

Nauwkeuriger nettostraling meten

M.K. van der Molen

W. Kohsiek



Technisch rapport; TR-177

De Bilt, 1995

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

(na 10-10-'95
tel. +31(0)30-22 06 911
fax +31(0)30-22 10 407)

Stageverslag LU Wageningen

UDC: 551.501.721
551.508.21
ISSN: 0169-1708
ISBN: 90-369-2080-9

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

Nauwkeuriger nettostraling meten

M.K. van der Molen, W. Kohsiek

Dit verslag beschrijft het werk dat is verricht in het kader van een stage van M.K. van der Molen bij het KNMI te De Bilt voor de studie Meteorologie aan de Landbouw Universiteit Wageningen. De stage is op het KNMI begeleid door W. Kohsiek.

Inhoud

Inhoud	2
1 Inleiding	3
2 Beschrijving van de instrumenten	4
2.1 Algemeen	4
2.2 Kortgolvlige straling	4
2.3 Langgolvlige straling	5
2.4 Nettostraling	8
2.4.1 Schulze	8
2.4.2 Funk en Fritschen	9
2.5 Opstelling	10
2.6 Overzicht	11
3 Meting van de componenten	12
3.1 Langgolvlige straling	12
3.1.1 Sneeuw en huistemperatuur	12
3.1.2 Vergelijking van meting en berekening van langgolvlige straling	14
3.1.3 Verschil tussen Schulze en Eppley	15
3.2 Kortgolvlige straling	17
4 Nettostraling	22
4.1 Funk	23
4.2 Fritschen	26
5 Conclusies	32
6 Aanbevelingen	34
Literatuur	35
Nawoord	37
Bijlage A Warmtebalans van de pyrgeometer	38
Bijlage B Controle van de elektronica	41
Bijlage C Schulze met verschillende gevoeligheden voor lang- en kortgolvlige straling	45
Bijlage D Foutenbronnen	46
Bijlage E Aansluiting van de Eppley	49

English Summary

Accurate data of net radiation at surface level are needed to improve the performance of climate models. Net radiation at the earth's surface consists of incoming and outgoing radiation and can be divided into longwave and shortwave radiation.

In Cabauw, the Netherlands, net radiation is measured with various instruments. First the components of net radiation are measured separately, using Kipp pyranometers for shortwave measurements and Eppley pyrgeometers for longwave measurements. Second a Schulze pyrrometer is measuring both incoming and outgoing radiation. Final Funk and Fritschen pyrrometers are measuring net radiation. The various instruments indicate net radiation differing up to 100 Wm^{-2} . In this report the origins of the differences are investigated.

Outgoing longwave radiation was computed and compared with measurements in melting snow situations, using Stefan-Boltzmann's law and both incoming and outgoing longwave radiation in clear night-time situations with the help of a radiation model. In night-time situations the Eppley's longwave radiation measurements have been compared with the Schulze's. Due to wrong measurements of the body temperatures differences were found. The Eppley's body temperature has been corrected with -1°C and Schulze's with $+0.5^\circ\text{C}$. After these corrections the computed longwave radiation emission of the melting snow equals the measurement of the Eppley within 1 to 3 Wm^{-2} and the measurement of the Schulze within 2 to 5 Wm^{-2} . Both the measurements of the Eppley and the Schulze are greater than the computation. The model computations of the outgoing longwave radiation equal the measurements of the Eppley within 1 Wm^{-2} and the computation of the incoming longwave radiation are maximum 4 Wm^{-2} less than the Eppley's measurements.

After the corrections of the body temperatures a constant difference is found between the Eppley and the Schulze. The Schulze indicates 6 Wm^{-2} more incoming longwave radiation than the Eppley and for the outgoing component the difference is 3 Wm^{-2} . Until now no satisfying explanation is found.

A problem is expected in longwave radiation measurements using Eppley pyrgeometers with silicon domes. The transmittance of longwave radiation is lower than 0.5 , so the emission of longwave radiation from the silicon domes is not negligible. On clear summer days the solar radiation will warm the domes and in clear nights the dome will cool, due to emission of longwave radiation to the colder atmosphere. The errors occasioned by these effects are expected to be up to $20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (Foot, 1986, Philipona et al., 1994).

According to the last calibration in 1994 the Schulze's shortwave sensitivity is 3% less than its longwave sensitivity. Shortwave sensitivity is investigated by comparing the Schulze with the component's sum on clear sunny days. The Schulze's shortwave sensitivity seems to be 5.9% greater than the longwave sensitivity. However the errors made due to the warming of the Eppley's dome may explain the deviating sensitivity.

Comparison of the Funk's net radiation is performed using the Schulze's. The Schulze was chosen, for the transmittance of the domes is 80% - 90% and consequently less problems are expected caused by deviating dome temperatures.

First night-time longwave measurements were compared. The Funk's longwave sensitivity seems to be 17.8% too small. After correction of the calibration constant nightly differences are maximum 10 Wm^{-2} and daily differences up to 50 Wm^{-2} . This may be caused by heat convection under the domes. The sensitivity changed 6% when the old domes were

replaced by new ones. The longwave and shortwave sensitivities seem to be equal and no asymmetry is found between the upper and lower side of the instrument.

The longwave sensitivity of the Fritschen pyrradiometer is in comparison with the Schulze 25% too small. The shortwave sensitivity appears to be 6% greater than the longwave sensitivity. After correction of the calibration constant and compensation for the exceeding shortwave sensitivity, nightly differences between the Schulze and the Fritschen are smaller than 10 Wm^{-2} . Daily differences may rise up to 80 Wm^{-2} . The Fritschen pyrradiometer seems to be asymmetric. The rate of asymmetry highly depends on the age of the domes and may reach 15%.

In order to achieve more accurate net radiation measurements, the influence of deviations of the Eppley's dome temperatures on longwave radiation measurements has to be incorporated in the calibration of the instrument. For accurate correction, the dome temperature has to be measured with a precision of 0.2°C .

When the precision of longwave radiation measurements is thus improved, the sum of the components can be regarded as the most accurate measurement of net radiation. Then it will be useful to perform more comparisons with pyrradiometers.

Nauwkeuriger nettostraling meten

1 Inleiding

Straling is een ongrijpbaar verschijnsel, wellicht omdat veel soorten straling onzichtbaar zijn. Hoewel straling aan de basis van het zien staat, is het menselijk oog niet in staat de hoeveelheid straling te bepalen. Mensen kunnen zowel overdag als 's nachts zien, hoewel de hoeveelheid straling 's nachts enkele orden van grootte kleiner is dan overdag. Mensen hebben al helemaal geen zintuigen om warmtestralen te kunnen waarnemen. Toch is straling de benzine voor de motor van de atmosfeer of meer in de menselijke sfeer, de turbine van de zonnecellen.

Aardstralen of de zo begeerde bruinmakende ultraviolette straling komen hier niet ter sprake. In deze verhandeling zal ik mijn licht laten schijnen over stralingsmeters, met het doel meer helderheid te werpen op de precieze hoeveelheden kort- en langgolvlige straling, waaraan wij worden blootgesteld.

Straling is een vorm van energie. Het aardoppervlak ontvangt (netto-)straling. Daardoor wordt de bodem opgewarmd en ook de lucht boven het oppervlak. Een ander deel van de straling wordt gebruikt om water uit de bodem te verdampen. De netto-straling is de aandrijvende kracht achter alle meteorologische processen.

Elk voorwerp met een temperatuur groter dan 0 K zendt straling uit. De totale hoeveelheid uitgezonden straling is volgens de wet van Stefan-Boltzmann evenredig met de vierde macht van de absolute temperatuur. Ook neemt de frequentie van de uitgezonden straling toe met de temperatuur als gevolg van de wet van Wien. Aan het aardoppervlak zijn twee soorten straling van belang. Als eerste de zonnestraling. De zon heeft een oppervlaktetemperatuur van bijna 6000 K en zendt de zogenaamde kortgolvlige straling uit. Aan het aardoppervlak kan de inkomende kortgolvlige straling worden onderscheiden van de gereflecteerde, uitgaande kortgolvlige straling. Het aardoppervlak, met een gemiddelde temperatuur van ongeveer 15°C, straalt zelf langgolvlige straling uit. Ook de atmosfeer zendt langgolvlige straling uit, met name door de aanwezigheid van broeikasgassen en wolken. Dit levert de inkomende langgolvlige straling op. De nettostraling bepaalt men door van de inkomende kort- en langgolvlige componenten de uitgaande af te trekken. Om de nettostraling te meten, kan men de 4 componenten meten, maar er bestaan ook een instrument, dat de totale inkomende en uitgaande straling meet. Daarnaast zijn er instrumenten, die de mate van stralingsonbalans van het atmosfeer-aarde-systeem meten, de werkelijke nettostralings-meters.

In het kader van het onderzoek naar mogelijke klimaatwijzigingen is een nauwkeuriger kennis van de nettostraling vereist dan voor meteorologische processen. Dit komt omdat een kleine fout aanleiding kan geven tot een temperatuurdrift die alleen op langere termijn dan de verwachtingstermijn (5 dagen) merkbaar is. De gewenste orde van nauwkeurigheid is een paar Wm^{-2} (Philipona et al., 1995). Bij de KNMI-meetmast in Cabauw wordt op de hierboven beschreven manieren de nettostraling gemeten. Er blijken grote verschillen te zijn tussen de verschillende metingen. Bovendien hebben alle instrumenten in het gebruik en het onderhoud hun specifieke voor- en nadelen. Daarom is nader onderzoek naar de verschillen tussen de stralingsmeters en de oorzaken daarvan gewenst.

2 Beschrijving van de instrumenten

2.1 Algemeen

Straling is een vorm van energietransport. Als straling op een oppervlak valt, wordt een deel gereflecteerd en een deel wordt geabsorbeerd en omgezet in warmte. Van dit principe wordt gebruik gemaakt bij het meten van straling.

Bij een stralingsmeter valt de te meten straling op een sensorplaatje, dat hierdoor warm wordt. Om de reflectie zo klein mogelijk te houden is het plaatje zwart geverfd. Het temperatuurverschil tussen de bovenkant van het plaatje en het huis van de stralingsmeter wordt gemeten met een zuil van thermokoppels. Het elektrisch signaal dat deze thermo zuil afgeeft is een maat voor de hoeveelheid nettostraling die het plaatje ontvangt.

Omdat de temperatuur van het plaatje anders wordt dan de omgevingstemperatuur, zal er door convectie warmtetransport plaatsvinden boven het plaatje. Om deze convectie te beperken, wordt boven moderne stralingsmeters een kapje in de vorm van een halve bol bevestigd. Dit kapje voorkomt ook dat het plaatje vuil wordt. De transmissie van de te meten straling door het kapje moet groot zijn en de reflectie en absorptie klein.

De meeste stralingsmeters worden geventileerd. Dit zorgt ervoor dat het kapje en het huis zoveel mogelijk dezelfde temperatuur hebben, bovendien kan ventilatie dauw en rijp op de kapjes voorkomen.

2.2 Kortgolvlige straling

De kortgolvlige straling wordt gemeten met een Kipp-pyranometer van het type CM11. Dit instrument heeft twee glazen kapjes, om warmtegeleiding door convectie te voorkomen en wordt geventileerd (fig.2.1). De kapjes laten 95% of meer van de straling tussen 0,335 μm en 2,20 μm door. In deze range wordt 98% van de kortgolvlige straling uitgezonden. Bij de calibratie van referentie-pyranometers is rekening gehouden met deze afkapping van het zonnenspectrum. In het instrument is een element ingebouwd om de effecten van eventuele temperatuur-onbalans te compenseren.

De fabrikant geeft een maximale fout van 3% op voor de uurgemiddelde straling, ten gevolge van verschillende factoren. Voor daggemiddelden is de fout maximaal 2%, omdat sommige fouten elkaar uitmiddellen.

Een CM11, die met het plaatje naar beneden wordt gehouden, meet de door het aardoppervlak gereflecteerde kortgolvlige straling.

De ijking vindt plaats op het KNMI. De te ijken CM11 wordt vergeleken met een referentie-CM11. De instrumenten worden afwisselend beschaduwed en belicht door een halogeenvlamp met een intensiteit van ca. 500 Wm^{-2} . Voor de lamp wordt een infraroodfilter geplaatst in de vorm van een glasplaat, gekoeld met perslucht. Het instrument wordt met een ventilator gekoeld.



Fig.2.1. De Kipp-pyranometer.

2.3 Langgolvlige straling

Het meten van langgolvlige straling is ingewikkelder. Bij langgolvlige stralingsmeting staat de warmtebalans van het instrument centraal. Om alleen de langgolvlige straling te meten, moet het kapje zwart of liever reflecterend zijn voor kortgolvlige straling. De langgolvlige straling die op het plaatje valt, wordt voor een deel gecompenseerd door de straling die het plaatje zelf uitzendt vanwege zijn temperatuur. Daarom moet naast het temperatuurverschil over de thermozuil, ook de temperatuur van het huis nauwkeurig bekend zijn.

Fabrikanten en onderzoekers hebben, met name voor langgolvlige stralingsmeters, naar het materiaal gezocht dat het meest geschikt is om er het ideale kapje van te maken. Toch laten de kapjes niet alle straling door en door veroudering en blootstelling aan het weer wordt de transmissie alleen maar kleiner. Er ontstaat dan een directe meetfout, omdat niet alle straling op het plaatje terecht komt, maar er is ook sprake van een indirecte meetfout, omdat de geabsorbeerde straling de kapjes opwarmt, die daardoor extra langgolvlige straling naar de thermozuil uitstraalt (bijlage A). Om de opwarming van de kapjes te voorkomen worden de meeste instrumenten geventileerd, zodat de kapjes zo goed mogelijk

dezelfde temperatuur hebben als het huis van de stralingsmeter. Een andere mogelijkheid is het beschaduwden van het kapje m.b.v. een zonnevolger (Van Lammeren en Hulshof, 1994).

De firma Eppley heeft een langgolvlige-stralingsmeter ontwikkeld. Het KNMI heeft twee van deze instrumenten in een behuizing gebouwd, één voor de inkomende en de andere voor de uitgaande langgolvlige straling. De huistemperatuur wordt zowel voor het onderste als het bovenste instrument gemeten. Op die manier kunnen de inkomende en de uitgaande langgolvlige stralingscomponenten worden gemeten en de netto-langgolvlige straling worden berekend (bijlage A).

Het instrument is uitgerust met siliconkapjes met volgens de fabrikant een transmissie van 0,50, afnemend met toenemende golflengte tot 0,30-0,40 bij 50 μm . Volgens Foot (1985) en Philipona et al.(1995) laten de kapjes straling door vanaf 3-4 μm en varieert de transmissie 0,20-0,40 bij golflengten tussen 4 en 50 μm . Zie fig.2.2. Aan de korte golflengtekant is er enige overlap met het zonnenspectrum (bijlage D). Maar volgens de Eppley-fabrieksbeschrijving is uit tests gebleken dat de hoeveelheid doorgelaten zonlicht verwaarloosbaar is.

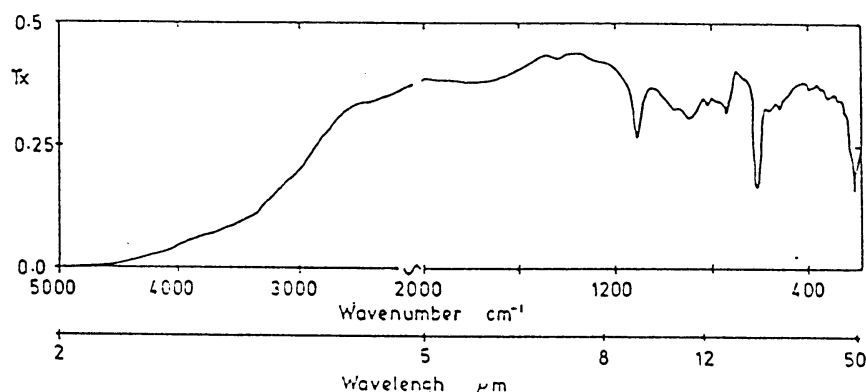


Fig.2.2. De gemeten transmissie T_x van siliconkapjes. Merk op dat de schaal verandert bij 5 μm . (Uit: Foot,1985)

Aan de rand van de kapjes is een temperatuursensor bevestigd om de kapjestemperatuur te meten, zodat het mogelijk is om hiervoor te compenseren (zie bijlage A).

Er is geen standaardmethode aanbevolen door de WMO voor de ijking van langgolvlige stralingsmeters. Stralingsmeters worden door de fabrikant geijkt of in andere laboratoria. Het is gebleken dat ijkingen van de verschillende instellingen calibratiefactoren opleveren, die 4% tot 15% van elkaar kunnen verschillen (Dehne et al., 1993).

Het instrument kan worden gecalibreerd door over het kapje een zwarte straler plaatsen. Het huis moet een andere temperatuur hebben dan de holte onder de zwarte straler, zodat er een temperatuurverschil bestaat over de thermozuul. Als de temperatuur in de holte nauwkeurig bekend is, kan de stralingsdichtheid die het sensoroppervlak bereikt berekend worden.

Philipona et al.(1995) beschrijven de calibratieopstelling die op het World Radiation Centre in Davos (Zwitserland) gebruikt wordt. In deze opstelling kan de kapjestemperatuur onafhankelijk ingesteld worden, om ook de invloed van een afwijkende kapjestemperatuur te bepalen (fig.2.3).

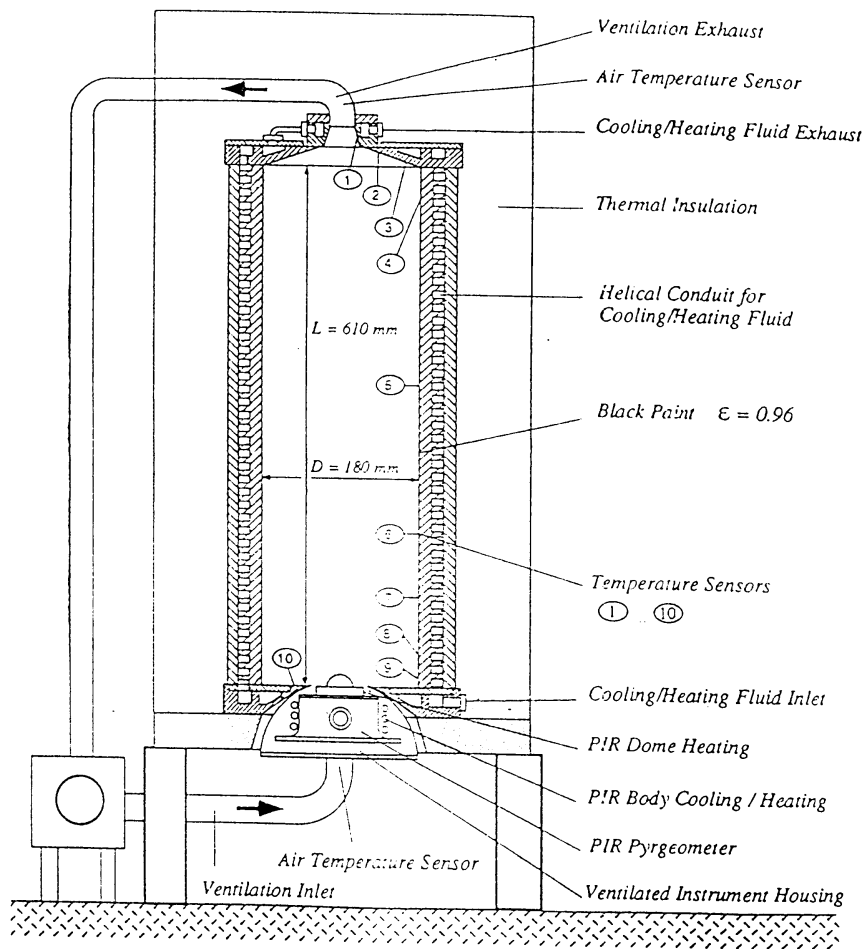


Fig.2.3. Calibratieopstelling bestaand uit een thermisch goed geïsoleerde zwarte straler. De temperatuur van de cilindrische holte kan ingesteld worden tussen -30° tot $+60^{\circ}\text{C}$. Met behulp van koelings- en verwarmingssystemen kunnen de huis- en kapjestemperatuur worden ingesteld, zodat het instrument kan worden gecalibreerd. Een gesloten ventilatiesysteem simuleert de omstandigheden tijdens waarnemingen in het veld (Philipona et al., 1995).

De langgolvlige straling kan met de Eppley, afhankelijk van de kwaliteit van de calibratie, de opstelling van het instrument, beschaduwing of compensatie voor de opwarming van het kapje, nauwkeurig gemeten worden. (Dehne en Bergholter, 1990). Uit testen in het veld blijkt dat de reproduceerbaarheid van metingen van verschillende Eppleys, die met behulp van de hierboven beschreven calibratieopstelling zijn gecalibreerd, beter dan 2 Wm^{-2} is, als de kapjestemperatuur op drie plaatsen gemeten wordt en er correcties worden uitgevoerd voor de afwijkende kapjestemperatuur. Dit geldt ook als het kapje niet beschaduwd wordt (Philipona et al., 1995).

2.4 Nettostraling

2.4.1 Schulze

De Schulze-netto-stralingsmeter bestaat uit twee afzonderlijke thermozuilen, die in een huis zijn ingebouwd. Een ervan is naar boven gericht en de ander naar beneden, om de inkomende en uitgaande straling te meten. De huistemperatuur wordt op één plaats gemeten. Het instrument wordt geventileerd door lucht tegen de kapjes te blazen.

De kapjes zijn van polyethyleen gemaakt en zijn 0,1 mm dik. Volgens de fabrieksbeschrijving is de transmissie van kortgolvlige straling 90% en voor langgolvlige straling 80%-90% met drie smalle absorptiebanden. Uit ervaringen met het instrument blijkt dat de Schulze gevoelig is voor vorming van dauw of rijp op de kapjes. Om dit te verhelpen, is naderhand door het KNMI een verwarmingselement in de ventilatiestroom geplaatst.

In de kern van het apparaat kan een wisselpatroon met droogstof worden aangebracht om te voorkomen dat het instrument van binnen vochtig wordt en er condens ontstaat aan de binnenkant van het kapje (fig.2.4).

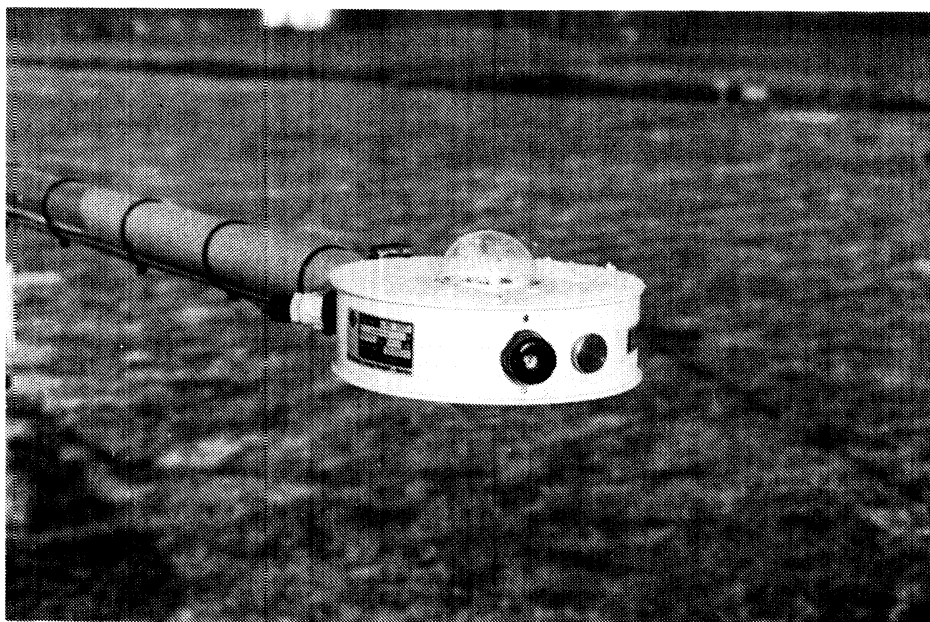


Fig.2.4. De Schulze-pyrradiometer.

Omdat de transmissiviteit van het kapje voor langgolvlige straling kleiner is dan voor kortgolvlige, heeft de Schulze een witte stip in het midden van de sensor, zodat de gevoeligheid voor kortgolvlige straling gelijk is aan die van de langgolvlige. Niettemin is bij een ijking door de fabrikant in 1994 vastgesteld dat de gevoeligheid voor langgolvlige straling volgens de WRR-schaal zo'n 3% groter is dan die voor kortgolvlige straling (bijlage C). Het instrument is door de fabrikant geijkt.

2.4.2 Funk en Fritschen

De netto-stralingsmeters van het type Funk en Fritschen meten de netto-straling met behulp van een thermoziuil, die het temperatuurverschil tussen de sensoren aan de boven- en onderkant meet. Het uitgangssignaal is een spanning, waaruit direct de netto-straling kan worden berekend.

De Fritschen heeft in tegenstelling tot de Funk een witte stip op het sensoroppervlak om het verschil in gevoeligheid voor lang- en kortgolvlige straling op te heffen. Het sensoroppervlak van de Funk ligt ca. 2 mm lager dan de rand van het instrument. Bij een zonne-stand van 10° begint de beschaduwing, die vanaf $2,5^\circ$ compleet is.

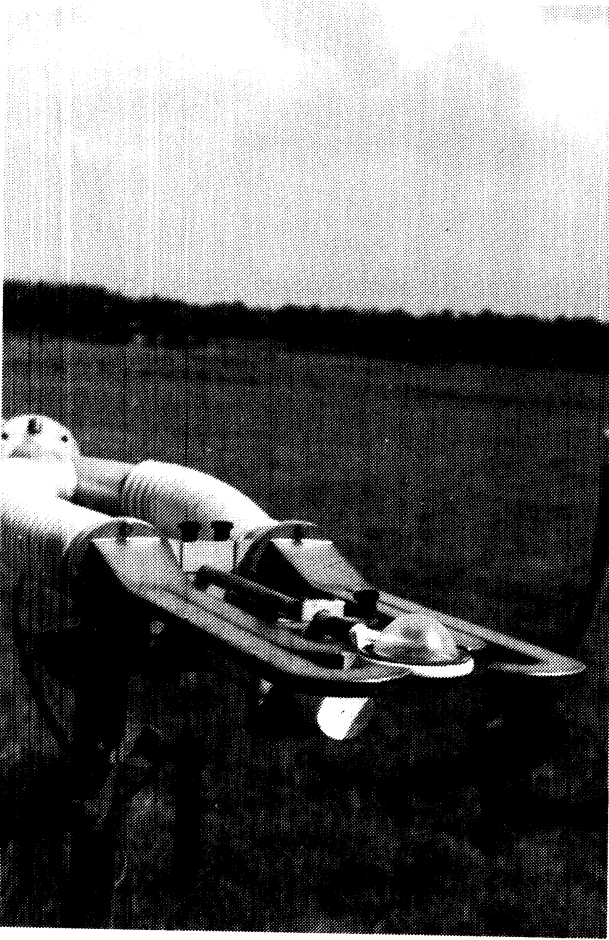


Fig.2.5. De Funk-pyrradiometer.

De kapjes zijn van polyethyleen gemaakt. De kapjes van de Funk hebben een gemiddelde dikte van 0,05 mm (Halldin en Lindroth, 1991), dit is zo dun, dat ze niet stevig genoeg zijn om in de vorm te blijven. Daarom wordt het kapje van binnenuit opgeblazen. Dit gebeurt met stikstof, dit heeft het bijkomende voordeel dat de kapjes van binnen droog blijven. De kapjes van de Fritschen zijn niet zo dun, 0,15 mm tot 0,35 mm, en hoeven daarom niet opgeblazen te worden. Kapjes van polyethyleen hebben een transmissie van 80% tot 90% met drie belangrijke absorptiebanden op $3,55 \mu\text{m}$, $6,9 \mu\text{m}$ en $14 \mu\text{m}$ (Miskolczy en Guzzi, 1993).

Het huis en de kapjes worden van buiten sterk geventileerd. Er zijn nauwelijks problemen met dauw.

De oorspronkelijke calibraties van de instrumenten zijn door de fabrikant uitgevoerd. Op het KNMI worden Funk en de Fritschen van tijd tot tijd vergeleken met een referentie-Funk. Daartoe wordt de onderzijde van de referentie en het te calibreren instrument in een zwart bakje geplaatst, zodat de onderkant van het instrument in thermisch evenwicht is.

De bovenkant van de zuil wordt afwisselend beschaduwd en belicht door een halogeenlamp met een intensiteit van ca. 500 Wm^{-2} . Om de stralingsmeters af te schermen van de warmtestraling van de lamp wordt onder de lamp een infraroodfilter geplaatst, zoals beschreven in hoofdstuk 2.2. Zodoende reageert het instrument alleen op de sprong in de hoeveelheid kortgolvlige straling. De instrumenten worden zwak geventileerd. De symmetrie van het instrument wordt gecontroleerd door de instrumenten om te keren. Op deze manier kan de gevoeligheid van het instrument in verhouding tot de referentie-Funk bepaald worden (Frerichs, 1981).

2.5 Opstelling

In Cabauw, aan de zuidoostkant van de 214 m hoge meetmast van het KNMI zijn de volgende instrumenten opgesteld:

-Kipp	kortgolvig	* inkomend, globaal inkomend, 214 m inkomend, wordt niet schoongemaakt inkomend, diffuus, zonneband inkomend, diffuus, zonnevolger
-Eppley	langgolvig	* uitgaand * inkomend inkomend, zonnevolger
-Schulze	lang- en kort	* uitgaand * inkomend
-Funk	lang- en kort	* uitgaand
-Fritschen	lang- en kort	* nettostraling
		* nettostraling

De globale straling is de totale kortgolfige straling van de hemelkoepel op een plat vlak. In deze beschouwing worden alleen de stralingsmeters aangegeven met (*) betrokken. De stralingsmeters staan op een hoogte van ongeveer 1,5 m. De kapjes van de stralingsmeters worden 1 of 2 keer per week schoongemaakt, soms vaker. Het gras onder de stralingsmeters wordt regelmatig gemaaid (fig.2.6).

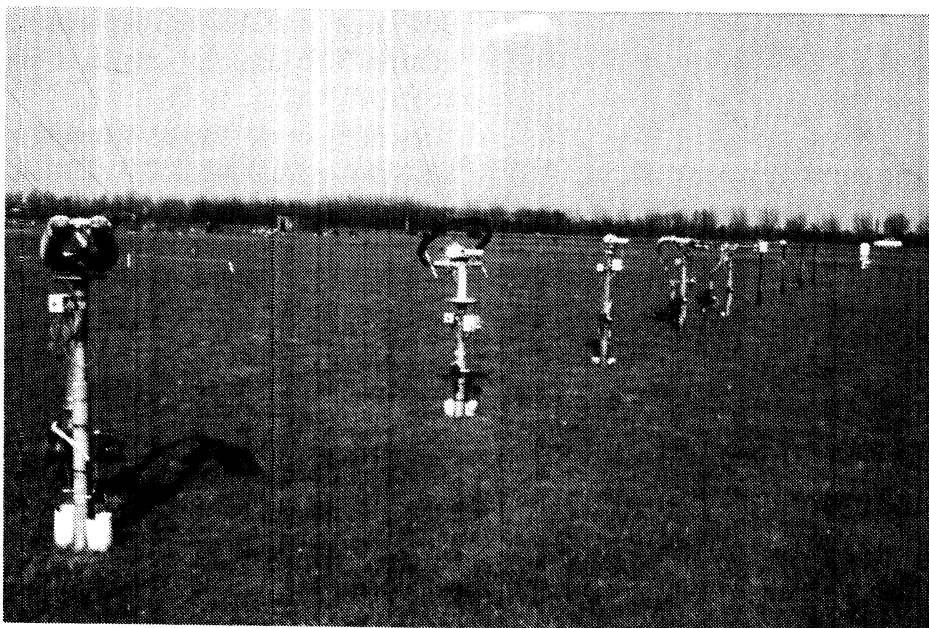


Fig.2.6. De stralingsmeters in Cabauw.

In deze beschouwing zal ook gebruik worden gemaakt van diverse metingen aan en nabij de mast, waaronder de droge- en natte bol temperatuur en de windsnelheid op verschillende hoogten. De luchttemperaturen worden op 10 m, 2 m en 0,6 m gemeten en de grastemperaturen op 8 cm, 5 cm, 2 cm en 0 cm.

2.6 Overzicht

Een goede manier om de netto-stralingsmeters te karakteriseren is op een onbewolkte dag de metingen van de verschillende instrumenten te vergelijken. 4 Januari 1995 was zo'n dag. Zie fig.2.7.

Het algemene beeld voor deze dag is dat 's nachts, met een uitstraling van bijna 100 Wm^{-2} , de som van de componenten de meest negatieve uitslag heeft. De Schulze nadert de som van de componenten het dichtst. Het verschil is ongeveer 7 Wm^{-2} . De Funk volgt de Schulze op ca. 9 Wm^{-2} . De Fritschen is nog 5 Wm^{-2} minder negatief.

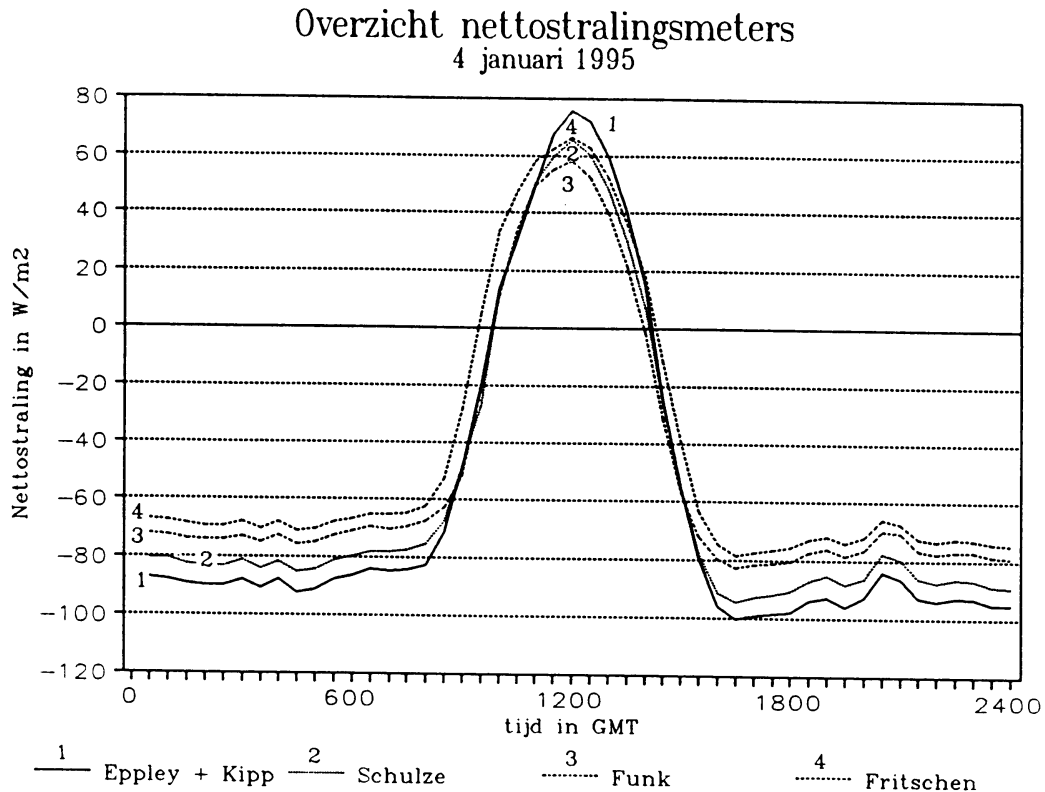


Fig.2.7. Overzicht nettostralingsmeters in Cabauw.

Op het midden van de dag is de som van de componenten het grootst met een maximale instraling van ca. 75 Wm^{-2} . Daarna volgen de Schulze en de Fritschen, met een verschil van zo 'n 9 Wm^{-2} . De Funk-netto-stralingsmeter geeft nog eens 7 Wm^{-2} minder aan.

De eerste indruk is dat de calibratiefactoren van de instrumenten moeten worden aangepast, maar het is van belang de fysische achtergronden van het probleem te doorzien. Mogelijke andere oorzaken van de verschillen zijn foute meting van de huistemperatuur, afwijkende kapjestemperatuur, verschillende gevoeligheden voor lang- en kortgolfige straling en afwijkingen die ontstaan door randapparatuur en verwerking (bijlage D).

3 Meting van de componenten

In dit hoofdstuk wordt de som van de componenten vergeleken met de Schulze. De som van de componenten en de Schulze hebben het voordeel dat de inkomende en de uitgaande component van de straling afzonderlijk bestudeerd kunnen worden. 's Nachts is er geen kortgolvlige straling, zodat de Schulze dan eenvoudig met de Eppley kan worden vergeleken (hoofdstuk 3.1). Pas als er duidelijkheid bestaat over de verhouding van de metingen van de langgolvlige straling door de Eppley en de Schulze, kan de kortgolvlige gevoeligheid van de Schulze onderzocht worden (hoofdstuk 3.2).

3.1 Langgolvlige straling

De metingen van de langgolvlige straling van de Eppley en de Schulze worden in dit hoofdstuk op een aantal manieren met elkaar vergeleken. Een vergelijking kan slechts informatie leveren over de relatieve betrouwbaarheid van de beide instrumenten, daarom wordt er ook vergeleken met enkele berekeningen van de langgolvlige straling.

3.1.1 Sneeuw en huistemperatuur

In de eerste dagen van januari 1995 was het aardoppervlak bedekt met sneeuw. Op 8 januari is de sneeuw gaan smelten. In dat geval is de oppervlaktetemperatuur nauwkeurig bepaald en kan de opgaande langgolvlige straling berekend worden volgens de wet van Stefan-Boltzmann en worden vergeleken met de metingen van de opwaarts gerichte langgolvlige stralingsmeter van Eppley en in nachtelijke gevallen met de opwaarts gerichte helft van de Schulze-nettostralingsmeter. De langgolvlige emissiviteit van sneeuw ligt tussen 82% en 99,5% (Sellers, 1972), maar onder bewolkte omstandigheden is de effectieve emissiviteit in een goede benadering 1. Wanneer de emissie, en dus ook de absorptie, van het sneeuwoppervlak 95% is, is de reflectie 5% ($\alpha + \rho = 1$). Onder bewolkte omstandigheden is het temperatuurverschil tussen het aardoppervlak en de wolken relatief klein. Daarom is er in die gevallen een grote mate van stralingsevenwicht in de atmosfeer. In dit specifieke geval meet de Eppley voor de inkomende langgolvlige straling zo'n 320 Wm^{-2} , terwijl de temperatuurstraling van smeltende sneeuw $315,4 \text{ Wm}^{-2}$ is. In het geval er rekening wordt gehouden met 5% reflectie, zou de uitgaande langgolvlige straling $315,6 \text{ Wm}^{-2}$ zijn. Het verschil is zo klein, dat het gerechtvaardigd is om met een emissiviteit van 1 te rekenen.

In deze nacht stijgt de luchttemperatuur op 2m en 10m van $1,5^\circ\text{C}$ aan het begin van de avond tot resp. 3°C en 4°C rond middernacht. De temperatuur op 0cm is gemiddeld een halve graad boven nul, de temperatuur op 5cm is de hele nacht net boven nul, terwijl de temperatuur op 8cm stijgt van net onder nul tot net boven nul. De temperatuur van de lucht is boven nul, de sneeuw aan het oppervlak is dus aan het smelten. Het is daarom aannemelijk dat de temperatuursensor op 8cm nog in de sneeuw steekt. Voor de sneeuwtemperatuur is daarom de temperatuur op 8 cm boven de grond genomen.

De metingen van de Eppley bleken in eerste instantie 6 tot 8 Wm^{-2} groter dan de berekende temperatuurstraling van de sneeuw te zijn, terwijl de Schulze binnen 2 Wm^{-2} de

berekende straling volgde.

Er moet echter opgemerkt worden dat de meting van de langgolvlige straling in dit geval vooral neerkomt op een juiste meting van de huistemperatuur. De huistemperatuur is vrijwel gelijk aan de oppervlaktetemperatuur en de temperatuur van de wolken, daarom is het temperatuurverschil tussen sensoroppervlak en huis, en daarmee de signalen van de thermozielen, vrijwel nul (bijlage A).

De afwijking van de Eppley zou dus veroorzaakt kunnen worden door een foute meting van de huistemperatuur. Een afwijking van 1 Wm^{-2} kan al veroorzaakt worden door een fout in de temperatuurmeting van $0,2^\circ\text{C}$.

De gemeten huistemperatuur van de Eppley kan gecontroleerd worden door een thermometer in de ventilatielucht te houden. Hierbij moet de thermometer zoveel mogelijk uit de directe zonnestraling worden gehouden. De temperatuursensor van de Schulze is uitneembaar, de controle kan daardoor nauwkeuriger worden uitgevoerd door de sensor in een bad met smeltend ijs en een waterbad te dopen.

Bij deze controles bleek de huistemperatuur van de Eppley een graad te hoog te zijn, maar de meting van de huistemperatuur van de Schulze bleek een halve graad te laag. De oorzaken van de afwijkingen zijn waarschijnlijk te wijten aan onvolkomenheden in de elektronica (zie ook bijlage E).

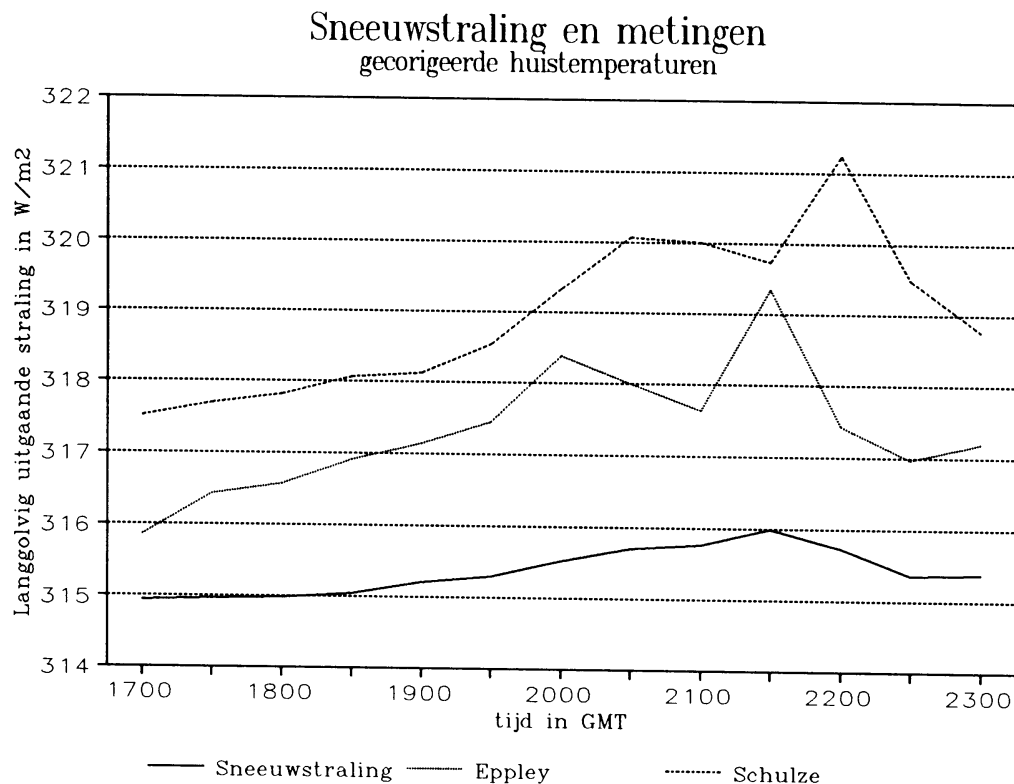


Fig.3.1. Temperatuurstraling van de sneeuw en metingen van de langgolvlige straling met Eppley en Schulze met gecorrigeerde huistemperaturen.

Conclusie: Na correctie van de huistemperaturen blijken de meting en berekening van de langgolvlige uitgaande straling voor de Eppley binnen 1 tot 3 Wm^{-2} met elkaar overeen te komen. De Schulze heeft een grotere afwijking, de meting is ca. 4 Wm^{-2} groter dan de berekening (fig.3.1).

Hoofdstuk 3.1.3 gaat verder in op het verschil tussen de Schulze en de Eppley, zoals dat nu geconstateerd is.

3.1.2 Vergelijking van meting en berekening van langgolvlige straling

Het is mogelijk om de hoeveelheid langgolvlige straling te berekenen. Dit geeft extra vergelijkingsmateriaal. De inkomende langgolvlige straling kan met behulp van een model berekend worden aan de hand van profielen van druk, temperatuur, vocht-, ozon-, kooldioxide, methaan- en stikstofdioxideconcentratie (Van Dorland, 1995). De uitgaande langgolvlige straling is berekend met behulp van de temperatuur op 5 cm, een emissiecoëfficiënt van 0,98 en een reflectie van de inkomende langgolvlige straling van 2%. De berekeningen kunnen dan vergeleken worden met de metingen van de langgolvlige straling.

Voor deze vergelijking zijn heldere nachten uitgezocht, omdat direct zonlicht de metingen kan verstoren en omdat gegevens over wolkenhoogte en -dikte niet nauwkeurig genoeg beschikbaar zijn. Bovendien is er in heldere nachten een groter temperatuurverschil tussen het huis en het sensoroppervlak. Voor de gegevens tot 200m hoogte zijn de metingen van de Cabauwmast gebruikt. Voor de gegevens van de temperatuur, druk en vochtigheid op grotere hoogtes zijn profielen gebruikt van radiosonde-oplatingen in De Bilt. De profielen van ozonconcentratie worden niet standaard gemeten bij sonde-oplatingen. Daarom zijn gegevens over ozon gebruikt van ozonsonde-oplatingen van in het eerste geval 5h eerder, in het tweede geval 5h later en in het derde geval 11h later. De fout, die hierbij wordt gemaakt, is naar verwachting klein. Een berekening van de inkomende langgolvlige straling, waarbij door een fout de totale hoeveelheid ozon in de atmosfeer 24 maal te hoog is ingevoerd, blijkt namelijk slechts 2,1 Wm^{-2} groter te zijn dan de berekening met de juiste gegevens. Voor de profielen van kooldioxide-, methaan- en stikstofdioxideconcentratie zijn gemiddelde waarden ingevoerd, omdat hiervan geen actuele gegevens beschikbaar zijn. Alleen bij de berekening van 9 december 1994 is een profiel van aërosolen ingevoerd. Aërosolen worden niet standaard gemeten, daarom is een globaal gemiddelde ingevoerd. De berekening is ook uitgevoerd zonder aërosolenprofiel, de uitkomst is dan 0,65 Wm^{-2} lager.

In tabel 3.1 staan de resultaten van drie berekeningen van de inkomende en uitgaande langgolvlige straling onder onbewolkte nachtelijke omstandigheden, vergeleken met de metingen van de Eppley.

Tabel 3.1. Berekening en meting van de langgolvlige straling in drie onbewolkte nachten.

		langgolvlige straling			
		inkomend		uitgaand	
datum	tijd GMT	berekening W/m ²	meting W/m ²	berekening W/m ²	meting W/m ²
09/12/94	6.00	241.3	245.0	324.0	325.4
03/01/95	18.00	210.8	214.9	300.0	298.8
19/01/95	0.00	233.0	236.9	316.5	315.3

Berekening en meting blijken goed overeen te komen, hoewel de metingen van de inkomende langgolvlige straling in de drie gevallen ca. 4 Wm⁻² groter zijn dan de berekeningen. Wanneer er ook rekening wordt gehouden met een geconstateerde afwijking van ca. 3% in de versterking van de zuilspanning van de Eppley (bijlage B), wordt het verschil met zo'n 2 Wm⁻² vergroot. De berekening en meting van de uitgaande langgolvlige straling komen binnen 1,5 Wm⁻² met elkaar overeen. Hierbij zijn de huistemperaturen van de Eppley's met -1°C gecorrigeerd.

Op deze tijdstippen is de inkomende langgolvlige straling volgens de Schulze ca.11 Wm⁻² groter dan de berekening en de uitgaande component ca.3 Wm⁻². Zie hoofdstuk 3.1.3.

Conclusie: Na correctie van de huistemperatuur van de Eppley met -1°C is de gemeten inkomende langgolvlige straling ca. 4 Wm⁻² groter dan de berekende en de gemeten uitgaande straling is op 1 Wm⁻² gelijk aan de berekende.

3.1.3 Verschil tussen Schulze en Eppley

Nadat de huistemperaturen van de Eppley-langgolvlige stralingsmeter en de Schulze-nettostralingsmeter zijn gecorrigeerd, blijkt dat er 's nachts een vrij constant verschil tussen de Schulze en de Eppley te zijn. Dit verschil is zichtbaar in dag- en weekoverzichten. De uitgaande component van de Schulze geeft 's nachts ca. 3 Wm⁻² meer aan dan de Eppley. Ook voor de neerwaartse component geeft de Schulze meer aan dan de Eppley. Het verschil is hier typisch 6 Wm⁻² (fig.3.2).

Er zijn verschillende mogelijke oorzaken aan te wijzen.

►De calibratiefactoren zijn niet juist en moeten aangepast worden. De calibratiefactor van de bovenste thermoziel zou met 7% verlaagd moeten worden en die van de onderste met 35% om het verschil te laten verdwijnen.

De zuilspanningen zijn over het gemiddeld genomen echter variabel. Daarom kan dit alternatief nooit het off-set karakter van het verschil verklaren.

Vershil tussen Schulze en Eppley nacht van 23 op 24 januari 1995

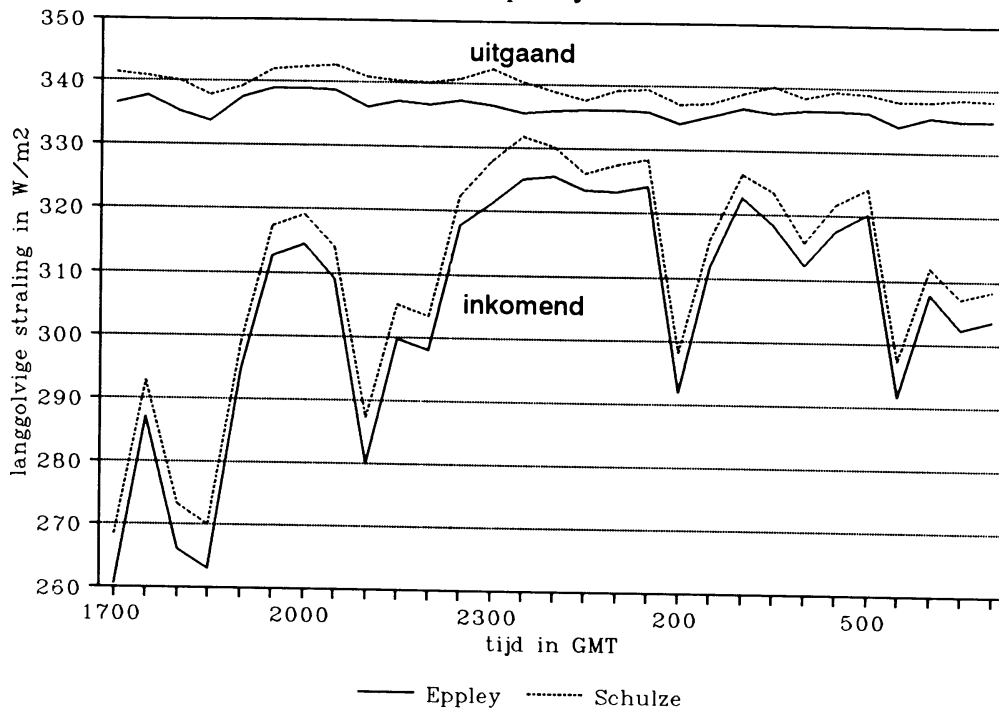


Fig.3.2. Het verschil tussen Schulze en Eppley, beide met gecorrigeerde huistemperaturen.

►De zuilspanning van de Schulze of de Eppley heeft een off-set. De Schulze heeft twee thermozuilen. Dit alternatief zou kunnen verklaren waarom het verschil tussen de neerwaartse componenten groter is dan tussen de opwaartse componenten en verklaart ook dat het verschil vrijwel constant is. Om te controleren of er bij de stralingsmetingen een off-set optreedt, is er een test uitgevoerd (bijlage B). Er zijn geen aanwijzingen dat er een noemenswaardige off-set optreedt bij de Eppley of de Schulze ten gevolge van onvolkomenheden in de elektronica.

►Er is een verschil tussen de Eppley en de Schulze wat betreft de kapjes. De Schulze heeft een kapje dat doorschijnend (80%-90%, hoofdstuk 2.4.1) is voor zowel lang- als kortgolvlige straling, terwijl het kapje van de Eppley geen kortgolvlige straling doorlaat. De transmissiecoëfficiënt voor langgolvlige straling van het kapje van de Eppley wordt geschat op 0,50. De emissie van langgolvlige straling door het kapje is daarom bij de Eppley niet te verwaarlozen.

Het is waarschijnlijk dat het bovenste kapje door stralingsemissie afkoelt (bijlage A), zodat de sensor van de Eppley voortdurend minder straling ontvangt dan de Schulze. Een temperatuurverlaging van $0,3^{\circ}\text{C}$ zou al genoeg zijn om een verschil van 6 Wm^{-2} te veroorzaken (Foot, 1986, Philipona et al., 1995). Het onderste kapje zal waarschijnlijk een kleinere temperatuurafwijking hebben. Het verschil tussen de uitgaande straling volgens Eppley en Schulze is inderdaad kleiner.

Toch moeten er vraagtekens geplaatst worden bij deze verklaring. Het is niet aannemelijk dat het kapje van het bovenste instrument een constante temperatuurafwijking heeft ten

opzichte van het huis, omdat dit o.a. afhangt van de hoeveelheid straling, die op het kapje valt. Het bovenste kapje van de Eppley zou 's nachts voortdurend ca. 0,3°C kouder moeten zijn dan het huis, zowel in heldere nachten als in bewolkte nachten, om het constante verschil tussen de Eppley en de Schulze te verklaren.

►De huistemperatuur van de Schulze wordt, ondanks de pas uitgevoerde correctie, niet juist gemeten. Als de huistemperatuur gemiddeld ca. 1°C lager zou zijn, zouden de verschillen kleiner dan 1 à 2 Wm⁻² zijn. Deze mogelijkheid verklaart niet waarom het verschil tussen de inkomende componenten groter is dan tussen de uitgaande componenten.

►Er ontstaat in het instrument zelf een off-set. Dit is moeilijk te controleren bij langgolvlige stralingsmeters. De off-set zou moeten optreden in de huistemperatuur of in de zuilspanning.

►De aansluiting van de Eppley was niet goed (bijlage E). De registratie van de huistemperatuur was in werkelijkheid de kapjestemperatuur. De elektronica ten behoeve van het meten van de huis- en kapjestemperatuur was tot 25 maart 1995, als complicerende factor, niet geheel betrouwbaar. Het is niet zeker welk effect dit heeft gehad in de metingen.

Een fout van 0,13°C in de meting van de temperatuur van het onderste kapje zou al een fout veroorzaken van 2,5 Wm⁻² in de uitgaande langgolvlige straling.

Conclusie: Tot nu toe is er geen afdoende verklaring gevonden voor het constante verschil tussen de inkomende en de uitgaande langgolvlige straling volgens de Eppley en de Schulze.

3.2 Kortgolvlige straling

De kortgolvlige straling wordt in Cabauw gemeten met Kipp CM11-pyranometers. Wanneer deze instrumenten goed gecalibreerd zijn, kunnen er zeer nauwkeurige metingen mee worden uitgevoerd. Daarom kunnen de Kipp-stralingsmetingen min of meer als referentie worden gezien wanneer de kortgolvlige gevoeligheid van de Schulze-nettostralingsmeter onderzocht wordt. Hierbij moet worden opgemerkt dat de globale stralingsmetingen van de Kipp in Cabauw gemiddeld groter zijn dan de metingen van de stations in de omgeving. Het is niet waarschijnlijk dat dit aan de Kipp in Cabauw te wijten is, omdat de metingen met verschillende Kipps en meetsystemen goed met elkaar overeen blijken te komen.

Hoewel de Schulze een witte stip op het sensoroppervlak heeft om de verschillende gevoeligheden voor lang- en kortgolvlige straling op te heffen, is bij de fabrieksijking (mei 1994) gebleken dat de kortgolvlige gevoeligheid groter is dan de langgolvlige (bijlage C). In dit hoofdstuk wordt met de kortgolvlige straling gewerkt volgens de WRR-schaal. De calibratiefactoren van de Schulze zijn oorspronkelijk opgegeven volgens de IPS-schaal, maar omgerekend naar de WRR-schaal.

De kortgolvlige straling volgens Schulze kan berekend worden door de langgolvlige straling af te trekken van de nettostraling. De kortgolvlige gevoeligheid kan het beste onderzocht worden op heldere dagen. In hoofdstuk 3.1 is aangetoond, dat de langgolvlige straling volgens Schulze de Eppley goed volgt, met als enige probleem de off-set van gemiddeld 6 Wm⁻² voor de bovenste zuil en 2 à 3 voor de onderste zuil. Twee heldere

dagen zijn 4 en 16 januari 1995. De off-set voor de uitgaande langgolvlige straling is voor deze twee dagen slechts $0,3 \text{ Wm}^{-2}$. Daarom wordt die verwaarloosd, maar de inkomende nettostraling van de Schulze moet met 6 Wm^{-2} verlaagd worden om een goede vergelijking mogelijk te maken. Als daarna van de Schulze-nettostraling de langgolvlige straling van Eppley wordt afgetrokken, kan de kortgolvlige straling volgens Schulze vergeleken worden met de Kipp. Mogelijk wordt hierbij een fout gemaakt, doordat de Eppley teveel aangeeft. Op dagen met sterke instraling van de zon kan het kapje van de Eppley warm worden. De Eppley meet dan te veel langgolvlige straling (bijlage A). De berekende kortgolvlige straling van de Schulze kan door dit effect te klein zijn. In de ochtend van de zestiende januari is er dauw ontstaan, daarom is de meting van de Schulze voor die tijdstippen gelijkgesteld aan de Kipp.

Figuur 3.3 laat zien dat de Schulze op het midden van de dag, als de Kipp zo'n 250 Wm^{-2} aangeeft, ca. 12 Wm^{-2} minder aangeeft voor de inkomende kortgolvlige straling.

De calibratie in 1994 geeft aan dat de Schulze gevoeliger is voor kortgolvlige straling dan voor langgolvlige straling. De correctie is wellicht overbodig, omdat de kortgolvlige straling gemeten met Schulze kleiner is dan de meting van de Kipp. Wanneer de kortgolvlige gevoeligheid wordt gelijkgesteld aan de langgolvlige, worden de verschillen verkleind tot 6 Wm^{-2} (fig.3.3).

Op 16 januari is bij zonsopkomst de meting van de Schulze groter dan die van de Kipp, bij zonsondergang is dit juist andersom. Er lijkt een faseverschil te zijn tussen de Schulze en de Kipp. Mogelijk is de stand van één van de instrumenten niet waterpas. Het is nu moeilijker om aan de hand van de verschillen een uitspraak te doen over de kortgolvlige gevoeligheid van de Schulze.

Op 4 januari is er (bijna) geen faseverschil te ontdekken, hoewel de verschillen bij zonsopkomst en zonsondergang wel pieken vertonen. Op 4 januari is bij de hoogste zonne-stand de meting van de Schulze $5,9\%$ kleiner dan de meting van de Kipp. In fig.3.3 is ook de meting van de Schulze uitgezet, waarbij de kortgolvlige gevoeligheid met $5,9\%$ is verhoogd.

De resultaten, zoals die in fig.3.3 en tabel 3.2 staan doen vermoeden dat bij de ijking van mei 1994, de kortgolvlige gevoeligheid te laag is opgegeven.

De uitgaande kortgolvlige straling kan op de zelfde manier bekeken worden. Op beide dagen is er bij de Kipp 's ochtends een piekje dat bij de Schulze niet terug te vinden is. Misschien is er op het kapje van de albedometer condens ontstaan, dat in de loop van de ochtend verdwijnt.

Dezelfde figuur als voor de inkomende straling is ook gegeven voor de uitgaande straling, fig.3.4. In tabel 3.3 staan de verschillen tussen Kipp en Schulze voor de uitgaande kortgolvlige straling op het midden van de dag, als de piek van de Kipp al verdwenen is.

Kortgolvlige straling 4 en 16 januari

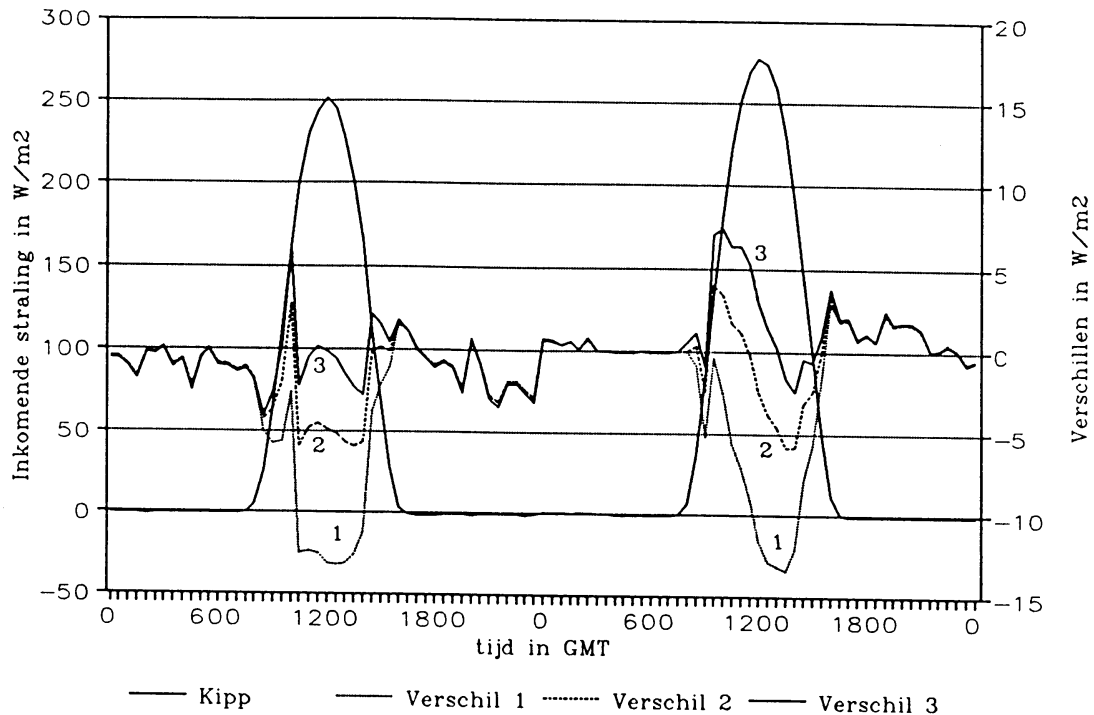


Fig.3.3. De inkomende kortgolvlige straling volgens Kipp en de verschillen met de Schulze (Verschil = Schulze-Kipp). Verklaring:

- ▶ Bij verschil 1 is de Schulze gebruikt volgens de oorspronkelijke ijking (WRR) (zie bijlage C).
- ▶ Bij verschil 2 is voor de kortgolvlige gevoeligheid van de Schulze de langgolvlige gevoeligheid gebruikt.
- ▶ Bij verschil 3 is de kortgolvlige gevoeligheid van de Schulze met 5,9% verhoogd ten opzichte van de WRR-ijkfactoren, zodat de toppen van de Kipp en de Schulze op 4 januari samenvallen.

Tabel 3.2. Verschillen tussen Schulze en Kipp voor de inkomende kortgolvlige straling.

W/m ²	max. 1	max. 2.1	max. 2.2
Schulze 1	-13.26	-0.38	-13.45
Schulze 2	-5.96	4.01	-5.97
Schulze 3	-2.81	7.41	-2.46

Toelichting bij tabel 3.2: Max.1 is het verschil tussen Schulze en Kipp bij maximale zonshoogte op 4 januari. max.2.1 is het maximale positieve verschil en max.2.2 is het maximale negatieve op 16 januari. Verklaring van de eerste kolom:

- ▶ Schulze 1: Schulze volgens de oorspronkelijke ijkfactoren (WRR).
- ▶ Schulze 2: Schulze met gelijke gevoeligheid voor lang- en kortgolvlige straling.
- ▶ Schulze 3: Schulze met een 5,9% verhoogde gevoeligheid voor de kortgolvlige straling.

Kortgolvlige straling 4 en 16 januari

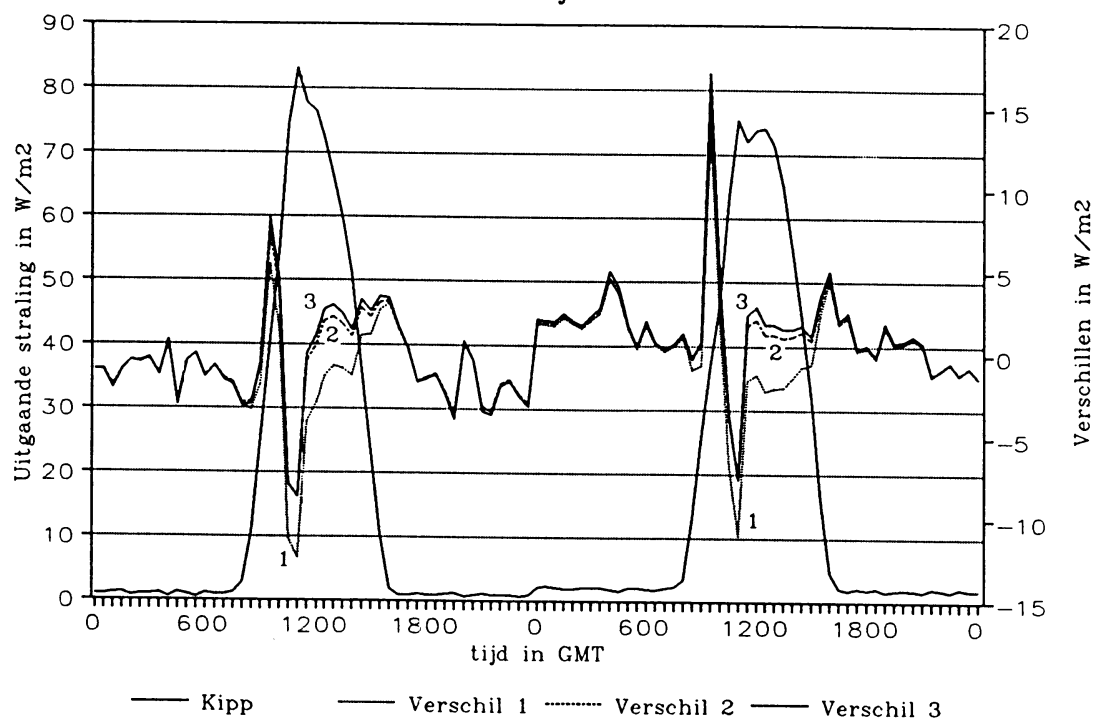


Fig.3.4. De uitgaande kortgolvlige straling volgens Kipp en de verschillen met de Schulze (Verschil = Schulze-Kipp).

Verklaring: ▶Bij verschil 1 is de Schulze gebruikt volgens de oorspronkelijke ijking (WRR) (zie bijlage C).

▶Bij verschil 2 is voor de kortgolvlige gevoeligheid van de Schulze de langgolvlige gevoeligheid gebruikt.

▶Bij verschil 3 is de kortgolvlige gevoeligheid van de Schulze met 5,9% verhoogd ten opzichte van de WRR-ijkfactoren, zodat de toppen van de Kipp en de Schulze (inkomend) op 4 januari samenvallen.

Tabel 3.3. Verschillen tussen Schulze en Kipp voor de uitgaande kortgolvlige straling.

W/m ²	max. 1	max. 2
Schulze 1	-4.13	-1.24
Schulze 2	-0.55	2.14
Schulze 3	-0.01	2.87

Toelichting bij tabel 3.3: Max.1 resp. max.2 is het verschil tussen Schulze en Kipp bij maximale zonshoogte op 4 januari resp. 16 januari. Verklaring van de eerste kolom:

▶Schulze 1: Schulze volgens de oorspronkelijke ijkfactoren (WRR).

▶Schulze 2: Schulze met gelijke gevoeligheid voor lang- en kortgolvlige straling.

▶Schulze 3: Schulze met een 5,9% verhoogde gevoeligheid voor de kortgolvlige straling.

De verschillen in de uitgaande kortgolvlige straling tussen de Kipp en de Schulze zijn niet zo groot als bij de inkomende component. De verschillen zijn bij de oorspronkelijke ijking zo'n 3 Wm^{-2} , door vergroting van de kortgolvlige gevoeligheid worden de verschillen iets kleiner.

Conclusie: De inkomende kortgolvlige straling lijkt door de Schulze te worden onderschat. Een 6% te lage calibratiefactor zou de oorzaak kunnen zijn, maar het kan wellicht ook verklaard worden door overschatting van de langgolvlige straling overdag ten gevolge van opwarming van het kapje van de Eppley.

4 Nettostraling

In het voorgaande hoofdstuk is de Schulze vergeleken met de som van de componenten. In dit hoofdstuk zullen de Funk en de Fritschen vergeleken worden met de Schulze. Er is voor vergelijking met de Schulze gekozen, omdat er bij de Eppley fouten optreden ten gevolge van een afwijkende kapjestemperatuur. Deze fouten treden niet bij de Schulze op. Fig.4.1 laat een vergelijking van de Schulze met de som van de componenten zien. 's Nachts is er een verschil van ca. 5 Wm^{-2} , dit komt overeen met de eerder geconstateerde 'off-set' (hoofdstuk 3.1.3). Overdag lopen de verschillen op tot 15 Wm^{-2} . Bij deze vergelijking zijn de oorspronkelijke calibratiefactoren van de Schulze (WRR) gebruikt, dit verklaart waarschijnlijk een deel van het verschil (hoofdstuk 3.2). Daarnaast is een deel van het verschil mogelijk te verklaren door aan te nemen dat de kapjes van de Eppley overdag warm worden door het opvallende zonlicht, dit zou resulteren in een overschatting van de nettostraling door de som van de componenten. Deze vergelijking geeft een idee van de betrouwbaarheid van de metingen van de Schulze, voordat de Funk en de Fritschen ermee worden vergeleken.

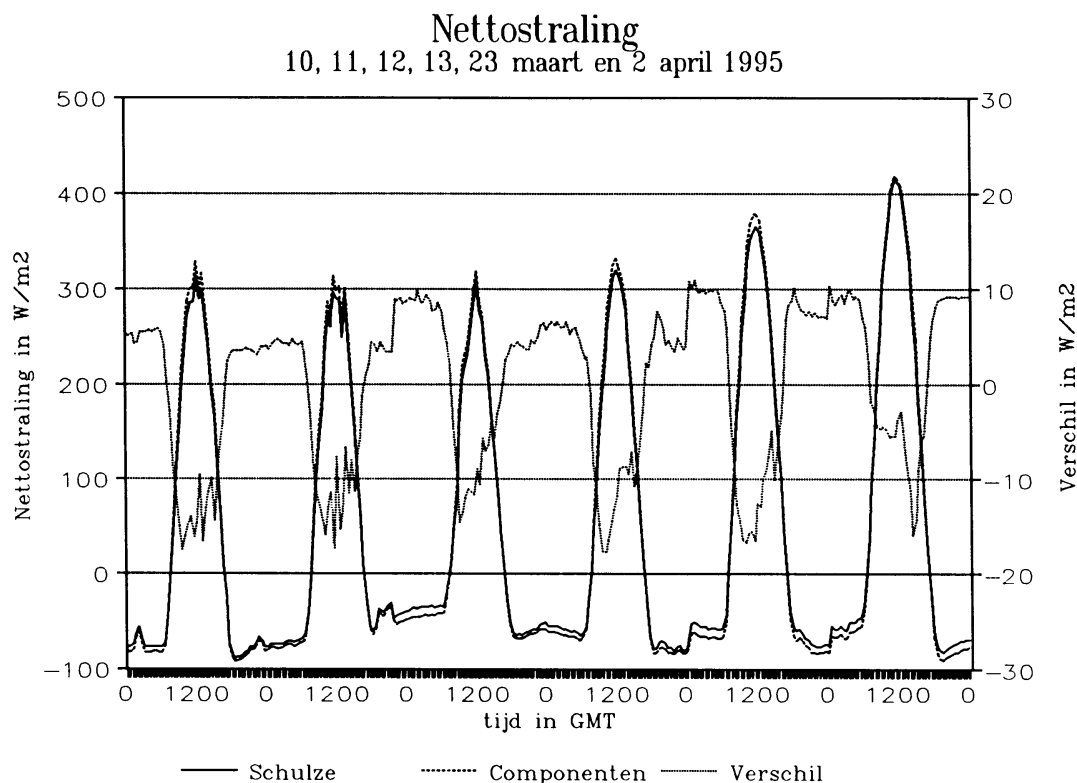


Fig.4.1. Vergelijking van de Schulze met de som van de componenten.

De Funk en de Fritschen zullen 's nachts worden vergeleken met de Schulze, om te zien of de langgolvlige calibratie juist is. Daarna zal de kortgolvlige gevoeligheid van de Funk en de Fritschen worden onderzocht, door vergelijking met de Kipp. Om de kortgolvlige gevoeligheid te kunnen onderzoeken, moet van de nettostraling (kort- en langgolvig) de

langgolvlige straling worden afgetrokken. Daartoe wordt de netto-langgolvlige straling benaderd door van de Schulze-nettostraling de netto-kortgolvlige straling volgens Kipp af te trekken. Voor deze vergelijking zijn bij de Schulze de oorspronkelijke ijkfactoren gebruikt (bijlage C).

In het geval er verschillen optreden, moet de oorzaak waarschijnlijk in calibratiefouten of andere gebreken gezocht worden. De transmissie van de kapjes van de Funk en Fritschen is namelijk 80% à 90% (hoofdstuk 2.4.2) en de instrumenten worden sterk geventileerd. Het is daarom niet aannemelijk dat er een verstoring van de meting optreedt ten gevolge van opwarming van het kapje. De instrumenten kunnen wel verschillende gevoeligheden hebben voor kort- en langgolvlige straling. Er kan ook een asymmetrie bestaan tussen de onder- en bovenkant van de stralingsmeter. Een eventuele off-set zou moeilijk te verklaren zijn vanuit de bouw van het instrument, omdat het slechts bestaat uit twee plaatjes, waarover met een thermozuil het temperatuurverschil wordt gemeten.

Om de vergelijking uit te voeren zijn 6 heldere dagen geselecteerd, nl. 10, 11, 12, 13 en 23 maart en 2 april 1995. Op de laatste dag is de maximale inkomende kortgolvlige straling bijna 700 Wm^{-2} .

4.1 Funk

Al eerder is vermeld (hoofdstuk 2.6), dat de nettostraling, die de Funk meet, nogal afwijkt van de som van de componenten en de meting van de Schulze. In dit hoofdstuk zal gezocht worden naar de grootte en de oorzaak van de verschillende afwijkingen.

Volgens Halldin en Lindroth (1992) heeft de Funk, die bij het vergelijkingsproject betrokken was, een niet-lineariteit van $0,015\%/W/m^2$ en ook de standaard-Funk heeft volgens de fabrieksijking een niet-lineariteit van $0,02\%/Wm^{-2}$. De oorzaak hiervan is waarschijnlijk warmte-overdracht tussen sensor en kapje. Ervan uitgaande dat de onderkant van het instrument vrijwel altijd in thermisch evenwicht is met het kapje en dat convectie onderdrukt wordt als de nettostraling negatief is, kan de volgende vergelijking worden afgeleid om voor de niet-lineariteit te compenseren. De referentiewaarde is 175 Wm^{-2} .

$$(cU)' = (c + (cU - 175) * 0.015 * 10^{-2} * c)U \quad \text{voor } U > 0 \text{ mV}$$

$$(cU)' = 0,974 * cU \quad \text{voor } U \leq 0 \text{ mV}$$

met: c: de calibratiefactor in Wm^{-2}/mV ;
U: het zuilsignaal in mV.

De correctie vergroot de aanwijzing van de Funk vooral bij grote hoeveelheden kortgolvlige straling. Deze niet-lineariteitscorrectie is hier niet toegepast om redenen, die later gegeven worden.

Als de langgolvlige straling van de Funk in de geselecteerde heldere nachten met de Schulze wordt vergeleken, blijkt uit regressie-analyse, dat de gevoeligheid van de Funk 17,8% te klein is. Dit is opvallend veel, het is niet duidelijk hoe de gehanteerde calibratiefactor bijna 20% kan afwijken.

Wanneer de gevoeligheid van de Funk wordt aangepast, zijn de verschillen tussen de

Funk en de Schulze 's nachts kleiner dan 10 Wm^{-2} (zie fig.4.2).

Vervolgens kan de kortgolvlige gevoeligheid van de Funk worden vergeleken met de netto-kortgolvlige straling gemeten met de Kipp, zoals eerder in dit hoofdstuk beschreven. Onmiddellijk valt op dat de verschillen tussen Funk en Schulze groot zijn, tot 50 Wm^{-2} en dat op drie van de zes dagen de Funk groter is dan de Schulze en op de andere drie dagen kleiner, zoals ook in fig.4.2 te zien is. Op de opeenvolgende dagen 10 tot en met 13 maart neemt het verschil tussen Kipp en Funk toe van ca. -10 Wm^{-2} tot zo'n 40 Wm^{-2} . Uit de bezoekerapporten van Cabauw blijkt dat de kapjes van de stralingsmeters op 10 en 14 maart zijn schoongemaakt, maar niet in de tussenliggende periode. Over het algemeen worden de kapjes eens in de twee dagen gereinigd. Op 23 maart zijn de kapjes wel schoongemaakt. Op 2 april niet, de laatste keer dat die voor 2 april zijn schoongemaakt, is op 30 maart.

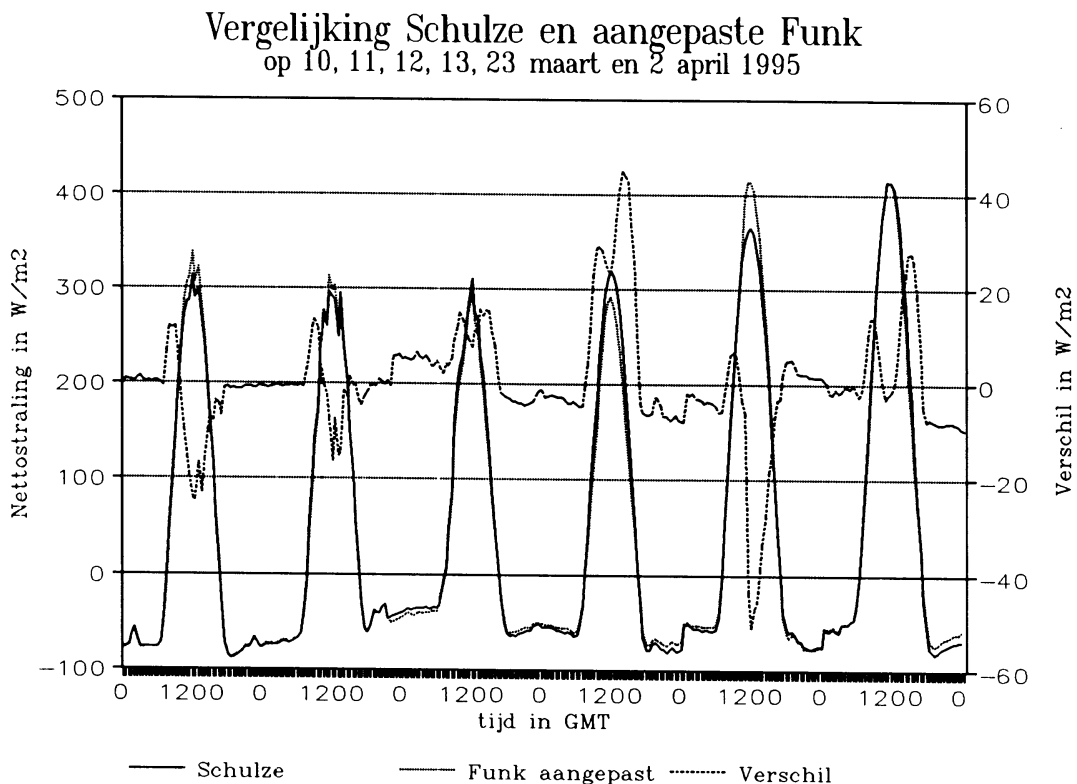


Fig.4.2. De Nettostraling gemeten met de Schulze en de Funk op zes heldere dagen. De gevoeligheid van de Funk is met 17,8% verhoogd. De verschillen zijn overdag groter dan 's nachts. (Verschil = Schulze-Funk).

Voorals de kapjes van de Funk kunnen vuil worden, de sterke ventilatie kan stof aanzuigen, omdat de lucht niet gefilterd wordt. De ventilatie van de Schulze is veel zwakker, het effect is dan naar verwachting kleiner. Mogelijk heeft dit invloed op de metingen.

Het is niet mogelijk om voor alle zes dagen de toppenhoogte van de grafiek van de kortgolvlige straling van de Funk aan te passen aan de Kipp, door een gemiddelde verhouding van de toppenhoogten te bepalen. Een betere manier om een verband te bepalen tussen de metingen van de Funk en de Kipp is het bepalen van een regressiecoëfficiënt. Deze blijkt niet significant af te wijken van 1, dat wil zeggen dat de Funk en de

Kipp gemiddeld gelijke hoeveelheden kortgolvlige straling meten. Er is geen aanleiding om te veronderstellen dat de kortgolvlige gevoeligheid van de Funk afwijkt van de langgolvlige gevoeligheid.

Fig.4.3 laat een vergelijking zien tussen de nettostraling volgens de Schulze en de Funk, waarvan de gevoeligheid met 17,8% is verhoogd. Duidelijk is te zien dat de verschillen 's nachts, als de nettostraling negatief is, klein zijn en overdag groter, afhankelijk van de grootte van de nettostraling. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door een thermische onbalans in het instrument en convectie onder het kapje overdag. Bij een toename van de aanwijzing van de Schulze blijkt de aanwijzing van de Funk evenredig toe te nemen, bij toepassing van de een niet-lineariteitscorrectiecorrectie zou de toename van de Funk meer dan evenredig zijn.

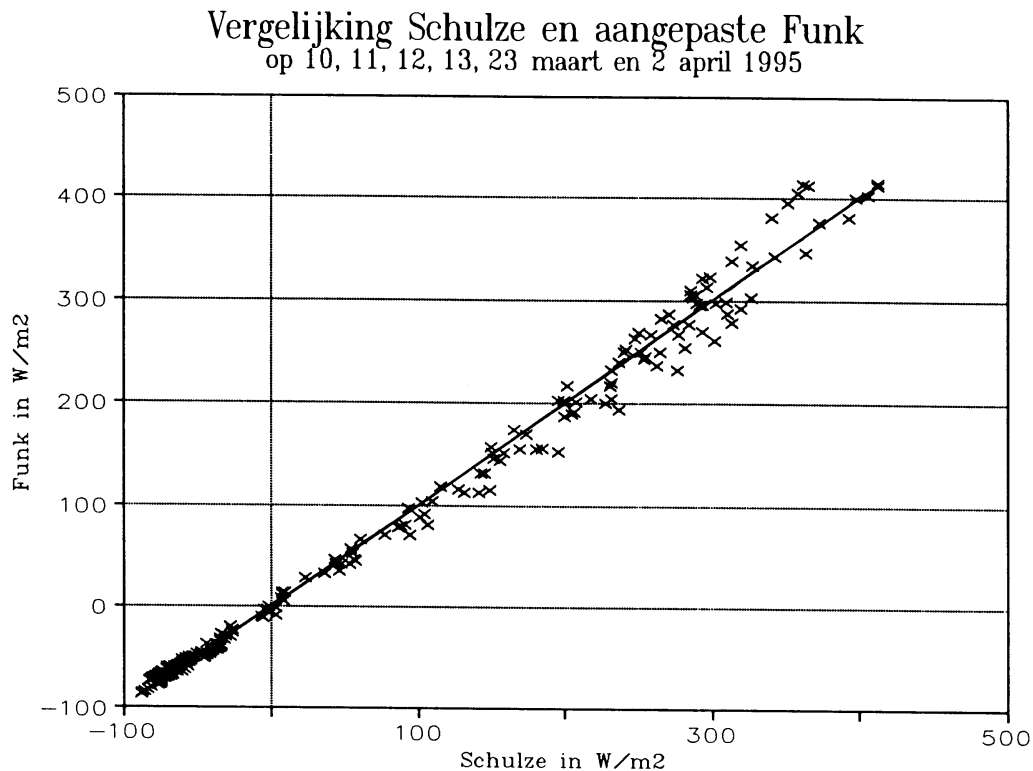


Fig.4.3. Vergelijking tussen de nettostraling gemeten met de Schulze en de Funk, met een 17,8% verhoogde gevoeligheid. De regressielijn van de aangegeven punten wijkt niet significant af van de aangegeven lijn (1:1).

Op 26 april 1995, een redelijk heldere dag, is de Funk enige tijd in omgekeerde positie gehouden om te kijken of de onderzijde van de meter een andere gevoeligheid heeft dan de bovenzijde. De Funk blijkt gedurende de test niet aantoonbaar meer of minder straling te meten.

De Funk is begin mei 1995 opnieuw geijkt, zoals beschreven in hoofdstuk 2.4.2. De ijkfactor blijkt binnen enkele procenten overeen te komen met de ijkfactoren van eerdere ijkingen. De Funk is tweemaal geijkt, een keer met de oude kapjes en een keer met nieuwe kapjes. De gevoeligheid blijkt 6% groter te zijn na vervanging van de oude kapjes. In tabel 4.1 staan de gegevens van de ijking ten opzichte van de referentie-Funk.

Tabel 4.1. IJking van de Funk met oude en nieuwe kapjes.

	oude kapjes	nieuwe kapjes
gevoeligheid instrument	39,734	42,141
rel. gevoeligheid boven	0,9689	1,0328
rel. gevoeligheid onder	0,9780	1,0319
verhouding gevoeligheden	1,0094	0,9991

- ▶De gevoeligheid van het instrument is opgegeven in $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$.
- ▶De relatieve gevoeligheid van de boven- en onderkant van het instrument is de gevoeligheid ten opzichte van de bovenkant van de referentie-Funk.
- ▶De verhouding van de gevoeligheden is de gevoeligheid van de onderkant in verhouding tot de gevoeligheid van de bovenkant.

Conclusie: De gevoeligheden voor lang- en kortgolvlige straling van de Funk verschillen niet significant. De niet-lineariteit lijkt verwaarloosbaar. Er is ook geen aantoonbaar verschil in gevoeligheid tussen de onder- en de bovenzijde van de nettostralingsmeter. Ondanks de aanpassing van de gevoeligheid met 17,8%, blijven de verschillen met de Schulze, vooral overdag, groot, tot zo'n 50 Wm^{-2} . Vervuiling en veroudering van de kapjes heeft mogelijk een belangrijke invloed op de metingen.

4.2 Fritschen

De Fritschen is eveneens vergeleken met de Schulze. Als er bij de referentie-Funk rekening wordt gehouden met de niet-lineariteit, moet de KNMI-ijkfactor van de Fritschen met 5% worden verhoogd. De reden hiervoor is dat de Fritschen is gecalibreerd ten opzichte van de referentie-Funk bij 500 Wm^{-2} . Bij deze intensiteit is de ijkfactor van de Fritschen 5% hoger dan bij de referentie-intensiteit van 175 Wm^{-2} . In dit hoofdstuk wordt de niet-lineariteit van de standaard-Funk verwaarloosd en wordt dus de 5% correctie weggelaten.

De langgolvlige gevoeligheid van de Fritschen blijkt 25% te klein te zijn ten opzichte van de Schulze, wanneer beide in hiervoor genoemde nachten met elkaar worden vergeleken (fig. 4.4). Het is niet duidelijk, wat de reden is van deze grote afwijking van de calibratiefactor. De Funk en de Fritschen hebben beide een afwijking van dezelfde orde van grootte in de calibratiefactor. Na een correctie van 25% komt de nachtelijke langgolvlige straling van de Fritschen binnen 10 Wm^{-2} overeen met de Schulze.

Vergelijking Schulze en Fritschen 10, 11, 12, 13, 23 maart en 2 april 1995

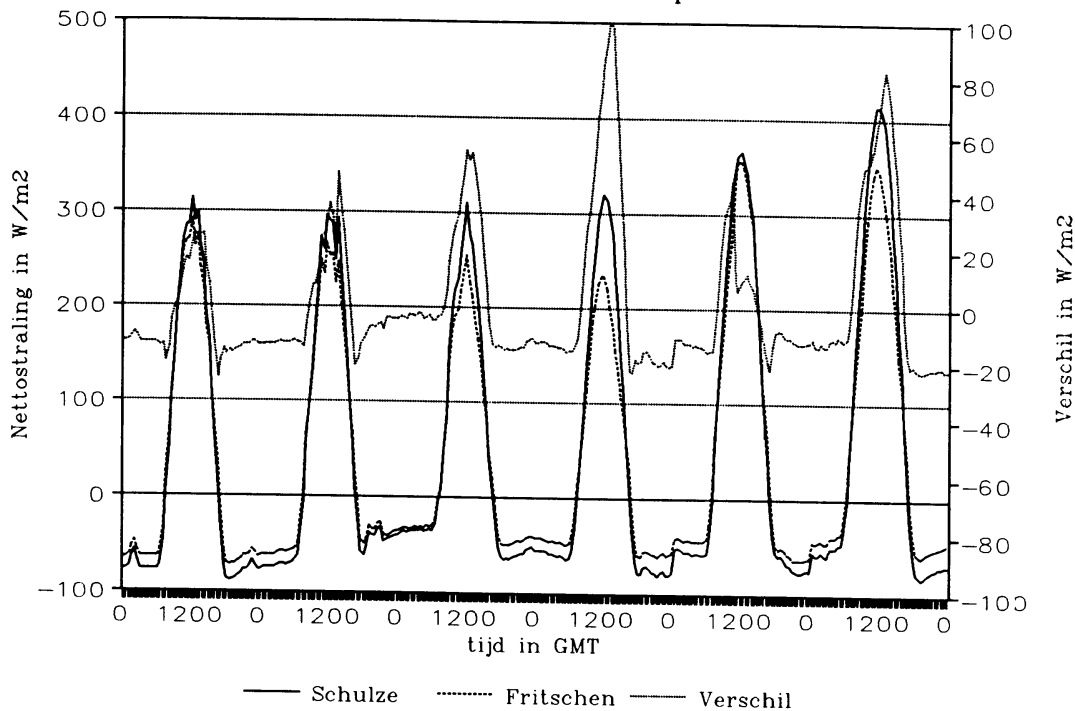


Fig.4.4. Vergelijking van de Schulze en de Fritschen. De Fritschen is gebruikt met de originele ijkfactor. (Verschil = Schulze-Fritschen).

Als de correctiefactor van 25% ook voor de kortgolvlige straling wordt doorgevoerd, kan de kortgolvlige straling, gemeten door de Fritschen, vergeleken worden met de Kipp, door van de Fritschen de langgolvlige straling van de Schulze af te trekken. Uit regressieanalyse blijkt dat de Fritschen 6,2% meer kortgolvlige straling aangeeft dan de Kipp, zoals ook in fig.4.6 is te zien. Hoewel de Fritschen een witte stip op het sensoroppervlak heeft, is de kortgolvlige gevoeligheid van de Fritschen kennelijk groter dan de langgolvlige. Hiervoor kan eventueel worden gecompenseerd door 6% van de netto-kortgolvlige straling, gemeten met de Kipp, af te trekken van de nettostraling, gemeten met de Fritschen. Fig.4.7 laat zien dat de Fritschen dan beter overeenkomt met de Schulze. De regressielijn van de aangegeven punten wijkt niet significant af van de aangegeven lijn, die gelijke gevoeligheden van de Schulze en de Fritschen aangeeft.

Vergelijking Schulze en Fritschen
op 10, 11, 12, 13, 23 maart en 2 april 1995

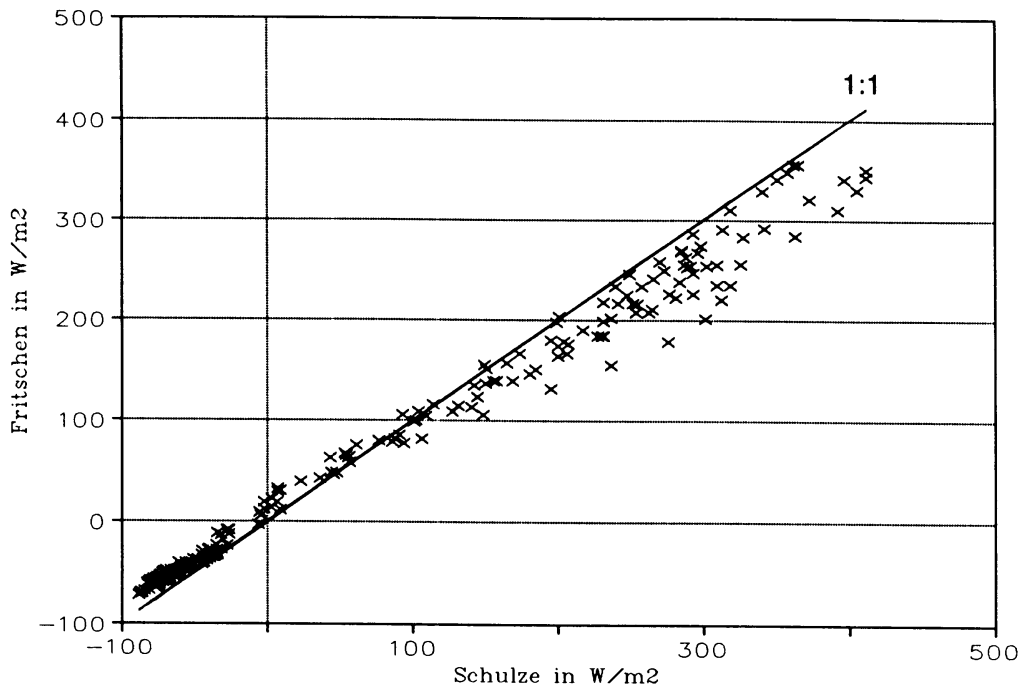


Fig.4.5. Vergelijking van de Schulze en de Fritschen (zonder aanpassing).

Vergelijking Schulze en Fritschen
op 10, 11, 12, 13, 23 maart en 2 april 1995

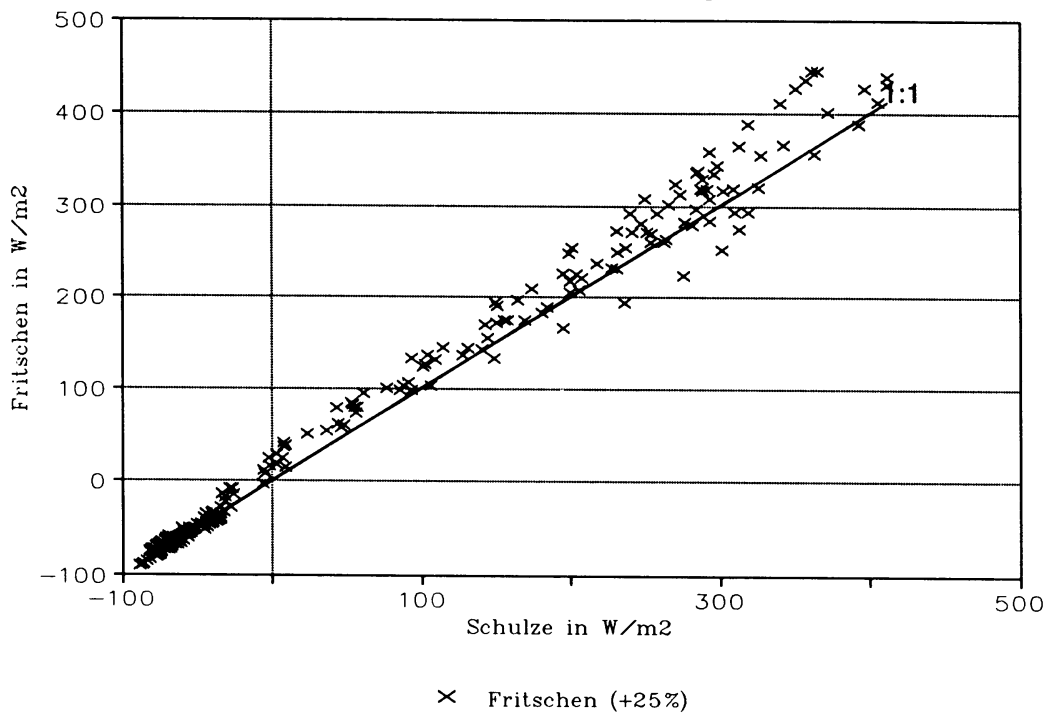


Fig.4.6. De Fritschen met de ijkfactor 25% aangepast.

De Fritschen is, net als de Funk, enige tijd omgekeerd gehouden om de gevoeligheden van de onder- en de bovenzijde te vergelijken. Uit de gegevens blijkt dat de Fritschen in omgekeerde positie ca. 10 Wm^{-2} minder aangeeft bij een nettostraling van 430 Wm^{-2} . De inkomende straling was 980 Wm^{-2} en de uitgaande straling 550 Wm^{-2} . De Fritschen zou dan een asymmetrie hebben van ca. $0,7\%$, waarbij de onderzijde een kleinere gevoeligheid heeft dan de bovenzijde. Hierbij moet worden opgemerkt, dat deze getallen niet geheel betrouwbaar zijn, omdat de lucht tijdens de test niet geheel onbewolkt was.

Uit regressieanalyse van dezelve zes dagen blijkt dat het signaal van de Fritschen $1,7\%$ meer afhangt van het signaal van de bovenkant van de Schulze dan van de onderkant. Dit zou wijzen op een asymmetrie van $1,7\%$.

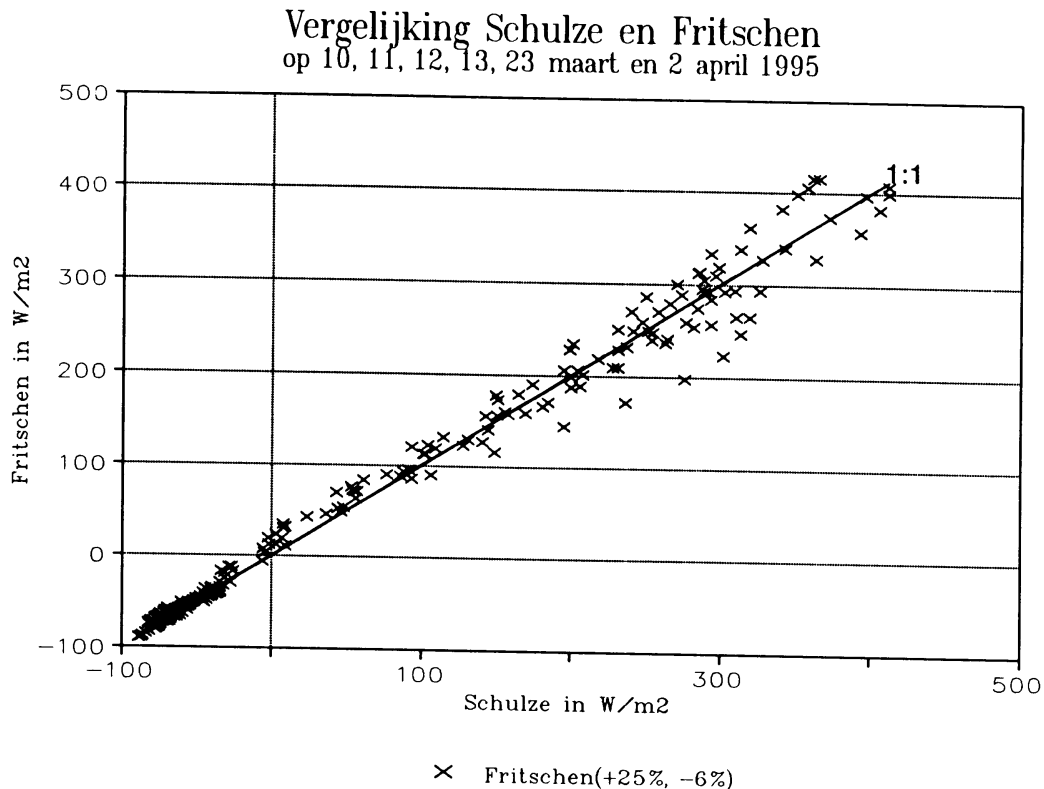


Fig.4.7. De Fritschen met de ijkfactor 25% aangepast voor lang- en kortgolvlige straling. De kortgolvlige gevoeligheid is ten opzichte van de langgolvlige met $6,2\%$ verlaagd.

Ondanks de correcties van de gevoeligheden voor kort- en langgolvlige straling blijven de verschillen groot, zo'n 10 Wm^{-2} 's nachts en 20 tot 80 Wm^{-2} overdag (fig.4.8). Dit zou erop kunnen wijzen dat er overdag onder invloed van het zonlicht warmtestromen in het instrument zijn, die het thermisch evenwicht verstoren en zo ook de meting. De meest waarschijnlijke oorzaak is warmteconvectie onder het kapje.

De Fritschen is begin mei 1995 ook met oude en nieuwe kapjes geijkt met behulp van de referentie-Funk. De gevoeligheid is na vervanging van de oude kapjes toegenomen met $11,7\%$. De asymmetrie blijkt bij de Fritschen sterk afhankelijk te zijn van de ouderdom van de kapjes. Met de oude kapjes was de asymmetrie bijna 15% , na vervanging door nieuwe kapjes is dat minder dan 1% . Zie tabel 4.2.

Tabel 4.2. IJking van de Fritschen met oude en nieuwe kapjes.

	oude kapjes	nieuwe kapjes
gevoeligheid instrument	73,697	82,311
rel. gevoeligheid boven	1,9486	2,0197
rel. gevoeligheid onder	1,6622	2,0131
verhouding gevoeligheden	0,8530	0,9967

- ▶De gevoeligheid van het instrument is opgegeven in $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$.
- ▶De relatieve gevoeligheid van de boven- en onderkant van het instrument is de gevoeligheid ten opzichte van de bovenkant van de referentie-Funk.
- ▶De verhouding van de gevoeligheden is de gevoeligheid van de onderkant in verhouding tot de gevoeligheid van de bovenkant.

Net als bij de Funk nemen de verschillen tussen de Schulze en de Fritschen toe in de loop van 10 tot en met 13 maart, mogelijk omdat de kapjes in die tijd niet zijn schoongemaakt. De Fritschen wordt op dezelfde manier geventileerd als de Funk (zie hoofdstuk 4.1).

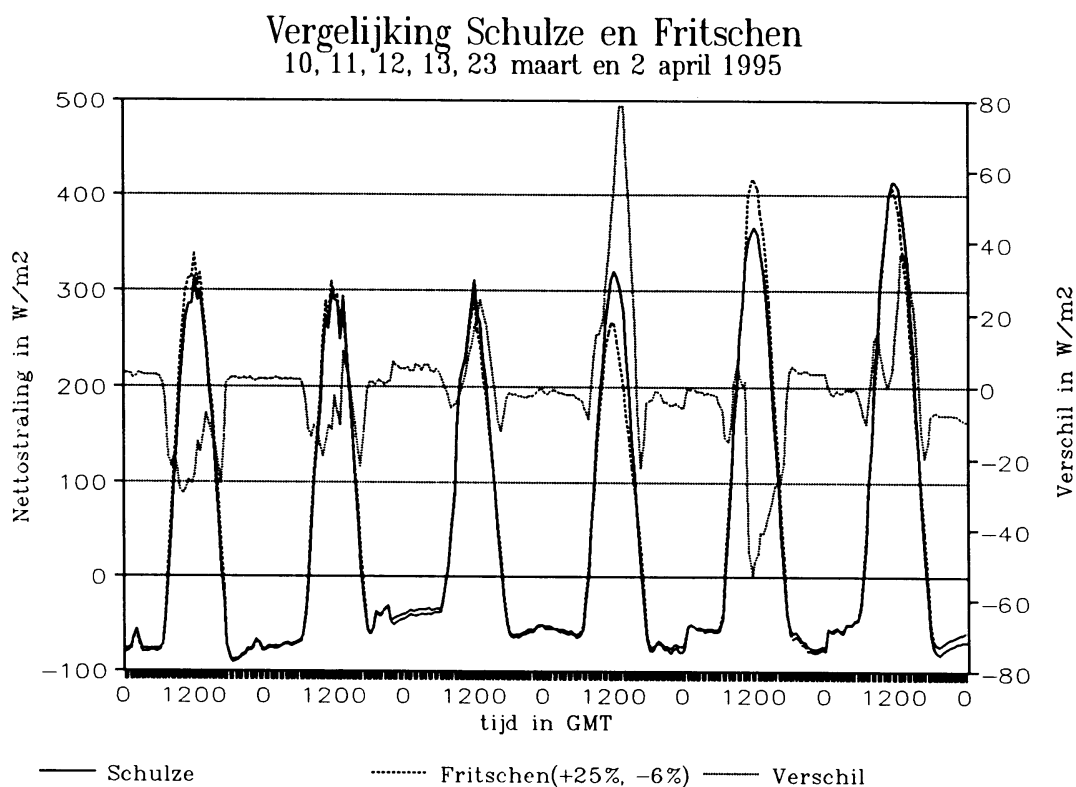


Fig.4.8. Vergelijking van de nettostraling van de Schulze en de Fritschen, na aanpassing van de ijkfactor voor de nettostraling met 25% en van de kortgolvlige gevoeligheid (t.o.v. de langgolvlige gevoeligheid) van -6,2%. (Vershil = Schulze-Fritschen).

Conclusie: De langgolvlige calibratiefactor van de Fritschen lijkt 25% te laag te zijn. De gevoeligheden voor kort- en langgolvlige straling verschillen 6%. Er lijkt een asymmetrie te zijn tussen de onder- en de bovenzijde van het instrument, die afhankelijk is van de ouderdom van de kapjes. Ondanks de aanpassingen van de ijkfactoren voor kort- en langgolvlige straling blijven de verschillen met de Schulze vooral overdag groot, 20 Wm^{-2} tot 80 Wm^{-2} . 's Nachts zijn de verschillen maximaal 10 Wm^{-2} .

5 Conclusies

Er is behoefte aan nauwkeurige metingen van de nettostraling voor het klimaatonderzoek. De gewenste orde van grootte is een paar Wm^{-2} . In deze beschouwing zijn verschillende stralingsmeters met elkaar en met berekeningen vergeleken. Sommige instrumenten zijn getest op mogelijke voorkomende fouten. De instrumenten hebben alle hun voor- en nadelen. De vraag is nu hoe nauwkeurig de stralingsmetingen van de instrumenten zijn en wat de oorzaken zijn van fouten in de metingen of wat bij sommige instrumenten de reden van een grotere betrouwbaarheid is.

De Kipp-pyranometer meet de kortgolvlige straling volgens de fabrikant met een nauwkeurigheid van 3% voor uurgemiddelden en 2% voor daggemiddelden. Het instrument heeft twee kapjes om convectie tegen te gaan en een element om te compenseren voor een interne warmtestroom.

De Eppley-pyrgeometer kan de langgolvlige straling nauwkeurig meten, als het instrument zorgvuldig gecalibreerd is en de huistemperatuur goed gemeten wordt. De transmissie van het siliconkapje is kleiner dan 0,5 en het kapje kan door zonnestraling warmer of door uitstraling kouder worden dan het huis. Het kapje emiteert dan zelf nettostraling. De kapjestemperatuur moet daarom nauwkeurig gemeten worden, zodat er voor afwijkingen kan worden gecompenseerd. Bij vergelijking van metingen en berekeningen van de langgolvlige straling in verschillende nachten waren de verschillen steeds kleiner dan 4 Wm^{-2} .

De metingen van de langgolvlige straling door de Schulze volgen de Eppley goed, hoewel er een constant verschil is tussen de beide metingen. De meting van de inkomende langgolvlige straling met de Schulze is ca. 6 Wm^{-2} groter dan de meting van de Eppley en voor de uitgaande straling is het verschil ca. 3 Wm^{-2} . Er is geen afdoende verklaring gevonden.

De kortgolvlige gevoeligheid van de Schulze lijkt in vergelijking met de Kipp ca. 6% te klein. De oorzaak kan een te lage calibratiefactor zijn. De oorzaak kan ook gezocht worden in een overschatting van de langgolvlige straling door de Eppley, doordat de kapjes warm worden door de zonnestraling. In dat geval wordt de kortgolvlige straling van de Schulze onderschat.

De Schulze heeft het voordeel dat de inkomende en de uitgaande straling afzonderlijk gemeten kunnen worden, er is dan geen sprake van asymmetrie tussen de onder- en de bovenkant van het instrument. De transmissie van het kapje is 80% tot 90%, er is daarom een kleiner effect van een afwijkende kapjestemperatuur te verwachten.

De verschillen tussen de Funk en de Schulze zijn in eerste instantie groot. Dit kan voor een deel worden verklaard met een 17,8% te lage calibratiefactor van de Funk, maar dan nog blijven de verschillen, vooral overdag, groot, tot 50 Wm^{-2} en 's nachts maximaal 10 Wm^{-2} . Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door warmteconvectie onder de kapjes. De gevoeligheid wordt met 6% vergroot door de oude kapjes te vervangen, mogelijk heeft vervuiling van de kapjes een belangrijke invloed gehad. Er lijkt geen sprake te zijn van verschillende gevoeligheden voor kort- en langgolvlige straling of asymmetrie tussen onder- en bovenkant van het instrument.

De langgolvlige gevoeligheid van de Fritschen is in vergelijking met de Schulze 25% te klein. Wanneer de calibratiefactor wordt aangepast, blijkt de kortgolvlige gevoeligheid 6% te groot te zijn. De Fritschen heeft een asymmetrie, met een grootte afhankelijk van de ouderdom van de kapjes. Na aanpassing van de calibratiefactor en correctie voor de verschillende gevoeligheden voor kort- en langgolvlige straling blijven de verschillen tussen de Schulze en de Fritschen overdag groot, tot 80 Wm^{-2} . 's Nachts zijn de verschillen kleiner dan 10 Wm^{-2} .

6 Aanbevelingen

Om de langgolelige straling nauwkeuriger te kunnen meten met de Eppley is meer kennis en inzicht over de invloed van een afwijkende kapjestemperatuur gewenst. De kapjestemperatuur dient daartoe op 3 plaatsen op het kapje gemeten te worden en er zal een correctie moeten worden toegepast als de temperatuur afwijkt.

De metingen, die op deze manier verkregen zijn, kunnen worden vergeleken met de Eppley, die op de zonnevolger staat. Ook kunnen er modelberekeningen van de inkomende langgolelige straling worden uitgevoerd voor situaties overdag.

Als er meer zekerheid bestaat over de betrouwbaarheid van de Eppley, kan de som van de componenten vergeleken worden met de Schulze, zodat er meer zekerheid is over het verschil tussen kort- en langgolelige gevoeligheid van de Schulze.

De Schulze, de Funk en de Fritschen kunnen door middel van beschaduwing in het veld voor de kortgolelige straling worden gecalibreerd. De calibratie op het KNMI van de Funk en de Fritschen kan met ventilatie worden uitgebreid. Zo kan onderzocht worden of er in het verleden fouten zijn gemaakt bij de ijkingen, doordat er in het lab zwakker wordt geventileerd dan in het veld.

Misschien kunnen de Funk en de Fritschen worden uitgerust met kapjes van de Schulze. De laatste verouderen minder snel.

Literatuur

- Alados-Arboledas, L., J. Vida and J.I. Jiménez. Effects of solar radiation on the performance of pyrgeometers with silicon domes. *Journal of atmospheric and oceanic technology*. Vol. 5. Oktober 1988. No. 5. p666-p670.
- Bedienungsanleitung. Strahlungsbilanzmesser nach Prof. Dr. Ing. Schulze. BDA 065.
- Dehne, K., and U. Bergholter. Longwave radiometer comparison in Hamburg 1989/1990. Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Hamburg. 1990.
- Dehne, K., U. Bergholter and F. Kasten. IEA comparison of longwave radiometers. Technical report No. IEA-SHCP-9F-3. Hamburg, Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Hamburg. 1993. 71pp.
- Dorland, R. van. The extension of the ECMWF radiation scheme with trace gases and aerosols for climate modelling purposes: methods and performance. To be published in: *Journal of Geophysical Research* in 1995.
- Eppley Laboratory, INC, The. Instrumentation for the measurement of the components of solar and terrestrial radiation. Newport, Rhode Island. 1993. 16pp.
- Foot, J.S. A new pyrgeometer. *Journal of atmospheric and oceanic technology*. Vol 3. September 1986. No.3. p363-p370.
- Fritschen, L.J., and C.L. Fritschen. Design and evaluation of net radiometers. In: *Proceedings of the seventh symposium on meteorological observations and instrumentation*. New Orleans. p113-p117. American Meteorological Society. Boston. 1991.
- Halldin, S. and A. Lindroth. Errors in net radiometry: Comparison and evaluation of six radiometer designs. *Journal of atmospheric and oceanic technology*. Vol.9. December 1992. No 6. p762-p783.
- Lammeren, A.C.A.P. van, en A. Hulshof. Standaard stralingsmetingen met een zonnevolger. Technisch rapport; TR-164. De Bilt. KNMI. 1994. 39pp.
- Frerichs, H.J.M.. Handleiding voor het vergelijken van de Funk-nettostralingsmeter met de standaard-Funk. Memorandum FM 81 11. De Bilt. KNMI. April 1981. (Intern document).

Miskolczi, F. and R. Guzzi. Effect of nonuniform spectral dome transmittance on the accuracy of infrared radiation measurements using shielded pyrrometers and pyrgeometers. *Applied Optics*. Vol. 32. June 1993. No. 18. p3257-p3264.

Philipona, R., C. Fröhlich and Ch. Betz. Characterization of pyrgeometers and the accuracy of atmospheric long-wave radiation measurements. *Applied Optics*. Vol.34. March 1995. No.9. p1598-p1605.

Sellers, W.D.. *Physical Climatology*. Chicago, London. The University of Chicago Press. 1972⁴ (1965). 272pp.

Nawoord

Graag wil ik iedereen, die mij geholpen heeft bij het werk, daarvoor hartelijk bedanken. Ik heb een plezierige tijd gehad en ik heb veel geleerd, zowel over straling en stralingsmeters als over de praktijk van het onderzoeken en het gebruik van software.

In het bijzonder wil ik de volgende mensen bedanken: dhr. Kohsiek, die mij begeleidt heeft, dhr. Van Ulden, dhr. Van Dorland, dhr. van der Vliet, dhr. Bosveld en dhr. Van Lammeren, met wie het prettig was om samen te werken. Verder wil ik dhr. Rauw bedanken voor de vele praktische hulp, die hij geboden heeft en dhr. Carolus en dhr. Csikós voor veel achtergrond informatie en hulp.

Michiel Kors van der Molen
juni 1995

Bijlage A Warmtebalans van de pyrgeometer

Straling is een vorm van energie-overdracht. De straling valt op het sensoroppervlak, maar dat staat ook weer energie af aan de omgeving, onder andere door geleiding en warmtestraling. Nauwkeurige stralingsmetingen vereisen daarom een goede beschrijving van de warmtestromen in het instrument. De meting van de langgolvlige straling wordt veelal beschreven met de volgende vergelijkingen:

$$\alpha_s \tau_k L^\downarrow + \alpha_s \epsilon_k \sigma T_k^4 - \epsilon_s \sigma T_s^4 = \frac{\lambda}{d} (T_s - T_h)$$

met L^\downarrow : de inkomende langgolvlige straling op pyrgeometerniveau (Wm^{-2}),
 T_k, T_s, T_h : de temperatuur van het kapje, de sensor en het huis (K),
 α_s : de absorptie van het sensoroppervlak,
 ϵ_k en ϵ_s : de emissie van het kapje en de sensor,
 τ_k : de transmissie van het kapje,
 λ : de warmtegeleidingscoëfficiënt van de thermoziil ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$),
 d : de dikte van de thermoziil (m),
 σ : de constante van Stefan-Boltzmann ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$).

Als gevolg van de wet van Kirchhoff is de absorptiecoëfficiënt α gelijk aan de emissiecoëfficiënt ϵ . De uitstraling van de sensor wordt benaderd met:

$$\epsilon_s \sigma T_s^4 = \epsilon_s \sigma T_h^4 + 4\epsilon_s \sigma T_s^3 (T_s - T_h)$$

Hieruit volgt:

$$\alpha_s \tau_k L^\downarrow = \frac{\lambda}{d} (T_s - T_h) + \epsilon_s \sigma T_h^4 + 4\epsilon_s \sigma T_s^3 (T_s - T_h) - \alpha_s \epsilon_k \sigma T_k^4$$

Het verschil tussen de zuiltemperatuur en de kapjestemperatuur wordt verwaarloosd:

$$\alpha_s \tau_k L^\downarrow = \left(\frac{\lambda}{d} + 4\alpha_s \sigma T_s^3 \right) (T_s - T_h) + (1 - \epsilon_k) \alpha_s \sigma T_k^4$$

Hieruit kan de inkomende langgolvlige straling worden bepaald:

$$L^\downarrow = \left(\frac{\lambda}{\alpha_s \tau_k d} + \frac{4\sigma T_s^3}{\tau_k} \right) (T_s - T_h) + (1 - \epsilon_k) \alpha_s \sigma T_k^4$$

Als het temperatuurverschil tussen het huis en het sensoroppervlak en de huistemperatuur van de pyrgeometer bekend is kan met behulp van een calibratiefactor de langgolvlige straling berekend worden. In de praktijk wordt het temperatuurverschil tussen het huis en het sensoroppervlak gemeten met behulp van een thermoziil, die een spanning afgeeft die evenredig is met het temperatuurverschil tussen de beide oppervlakken. De hoeveelheid

langgolvlige straling die op het sensoroppervlak valt wordt dan berekend door de thermospanning te vermenigvuldigen met een calibratiefactor en daarbij de temperatuurstraling van het huis op te tellen.

De bovenstaande afleiding houdt geen rekening met warmteoverdracht naar het huis via de randen van de sensor, met warmteoverdracht door convectie tussen huis, sensor en kapje, en met stralingsreflectie op het sensoroppervlak.

Om de langgolvlige stralingsmeting nauwkeuriger uit te voeren, zijn er methodes ontwikkeld die met deze processen wel rekening houden (Foot, 1986, Alados-Arboledos et al., 1988, Philipona et al., 1995).

Naast de hiervoor genoemde, worden de volgende symbolen gebruikt:

- L_{in} : de langgolvlige straling die het sensoroppervlak bereikt (Wm^{-2}),
- L_{uit} : de langgolvlige straling die van het sensoroppervlak uit gaat (Wm^{-2}),
- α : de warmteoverdrachtscoëfficiënt ten gevolge van geleiding en convectie via de lucht tussen het sensoroppervlak en het huis ($Wm^{-2}K^{-1}$),
- α_o : de warmteoverdrachtscoëfficiënt ten gevolge van geleiding en convectie via de lucht tussen het sensoroppervlak en het kapje ($Wm^{-2}K^{-1}$),
- β : de warmtegeleidingscoëfficiënt vanwege geleiding via metaal en andere materialen tussen het sensoroppervlak en het huis ($Wm^{-2}K^{-1}$),
- ρ_s : de reflectie van het sensoroppervlak,
- ρ_k : de reflectie van het kapje.

$$L_{in} = \tau_k L^i + \epsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k L_{uit}$$

$$L_{uit} = \epsilon_s \sigma T_s^4 + \rho_s L_{in}$$

De netto-straling die op het oppervlak terecht komt, wordt als volgt afgevoerd:

$$L_{in} - L_{uit} = (\alpha + \beta)(T_s - T_h) + \alpha_o(T_s - T_k)$$

Na enig rekenwerk en enkele benaderingen worden deze vergelijkingen omgezet in (Alados-Arboledas te al., 1988):

$$L^i = \frac{\alpha + \beta + 4\epsilon_s \sigma T_h^3 (1 - \rho_k)}{\epsilon_s \tau_k} (T_s - T_h) + \sigma T_h^4$$

$$- \frac{\alpha_o + 4\epsilon_s \epsilon_k \sigma T_h^3}{\epsilon_s \tau_k} (T_k - T_h)$$

De eerste twee termen in het rechterlid van deze vergelijking zijn vergelijkbaar met het rechterlid van de eerste afleiding. We zien dat er meer warmtegeleidingscoëfficiënten zijn betrokken bij de afleiding, om een beter beeld te geven van de warmtestromen in de pyrgeometer. De derde term in het rechterlid is nieuw. Deze term is een correctieterm voor

de afwijkende kapjestemperatuur. De term $(\alpha_0 / \epsilon_s \tau_k)$ zou 7 à 8 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ zijn, zodat bij een huistemperatuur van 288 K de hele coëfficiënt ca. 10 à 12 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ zou zijn (Alados-Arboledos et al., 1988). Volgens Foot (1986) en Philipona et al.(1995), die vergelijkbare coëfficiënten hebben afgeleid, zou dit ca. 22 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ moeten zijn. Een foute meting van de huistemperatuur heeft een invloed op de bepaling van de langgolvlige straling van 5,4 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ bij 288 K. Een pyrgeometer is in vergelijking hiermee circa vier keer gevoeliger voor een afwijkende kapjestemperatuur.

De fouten die ontstaan als er niet voor de kapjestemperatuur wordt gecorrigeerd, zullen vooral voor de opwaarts gerichte stralingsmeter aanzienlijk zijn. In nachtelijke onbewolkte situaties het bovenste kapje aan de buitenkant blootgesteld aan de koude hemelkoepel en zal dan afkoelen door netto langgolvlige uitstraling, zodat er ook minder straling op het sensoroppervlak valt. Overdag kan het kapje door de opvallende zonnestraling warm worden.

In bewolkte situaties en voor de neerwaarts gerichte pyrgeometer is het effect naar verwachting kleiner, omdat er een grotere mate van stralingsevenwicht heerst. Het kapje is in die gevallen blootgesteld aan stralers die relatief weinig in temperatuur afwijken van de kapjestemperatuur.

Als bij de bepaling van de langgolvlige straling gecompenseerd wordt voor de kapjestemperatuur, moet de kapjestemperatuur nauwkeurig gemeten worden. De temperatuur van het kapje is niet op alle plaatsen gelijk, afhankelijk van de zonnestand, de bewolking en de windsnelheid en -richting. Daarom kan volgens Philipona et al.(1995) de kapjestemperatuur het best op drie plaatsen gemeten worden met thermistors met een onderlinge hoek van 120° en op een hoogte op het kapje van 45°.

Bijlage B Controle van de elektronica

Om te controleren of er geen afwijkingen ontstaan in de stralingsmetingen ten gevolge van het transport van het signaal door de leidingen en de versterking en registratie van de afgegeven signalen, zijn er enkele tests uitgevoerd.

Een test is uitgevoerd om te controleren of er een off-set optreedt en de andere om te zien of de juiste spanning geregistreerd wordt en of daaruit op de juiste manier het stralingsvermogen wordt berekend.

De tests zijn in Cabauw uitgevoerd, met zo min mogelijk verstoring van de normale omstandigheden. Dat betekent dat het meetsysteem zo veel mogelijk ineens is doorgemeten zonder de onderdelen los te koppelen.

Tabel 1. Gegevens van de instrumenten.

Instrument	Versterkingsfactor	Calibratiefactor W/m ² /V	Gevoeligheid μV/W/m ²	Interne weerstand Ω	
Kipp	globaal	2000	125	4.00	1.1 k
	albedo	2000	125	4.00	1.1 k
	diffuus	2000	125.628	3.98	1.1 k
Eppley	boven	5000	53.763	3.72	680
	onder	5000	51.948	3.85	680
Funk	300	78.763	42.32	78	
Fritschen	125	103.31	77.44	4	
Schulze	boven	n.v.t.	n.v.t.	42.6	2
	onder	n.v.t.	n.v.t.	43.8	2

1. Controle op off-set

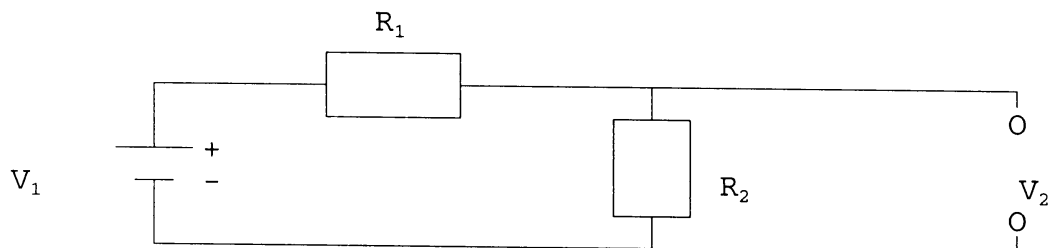
De eerste test had als doel te controleren of er spanningen worden opgewekt of geregistreerd, die niet door de sensor worden opgewekt. Deze spanningen zouden gemiddeld nul kunnen zijn, maar met een sterke ruis. De gemiddelde spanning zou ook ongelijk aan nul kunnen zijn, dan heeft de meetapparatuur een zogenaamde off-set. Door in het verbindingkastje bij de stralingsmeter de sensor los te koppelen en te vervangen door een weerstand die vergelijkbaar is met de interne weerstand van de sensor, is de elektronica eenvoudig op off-set te controleren. De interne weerstand van de stralingsmeters staat in tabel 1 en de gebruikte vervangingsweerstand in tabel 2. De resultaten van de test zijn te vinden in tabel 3.

De resultaten zijn voor de meeste instrumenten bevredigend, de off-set is alleen voor het albedo groter dan 1 Wm⁻². De off-set bij de andere instrumenten verwaarloosbaar. De standaarddeviatie van de geregistreeerde spanning is bij alle instrumenten in de zelfde orde van grootte als de gemeten off-set.

Tabel 2. Spanningen en weerstanden.

Instrument	Rv Ω	V1 V	R1 Ω	R2 Ω	V2 mV	
Kipp globaal albedo	1.2 k	8.82	2.4 M	1.0 k	3.67	
	1.2 k	8.82	2.4 M	1.0 k	3.67	
Eppley boven onder	680	1.462	2.2 M	680	0.452	
		-1.462	2.2 M	680	-0.452	
	680	1.462	2.2 M	680	0.452	
		-1.462	2.2 M	680	-0.452	
Funk *	75	1.463	3.9 k	75	27.6	
		1.463	3.9 k	75	-27.6	
Fritschen *	4	8.92	24 k	10	3.7	
		-8.92	24 k	10	-3.7	
		8.28	1.0 k	4.0	33.0	
Schulze boven *	18.0	8.88	2.4 k	2.0	7.4	
		-8.65	2.4 k	2.0	-7.2	
		1.31	51	2.0	49.5	
		-1.30	51	2.0	-49.0	
	onder *	4.0	8.65	2.4 k	2.0	7.2
			-8.65	2.4 k	2.0	-7.2
			1.30	51	2.0	49.1
			-1.30	51	2.0	-49.0

* V2 gemeten i.p.v. V1



Figuur 1. Gebruikte weerstanden in de spanningsdeler.

2. Controle van de aangeboden spanning.

Een stralingsmeter zet het temperatuurverschil over de thermozuil om in een spanningsverschil. Dit spanningsverschil wordt weer omgerekend naar het stralingsvermogen in Wm^{-2} . Met behulp van een batterij en een spanningsdeler kan een bekende spanning worden aangeboden. Op deze manier kan de stralingsmeter gesimuleerd worden en de registratie gecontroleerd.

De resultaten staan weer in tabel 3. Voor de Schulze- en Kipp-stralingsmeters zijn de verschillen in de orde van tienden van procenten. Voor de Funk zijn de verschillen iets

groter, maar voor de Eppley en de Fritschen zijn de metingen in de buurt van drie procent groter dan de verwachte waarden.

Tabel 3. Resultaten.

Instrument	Berekend vermogen W/m2	Meting W/m2	Verschil		Off-set W/m2
			W/m2	%	
Kipp globaal albedo diffuus	918	920	2	0.2	-0.08
	918	919	1	0.1	1.37
					0.48
Eppley boven	122	126	4	3.3	0.478
	-122	-125	-3	2.5	
	117	120	3	2.6	
	-117	-120	-3	2.6	
Funk	652	661	9	1.4	-0.24
	-652	-662	-10	1.5	
Fritschen	47.8	49.0	1.2	2.5	-0.153
	-47.8	- 9.5	-1.7	3.4	
	426.0	424.4	-1.6	-0.4	
Schulze boven	174	169	-5	-2.9	0.157
	-169	-169	0	0.0	
	1162	1155	-7	-0.6	
	-1150	-1152	-2	0.2	
	164	165	1	0.6	
	-164	-165	-1	0.6	
	1121	1121	0	0.0	
	-1119	-1121	-2	0.2	
onder					0.153

3. Controle van de Pt-100

De temperatuur van het huis van de Schulze wordt gemeten met behulp van een Pt-100-temperatuur-afhankelijke weerstand. Om de Pt-100 registratie te controleren werd de Pt-100 losgekoppeld en vervangen door een decadenbank.

De relatie tussen weerstand en temperatuur wordt beschreven door:

$$R_T = R_0(1 + a(T - T_0) + b(T - T_0)^2)$$

met: R_T : de weerstand bij T °C,
 R_0 : de weerstand bij 0 °C,
 $a = 3.9 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$ en $b = -5.5 \cdot 10^{-7} \text{ °C}^{-2}$.

In het kader van deze test is b te verwaarlozen en kan de temperatuur geschreven worden als functie van de weerstand:

$$T = \frac{1}{a} * \frac{R_T}{R_0} - \frac{1}{a} + T_0$$

Met $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ en $R_0 = 100 \text{ } \Omega$ komt dit neer op :

$$T = 2.5641 * R_T - 256.41$$

Door nu met behulp van de decadenbank verschillende weerstanden aan te bieden aan de datalogger kan de temperatuur registratie gecontroleerd worden. De resultaten van de test staan in tabel 4. Uit de test blijkt dat de geregistreerde temperatuur bijna een halve graad hoger is dan de nagebootste temperatuur. De gemeten temperatuur van $0,44 \text{ }^\circ\text{C}$ bij nul $^\circ\text{C}$ zou overeenkomen met een aangeboden weerstand van $100,17 \text{ } \Omega$. Mogelijk is de weerstand van de bedrading van de decadenbank naar het aansluitpunt met het schakelkastje $0,17 \text{ } \Omega$. Overigens is de weerstand van de bedrading van het schakelkastje naar de datalogger niet van belang, omdat hiervoor gecompenseerd wordt.

Tabel 4. Controle Pt-100.

R Ω	Temperatuur		
	berekend $^\circ\text{C}$	registratie $^\circ\text{C}$	verschil $^\circ\text{C}$
96	-10.26	-9.68	0.58
98	-5.13	-4.61	0.52
100	0	0.44	0.44
101	2.56	3.00	0.44
102	5.13	5.57	0.44
104	10.26	10.68	0.42
106	15.38	15.82	0.44
108	20.51	20.95	0.44
110	25.64	26.13	0.49
115	38.56	39.02	0.46
120	51.28	52.07	0.79

Conclusies:

- ▶De off-sets zijn acceptabel, voor alle instrumenten kleiner dan $0,5 \text{ Wm}^{-2}$, behalve voor de albedometer.
- ▶De versterkingen van de spanningen zijn binnen 1% nauwkeurig. De verschillen zijn niet significant als de onnauwkeurigheid van de metingen in aanmerking wordt genomen. Een uitzondering moet gemaakt worden voor de versterking van de Eppleyzuilen, die ca. 3% te groot is.

Bijlage C Schulze met verschillende gevoeligheden voor lang- en kortgolvlige straling

De calibratiefactoren van de Schulze, zoals die bij de ijking van 4 mei 1994 zijn vastgesteld, staan in tabel 1. Omdat de Schulze één signaal geeft voor alle opvallende straling, kan er niet zonder meer met verschillende gevoeligheden voor kort- en langgolvlige straling gerekend worden. Met behulp van de volgende procedure kan er toch mee gewerkt worden.

De calibratiefactoren voor de kortgolvlige straling zijn opgegeven volgens de IPS-schaal uit 1956, omdat er nu gewerkt wordt volgens de WRR-schaal uit 1977 zijn de factoren omgerekend. Het verschil is 2,2%.

Tabel 1. Calibratie Schulze.

Schulze d.d. 04/05/94	Calibratiefactor (mV/W/m ²)		
	kortgolvlige IPS WRR		langgolvlige
Bovenste zuil	0.0450	0.0440	0.0426
Onderste zuil	0.0468	0.0458	0.0438

Schat L uit de meting van de Schulze (K+L) en de Kipp (K). Bereken dan K + L met de toepasselijke calibratiefactoren.

$$U_b = 0.0440K^{\downarrow} + (L^{\downarrow} - \sigma T_h^A)0.0426 \approx 0.0440K^{\downarrow Kipp} + (L^{\downarrow} - \sigma T_h^A)0.0426$$

$$\Rightarrow L^{\downarrow} = \frac{U_b - 0.0440K^{\downarrow Kipp}}{0.0426} + \sigma T_h^A$$

$$\Rightarrow K^{\downarrow} + L^{\downarrow} = U_b / 0.0426 - 0.033K^{\downarrow Kipp} + \sigma T_h^A$$

en voor de uitgaande straling:

$$K^{\uparrow} + L^{\uparrow} = U_b / 0.0438 - 0.046K^{\uparrow Kipp} + \sigma T_h^A$$

Voor iedere 100 Wm⁻² die de Kipp aangeeft wordt de Schulze zo'n 6 Wm⁻² gecorrigeerd. Met deze methode is het in principe mogelijk nauwkeuriger te meten. Het nadeel is alleen dat er nu naast de Schulze ook twee Kipps nodig zijn om de nettostraling te meten.

Bijlage D Foutenbronnen

Bij stralingsmetingen kunnen door allerlei oorzaken fouten ontstaan. Hier volgt een opsomming van de belangrijkste foutenbronnen. Zie ook fig.2.

	instrument	afwijking
▶dauw- of rijpvorming op kapjes	Schulze	+10-150 Wm ⁻²
▶terreininvloeden	neerwaarts gerichte instr.	+/-
▶fouten bij spanningsmeting	alle	+/-
▶cosinusfout	Funk	ca.-2 Wm ⁻²
▶foute huis-temperatuurmeting	pyrgeometer	5 Wm ⁻² K ⁻¹
	pyrradiometer	5 Wm ⁻² K ⁻¹
▶afwijkende kapjestemperatuur	pyrgeometer	20 Wm ⁻² K ⁻¹
▶convectie onder kapje	alle naar boven gerichte instr.	< 100 Wm ⁻²
▶vervuiling en veroudering kapje	Funk, Fritschen	tot 12%
▶niet-lineariteit	Funk	+/-
▶calibratiefouten	pyrgeometer	+/-
	pyrradiometer	+/-
	pyranometer	+/-1%
▶verschillende gevoeligheden voor kort- en langgolvlige straling	Schulze	ca.3%
	Fritschen	< 10%
▶asymmetrie	Fritschen	tot 15%
▶siliconkapjes laten deel van de kortgolvlige straling door	pyrgeometer	max.6 Wm ⁻²

Glaskapjes laten kortgolvlige straling door tot 2800 nm, maar er is nog wel zonnestraling met een grotere golflengte. Bij de calibratie van de Kipp wordt hiermee rekening gehouden. Siliconkapjes laten langgolvlige straling door vanaf een golflengte van 3 à 4 µm. Er is nog zonnestraling bij deze golflengten. Deze kortgolvlige straling is bij de Kipp in rekening gebracht, maar wordt dus ook door de Eppley gemeten. De straling tussen 2,8 µm en 3 à 4 µm wordt door beide kapjes niet doorgelaten.

De fouten die hierbij gemaakt worden, kunnen berekend worden, als wordt aangenomen dat de temperatuur aan het oppervlak van de zon 5800 K is, de stralingstemperatuur van de atmosfeer 250 K is, dat de siliconkapjes straling doorlaten vanaf 3,5 µm en dat de kortgolvlige stralingsintensiteit aan het aardoppervlak 1000 Wm⁻² is (¹). Met behulp van de wet van Planck dan kunnen de kort- en langgolvlige stralingsintensiteiten in een bepaald golflengtegebied worden berekend (fig.1). Bij de berekening van de fouten, die gemaakt worden, wordt aangenomen dat transmissie van de kapjes 1 is in het golflengtegebied waar ze doorlatend zijn en 0 daarbuiten.

De glaskapjes laten dan 11,4 Wm⁻² van de zonnestraling niet door, waarvan 5,4 Wm⁻²

door zowel de glas- als de siliconkapjes niet wordt doorgelaten en $6,0 \text{ Wm}^{-2}$ wel wordt doorgelaten door de siliconkapjes. De siliconkapjes laten $0,026 \text{ Wm}^{-2}$ van de atmosferische straling niet door, waarvan $0,025 \text{ Wm}^{-2}$ door beide kapjes niet wordt doorgelaten en $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Wm}^{-2}$ wel wordt doorgelaten door de glaskapjes.

Zoals vermeld is er bij de calibratie van de Kipp gecompenseerd voor de $11,4 \text{ Wm}^{-2}$ van de zonnestraling, die niet wordt gemeten. Er wordt een fout gemaakt, doordat de siliconkapjes $6,0 \text{ Wm}^{-2}$ van deze straling doorlaat. Deze hoeveelheid zonnestraling wordt zowel bij de meting van de Kipp als de meting van de Eppley meegeteld. De fout die wordt gemaakt ligt in dezelfde orde van grootte als de onnauwkeurigheid van de Kipp (hoofdstuk 2.2). De hoeveelheid langgolvlige straling, die de siliconkapjes niet doorlaten, is verwaarloosbaar ten opzichte van de meetonzekerheden van de Eppley (hoofdstuk 3.1).

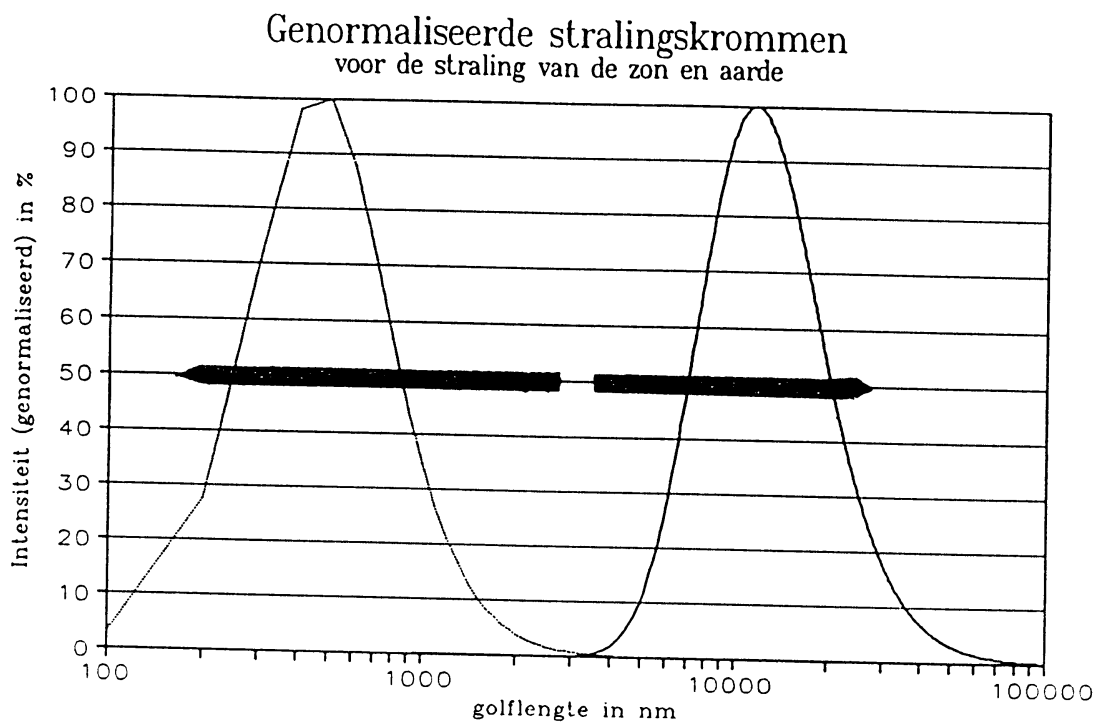


Fig.1. De genormaliseerde stralingskrommen van de zon (5800 K) en de atmosfeer (250 K). In de figuur is aangegeven bij welke golflengten glas- en siliconkapjes doorlatend zijn.

(¹) Hoewel de zonneconstante 1365 Wm^{-2} is, staat de zon in Nederland nooit in het zenith. Bovendien heeft de atmosfeer een bepaalde troebelheid. Daarom is de totale hoeveelheid inkomende zonnestraling met 27% teruggebracht tot 1000 Wm^{-2} .

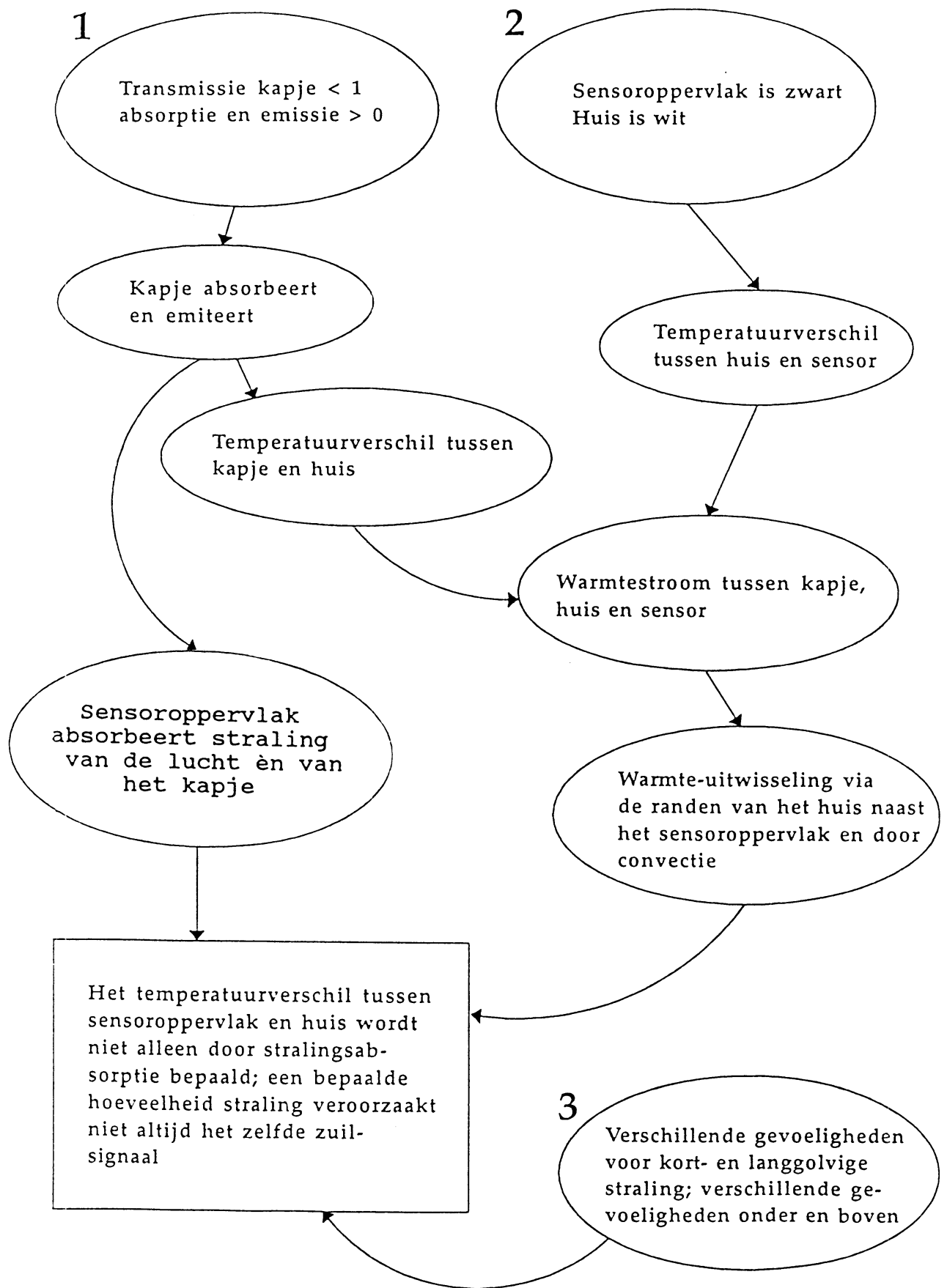


Fig.2. Fouten die kunnen ontstaan bij stralingsmetingen.

Bijlage E Aansluiting van de Eppley

Naar aanleiding van het vreemde gedrag van de temperatuur van het huis en de kapjes, zijn de aansluitingen van de Eppley gecontroleerd. Er bleek een aantal verkeerde aansluitingen te zijn. De temperatuur die de huistemperatuur werd genoemd, bleek in werkelijkheid de kapjestemperatuur te zijn. Dat wat de kapjestemperatuur werd genoemd, was in werkelijkheid de huistemperatuur, maar daarbij was ook onder en boven verwisseld. Tabel 1 laat een overzicht zien.

Tabel 1. Aansluiting van de Eppley.

Regi- stratie	Signaal			
	voor 29/3/95	29/3/95 8/5/95	8/5/95 11/5/95	vanaf 11/5/95
LWDS	zuil boven	zuil boven	zuil boven	zuil boven
LWDH	kapje boven	kapje boven	huis onder*	huis boven
LWDK	huis onder	huis boven	kapje onder	kapje boven
LWUS	zuil onder	zuil onder	zuil onder	zuil onder
LWUH	kapje onder	kapje onder	huis boven	huis onder*
LWUK	huis boven	huis onder*	kapje boven	kapje onder

*Dit signaal vertoont een afwijkend gedrag.

►LW staat voor Long Wave, D voor Down (neerwaarts), U voor Up (opwaarts) en K voor Kapje.

Op 22 maart zijn de versterkers, die het signaal van de huis- en de kapjestemperatuur versterken, vervangen. Op de kanalen LWDK en LWUK had dit een temperatuursprong van ca. 2°C ten gevolge, terwijl het effect op de kanalen LWDH en LWUH minder duidelijk was. Op 29 maart is de Eppley omgekeerd, omdat wat toen de registratie was van LWDK een afwijkend gedrag vertoonde. Op 8 mei is begonnen met de controle van de aansluitingen. De juiste aansluiting is op 11 mei voltooid.