

# Standaard stralingsmetingen met een zonnevolger

*A.C.A.P. van Lammeren en  
A. Hulshof*

# Technisch rapport; TR-164

Verslag van werkzaamheden bij het KNMI te De Bilt ter afronding van de stage voor de studie Technische Natuurkunde aan de Hogeschool Enschede (juni 1994).

De Bilt, 1994

Postbus 201  
3730 AE De Bilt  
Wilhelminalaan 10  
Telefoon 030-206 911  
Telefax 030-210 407

UDC: 551.501.721  
551.508.2  
ISSN: 0169-1708  
ISBN: 90-369-2056-6

© KNMI, De Bilt. Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotocopie, microfilm, of op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het KNMI.

# **STANDAARD STRALINGSMETINGEN MET EEN ZONNEVOLGER**

A.J. Hulshof, A.C.A.P. van Lammeren

Dit verslag beschrijft het werk dat is verricht in het kader van een stage van A.J. Hulshof bij het KNMI te De Bilt voor de studie Technische Natuurkunde aan de Hogeschool Enschede. De stage is op het KNMI begeleid door A.C.A.P. van Lammeren.

# 1 Inhoudsopgave.

1 Inhoudsopgave .....	2
2 Samenvatting .....	3
3 Inleiding .....	5
4 Zonnestraling .....	6
4.1 Inkomende kortgolvlige straling .....	6
4.2 Turbiditeit .....	8
4.3 Inkomende langgolvlige straling .....	9
5 Instrumentatie .....	11
5.1 Stralingsmeters.....	11
5.1.1 Pyrheliometer .....	11
5.1.2 Pyranometer .....	12
5.1.3 Diffusometer .....	14
5.1.4 Pyrgeometer .....	15
5.2 Zonneschijnmeter .....	16
5.3 Zonnevolger .....	18
5.4 Datalogger .....	21
6 Gebruikte algoritmen .....	22
6.1 Positie zon .....	22
6.2 Inkomende straling aan de top van de atmosfeer .....	23
6.3 Correctie formule schaduwband bij diffuse stralings- metingen .....	24
7 Meetresultaten .....	29
7.1 Globale straling .....	29
7.2 Diffuse straling .....	30
7.3 Inkomende langgolvlige straling .....	35
8 Conclusies.....	37
9 Literatuurlijst.....	38
10 Begrippenlijst.....	39
Bijlage I Aansturing zonnevolger m.b.v software progamma	
Bijlage II Controle som Globaal = direkt + diffuus	
Bijlage III Langgolvlige straling, beide meters niet afgedekt tegen de direkte straling	

## 2 Samenvatting.

Langjarige metingen hebben bepaald dat de hoeveelheid stralingsflux  $I_0$  van de zon, gemeten op een afstand van een Astronomische Eenheid (de gemiddelde afstand zon-aarde) op een vlak loodrecht op de invallende straling, en geïntegreerd over het gehele spectrum, constant is.  $I_0$  bedraagt  $1367 \text{ W/m}^2$ . In de atmosfeer wordt de straling deels verstrooid en geabsorbeerd en eventueel weerkaatst aan bewolking. De straling die uiteindelijk het aardoppervlak bereikt, bestaat nu uit een directe component  $I$  uit de richting van de zon en een diffuse component uit alle andere richtingen. Als nu  $D$  de diffuse component is, gemeten op het horizontale vlak, en de bijdrage van  $I$  op een horizontaal vlak is  $I \cdot \sin(h)$ , waarin  $h$  de zonshoogte is in graden, dan geldt voor de globale straling  $G$  op het horizontale vlak:

$$G = I \cdot \sin(h) + D$$

Globale straling wordt al ongeveer 25 jaar op routinebasis gemeten. Zonneschijnduur wordt in De Bilt al sinds 1901 bepaald. Instrumenten om directe en diffuse componenten te meten vergen in de praktijk veel meer aandacht dan een globale stralingsmeter en worden daarom nauwelijks op routinebasis gebruikt. Tegenwoordig worden deze componenten m.b.v. algoritmen uit de globale stralingsmetingen bepaald. Hierbij worden om de 10 minuten de minima, maxima en het gemiddelde van die 10 minuten opgeslagen, dit zijn belangrijke parameters voor het gebruikte algoritme. Wel is er continu een instrument opgesteld om de diffuse straling te meten. Dit is een globale stralingsmeter (Kipp CM11 Pyranometer, WMO 1986), alleen wordt nu de directe zonnestraling afgeschermd d.m.v een zonneband (Fig. 5.1.3.1.). Deze band wordt 2x per week in hoogte versteld zodat deze altijd tussen zon en meter staat. In deze figuur is ook te zien dat de zonneband ook een deel van de hemelkoepel afschermt, zodat er een stukje diffuse straling wordt weggenomen. Als dit een constant gedeelte was dan zou daar makkelijk rekening mee te houden zijn. Maar uit het algoritme van K. Dehne (par. 6.3) blijkt dat de gemaakte fout afhankelijk is van de zonshoogte, troebelheid van de atmosfeer en vooral van de bedekkingsgraad van de hemel. De gemaakte fout varieert dus sterk in de tijd.

Nauwkeurigere metingen worden behaald door de zonneband te vervangen door een bolletje welke de directe zonnestraling constant afschermt. Om dit te realiseren is er een zonnevolger nodig. De door het KNMI aangeschafte zonnevolger is de 2AP-TRACKER van de firma SCI-TEC (Fig. 5.3.1). Op dit apparaat is plaats voor 3 instrumenten welke met een bolletje tegen de directe zonnestraling afgeschermd kunnen worden. Daarnaast is het mogelijk om 4 instrumenten te plaatsen om de directe straling te meten. De stralingsapparatuur en de zonnevolger zijn echter niet afkomstig van dezelfde firma, hierdoor kwamen de afmetingen niet met elkaar overeen. Dit moest eerst aangepast worden waarna de installatie van de apparatuur en de analyse van de gegevens kon plaats vinden.

Mijn werkzaamheden waren als volgt:

- ontwerpen van een bouwtekening waarin de verandering van de afmetingen van sommige zonnevolger-elementen wordt weergegeven.
- installatie en aansluiting van de stralingsapparatuur
- ontwikkelen van computerprogramma's om de data te analyseren

K. Dehne (Hamburg) kwam in 1981 al tot de conclusie dat de gemaakte fouten bij diffuse stralingsmetingen met een schaduwband op konden lopen tot 16%. De gebruikte zonneband in Cabauw (plaats 30km. te zuidoosten van Utrecht waar de meetapparatuur staat) heeft grotere afmetingen dan die in Hamburg door K. Dehne gebruikt is. Volgens het algoritme dat door K. Dehne gevonden is zou de foutenmarge in Cabauw liggen tussen 5 en 18%. De diffuse stralingsmetingen met een bolletje bevestigen dit.

De conclusie is dat er een significant verschil bestaat tussen diffuse stralingsmetingen met een schaduwband en metingen met een schaduwbolletje. De afwijkingen kunnen oplopen tot zo'n 18%. In bijlage II is te zien dat de som van de directe en diffuse straling gelijk is aan de globale straling. Het is voorbarig om hieruit te concluderen dat de zonnevolger steeds op de goede positie heeft gestaan. Het is immers mogelijk dat fouten die in de diffuse en de directe stralingsdata optreden elkaar opheffen, zodat de som als nog klopt.

Op de zonnevolger is ook een langgolvlige stralingsmeter geplaatst welke de inkomende infrarode straling, afkomstig van atmosfeergassen en wolken, detecteert. Eerder onderzoek had uitgewezen dat het kapje over het meetelement opgewarmd wordt bij langdurige blootstelling aan directe zonnestrallen. Deze opwarming heeft tot gevolg dat ook het kapje infrarode straling uitzendt, en dus de meting beïnvloedt. Door nu m.b.v. een schaduwbolletje het kapje af te schermen tegen de directe zonnestraling moet het mogelijk zijn om dit effect te voorkomen. Metingen op zonnige dagen laten zien dat het verschil tussen beide metingen op kan lopen tot zo'n 5%.

De doelstelling van deze stage was om diverse stralingsapparatuur op de zonnevolger te installeren en de gegevens hiervan te analyseren om zo tot een schatting te komen van de nauwkeurigheid waarmee in Cabauw het stralingsbudget wordt gemeten. Een indicatie van de fouten is nu bekend, maar om tot een exacte schatting te komen is er een grotere datareeks nodig. Vooral het registreren van de temperatuur van de instrumenten lijkt een nuttige zaak.

### 3 Inleiding.

In het klimaat op aarde speelt de balans tussen inkomende en uitgaande straling een bepalende rol. Natuurlijke verstoringen van deze balans hebben in de historie van de aarde tot variaties in het klimaat geleid, tot zelfs ijstijden.

In deze voor het klimaat op aarde zo belangrijke stralingshuishouding spelen zon, wolken, waterdamp en andere gassen een hoofdrol. Het blijkt dat kleine verstoringen door een aantal natuurlijke terugkoppelingsprocessen versterkt kunnen worden, waardoor grote variaties kunnen ontstaan. Vooral wolken hebben een zeer sterke invloed op de stralingshuishouding en kleine veranderingen in de hoeveelheid en het karakter ervan kunnen grote invloed hebben op de stralingsbalans.

In dit stralingsevenwicht was de mens een buitenstaander, maar sinds enkele decennia lijkt het erop dat menselijke activiteiten ook verstoringen van de stralingsbalans kunnen veroorzaken. Deze kunnen ingrijpende gevolgen (broeikaseneffect, verdunning ozonlaag) hebben voor de energiehushouding en dus het klimaat op aarde. Een reden te meer om nauwkeurig deze energitermen te meten.

Een andere reden om meer aandacht aan stralingsmetingen te besteden is de enige jaren geleden wereldwijde ingevoerde verandering van de meetmethodiek om de zonneshijnduur te bepalen. Jarenlang werd deze zonneshijnduur bepaald met een glazen bol (Campbell Stokes meter) welke een gat in een strook papier brandde als de zon scheen. Tegenwoordig wordt de zonneshijnduur berekend uit directe stralingsmetingen. De directe straling moet  $120 \text{ W/m}^2$  (gemeten op een vlak loodrecht op de zonsrichting) bedragen om een bijdrage te leveren aan de zonneshijnduur.

Ook de toenemende belangstelling voor zonnestraling en langgolvlige warmtestraling in de bouwwereld, landbouw en bij onderzoek naar de mogelijkheid om zonne-energie voor diverse doeleinden te gebruiken geeft aanleiding tot een nadere beschouwing van de nauwkeurigheid van de stralingsmetingen.

## 4 Zonnestraling.

Het aardsysteem - het geheel van vaste aarde, oceanen en atmosfeer - wisselt energie uit met het heelal d.m.v. elektromagnetische straling. Andere energie-uitwisselingen zijn verwaarloosbaar. Het aardsysteem ontvangt straling van de zon. De zon heeft een hoge temperatuur van circa 5800 K en zendt kortgolvlige straling uit (300-3000 nm, UV - NIR, Fig. 4.1). Een deel van de ontvangen straling wordt door de aarde teruggekaatst en een deel geabsorbeerd. Ten slotte zendt het aardsysteem zelf ook straling uit welke door de lage temperatuur langgolvlige (3000 - 30.000 nm, infrarood) is.

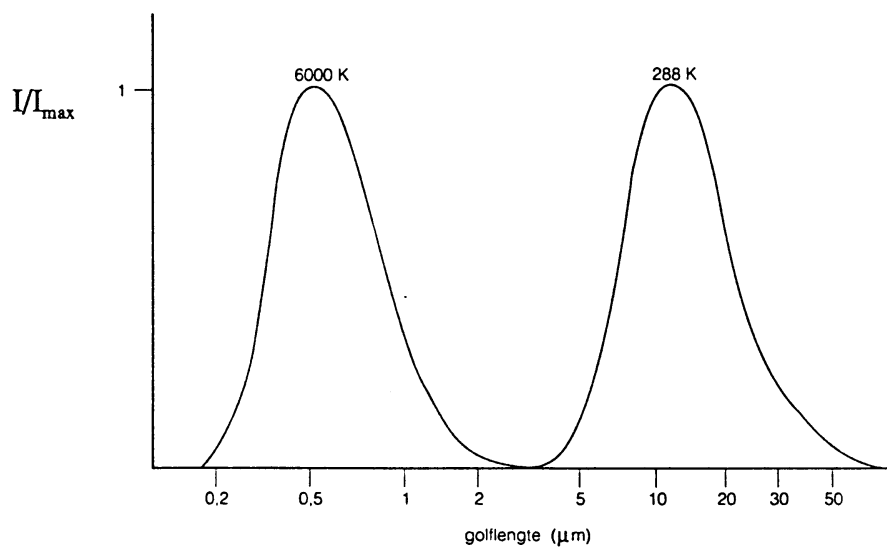


Fig. 4.1. Genormeerd stralingsspectra van lichamen met een temperatuur van 6000 K en 288 K

### 4.1 Inkomende kortgolvlige straling.

Langjarige metingen hebben aangetoond dat de door de zon op de aarde gerichte energiestroom niet noemenswaardig met de tijd verandert. Er kan dus gesproken worden van een zonneconstante: de energie die iedere seconde aan de rand van de atmosfeer wordt opgevangen door een vlak van 1 m<sup>2</sup> dat loodrecht op de richting van de zonnestrallen is gericht (Fig. 4.1.1.). De zonneconstante is 1367 W/m<sup>2</sup>.



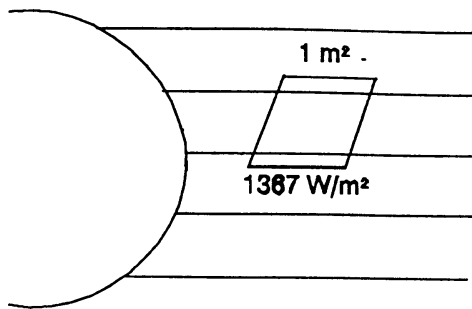


Fig. 4.1.1.

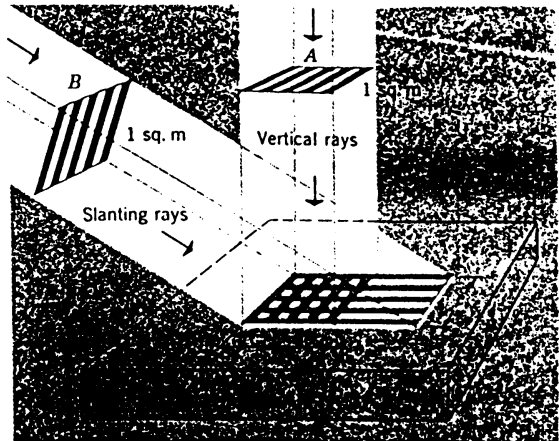


Fig. 4.1.2.

Het is dan mogelijk de energie uit te rekenen en die op een bepaalde plaats aan de rand van de atmosfeer binnenvalt (=  $S$ , zie paragraaf 6.2, formule (6)). Dat elke plaats op aarde niet evenveel energie ontvangt heeft als oorzaken:

- in Fig. 4.1.2 is te zien dat door de ronding van de aarde de zonnestraling niet overal loodrecht invalt, dezelfde energie hoeveelheid wordt dan over een groter oppervlak verdeelt.
- de scheve aardas en de elliptische vorm van de baan van de aarde rond de zon hebben tot gevolg dat er seizoenverschillen optreden, welke wij kennen als jaargetijden met minima en maxima in de op het aardoppervlak invallende energie van de zon.

De zonnestraling aan de rand van de atmosfeer wordt verzwakt op haar weg door de atmosfeer. Wolken hebben een grote invloed op de hoeveelheid zonnestraling die het aardoppervlak bereikt. Maar ook de gassen in de atmosfeer als zuurstof, kooldioxide, ozon, stikstof, waterdamp en vaste deeltjes (stof, roet) verzwakken de zonnestraling. De deeltjes worden *aerosolen* genoemd. De verzwakking van de zonnestraling door deze aerosolen en gassen komt doordat die gassen en deeltjes energie van de zonnestraling kunnen opnemen (absorptie) of de zonnestraling kunnen verstrooien.

De straling die het aardoppervlak rechtstreeks bereikt wordt de *directe straling* genoemd. Omdat de zon in Nederland nooit loodrecht boven ons staat, valt de directe straling onder een hoek met het aardoppervlak in. De directe straling op een vlak van  $1 \text{ m}^2$  loodrecht op de richting van de zonnestraling wordt genoteerd als  $I$ , de directe straling loodrecht op  $1 \text{ m}^2$  aardoppervlak als  $B$ . Als de zonshoogte  $h$  is, is dus  $B = I \cdot \sin(h)$  (Fig. 4.1.3).

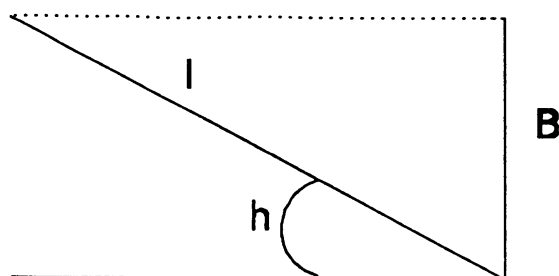


Fig. 4.1.3.

De straling die via verstrooiing en reflectie op het aardoppervlak wordt ontvangen heet diffuse straling (D). De som van directe en diffuse straling wordt globale straling (G) genoemd. Er geldt dus  $G = B + D = I \cdot \sin(h) + D$ .

## 4.2 Turbiditeit.

De doorlatendheid van de atmosfeer voor (zichtbare) straling wordt dus verminderd, dit kan met de term *turbiditeit* of *troebelheid* worden aangegeven. Er zijn verschillende methoden ontwikkeld om de turbiditeit van de atmosfeer te beschrijven. De bij het KNMI gehanteerde methode is de turbiditeitsfactor  $T_L$  van Linke (1922). Hij bracht de afname van de intensiteit van de zonnestralen in de atmosfeer in verband met de intensiteitsafname door Rayleigh-verstrooiing (de verstrooiing aan bolvormige deeltjes met een straal  $r$ , die kleiner is dan  $0.1 \lambda$ . Dit geldt b.v. voor luchtmoleculen) in een schone en droge atmosfeer. Hij stelde vast dat de verhouding van de afnamecoëfficiënt van de intensiteit van de werkelijke atmosfeer tot die van de droge Rayleigh-atmosfeer onafhankelijk was van de zonnestand en noemde deze verhouding de turbiditeitsfactor  $T_L$ :

$$T_L = \frac{\bar{\mu}}{\mu_r(m)} \quad (1)$$

met:

$\mu$  = afnamecoëfficiënt

De bovenstreep betekent een middeling over de golflengten van het zonnenspectrum, de index  $r$  betekent dat we met een Rayleigh-atmosfeer te maken hebben en  $\mu_r(m)$  is uitgedrukt als een functie van de optische massa  $m$ . De optische massa is gedefinieerd als:

$$\int \rho * ds [kg m^{-2}] \quad (2)$$

met:

$\rho$  = dichtheid lucht

$ds$  = lengte van stralingsweg, gerekend vanaf aardoppervlak

Dit is dus de hoeveelheid massa per oppervlak. Zo wordt de invloed van de zonnestand weggewerkt, dit is nodig om de weglengte van de zonnestralen door de atmosfeer gelijk te stellen. Aangezien  $T_L$  de troebelheid van de atmosfeer bepaalt ten opzichte van een droge schone Rayleigh-atmosfeer, betekent dit dat  $T_L$  een maat is voor de turbiditeit van de atmosfeer door aerosolen en waterdamp gezamenlijk. Dat is een bezwaar, als men geïnteresseerd is in de turbiditeit door aerosolen alleen, b.v. bij luchtverontreinigingsonderzoek.

Uit de definitie volgt dat  $T_L$  nooit kleiner kan zijn dan 1. In een tamelijk schone atmosfeer is  $T_L = 1,5$ , terwijl een  $T_L$ -waarde van 5,0 een zeer troebele atmosfeer betekent. Voor Nederland schommelt de gemiddelde  $T_L$  van 2 in januari tot 6 in augustus.

In de praktijk betekent dit dat  $T_L$  wordt bepaald door de verhouding:

$$\frac{\perp \text{ inkomende zonnestraling aan top atmosfeer}}{\text{directe zonnestraling } \perp \text{ aardopp.}} = \frac{S}{B} \quad (3)$$

B zal dan gemeten worden met een directe stralingsmeter, S daarentegen zal met een algoritme bepaald moeten worden (paragraaf 6.2).

### 4.3 Inkomende langgolvlige straling.

Al zorgt de zon zelf ook voor wat inkomende langgolvlige straling, dit is slechts een kleine bijdrage tot het geheel. De zonnestraling die de aarde bereikt wordt voor een deel geabsorbeerd door de aarde. De aarde zendt deze opgenomen straling voor een deel weer uit en wel in het infrarode stralingsgebied. Naast de op dat moment eventuele aanwezige bewolking zijn er 3 gassen (waterdamp, kooldioxide, methaan) in de atmosfeer die voornamelijk verantwoordelijk zijn voor de absorptie van straling in het infrarode deel van het spectrum, zowel voor de inkomende als voor het door de aarde uitgezonden infrarode straling. De gassen die de uitgezonden straling van het aardatmosfeer systeem absorberen, worden broeikasgassen genoemd, omdat ze net als glas in een broeikas de uitgaande warmtestraling tegenhouden. Dat aanwezige bewolking voor inkomende langgolvlige straling kan zorgen komt door het feit dat wolken overwegend bestaan uit waterdamp welke warmtestraling (langgolvlige straling) opneemt en uitstraalt.

Bij onbewolkt weer zorgen dus de broeikasgassen voor de inkomende langgolvlige straling, bij bewolkt weer zijn dit de broeikasgassen en de wolken.

## 5 Instrumentatie.

### 5.1 Stralingsmeters

Om de verschillende componenten van de stralingshuishouding van de aarde te kunnen bepalen zijn diverse soorten stralingsmeters ontwikkeld. De voor dit onderzoek belangrijke stralingsmeters zijn:

- de pyrhelimeter, een instrument om de energie van de directe zonnestraling te meten in een vlak loodrecht op de straling;
- de pyranometer, een instrument om de energie te meten van de globale straling die vanuit de hemelkoepel op een horizontale vlak valt;
- diffusometer, een pyranometer waarbij de directe invallende straling d.m.v een schaduwring of bolletje wordt afgeschermd en die dus alleen de diffuse straling meet;
- pyrgeometer, deze meet alleen langgolvlige straling op het horizontale vlak

#### 5.1.1 Pyrhelimeter.

Een pyrhelimeter bestaat in principe uit een meetelement dat gevoelig is voor zonnestraling en dat aan de onderkant van een buis zit. De bovenkant van de buis heeft een kleine ronde opening waardoor de directe straling binnenvalt. Om de directe straling van de zon te meten moet de pyrhelimeter continu op de zon gericht worden. Daarom wordt deze op een zonnevolger geplaatst welke later nog in dit hoofdstuk behandeld zal worden. De openingshoek van de pyrhelimeterbuis is groter dan de hoek waaronder wij de diameter van de zon zien ( $0,5^\circ$ ). De pyrhelimeter meet dan ook nog een deel van de hemelstraling vlak rondom de zon, de *circumsolaire* straling genoemd. De openingshoek van de pyrhelimeter moet zo klein zijn dat er slechts weinig circumsolaire straling wordt gemeten, maar ook weer niet te klein, omdat het dan moeilijk is de meter precies op de zon te richten. Voor moderne pyrhelimeters wordt een cirkelvormige opening met een openingshoek van  $5^\circ$  aanbevolen.

De meetfout van een pyrhelimeter kan veroorzaakt worden door drie soorten foutenbronnen.

- sneeuw, regen, vuil op de opening
- zonzichtfout: de pyrhelimeter is niet goed op de zon gericht. Deze fout is afkomstig van de zonnevolger.

- instrumentele fouten, afhankelijk van het type instrument, van de ouderdom van het meetoppervlak (verminderde absorptie) en van het onderhoud (verlopen ijkfactor).
- te grote variaties in de behuizingstemperatuur

De voor dit onderzoek gebruikte directe zonnestralingmeter is een CH1 pyrheliometer. Het element van een pyrheliometer bestaat uit twee gelijke secties van een thermozuil. De ene helft van de lassen is gezwart, ligt in de as van de pyrheliometerbuis en wordt blootgesteld aan de directe zonnestraling (de "warme" lassen). De andere helft ligt aan de rand van de buis en is in goed warmtecontact met het huis, zodat die ongeveer de temperatuur van de buitenlucht houdt (de "koude lassen"). Hierdoor ontstaat er een elektrische spanning over de thermozuil, die evenredig is met het temperatuurverschil tussen warme en koude lassen en is daarmee een maat voor de energie van de invallende zonnestraling. De door ons gebruikte CH1 pyrheliometer bevat geen correctieschakeling voor eventuele grote fluctuaties van de temperatuur van het huis. Wel is er een PT100 element aanwezig om deze temperatuur bij te houden, in eerste instantie is er geen gebruik gemaakt van deze mogelijkheid. Uit specificaties blijkt dat afwijkingen ten gevolge van verandering van de buitentemperatuur ten opzichte van 20° Celcius op kan lopen tot 1,5%.

De gevoeligheid van de CH1 pyrheliometer bedraagt 10.88  $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$ . Spectraal meet de CH1 van 0.2-4 micrometer, dit loopt dus van UV (het kortgolfige gebied) tot NIR. De openingshoek bedraagt de door WMO aanbevolen 5° ( $\pm 0.2^\circ$ ), terwijl de openingshoek van de zon 0.5° bedraagt. Volgens de voorschriften is het nog mogelijk dat er 0.75° afgeweken mag worden t.o.v. van de positie van de zon. De gebruikte zonnevolger moet aan deze nauwkeurigheid voldoen. De nauwkeurigheid van de CH1-pyrheliometer ligt in de orde grootte van 1 a 2%, onder de voorwaarde dat de zon goed gevolgd wordt en de calibratie correct is.

### **5.1.2 Pyranometer.**

De Pyranometer wordt gebruikt voor continu-metingen van diverse stralingscomponenten. Zo wordt de totale kortgolfige straling van de hele hemelkoepel op een horizontaal vlak gemeten met een pyranometer. Dit is de globale straling, welke de som is van de directe straling en de diffuse straling. De door het KNMI gebruikte globale stralingmeters zijn de CM11 pyranometers van het fabrikaat Kipp en Zonen (Delft). Ook bij een CM11 wordt een thermozuil met "koude" en "warme" lassen gebruikt.

Fig 5.1.2.1 Kipp CM11, met ventilator aan de zijkant



De pyranometer moet onder alle weersomstandigheden kunnen werken. Het gevoelige meetoppervlak is daarom afgeschermd met twee halve bolletjes (Fig. 5.1.2.1). Een enkele halve glazen bol beschermt de thermozuil tegen invloeden van het weer, zoals temperatuurwisselingen, wind en neerslag. Doordat zo'n bol warmtestraling absorbeert krijgt de bol een andere temperatuur als het huis, dit geeft aanleiding tot langgolvlige stralingstransport binnen de bol. Om dat effect zo klein mogelijk te houden is een tweede halve bol binnen de eerste aangebracht, waarvan de temperatuur zoveel mogelijk gelijk wordt gehouden aan de temperatuur van het huis. Een nadeel van halve bollen is dat er zich dauw en stof kan afzetten en in de winter rijp of ijs. Ook blijven regendruppels er geruime tijd op liggen. Het is dus van groot belang dat deze bollen constant geventileerd worden.

Doordat de halve bollen van glas zijn gemaakt laten ze het spectraalgebied van 305-2800 nm door, dit is vrijwel het hele spectrum van de zon. Het apparaat werkt dus alleen wanneer de zon boven de horizon is. De gevoeligheid ligt op  $4 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ , en volgens de specificaties wordt er een nauwkeurigheid gehaald van 1%. De openingshoek bedraagt  $160^\circ$ .

Naast dat de CM11 waterpas moet staan, heeft men afgesproken dat, i.v.m de oriëntatie van de thermozuil de uitgang van de signaalkabel naar het noorden gericht moet worden. Dit om problemen te voorkomen. Met een CM11 op een bewegende zonnevolger is dit niet

mogelijk. Dit kan een azimuth fout geven welke in de data zichtbaar kan zijn.

### 5.1.3 Diffusometer.

In de atmosfeer zijn verstrooiende deeltjes in alle afmetingen van gasatomen tot hagelstenen aanwezig. Door de aanwezigheid van deze deeltjes wordt de directe straling uit de richting van de zon verstrooid en verzwakt. Een deel van het verstrooide licht komt ook op het aardoppervlak terecht en wordt diffuse straling genoemd. In principe is een diffusometer eenzelfde meter als de globale stralingsmeter CM11 Pyranometer alleen wordt de diffusometer afgeschermd tegen de directe zonnestraling. Dit afschermen kan op 2 manieren:

De meest gebruikelijke manier is om over de CM11 Pyranometer een schaduwband aan te brengen (Fig. 5.1.3.1), die evenwijdig is met de baan van de zon langs de hemelkoepel. De hoogte van de zonneband is met de hand instelbaar wat in principe dagelijks gedaan moet worden om de zon ook qua hoogte goed langs de zonneband te laten lopen. Dit is een relatief goedkope oplossing. Een nadeel van deze methode is dat de zonneband een deel van de diffuse straling afschermt. Als dit een constante hoeveelheid was dan is dat makkelijk te corrigeren. Maar deze afwijking is, zoals uit een algoritme in paragraaf 6.3 zal blijken, afhankelijk van de zonshoogte, turbiditeit en vooral van de bedekkingsgraad. Voor de door ons gebruikte diffusometer met schaduwband blijkt uit dit algoritme dat er afwijkingen van 5-18% gemaakt kunnen worden.

De stralingsintensiteit over de hemelkoepel is sterk inhomogeen in half bewolkte situaties. Ook kan er dan extra straling door reflecties aan de wolken terecht komen op de CM11 (Fig. 5.1.3.2).

Een bolletje (Fig. 5.1.3.3) zal dan niet in de weg staan, terwijl de schaduwband bij deze inhomogene stralingssituaties dan voor een deel de diffuse straling kan afschermen. In deze regelmatig voorkomende situatie worden er met de schaduwband de grootste fouten gemaakt. Ook is het zo dat in deze situatie de gemaakte fout zeer snel in de tijd kan variëren. Het is dan uiterst moeilijk om voor deze situaties te corrigeren.

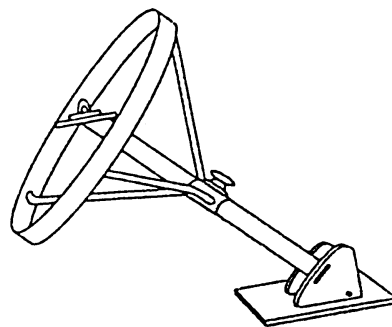


Fig. 5.1.3.1. CM11 met schaduwband.



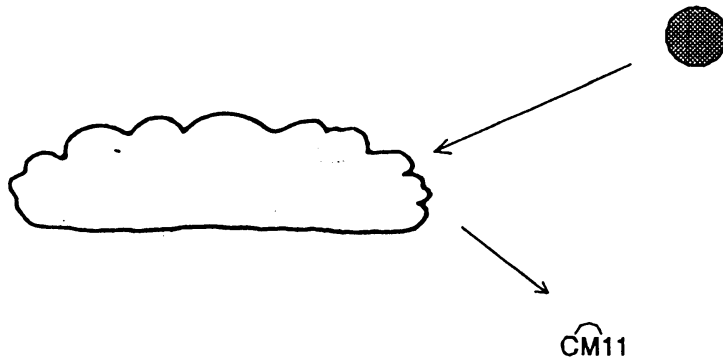


Fig. 5.1.3.2

Een meer bevredigende oplossing is een kleine ondoorschijnende schijf of bol op een dunne arm, die door een mechanisme de bewegingen van de zon volgt en de CM11 tegen de directe straling afschermt (Fig. 5.1.3.3). De juiste instelling van het geheel vereist echter veel aandacht en bewaking.

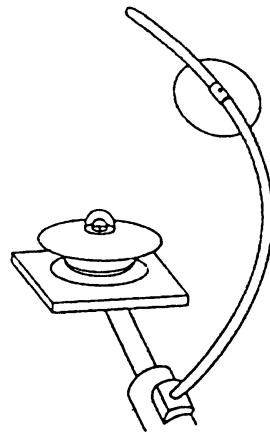


Fig. 5.1.3.3 CM11 met schaduwscijf

#### 5.1.4 Pyrgeometer.

De langgolvlige stralingsmeter (Pyrgeometer, radiometer) meet straling in het infrarode gebied. De gebruikte stralingsmeter is van die van de fabrikant Eppley uit de USA, deze lijkt in uitvoering veel op de CM-11 van Kipp. Deze stralingsmeter heeft ook een cirkelvormige thermozuil, waarvan de lussen in het centrum zijn gezwart. Een voordeel van dit instrument is dat de beide halve bolletjes gemakkelijk vervangen kunnen worden door één bol van filtermateriaal. Dit kan gekleurd glas zijn, maar ook een filter dat alleen langgolvlige straling (4-40 micrometer) doorlaat. Een voorbeeld daarvan is een silicon bol met een opgedampte interferentiefilter om de kortgolvlige straling te reflecteren. Zo'n stralingsmeter meet dan alleen de langgolvlige (infrarode) straling van de atmosfeergassen en van de eventueel aanwezige bewolking. Deze stralingsmeter wordt dan pyrgeometer genoemd.

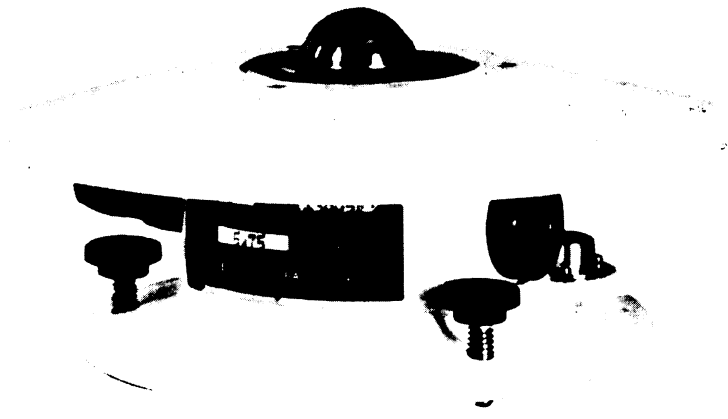


Fig. 5.1.4.1 pyrgeometer

Voor dit onderzoek is alleen de inkomende langgolvlige straling van belang. Tot nu toe worden de pyrgeometers niet beschermd tegen de directe zonnestraling. Ook al beweren de specificaties dat dit niet het geval is, uit recent onderzoek is gebleken dat het meten van de langgolvlige inkomende straling nauwkeuriger kan door deze af te schermen tegen de directe zonnestraling. Door deze afscherming warmt het afschermkapje minder op waardoor deze minder infrarode straling afgeeft. Voor dit afschermen is ook een bolletje nodig dat de pyrgeometer constant afschermt tegen de directe zonnestraling. De Eppley pyrgeometer wordt ook op de zonnevolger geplaatst.

Ook een pyrgeometer moet geventileerd worden tegen weersinvloeden. De gebruikte Eppley pyrgeometer wordt geleverd met een ventilator welke onder de meter is gemonteerd in plaats van ernaast. Dit is een voordeel omdat op de gebruikte zonnevolger maar beperkt plaats is. Ook bevat de Epply een ingebouwde compensatieschakeling voor fluctuaties in de buitentemperatuur, en dus fluctuaties in de behuizingstemperatuur.

De gevoeligheid van de gebruikte Eppley bedraagt  $3,56 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ , de nauwkeurigheid ligt op 1 a 2 %. Afwijkingen t.o.v de routine metingen zullen in principe alleen bij zonnige situaties tot uiting komen. Daarbij komt ook nog dat de calibratie bij langgolvlige stralingsmeters erg moeilijk is, offset verschillen zullen dan ook mogelijk zijn.

## 5.2 Zonneschijnmeter.

Van de zonneschijnmeter is bij dit onderzoek geen gebruik gemaakt, maar doordat tegenwoordig uit stralingsmetingen de zonneschijnduur bepaald wordt zal de werking van een zonneschijnautograaf ook vermeld worden.

Tientallen jaren werd de duur van zonneschijn bepaald met een Campbell-Stokes zonneschijnmeter (Fig. 5.2.1).

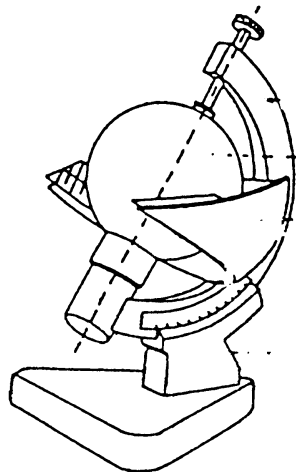


Fig. 5.2.1.

Dit instrument bestaat uit een glazen bol van 10 cm. diameter welke fungeert als brandglas. Deze bol is gecentreerd bevestigd in een bolvormige schaal. De opstelling is zo gemaakt dat de zonnestralen precies worden gefocuseerd op een strook papier die op de bolvormige schaal is geschoven. Wanneer de zon schijnt brandt die op de strook een spoor in welke voorzien is van een tijdsindeling. Het zal duidelijk zijn dat de zonnestralen een zekere energie moeten hebben voordat ze een brandspoor kunnen maken. De waarde varieert tussen 100 en 200 W/m<sup>2</sup>. Deze waarde is mede afhankelijk van het soort papier, de vochtigheid van het papier, en de vervuiling van het papier.

Aan het eind van de dag wordt de strook er af gehaald en wordt aan de hand van de lengte van het brandspoor afgelezen hoe lang de zon geschenen heeft.

De WMO heeft in september 1989 de Campbell-Stokes als standaard meetinstrument afgeschaft en een meer fysische definitie van de zonneschijnduur ingevoerd, namelijk de tijd waarover de directe straling gemeten - in een vlak loodrecht op de richting van de zon - groter is dan 120 W/m<sup>2</sup>.

Daar directe stralingsmetingen relatief veel aandacht vergen, werd op het KNMI besloten om uit de al aanwezige en weinig arbeidsintensieve globale stralingsmetingen de zonneschijn te berekenen (Slob en Monna, 1991). De ontwikkelde algoritmen hiervoor bleken de zonneschijnduur minstens even nauwkeurig te bepalen als metingen met de Campbell-Stokes meter.

### 5.3 Zonnevolger.

Een zonnevolger is een apparaat dat een object kan volgen welke zich langs de hemelkoepel beweegt. De voor dit onderzoek gebruikte zonnevolger is de 2AP TRACKER van de firma SCI-TEC. (Fig 5.3.1). Een voordeel van deze zonnevolger boven andere zonnevolgers is de mogelijkheid om hierop meerdere instrumenten te plaatsen welke eventueel afgeschermd kunnen worden tegen de directe zonnestraling. Ook kunnen er meerdere instrumenten gemonteerd worden om de directe zonnestraling te meten voor welke doeleinden dan ook. Bij de 2AP TRACKER wordt een software programma (bijlage I) geleverd waarmee het mogelijk is om de zonnevolger aan te sturen. Voor het volgen van de zon zijn de volgende parameters van belang:

- plaatscoördinaten op aarde
- utc tijd
- dagnummer

Met deze gegevens kan het softwareprogramma de baan van de zon berekenen voor een aantal dagen en de zonnevolger deze laten volgen. Wel is het van belang dat het geheel waterpas staat.

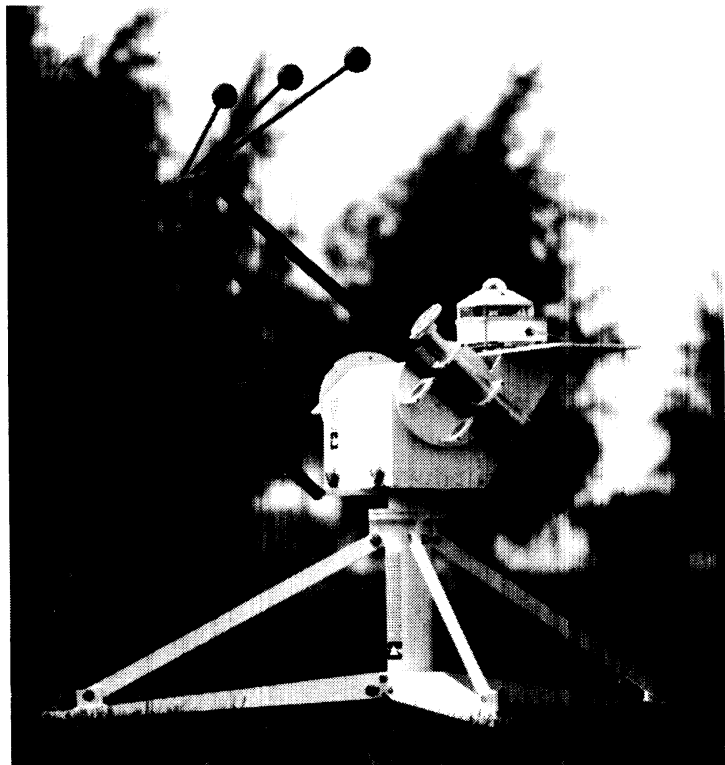


Fig. 5.3.1 2AP Tracker.

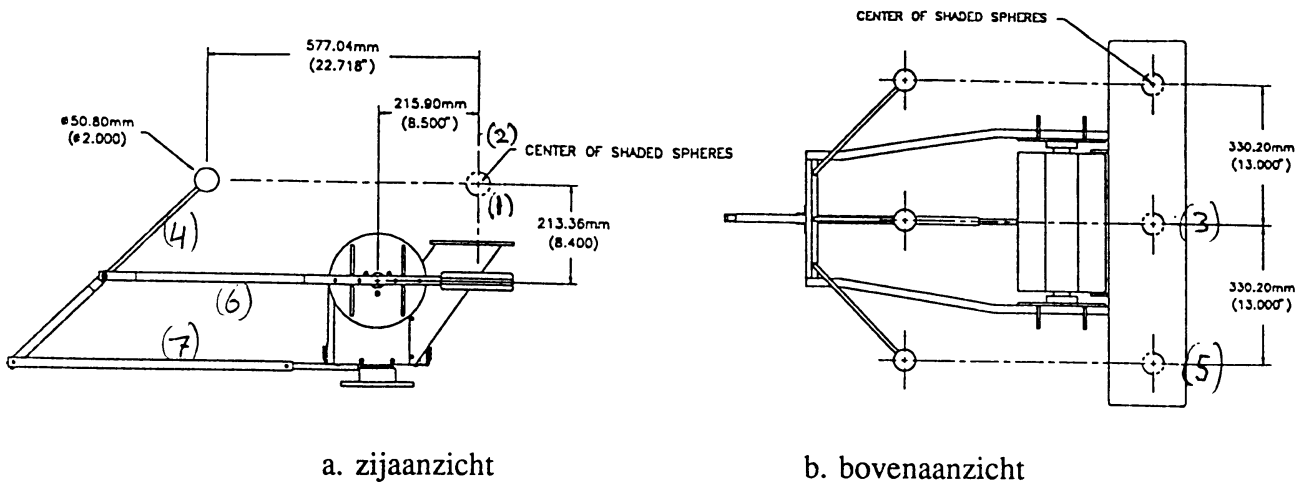


Fig. 5.3.2 Instrument layout.

In Fig. 5.3.2.a. is te zien dat de bolletjes van de zonnevolger constant een plek afschermen boven een plaat waarop stralingsmeters geplaatst kunnen worden (1). De meetelementen van de stralingsapparatuur worden op deze manier constant afgeschermd van de directe zonnestrallen. De bolletjes geven een schaduwvlek met een gezichtshoek van  $5^\circ$  op de plaat van de zonnevolger, dit is gelijk aan de openingshoek van de directe stralingsmeter (paragraaf 5.1.1). Dit betekent dat er bij de directe stralingsmetingen evenveel circumsolaire straling wordt meegenomen als dat er bij de diffuse stralingsmetingen met een bolletje wordt tegengehouden.

Door ruimtegebrek op de zonnevolger was het handig dat er bij de firma Eppley een langgolvlige stralingsmeter aanwezig was welke een ventilator onder zich had in plaats van ernaast. Maar hierdoor voldeed de meter niet meer aan de afmetingen van de zonnevolger en kwam het meetelement boven de schaduwvlek van het schaduwbolletje terecht (Fig. 5.3.2.a.). De arm van het bolletje (4) werd verlengd en de Eppley (3) werd naar achteren verplaatst zodat de schaduwvlek weer het meetelement bedekt. Dit is namelijk mogelijk omdat stang (6) en (7) altijd evenwijdig t.o.v. elkaar blijven zodat het mogelijk is om bij verlenging van arm (4) uit te rekenen waar dan de schaduwvlek (1) valt. De Eppley (3) staat door zijn hoogte een beetje in het gezichtsveld van de CM11 (5), de hoek is  $8^\circ$ . Doordat de intensiteitsverdeling van de straling met een cosinusfunctie afneemt is dit niet erg van invloed op de metingen met de CM11. Ook het feit dat de openingshoek van de CM11  $160^\circ$  is geeft aan dat de Eppley waarschijnlijk niet in de weg staat. Voor de zekerheid zijn er toch metingen gedaan waarbij de zonnevolger horizontaal stond om zo een vergelijking te maken met de globale stralingsmetingen die operationeel worden gedaan en de globale stralingsmetingen die op dat moment dan op de zonnevolger worden bepaald. In paragraaf 7.1 zijn de resultaten weergegeven.

Het principe van de zonnevolger is eenvoudig. In zijn referentiestand (Home stand) staat het apparaat naar het noorden gericht. D.m.v. een uitlijnprocedure is het mogelijk om de zonnevolger op de zon te richten. Het apparaat bepaalt dan het aantal stappen tot zijn referentiepositie welke beide stappenmotoren (azimuth, zenith) hebben afgelegd. Met deze

gegevens kan het softwareprogramma de baan van de zon voor een bepaald aantal dagen uitrekenen. Deze gegevens worden dan naar het interne geheugen van de zonnevolger gestuurd zodat het mogelijk is om de computer uit te schakelen terwijl de zonnevolger gewoon zijn werk doet. De zonnevolger bepaalt m.b.v. zijn eigen interne klok en het berekende pad waar de zon staat. Deze interne klok is in principe een computerklok welke temperatuur gevoelig is en wat verloop toont. Aanbevolen wordt om de klok niet meer dan 10 seconden te laten verlopen (10 sec.  $\Delta$  0.04°).

Daarom is een DCF ontvanger aangeschaft welke de precieze tijd vanuit Duitsland doorgeeft. Hiermee kan de computerklok steeds bijgesteld worden.

Controle van de gevolgde positie is in principe goed mogelijk omdat moet gelden:

$$\text{Globaal (G)} = \text{Direkt (B)} + \text{Diffuus (D)}$$

Maar toch moeten we daar mee oppassen, want bij afwijkende posities t.o.v. zon neemt de directe straling af en de diffuse straling toe. In principe zouden deze elkaar kunnen opheffen en zo het sommetje  $G = B + D$  nog rond kunnen maken.

In principe zou er op een of andere manier een automatische controle aanwezig moeten zijn welke controleert of de zonnevolger goed zijn werk heeft gedaan. Dit zou in de vorm van een stappencontrole kunnen, het programma berekent in principe hoeveel stappen de stappenmotoren die dag moeten maken. Aan het eind van de dag zou er gecontroleerd kunnen worden of deze hoeveelheid gehaald is. Een andere mogelijkheid is om een zonnensensor te plaatsen welke uit 4 naast elkaar gelegen componenten bestaat. Dit geheel zou opgenomen kunnen worden in een brugschakeling. Als de zonnevolger uit positie geraakt dan detecteren de 4 sensoren geen gelijk signaal meer. De brugschakeling is dan uit positie en geeft een spanning af. Doordat er 4 sensoren zijn is het mogelijk om en azimuth en zenith fouten te bepalen. Dit foutsignaal zou in principe gelijk gebruikt kunnen worden om de zonnevolger bij te sturen. Een nadeel is echter dat er in sommige situaties zich intensere stralingsbronnen aan de hemel bevinden dan de zon (b.v. reflecties aan de rand van een wolk). De zonnevolger zou dan geheel verkeerd gericht worden. Wat dan natuurlijk wel mogelijk is, is het inbouwen van een begrenzing. Als er bijvoorbeeld meer dan een graad gecorrigeerd moet worden dan is het waarschijnlijk dat deze correctie onterecht is. De correctie zal dan achterwege gelaten moeten worden. Ook is het mogelijk om deze schakeling passief te gebruiken. Het foutsignaal wordt dan naar een file weggeschreven, achteraf is dan de controle mogelijk.

## 5.4 Datalogger.

Lange tijd werden de stralingsmetingen opgeslagen in de vorm van uursommen. Moderne inzameltechnieken maken echter registratie met een hogere tijdoplossing mogelijk. Met behulp hiervan is dan ook meer informatie uit de metingen te halen. Sinds 1986 worden de globale en diffuse (met zonneband) stralingsmetingen om de 10 minuten opgeslagen met een sample-tijd van 12 seconden. Met behulp van een datalogger worden vervolgens 10-minuutgemiddelden bepaald en de in hetzelfde 10-minuutvlak opgetreden maximum- en minimumwaarden opgeslagen. Tegelijkertijd worden de directe (B), diffuse (D, met bolletje) en inkomende langgolvlige straling gemeten (met en zonder bolletje). Het tegelijk meten van G, B en D maakt controle op de juistheid van de meetgegevens eenvoudig, omdat immers moet gelden:  $G = B + D$ . Met de 10-minuutwaarden is het weersverloop goed te volgen.

Wel is het van groot belang dat de datalogger voor de routinemetingen en de datalogger voor de zonnevolgermetingen dezelfde tijd hebben. Zouden ze 1 a 2 minuten verschillen dan bereken je, vooral bij grote signaalfuctuaties, grote verschillen in de gemiddelden per 10-minuutwaarden. Bij een verschil van 1.5 min. kan deze oplopen tot meer dan 10%.

De stralingsdata op de zonnevolger werden opgeslagen op de 21X Micrologger van de firma Campbell, deze heeft een sampletijd van 1 seconde. Deze is vrij eenvoudig te programmeren met betrekking tot de bovenstaande gegevens. De data werd steeds met een lab-top computer uitgelezen.

## 6 Gebruikte algoritmen.

### 6.1 Positie zon.

Om de zonnevolger de zon te laten volgen is een algoritme nodig dat de positie van de zon op elk moment van de dag kan bepalen. Het bij de zonnevolger geleverde softwarepakket gebruikt zo'n algoritme welke door WMO (World Meteorologic Organisation) wordt aanbevolen. Deze formule is nodig voor de interpretatie van de directe stralingsgegevens. De directe straling wordt gemeten op een vlak loodrecht op de zonnestralen, terwijl de andere stralingsmetingen worden gedaan op een horizontale vlak. Om deze componenten te vergelijken worden de directe stralingsmetingen vermenigvuldigd met  $\sin(h)$  waarbij  $h$  de zonshoogte is. De formule luidt als volgt (Spencer 1971):

$$\mathit{SIN}(h) = \mathit{SIN}(\delta) * \mathit{SIN}(\Phi) - \mathit{COS}(\delta) * \mathit{COS}(\Phi) * \mathit{COS}(t) \quad (1)$$

met:

$h$  = zonshoogte

$\delta$  = declinatie van de zon in radialen (zie (2))

$\Phi$  = geografische hoogte

$t$  = tijdhoek (zie (4))

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 \\ & - 0.399912 \mathit{COS}(\theta) + 0.070257 \mathit{SIN}(\theta) \\ & - 0.006758 \mathit{COS}(2\theta) + 0.000907 \mathit{SIN}(2\theta) \\ & - 0.002697 \mathit{COS}(3\theta) + 0.001480 \mathit{SIN}(3\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

met:



$$\theta = 2 \pi d_n / 365 \quad (3)$$

waar  $\theta$  in radialen en  $d_n$  is het dagnummer lopend van 0 op 1 januari tot 364 op 31 december (365 in schrikkeljaar).

Tijdhoeck kan gedefinieerd worden als:

$$t = \pi * (time + Eq) / 12 + \text{geografische breedtegraad} \quad (4)$$

met:

$$Eq = 0.000075$$

$$+ 0.001868 \cos(\theta) - 0.032077 \sin(\theta)$$

$$- 0.014615 \cos(2\theta) - 0.040849 \sin(2\theta) \quad (5)$$

Door formule (1) op de direkte data toe te passen is vergelijking met andere stralingsdata mogelijk. Wel moet in vergelijking (4) voor de tijd (time) 5 minuten eerder ingevuld worden, dit omdat er gewerkt wordt met gemiddelden van de afgelopen 10 minuten.

## 6.2 Inkomende straling aan de top van de atmosfeer.

In paragraaf 4.1 werd al vermeld dat de hoeveelheid zonnestraling die aan de top van de atmosfeer ( $S$ ) binnenvalt afhankelijk is van plaats en tijd. Om deze term te kunnen bepalen is ook een algoritme nodig, welke vooral nodig is bij turbiditeits-berekeningen (paragraaf 4.2).

$$S = S_0 * \frac{R_0^2}{R^2} * \sin(h) \quad (6)$$

met:

$h$  = zonshoogte

$S_0$  = zonneconstante =  $1367 \text{ Wm}^{-2}$

$R_0$  = gemiddelde afstand tussen zon en aarde

en:

$$\frac{R_0^2}{R^2} = 1.000110$$

$$+ 0.034221 \text{ COS}(\theta) + 0.001280 \text{ SIN}(\theta)$$

$$+ 0.000719 \text{ COS}(2\theta) + 0.000077 \text{ SIN}(2\theta) \quad (7)$$

### 6.3 Correctie formule schaduwband bij diffuse stralingsmetingen.

Het meten van de diffuse straling met een schaduwband is een goedkopere methode dan het meten van de diffuse straling met een zonnevolger systeem waarbij de meter met een bolletje wordt afgeschermd tegen de directe zonnestraling. Maar zoals eerder vermeld is neemt de schaduwband ook een gedeelte van de hemel en dus diffuse straling weg. Hoeveel dit gedeelte bedraagt is onderzocht door K. Dehne van de Duitse Weerdienst in het Meteorologische Observatorium in Hamburg (januari 1981 t/m oktober 1981). Het algoritme wat K. Dehne gevonden heeft om de zonneband metingen te corrigeren staat centraal in dit onderzoek en zal worden getoetst voor de metingen met de zonnevolger in Cabauw.

Er moet vermeld worden dat beide onderzoeken niet geheel volgens gelijke condities verlopen. Wel is de vorm van beide schaduwbanden gelijk (cylindrisch profiel), maar de afmetingen verschillen (Tabel 1).

**Tabel 1**

	Hamburg (1981)	Cabauw(1994)
Bandbreedte (b) :	5.0 cm.	5.4 cm.
Straal (r) :	29.5 cm.	28.0 cm.
b/r :	0.169	0.193
Schaduwhoek schaduwband :	9.6 °	11.0 °
Schaduwhoek bolletje/disk :	9.6 °	5 °

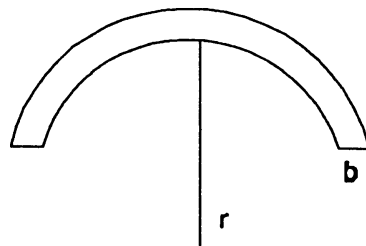


Fig. 6.3.1 afmetingen zonneband

In Tabel 1 is te zien dat de schaduwband in Cabauw grotere afmetingen heeft dan in Hamburg. Het is dus te verwachten dat de fouten gemaakt met de schaduwband in Cabauw groter zijn dan die met de schaduwband in Hamburg. Dat de schaduwband in Cabauw andere afmetingen heeft dan de schaduwband gebruikt in Hamburg is niet erg want in het algoritme zit ook een correctiefactor voor deze afmetingen (formule 11). Wel is van belang om te vermelden dat de toen gebruikte schaduwdisk (om de "echte" diffuse straling te meten) een schaduwhoek had van 9.6° welke hetzelfde is als de schaduwhoek van de schaduwband. De opstelling in Cabauw wijkt van die afmetingen af; de schaduwhoek van de schaduwband is 11°, die van het bolletje 5°. Deze afwijkende afmetingen zijn niet in de formule te stoppen. Ook van belang is het te weten dat de correctie formule bepaalt is aan de hand van uursommen van de gemeten straling, terwijl in Cabauw gemeten wordt met 10 minuut gemiddelden.

De correctie formule is bepaald in de vorm van een correctie factor  $f$  tussen de "echte" diffuse straling  $D$  en de diffuse straling bepaald met een zonneband  $D_{mR}$ :

$$f = \frac{D}{D_{mR}} \quad (8)$$

De empirisch bepaalde correctie formule  $f$  voor een CM11 - pyranometer luidt als volgt:

$$f = 1.161 - 0.122 * \left(\frac{D_{mR}}{G}\right)^3 + 0.0009 * \delta - \frac{0.0246}{\tau} \quad (9)$$

met:

$D_{mR}$  = diffuse straling gemeten met een CM11 en een zonneband

$G$  = globale straling gemeten met een CM11

$\delta$  = zonshoogte in graden =  $h$

en:

$$\tau = \ln [I_0 * \sin(h) / (G - D_{mR})] \quad (10)$$

$$I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$$

$I_0 * \sin(h) = S$  = aan de top van de atmosfeer binnenkomende straling op het horizontale vlak.

De gewichten van de 3 parameters  $(D_{mR}/G)^3$ ,  $\delta$  en  $\tau'$  op de totale correctie is voor formule 9 weergegeven in Fig 6.3.1.

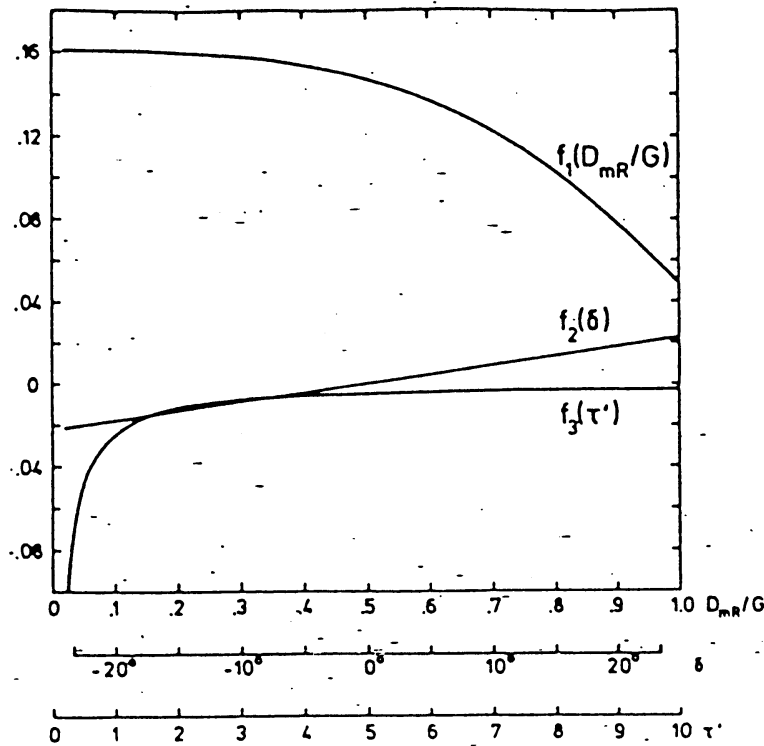


Fig. 6.3.1. Representatie van de drie termen in de correctieformule (9)  
 $f = 1 + f_1(D_{mR}/G) + f_2(\delta) + f_3(\tau')$ .

De  $(D_{M_r}/G)^3$  - term, welke het effect van de bedekkingsgraad weergeeft, bepaalt voor het grootste gedeelte de gemaakte fout. Bij vrijwel onbewolkt weer (lage verhouding  $D_{M_r}/G$ ) is het effect van de zonneband blijkbaar groter dan bij bewolkt weer. In Fig. 6.3.1 is te zien dat de gemaakte fout dan ongeveer 16% bedraagt. Voor de zonneband in Cabauw is dit meer (18%) omdat de afmetingen van de zonneband groter zijn.

De functie  $f_3(\tau')$  wordt volgens K. Dehne van belang bij lage bedekkingsgraad, deze term vertegenwoordigt het effect van de turbiditeit van de atmosfeer. In de figuur is ook te zien dat de zonshoogte  $h(= \delta)$  in de vorm van  $f_2(\delta)$  niet erg van invloed is. De gemaakte fout kan dus samen met de wisselende weersomstandigheden sterk variëren in de tijd.

Als referentie is de schaduwband van Hamburg gebruikt. Om de formule ook "geldig" te maken voor de schaduwband in Cabauw, is er een transformatiefunctie t.o.v de schaduwband uit Hamburg opgesteld:

$$f = f_r * [f_r - (f_r - 1) * \frac{K}{K_r}]^{-1} \quad (11)$$

De index "r" geeft aan dat het hierbij gaat om referentie schaduwband van Hamburg.

De factor K hangt af van de geometrie van de ring, voor een cilindrisch ringprofiel geldt:

$$K = \left(\frac{b}{r}\right) * \cos^3(\delta) \quad (12)$$

b = bandbreedte ring  
r = straal ring

Ook is het nog mogelijk om te corrigeren voor het op verschillende geografische hoogten opereren van de instrumenten. Maar aangezien de geografische hoogte tussen Hamburg (54°) en Cabauw (52°) niet zoveel verschilt is dit achterwege gelaten.

Bij het opstellen van deze formules door K. Dehne is verondersteld dat de correctiefactor f geschreven kan worden als een produkt van de "isotropische correctie formule" en de "anisotropische correctie formule" welke onafhankelijk is van geografische hoogte en zonneband.

De uiteindelijke gecorrigeerde waarde voor de diffuse straling ( $D_R$ ) wordt dan als volgt:

$$D_R = f_{an} * (f_{is} * D_{mR}) \quad (13)$$

met:

$D_{mR}$  = diffuse straling gemeten met de zonneband

$f_{is}$  = f (formule 5)

en:

$$f_{an} = 1.039 - 0.067 * \left(\frac{D_{mR}}{G}\right)^3 - 0.001 * \delta \quad (14)$$

Formule 13 is de uiteindelijke formule welke op de diffuse data, verkregen met een CM11 en een zonneband, wordt toegepast.

## 7 Meetresultaten.

### 7.1 Globale straling.

In paragraaf 5.3 werd al vermeld dat de Eppley in het gezichtsveld stond van de CM11, maar dat het effect hiervan beperkt leek. Dit wordt getest door de CM11 meting op de 2AP zonnevolger te vergelijken met de routine metingen van de globale straling welke ook gedaan worden met een CM11. De afstand tussen beide apparaten is 50 meter in Cabauw. Verder wordt de routine meting geventileerd, de CM11 op de zonnevolger niet. De resultaten zijn zichtbaar in figuur 7.1.1.

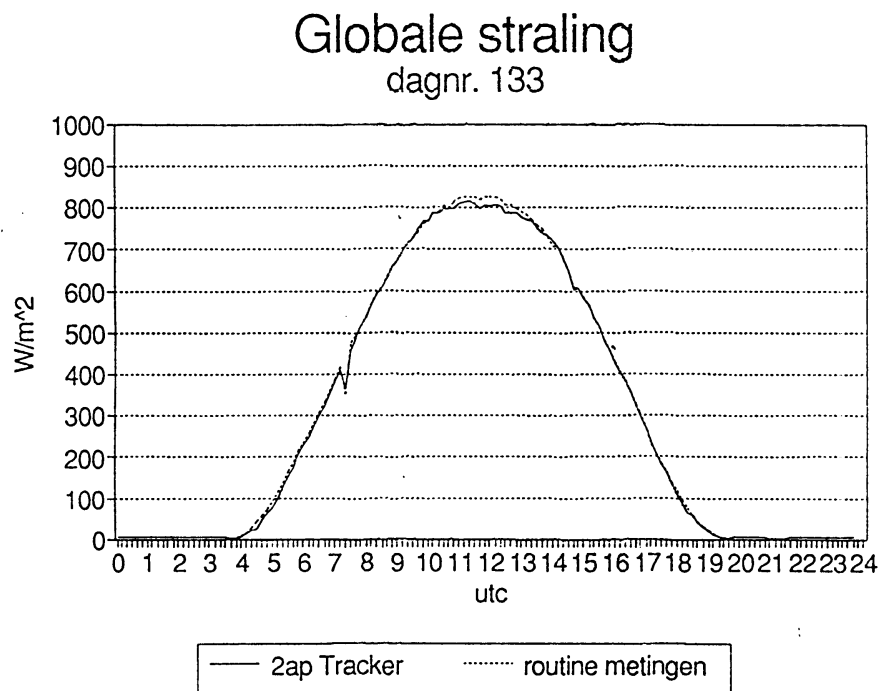


Fig. 7.1.1. Vergelijking globale straling gemeten op de zonnevolger met de routine metingen, 13-5-1994

De zonnevolger is in deze situatie zo geplaatst dat hij naar het oosten wijst. Dit omdat de Eppley dan het meest tussen de zon en de CM11 bevindt en dan de meeste straling wegneemt. Een nadeel van zo'n positie is dat de oriëntatie van de thermozuil van de CM11 dan niet meer naar het Noorden is gericht. Maar dit is in principe bij een draaiende zonnevolger ook niet te realiseren. In Fig. 7.1.1 is te zien dat er geringe afwijkingen rond het midden van de dag optreden. Doordat de Eppley tussen de CM11 en de zonnepositie staat zou nu de meeste straling weggenomen moeten worden. Bij een draaiende zonnevolger wordt deze positie nooit ingenomen zodat het effect minder zal zijn. Maar ook de veranderde oriëntatie van de CM11 zou van invloed kunnen zijn. Verder liggen de

nauwkeurigheden van de CM11's op 1%. Je vergelijkt nu 2 CM11's met elkaar wat betekent dat je te maken hebt met een foutenpercentage van 2%. De afwijkingen in figuur 7.1.1 zijn van de zelfde orde.

Te verwachten valt dat de Eppley geen wezenlijke invloed zal uitoefenen op de metingen met de CM11 op de zonnevolger.

## 7.2 Diffuse straling.

In deze paragraaf zullen de uitkomsten van de 3 manieren om de diffuse straling te bepalen getoond worden. Figuur 7.2.1 laat een dag (24-5-1994) zien met veel bewolking maar waar zo af en toe ook de zon doorbrak. Het aanwezig zijn van gebroken bewolking betekent dat variaties in de instraling groot zijn. Ook reflecties aan wolken zijn belangrijk (par. 5.1.3), dit betekent dat in deze situatie de grootse fouten met de schaduwband gemaakt kunnen worden.

De gemaakte fouten met een schaduwband liggen volgens deze figuur tussen de 10 en 20%. Wat ook moet worden vermeld is dat de afstand tussen de zonnevolger en de routine opstelling zo'n 50 meter bedraagt. Het komt dus ook wel eens voor dat de ene helft van het veld in de schaduw ligt en de andere helft beschenen wordt door de zon.

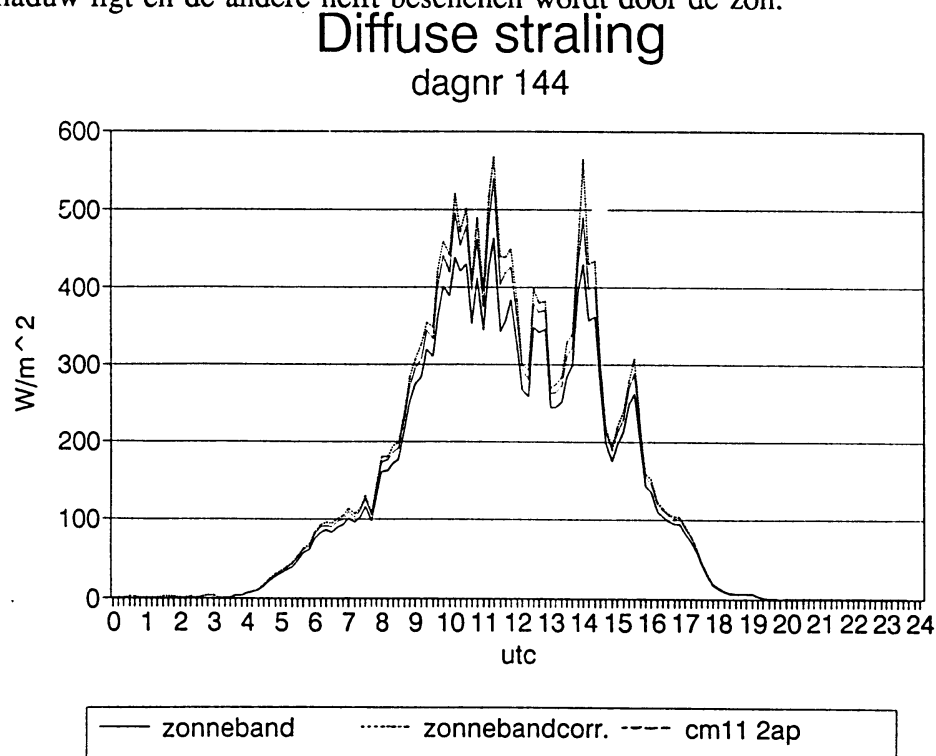


Fig. 7.2.1. Diffuse straling 24-5-1994, onder de metingen met een schaduwband, midden gecorrigeerd voor zonneband met formule van K. Dehne (Par. 6.3), boven de metingen gedaan op de zonnevolger



Om te controleren of de meting goed is verlopen moet de som van de diffuse en de directe straling de globale straling opleveren. In figuur 7.2.2 is deze in een grafiek weergegeven. De globale stralingsmetingen zijn de routine metingen in Cabauw. De andere lijn geeft de som van directe en diffuse stralingsmetingen op de zonnevolger aan. In deze figuur is te zien dat de metingen met de zonnevolger en de globale stralingsmetingen goede overlap vertonen. In eerste instantie valt nu te concluderen dat de zonnevolger goed heeft gefunctioneerd. Maar in paragraaf 5.3 is al vermeld dat hiermee uitgekeken moet worden, omdat bij foute positie de fouten in directe en diffuse metingen elkaar kunnen opheffen. In bijlage II is voor meerdere dagen de controle op de som globaal = direkt + diffuus weergegeven.

## Globale straling dagnr 144

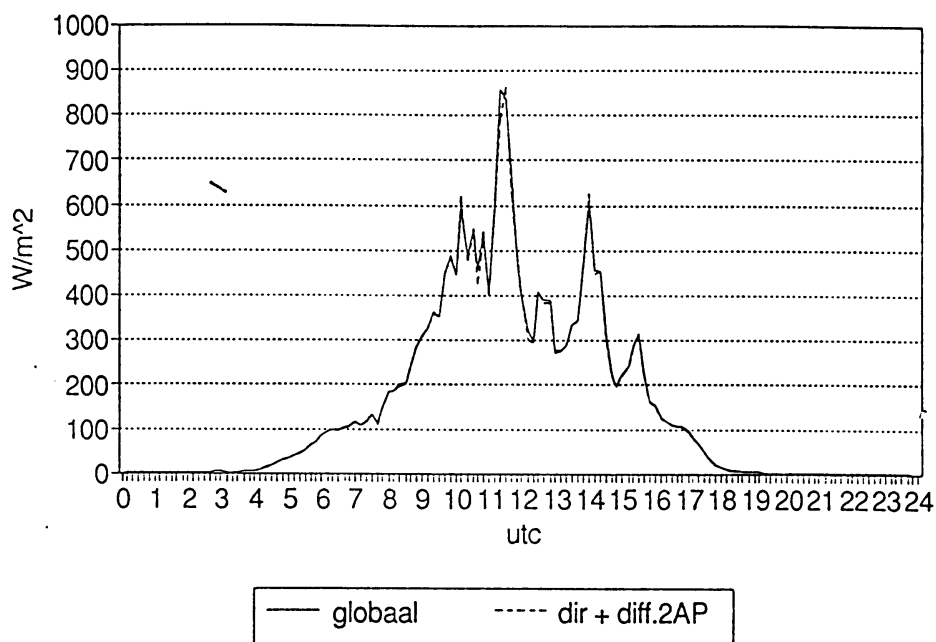


Fig. 7.2.2 Controle van som Globaal = direkt + diffuus, 24-5-1994

Volledigheidshalve zijn voor deze dag de directe stralingsgegevens weergegeven in Fig. 7.2.3.

## Direkte straling dagnr 144

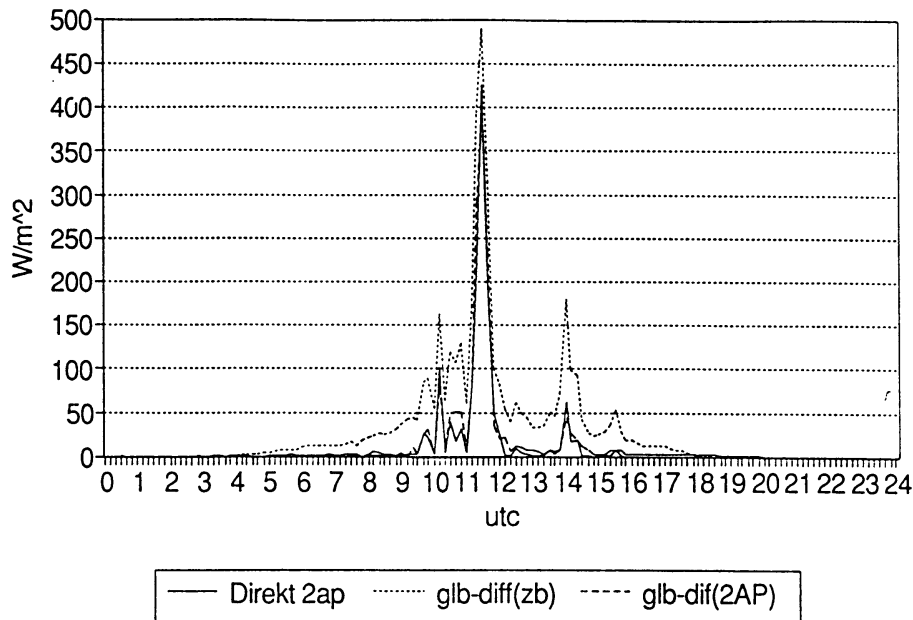


Fig. 7.2.3. Direkte straling vergeleken met globaal - diffuus (zonneband) en globaal - diffuus (2AP, bolletje)

In figuur 7.2.4 is de diffuse straling voor 1-6-1994 (dagnummer 152) weergegeven, dit was een vrij zonnige dag. Er is te zien dat op het zonnige gedeelte van de dag er een fout van ongeveer 15% met de schaduwband gemaakt wordt. Maar als rond 14 uur utc er bewolking binnenkomt en de diffuse straling stijgt, dan valt het foutenpercentage hoger uit. De gemaakte fout is dus afhankelijk van de hoeveelheid bewolking. Dit is logisch omdat dit het grootste gedeelte van de diffuse straling bepaalt.

De overlap tussen de diffuse straling gemeten met de zonnevolger en de gecorrigeerde diffuse metingen met een schaduwband is in deze stabiele situatie vrij goed. De afwijking tussen beide metingen ligt bij stabiele situaties in de orde van 5%. Bij wisselvallige stralingssituaties treden er soms grotere afwijkingen op tot zo'n 10%.

In figuur 7.2.5 is weer de controle van de globale straling weergegeven. De overlap wijkt hier wat af, de directe stralingsmeting lijkt hier de oorzaak van te zijn (Fig. 7.2.6).

Het te lage afgegeven signaal van de directe stralingsmeter kan misschien verklaard worden door het feit dat door het warme en zonnige weer de behuizingstemperatuur van de meter gestegen is. Dit heeft tot gevolg dat het temperatuurverschil tussen de "warme" lussen en "koude lussen" (Par. 5.1.1) afneemt, daarmee neemt de elektrische spanning over de thermozuil ook af. De meter zal dan een te lage waarde aangeven. Het is dus van belang om de behuizingstemperatuur in de toekomst in de gaten te houden. Ook vervuiling van het venster kan een oorzaak zijn.

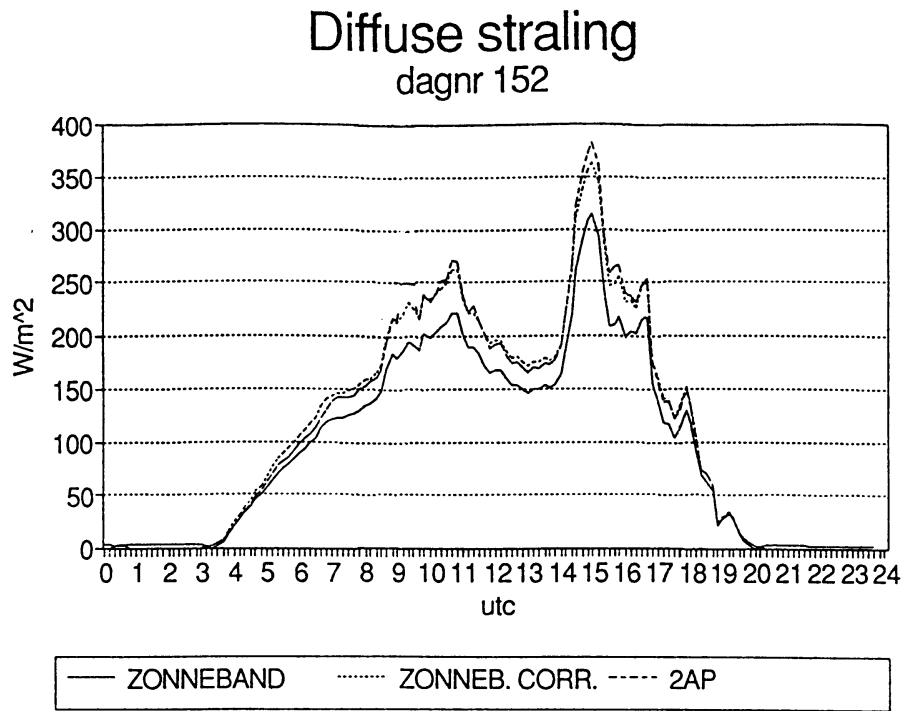


Fig. 7.2.4. Diffuse straling, 1-6-1994

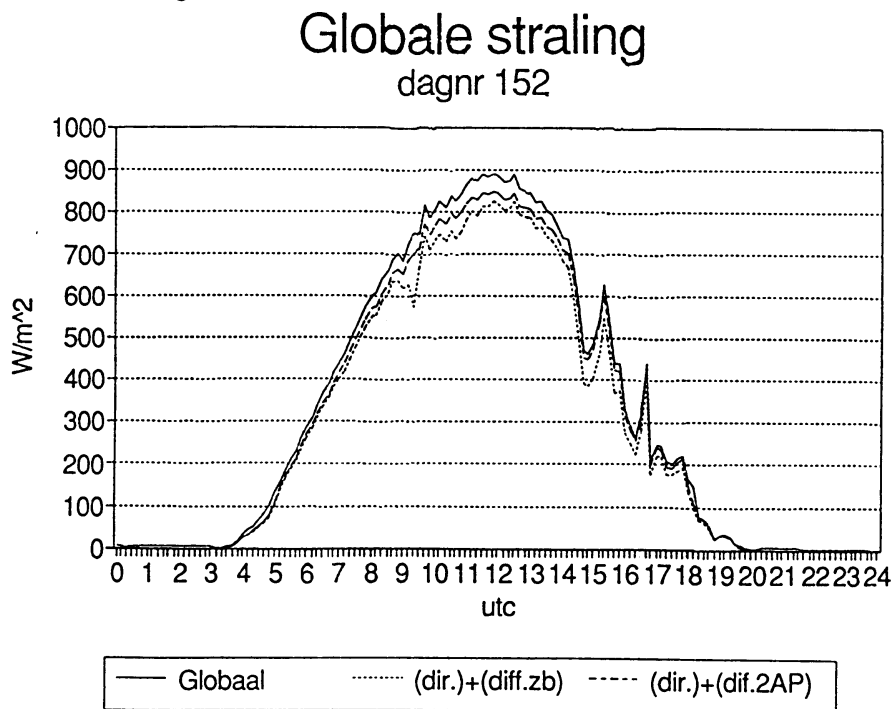


Fig. 7.2.5. Globale straling, 1-6-1994, onder: direkt + diffuus (schaduwband), midden: direkt + diffuus (zonnevolger), boven: de routine meting

## Direkte straling dagnr 152, 1-6-1994

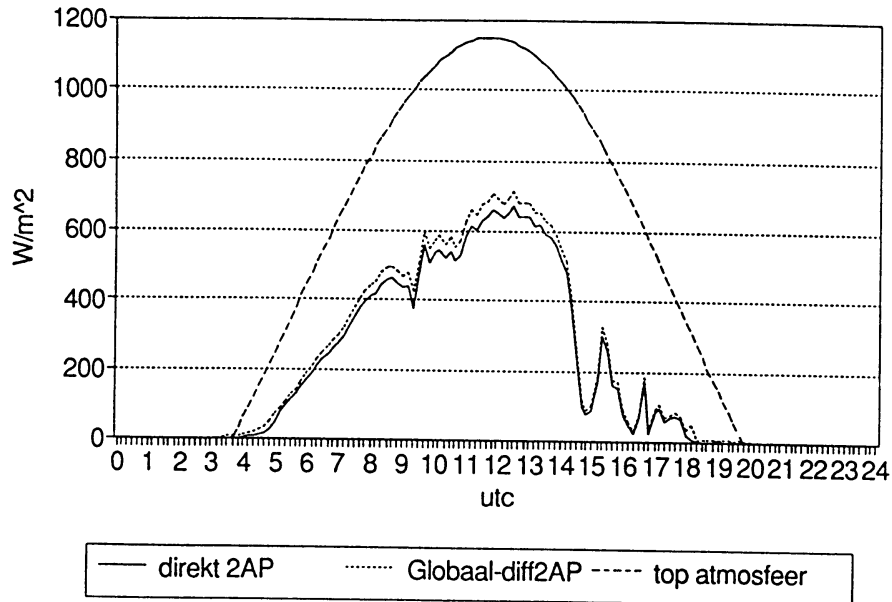


Fig. 7.2.6. Direkte straling, 1-6-1994

In paragraaf 4.2 is vermeld dat de turbiditeit (troebelheid) van de atmosfeer berekend kan worden door de gemeten direkte straling te delen door de aan de top van de atmosfeer binnenkomende straling ( $s$ ). Uit figuur 7.2.6 is te berekenen dat de turbiditeit voor deze dag ongeveer 2 bedraagt, deze lage waarde geeft aan dat de atmosfeer schoon is.

### 7.3 Inkomende langgolvlige straling.

In figuur 7.3.1 staan de langgolvlige metingen welke routine matig gedaan worden naast de langgolvlige metingen op de zonnevolger waarbij de meter m.b.v een bolletje afgeschermd word tegen de invloed van de direkte zonnestraling. Deze dag is weer de dag, 1-6-1994, waarbij het langtijdig zonnig blijft totdat er om 14 uur utc (Fig. 7.2.6) wolkenvelden binnendringen.

In paragraaf 4.3 was al verteld dat er 's nachts ook inkomende langgolvlige straling wordt gemeten welke afkomstig is van de gassen in de atmosfeer. In deze heldere nacht lag dit op zo'n 270 W/m<sup>2</sup>. Wel is te zien dat de routinemetingen constant een hoger waarde aangeven dan de metingen op de zonnevolger. Dit kan een offset-fout zijn, welke veroorzaakt is door slechte calibratie.

In Figuur 7.3.2 is het verschil tussen beide metingen geplot. Het eerste wat opvalt is de offset. Daarna is te zien dat het verschil tussen beide steeds toe neemt doordat de zonnestraling de routinemetingen steeds meer beïnvloeden en dit niet het geval is bij de metingen op de zonnevolger waarbij de meter afgeschermd wordt tegen deze direkte straling. Het kapje van de Eppley bij de routinemetingen warmt steeds verder op zodat het verschil steeds grote wordt. Dit totdat er om 14 uur utc bewolking binnenkomt (Fig. 7.2.6) waarbij deze opwarming niet meer plaats vindt en het kapje langzaam afkoelt. Het verschil tussen beide metingen neemt dan ook langzaam af.

De verschillen die optreden bij wel en niet afschermen van de direkte straling kan bij langdurige zonnenschijn oplopen tot zo'n 5%.

De nauwkeurigheid van beide meters ligt op 1 %, in totaal is er dan een foutenpercentage van 2%.

De direkte zonnestraling heeft dus invloed op de langgolvlige stralingsmetingen, om dit te onderstrepen staan in bijlage III 2 dezelfde grafieken als Fig. 7.3.1 en Fig. 7.3.2. Alleen worden beide metingen nu blootgesteld aan de direkte zonnestraling. Deze dag was ook een zonnige onbewolkte dag. In deze figuren is te zien dat het verschil tussen beide metingen alleen de offset-waarde bedraagt, er is geen tendens waar te nemen.

## Langgolvlige inkomende straling dagnr 152

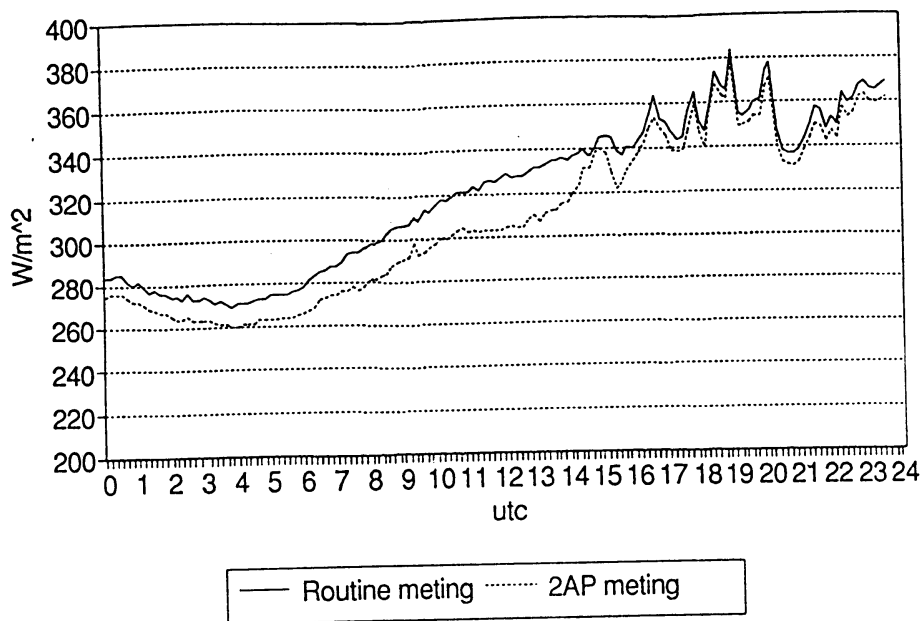


Fig. 7.3.1. Inkomende langgolvlige straling, 1-6-1994

## Langgolvlige inkomende straling dagnr 152

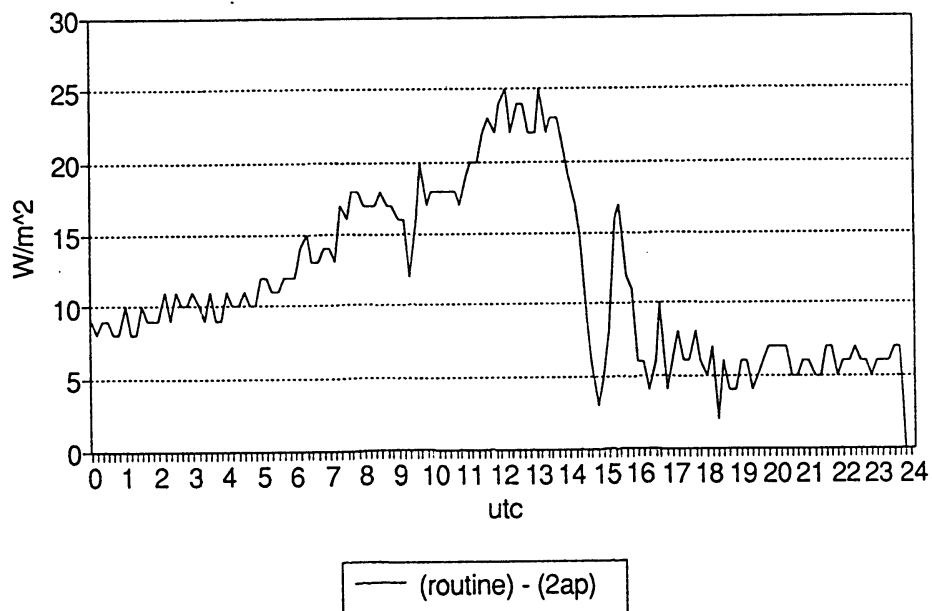


Fig. 7.3.2. Verschil langgolvlige metingen met (routine meting) en zonder (2AP meting) afscherming van de direkte zonnestraling, 1-6-1994

## 8 Conclusies.

- de gemaakte meetfout bij diffuse stralingsmetingen met een schaduwband hangt sterk af van de bedekkingsgraad van de hemel, de meetfout kan dan ook sterk variëren in de tijd
- de meetfout met de schaduwband in Cabauw ligt tussen de 5 en 18%
- de afwijking van de schaduwband correctie formule van K. Dehne t.o.v van diffuse stralingsmetingen met een bolletje ligt op ongeveer 5 %.
- de afwijking tussen het wel en niet afschermen van de directe zonnestraling bij langgolvlige stralingsmetingen kan oplopen tot zo'n 5%
- uit de correctheid van de som Globaal = direkt + diffuus valt niet meteen te concluderen dat de zonnevolger de zon goed gevolgd heeft. Afwijkingen in diffuse en directe stralingsmetingen kunnen elkaar opheffen.
- nadere analyse van de directe stralingsmetingen lijkt nodig i.v.m. mogelijke afwijkingen in de behuizingstemperatuur.

## 9 Literatuurlijst.

SCI-TEC Instruments (1993)

2AP (Two Axis Positioner) installation and operation manual. Doc# 12140073 Rev. C (v1r4) march 29/94. SCI-TEC Instruments Inc., Saskatoon, Sask., Canada.

Velds, C.A. (1992)

Zonnestraling in Nederland. - (Klimaat van Nederland; 3)

Uitg. Thieme Baarn i.s.m. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.

Dehne, K. (1984)

Diffuse solar radiation measured by the shade ring method improved by a correction formula.

In: Papers presented at the WMO technical conference on instruments and cost-effective meteorological observations TECEMO: Noordwijkerhout, Netherlands, 24-28 september 1984 (Instruments and observing methods report; 15); p. 263-267.

World Meteorological Organization, Geneva.

Slob W.H., en W.A.A. Monna (1991)

Bepaling van directe en diffuse straling en van zonneshijnduur uit 10-minuutwaarden van de globale straling.

Technische rapporten, TR-136; KNMI de Bilt.

Ulden, A.P. van (1992)

De stralingshuishouding van de aarde.

In: Energiespectrum. - Vol. 6; p. 211-216.

Vliet, J.G. van der (1994)

Meteorologische instrumenten.

KNMI publicatie 178, module A11. De Bilt.

(Intern document)

Frohlich, C., and J. London eds. (1986)

Revised instruction manual on radiation instruments and measurements; prepared by the Radiation Commission of IAMAP.

World Climate Research Programme publications series, 7.

World Meteorological Organization, Geneva.



## 10 Begrippenlijst.

Aerosolen	:	deeltjes in de atmosfeer welke de direkte zonnestraling verzwakken
Circumsolaire straling	:	hemelstraling vlak rondom de zon
Diffuse straling	:	straling die uit alle andere richtingen dan de richting van de zon op een horizontaal vlak gemeten wordt.
Direkte straling	:	straling die gemeten wordt in de richting van de zon
Globale straling horizontaal vlak	:	totale hoeveelheid straling die gemeten wordt op een
Schaduwband	:	band om een stralingsmeter welke deze meter afschermt van de direkte zonnestraling, dit om alleen de diffuse straling te meten.
Turbiditeit	:	de vermindering van de doorlatendheid van de atmosfeer voor zichtbare straling
Zonneconstante	:	constante hoeveelheid stralingsflux van de zon, gemeten op de gemiddelde afstand zon-aarde op een vlak loodrecht op de invallende straling: $1367 \text{ Wm}^{-2}$

# BIJLAGE I Aansturing zonnevolger m.b.v. software programma

File Setup Move Track Exit

Window on ZAP via Com1, 1200 baud (4), FED On  
Universal Date and Time 1993 356 14:22:01

	Azimuth	Zenith
Current Position (degrees):	35.8349	41.8349
Max Angular Speed (deg/sec):	3.24	3.24
Amount of Path Used (%):	0	0

Instrument Status accepting instructions

Most Recent Command/Reply:

Instrument Temperature (deg C): 31

Serial Number: 10001

Latitude (deg North): 52.108

Longitude (deg East): -106.7

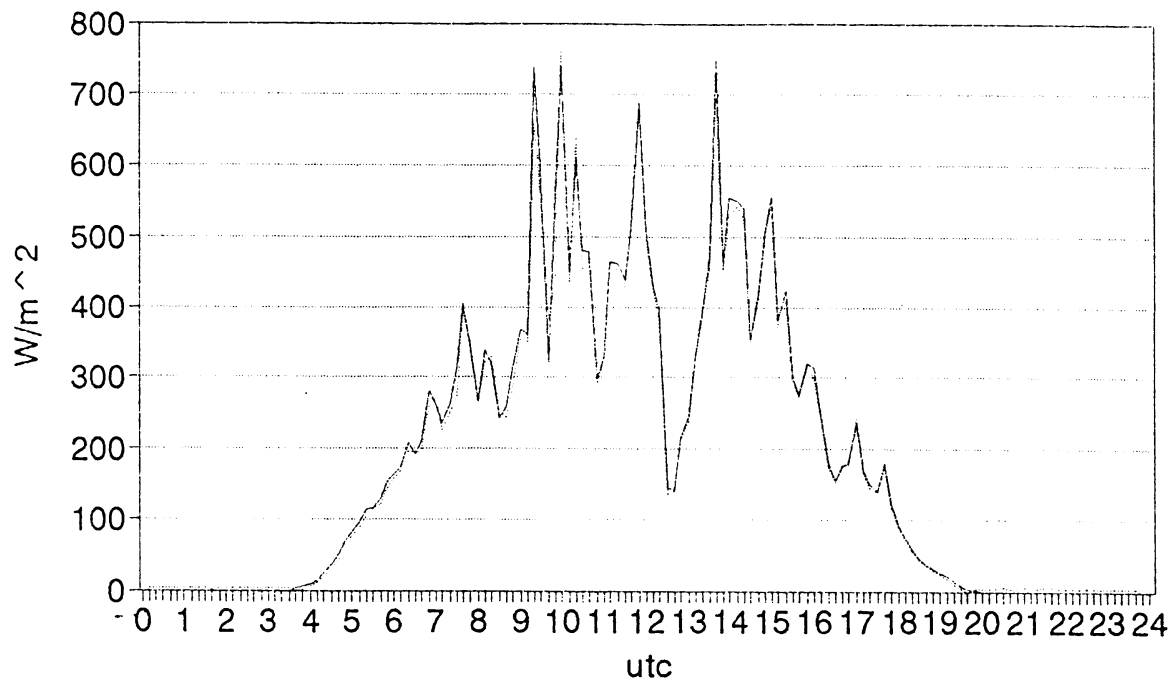
Mean Atmospheric Pressure (mBars): 950

F10 Menu Alt-X Exit

## BIJLAGE II Controle som Globaal = direkt + diffuus

- globaal : routine metingen van globale straling
- dir+diff.2AP : direkte + diffuse straling(bolletje op 2AP zonnevolger)

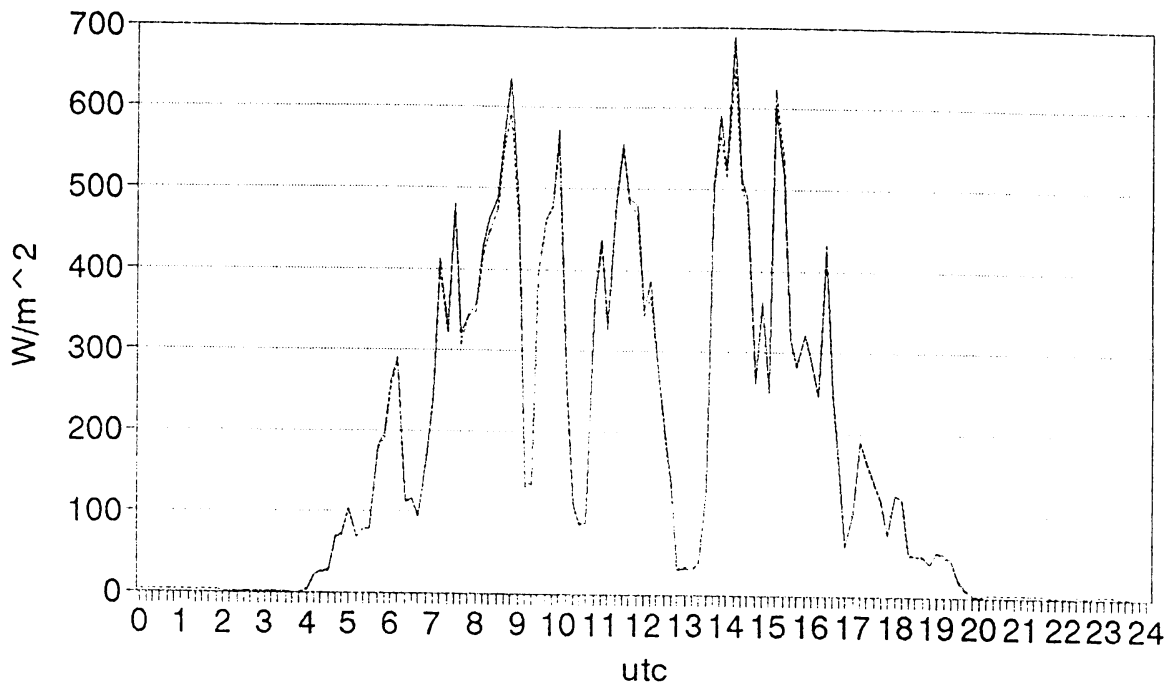
### Globale straling dagnr 139, 19-5-1994



— routine      - - - dir+diff.2AP

# Globale straling

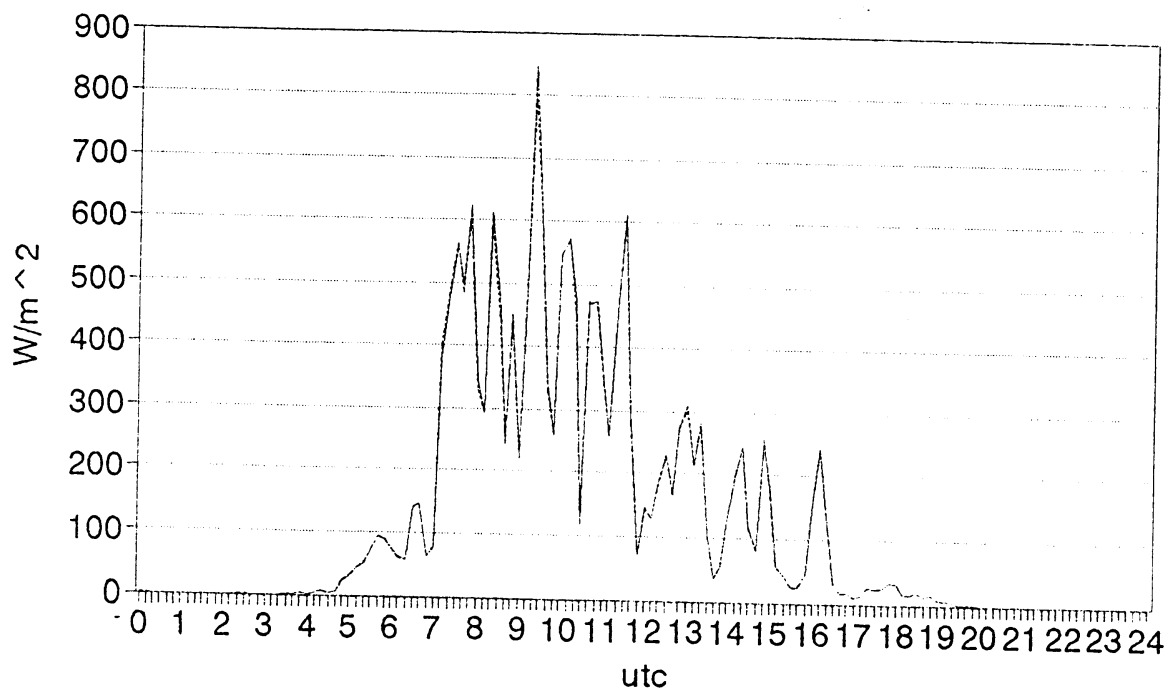
dagnr 154, 3-6-1994



— globaal      ..... dir. + diff.2AP

# Globale straling

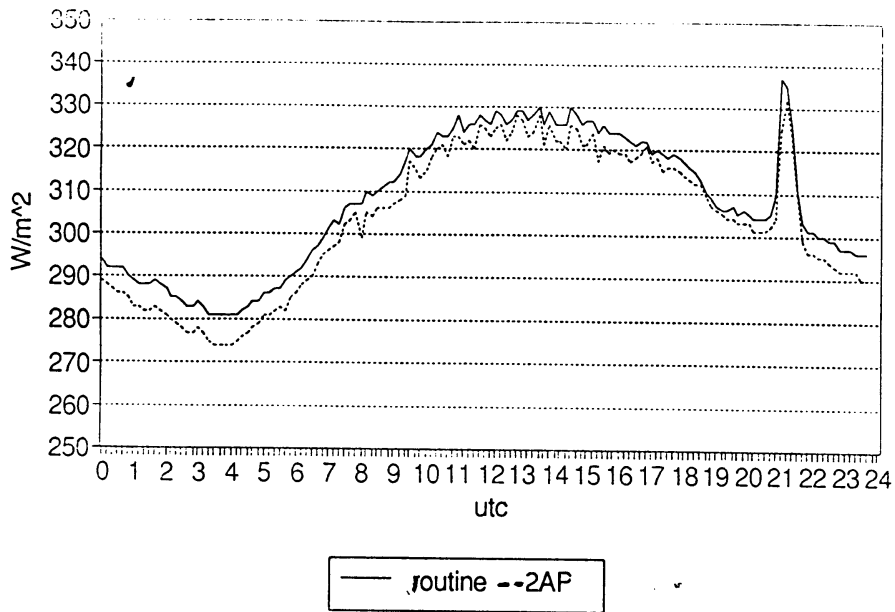
dagnr 155, 4-6-1994



— globaal      ..... dir. + diff.2AP

BIJLAGE III langgolvige straling, beide meters niet afgedekt tegen de directe straling

Inkomende langgolvige straling  
dagnr 133, 13-5-1994



Inkomende langgolvige straling  
dagnr 133, 13-5-1994

