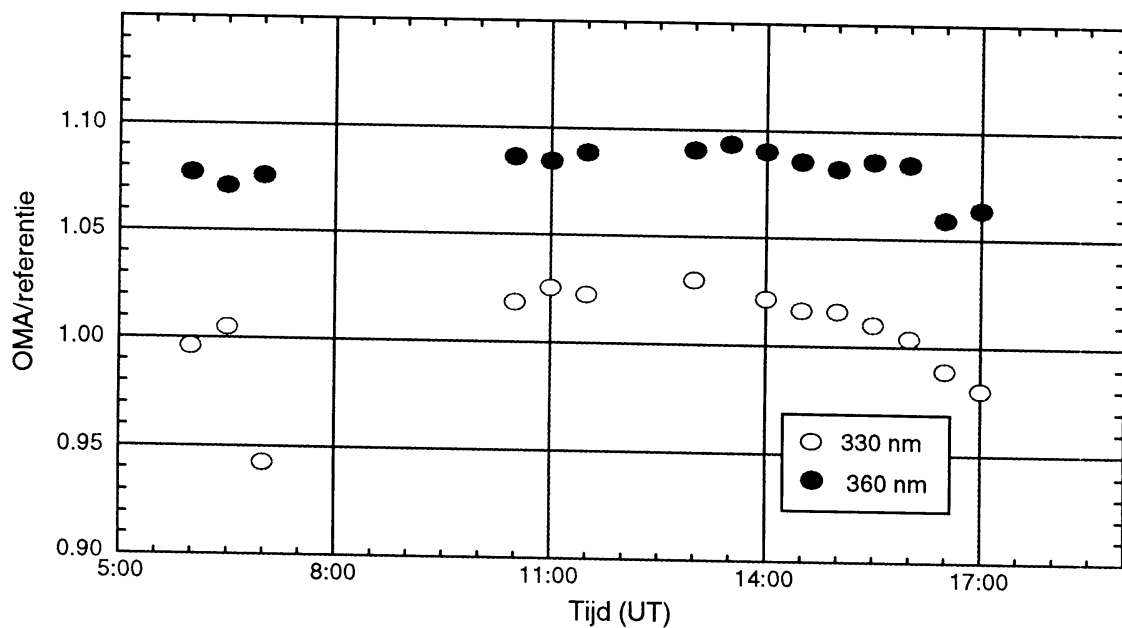
De OMA meet meestal wat grotere waarden dan de referentie. De tweede dag zijn de ratio's groter dan de eerste dag. De tweede dag werd de referentie voor een gedeelte door andere instrumenten gevormd, wat gedeeltelijk een verklaring hiervoor kan zijn. Bovendien zijn ze midden op de dag groter dan aan het begin en eind van de dag. De cosinus response van de OMA moet nog bepaald worden. Het is mogelijk dat deze niet erg goed is en dat de metingen voor lage zonshoogtes hiervoor gecorrigeerd moeten worden.



**Figuur 3.2** Ratio OMA/referentie bij 330 nm voor alle metingen.

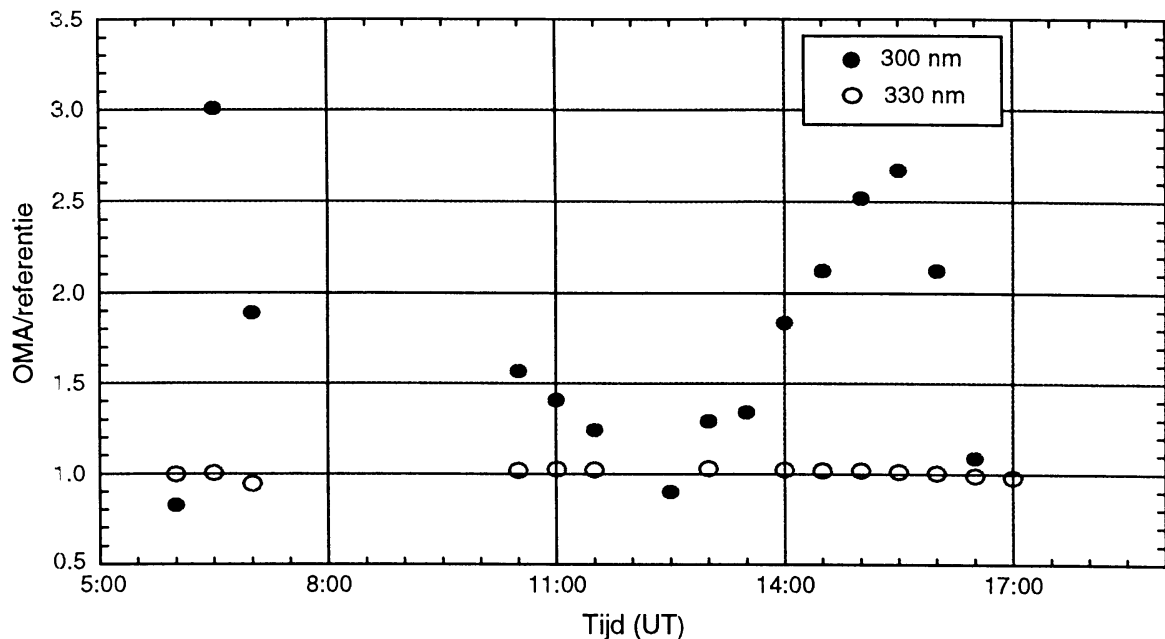
In figuur 3.3 zijn naast de ratios bij 330 nm ook die bij 360 nm weergegeven. De ratio's liggen bij 360 nm zo'n 0.06 à 0.07 hoger dan bij 330 nm. Voor de OMA-metingen is er een indicatie dat bij de langere golflengten extra veel strooilicht zou kunnen zijn. Dit zou mede een verklaring voor de hogere ratios bij 360 nm kunnen zijn.

In figuur 3.4 zijn naast de ratio's bij 330 nm ook die bij 300 nm gegeven.



**Figuur 3.3** Ratio OMA/referentie bij 330 en 360 nm op 24-05-1995.





**Figuur 3.4** Ratio OMA/referentie bij 300 en 330 nm op 24-05-1995.

De OMA komt bij de heel korte golflengten duidelijk in de problemen. Het dynamisch bereik van de detector is niet groot genoeg om de korte UVB-straling te meten zonder dat de metingen in het UVA verzadigen. Dit effect wordt versterkt doordat de intensiteit van de UVB-straling aanzienlijk sterker afneemt bij lage zonnestanden dan de UVA-intensiteit. Duidelijk is te zien dat midden op de dag wanneer meer kortgolvlige straling het aardoppervlak bereikt de ratio's dicht bij één liggen.

### 3.4 Conclusies

Het meetinstrument heeft een aantal belangrijke verbeteringen ondergaan. De temperatuurstabilisatie functioneert goed. De donkerstroom bleef heel constant zodat hiervoor makkelijk gecorrigeerd kon worden. Door de kist is lichtlekage geen probleem meer.

De meetresultaten van de OMA waren aanzienlijk verbeterd t.o.v. de vorige meetcampagnes (zie Gardiner, B.G., Kirsch, P.J. 1992).

De metingen leveren irradianties op die bij 330 nm maximaal 4% hoger zijn dan de referentie. Voor twee verschillende typen spectrale meetinstrumenten mag men tevreden zijn wanneer ze onderling zo weinig verschillen. Bij 360 nm zijn de irradianties maximaal 9% hoger dan de referentie. Voor heel korte golflengten komt het instrument in de problemen.

De cosinus response van de vernieuwde OMA moet gemeten worden, mogelijk is een correctie nodig, of een andere diffuser.

Het strooilichtprobleem lijkt nog niet afdoende verholpen. Hier moet meer aandacht aan besteed worden.

De golflengteijking heeft een belangrijke verbetering ondergaan. Verdere verbetering van de golflengteijking kan gebeuren door niet alleen een kwiklamp te gebruiken maar b.v. ook een neonlamp. Een andere mogelijkheid is gebruik te maken van de in het UV-spectrum van de zon aanwezige Fraunhoferlijnen. Hier moet dan een methode voor ontwikkeld worden.

Het beperkte dynamische bereik van de diode array ( $\sim 10^3$ ) maakt de OMA minder geschikt voor metingen van 290 tot 400 nm. Het UV-spectrum varieert over dit golflengtegebied namelijk een factor  $10^6$ . Het ligt daarom voor de hand een golflengtegebied te kiezen waarin het spectrum niet meer dan een factor  $10^3$  varieert: van 290 tot ongeveer 320 nm, of 320 tot 420 nm. In dit geval is het bovendien nog mogelijk de resolutie met een factor 2 op te voeren door de tralie van 1200 l/mm te vervangen door een tralie met 2400 l/mm.

## 4 Appendix

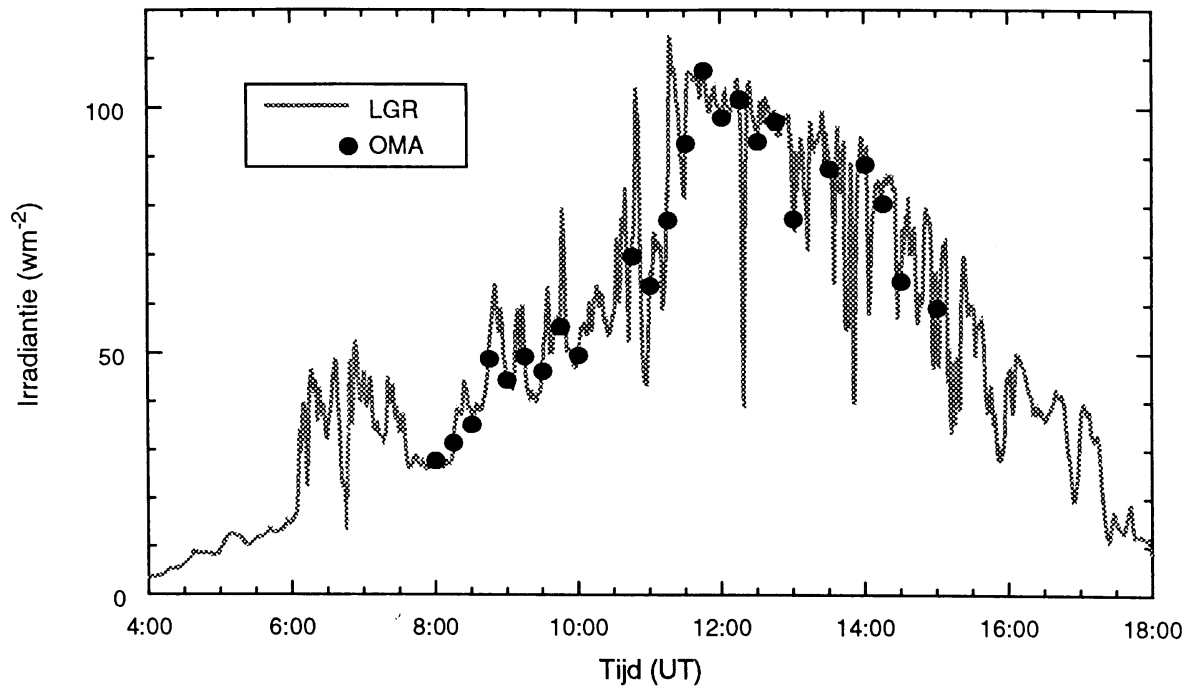
In dit hoofdstuk worden nog enkele extra resultaten besproken van metingen met de OMA die niet in het voorgaande pastten, maar in het kader van het uittesten van de OMA, minstens zo belangrijk zijn.

### **Metingen ter controle van modelberekeningen voor afsmelting van gletsjerijs**

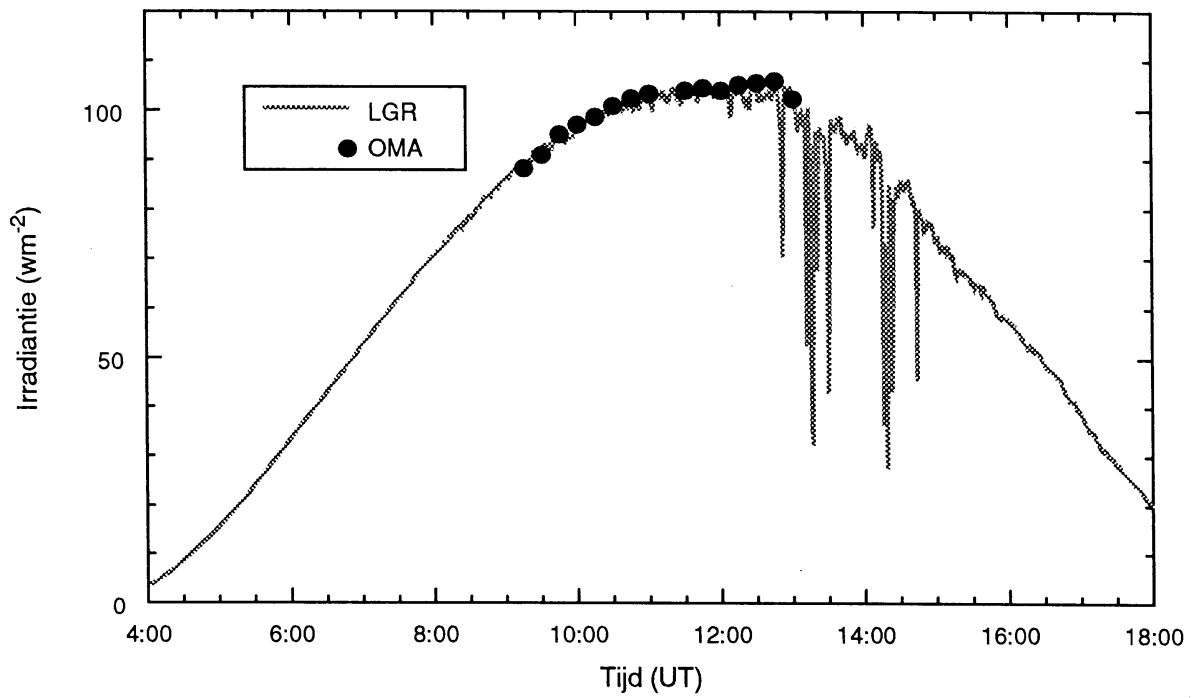
De albedo (gereflecteerde straling/invallende straling) van een sneeuw- of ijsoppervlak bepaalt in hoge mate de hoeveelheid energie die beschikbaar is voor afsmelting. De albedo is daarom de belangrijkste grootte in scenarioberekeningen voor het massa-budget van een gletsjer of ijskap, op basis van het huidige klimaat, of op basis van mogelijke klimaatveranderingen in de toekomst. In modellen wordt de albedo vaak geparameteriseerd als functie van bijvoorbeeld type oppervlak (sneeuw, firn, ijs) en de hoeveelheid water aan het oppervlak. Deze schematische voorstelling van zaken moeten met behulp van grondmetingen getest worden. Echter: grondmetingen beslaan maar een klein deel van de gletsjer of ijskap. Daarom worden satellietmetingen gebruikt om de albedo over grote oppervlakken te bepalen. De satelliet meet in bepaalde visuele en NIR banden, welke gecorrigeerd moeten worden alvorens de totale (over het zonnenspectrum geïntegreerd) albedo eruit volgt. Daarvoor zijn methoden ontwikkeld en toegepast op bijvoorbeeld sneeuw in Groenland. Echter boven ijs is er weinig bekend en zijn er weinig metingen gedaan (ijs is vaak lastig toegankelijk).

Daarom ontwikkelde Kipp & Zonen in opdracht van IMAU (Instituut voor Marine en Atmosferisch Onderzoek Utrecht) een set radiometers (code LGR) voor het meten van irradiaties in de landsatbanden 2 (520-600 nm) en 4 (760-900 nm). Samen met de metingen van de totale albedo (met CM14's) kan op die manier een relatie gelegd worden tussen de albedo in de landsatbanden en de totale albedo. Deze metingen zijn en worden uitgevoerd op de Pasterze gletsjer (Oostenrijk) en de Haut Clacier d'Arolla (Zwitserland) door het IMAU. IJkingen van deze instrumenten zijn uitgevoerd in het UV-calibratie laboratorium van het KNMI. Vergelijkende metingen zijn op het dak van het KNMI-gebouw uitgevoerd met de Optical Multichannel Analyzer.

De bandinstrumenten deden elke tien seconden een meting, waarna minuutgemiddelden bepaald werden. De OMA mat elk kwartier of halfuur gelijktijdig met de bandinstrumenten gedurende 1 à 2 minuten. Net als voor de bandinstrumenten werd uit de metingen die om de tien seconde werden gedaan minuutgemiddelden bepaald.



**Figuur4.1** Irradiantie gemeten door de OMA en LGR op een bewolkte dag.



**Figuur 4.2** Irradiantie gemeten door de OMA en LGR op een onbewolkte dag.

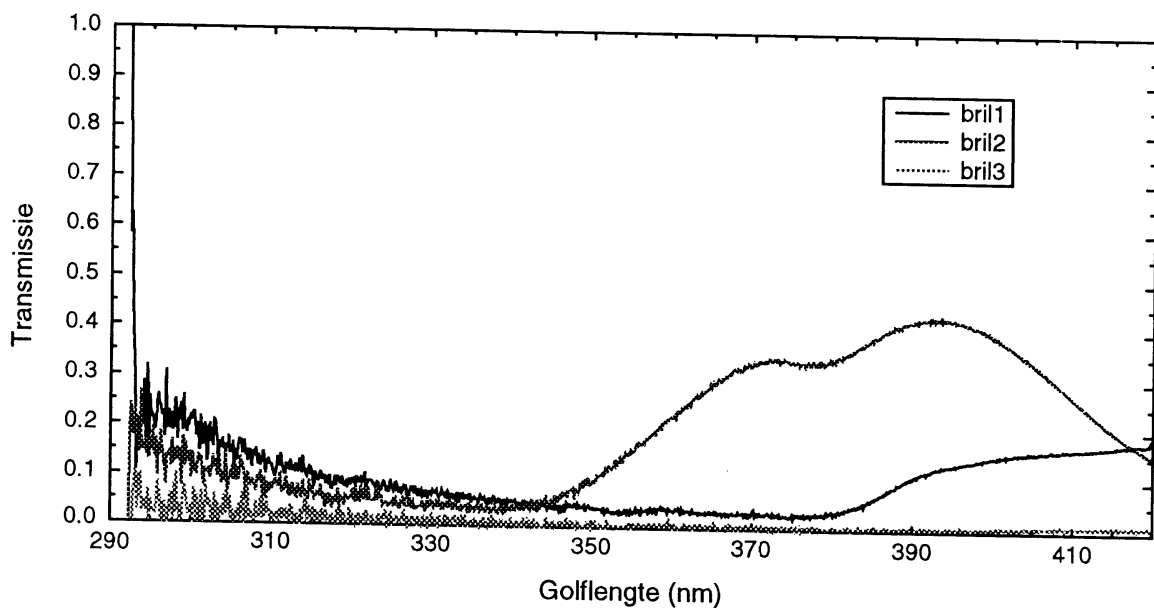
Hierbij werden de absoluut geijkte spectrale OMA-metingen geconvolueerd met de bekende filterkarakteristiek van de bandmeters en vervolgens over het golflengtebereik van de bandfilters geïntegreerd.

In de figuren 4.1 en 4.2 zijn de gemeten irradianties weergegeven in de landsatband 2 gedurende een dag door beide instrumenten. De overeenkomst is op onbewolkte dagen nog iets beter dan op bewolkte dagen.

Het is voor het eerst dat spectrale metingen op deze manier direct vergeleken zijn met bandmetingen. De overeenkomst is boven verwachting goed.

### Spectrale UV-transmissie van zonnebrillen

Zonnebrillen worden tegenwoordig vaak te koop aangeboden met de vermelding dat ze bescherming bieden tegen UV-straling. Ik heb van drie zonnebrillen de spectrale UV-transmissie opgemeten. De brillen worden niet nader gespecificeerd. Het resultaat van de metingen is te zien in figuur 4.3.



**Figuur 4.3** Spectrale UV-transmissie van zonnebrillen.

Hierin is te zien dat één bril (bril 2) nog een aanzienlijke hoeveelheid UVA doorlaat.

### Onderzoek effecten zonnebrandcrème

De huid kun je beschermen tegen UV-straling met zonnebrandcrème. In welke mate zonnebrandcrèmes van verschillende factoren bescherming bieden tegen huidkanker i.p.v. verbranding, is niet goed bekend. In het kader van haar promotieonderzoek heeft Gertrud Krekels

van de afdeling Dermatologie van de Universiteit van Maastricht de beschermende effecten van zonnebrandcrème voor huidkanker getest.

Wanneer straling in de huid DNA-schade aanricht, wordt een herstel bevorderend enzym aangemaakt. De hoeveelheid van dit enzym is dan een maat voor de opgelopen schade. Na enkele dagen is het enzym weer verdwenen. Bij 25 proefpersonen is een stukje huid, een biopt genoemd, weggenomen (meestal van de bil) wat minstens drie dagen niet aan zonlicht was blootgesteld (vergelijkingsmateriaal). Een dag later moesten deze proefpersonen “met de billen bloot” op het strand van Scheveningen. Eén bil bleef geheel onbeschermd. Op de andere bil werd een afgestemde hoeveelheid zonnebrandcrème over een standaard oppervlak (10×10 cm) uitgesmeerd. Dit gebeurde voor zowel factor 10 als factor 20. Alle proefpersonen moesten één uur zo in de zon blijven liggen. Een dag later werd bij elke proefpersoon drie biopten genomen. Eén van de onbeschermd bil en één van elk ingesmeerd stuk van de beschermde bil. Aan de hand van de hoeveelheden van het enzym in de vier biopten per proefpersoon zal G. Krekels binnenkort een uitspraak kunnen doen over de effecten van zonnebrandcrème.

Van het KNMI is een kleine delegatie bestaande uit Foeke Kuik, Wiel Wauben en Frank Helderma naar Scheveningen afgereisd om tijdens dit onderzoek de irradiantie in het UV-gebied te meten (en foto's te maken).

### **Testen van een ozonmetertje**

Op het KNMI is een experimenteel ozonmetertje aanwezig wat aan de hand van metingen in de richting van de zon bij twee golflengtes (303 en 306 nm) de ozonkolom zou moeten kunnen bepalen. Dit metertje zit eenvoudig in elkaar (één filter, één fotodiode, klein voltmeterkje). Het zou als bouw pakket door middelbarescholen aangeschaft kunnen worden. Leerlingen kunnen het dan in elkaar zetten om er vervolgens metingen mee te doen. Bij het testen van het metertje bleken de metingen slecht reproduceerbaar. Het metertje is daarom aangepast en zal nog verder getest moeten worden.

## 5 Referenties

Eggink, G.J., Janssen, L.H.J.M., Kuik, F., Peeck, H.H., Woerd, H. van der, (red.), *Ozon en UltraViolette straling: veranderingen, gevolgen en effecten*, KNMI, RIVM (1995).

Kuik, F., Kelder, H., *Spectral Ultraviolet Radiation Measurements and Correlation with Atmospheric Parameters*, KNMI scientific report nr. 94-05, De Bilt (1994).

Pedrotti, F.L., Pedrotti, L.S., *Introduction to Optics*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1993).

Iqbal, M., *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press Toronto (1983).

Helderman, F., *Het verbeteren van de OMA voor het meten van UV-straling*, KNMI (1995), (ongepubliceerd manuscript).

Gardiner, B.G., Kirsch, P.J., *Air Pollution Research Report 49: Second European Intercomparison of Ultraviolet Spectroradiometers*, Commission of the European Communities, Brussels (1993).

Gardiner, B.G., Kirsch, P.J., *Air Pollution Research Report 53: Setting standards for European ultraviolet spectroradiometers*, Commission of the European Communities, Brussels (1995).

Fortuin, J.P.F., Dorland, R. van, Kelder, H., *Concurrent ozone and temperature trends derived from ozonsonde stations, Atmospheric ozone as a climate gas*, NATO ASI series Vol. I32, 131-144 (1995).