

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

W.H. Slob en W.A.A. Monna

Technische rapporten; TR - 136

INHOUD

| | | |
|-----|---|----|
| | Summary and conclusions | iv |
| 1. | Inleiding | 1 |
| 2. | Instrumentatie | 2 |
| 3. | Berekening van diffuse en directe straling | 3 |
| 3.1 | Geen bewolking | 3 |
| 3.2 | Geheel bewolkt | 5 |
| 3.3 | Gedeeltelijk bewolkt, soms een wolk voor de zon | 5 |
| 3.4 | Gedeeltelijk bewolkt; soms een wolk voor de zon; toch $(G/G_0)_{\min} \geq 0.4$ | 6 |
| 3.5 | Overzicht van alle situaties | 6 |
| | Survey of all situations | 6 |
| 4. | Evaluatie | 8 |
| 4.1 | Vergelijking met metingen | 8 |
| 4.2 | Conclusie | 9 |
| 5. | Bepaling van de zonneshijnduur | 11 |
| 5.1 | $\sin(h) < 0.1$ | 11 |
| 5.2 | $0.1 \leq \sin(h) < 0.3$ | 11 |
| 5.3 | $\sin(h) \geq 0.3$ | 12 |
| | 5.3.1 Geen zon | |
| | 5.3.2 Geheel zonnig | |
| | 5.3.3 Wisselend bewolkt (af en toe zon) | |
| 5.4 | Vergelijking met metingen | 14 |
| 5.5 | Schattingsprocedure | 15 |
| | Estimation procedure | 15 |
| 5.6 | Conclusie | 16 |
| 6. | Dankbetuiging | 16 |
| 7. | Literatuur | 17 |
| 8. | Figuren | 18 |

ESTIMATION OF DIRECT AND DIFFUSE RADIATION AND OF SUNSHINE DURATION FROM 10-MINUTE VALUES OF GLOBAL RADIATION

W.H. Slob and W.A.A. Monna
KNMI, De Bilt, The Netherlands

SUMMARY AND CONCLUSIONS

Modern measuring techniques enable high sampling rates together with large data storage capacities. It is therefore feasible to measure 10-minute mean values of global radiation and moreover store the extreme values that occurred within each integration period. In this paper a procedure is given to estimate the diffuse and direct components of global radiation from 10-minute means and extreme values as measured by a pyranometer. The advantage of this procedure is that no special instruments are required. For the development of the algorithms given hereafter, a dataset was used which was collected at De Bilt in the period from May 1986 to May 1989. Global radiation was measured with a Kipp CM11 pyranometer (Slob, 1981; WMO, 1986). Another one, equipped with a shading disc, was used to measure the diffuse component. The direct radiation was measured with an Eppley Normal Incidence Pyrheliometer (Fritschen and Gay, 1970; WMO, 1986).

The relative contributions of direct and diffuse radiation to (total) global radiation depends on the amount and type of clouds, the elevation angle of the sun and the Linke-turbidity (Linke, 1922). Depending on the cloud situation, relations between these parameters are given which can be used to estimate the direct and diffuse components. Moreover, criteria were developed to discriminate between these various cloud situations. For this purpose the maximum and minimum value within a 10-minute period of the global radiation were found to be extremely valuable. In figures 2-6 examples of the variations over a day are given for various cloud situations. In chapter 3.5 the criteria and estimation procedures are given for four cloud situations. Relation (3) was given by Kasten (1980), (4) is a linear regression for our dataset, and also (6) is a result of our measurements. Formulas (1) and (6) hardly need explanation.

An evaluation of these algorithms has shown that in most situations a correct estimation of the direct and diffuse component can be given, with an accuracy of about $\pm 10\%$.

Several years ago WMO introduced a new definition of sunshine duration: the percentage of time during which the direct radiation exceeds 120 W/m^2 . A dataset as described before, but now for the period October 1989 - April 1990 was used to develop algorithms to estimate the sunshine duration from 10-minute mean values plus extremes of global radiation. The results were compared with measurements by the Eppley Pyrheliometer.

Obviously the cloud situation is of major importance for the sunshine duration. So the selection criteria mentioned before also play an important role here. Moreover, the computation procedures for

the components can also be used. It has been found that the choice of the algorithms depends on the elevation angle of the sun. Finally the procedure summarized in chapter 5.5 has been developed. Again the extreme values of the global radiation are of vital importance.

An evaluation of this procedure has shown that in most cases the results compare well with the sunshine duration as derived from pyrliometer measurements of the direct radiation. So this procedure can also replace the classical Campbell-Stokes measurements. The accuracy is about ± 0.6 hour for daily sums.

1. INLEIDING

Globale straling wordt in Nederland op een aantal stations reeds 25 jaar op routinebasis gemeten. Zonneschijnduur wordt al veel langer bepaald; in De Bilt sinds 1901. Instrumenten om de directe en de diffuse component van de globale straling afzonderlijk te meten bestaan reeds enkele tientallen jaren, maar deze instrumenten vergen in de praktijk wat meer aandacht dan een globale stralingsmeter en worden daarom nauwelijks op routinebasis gebruikt. Een uitzondering is de meting van de directe straling in De Bilt sinds 1971.

Inmiddels neemt de belangstelling voor directe en diffuse straling toe in bijvoorbeeld de bouw-wereld, bij de landbouw en in verband met het gebruik van zonneënergie. Teneinde ook deze stralingscomponenten op routinebasis te kunnen bepalen, zijn door diverse auteurs procedures voorgesteld om de componenten te schatten uit routinematige uurgemiddelde globale stralingsmetingen. Bij de Klimatologische Dienst van het KNMI is daartoe de door Raaff enigszins gewijzigde procedure van De Jong (1980) gebruikt.

De relatie tussen globale straling en zonneschijnduur was reeds eerder onderwerp van onderzoek op het KNMI (Frantzen en Raaff, 1982). Li en Kruizinga (1989) onderzochten de zonneschijnduur als parameter bij de weerberichtgeving. Inmiddels is sinds enige jaren door de WMO de Campbell-Stokes als standaard-meetinstrument afgeschaft, en is een meer fysische definitie van zonneschijnduur ingevoerd, nl. de tijd waarover de directe straling (gemeten op een vlak loodrecht op de zonsrichting) groter is dan 120 W/m^2 . Een en ander is reden om de meetmethodiek voor zonneschijnduur opnieuw te bezien.

Bij globale stralingsmetingen worden over het algemeen uurgemiddelden geregistreerd. Moderne inzameltechnieken maken echter registratie met een hogere tijdresolutie mogelijk. Bovendien is het mogelijk het maximum en minimum per integratieperiode op te slaan. Sinds mei 1986 wordt globale straling, inclusief maximum- en minimumwaarden, op 10-minuutbasis geregistreerd op het meetterrein van het KNMI in De Bilt. Parallel daarmee worden de directe en de diffuse component van de globale straling geregistreerd. Met de zo verkregen dataset is nagegaan in hoeverre de directe en diffuse component kunnen worden bepaald uit metingen van de (totale) globale straling op 10-minuutbasis. Bovendien is geprobeerd de zonneschijnduur te schatten uit deze globale stralingsmetingen, waarbij als verificatie een directe stralingsmeting is gebruikt om te bepalen wanneer de door de WMO voorgeschreven grenswaarde van 120 W/m^2 werd overschreden. Deze nauwkeurige bepaling uit meting van de directe straling is daarnaast vergeleken met de Campbell-Stokes registratie.

In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van het gebruikte instrumentarium. Hoofdstuk 3 gaat in op de berekeningsprocedure voor de stralingscomponenten. Voor verschillende stralingssituaties worden "recepten" gegeven. Aangegeven wordt hoe deze situaties aan de hand van de globale stralingsmetingen kunnen worden herkend. Van een aantal karakteristieke dagen worden in hoofdstuk 4 voorbeelden gegeven. Voor enkele situaties worden de resultaten vergeleken met die van methode De Jong (1980) (gemodificeerd door Raaff), zoals bij de Klimatologische Dienst van het KNMI wordt gebruikt. In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op zonneschijnduur schattingen.

2. INSTRUMENTATIE

Op het meetterrein van het KNMI is een opstelling gemaakt waarmee continu de benodigde parameters automatisch worden gemeten en geregistreerd. De globale straling wordt gemeten met een Kipp CM11 pyranometer (Slob, 1981; WMO, 1986). Het instrument is voorzien van een ventilatiesysteem van het fabrikaat Eigenbrodt. Dat is geen standaardvoorziening; in het Nederlandse stationsnet wordt eveneens de CM11 gebruikt, maar zonder ventilatie. Het ventilatiesysteem, waarbij enige verwarming in de winter ook mogelijk is, voorkomt bijvoorbeeld dichtsneeuwen en rijpvorming op de glazen bolletjes, en droogt deze ook sneller na regen.

Voor de meting van de diffuse component wordt eveneens een Kipp CM11 pyranometer gebruikt, nu echter voorzien van een schaduwscijf die in eigen beheer is gefabriceerd. Dit instrument is niet voorzien van ventilatie. De instelling van de rechte-klimming van de schaduwscijf verloopt automatisch; de declinatie wordt enkele malen per week met de hand bijgesteld.

De directe straling (te meten op een vlak loodrecht op de zonsrichting) wordt gemeten met een Eppley Normal Incidence Pyrheliometer (Fritschen en Gay, 1970; WMO, 1986). Ook bij dit instrument verloopt de instelling van de rechte-klimming automatisch en de declinatie-instelling met de hand.

De signalen van deze drie instrumenten worden met een digitale voltmeter (PREMA 5000) ca. 25 maal per 10 minuten bemonsterd. Met behulp van een Apple II e PC worden vervolgens 10-minuutgemiddelden bepaald en weggeschreven op een floppy disk. Bovendien worden voor de globale straling de in het betreffende 10-minuutvak opgetreden maximum- en minimumwaarde opgeslagen. Het data-inzamelgedeelte van de opstelling is voor wat de straling betreft nagenoeg identiek aan het "Westlandstation" (Slob, 1989). De gehele opstelling wordt met uitzondering van de weekends dagelijks gecontroleerd. De registratie is gestart in mei 1986. De voor dit rapport gebruikte gegevens hebben voor wat betreft de schatting van componenten betrekking op de metingen tot mei 1989. Voor de schatting van de zonneshijnduur zijn metingen gebruikt uit de periode oktober 1989 - april 1990.

Als referentie voor de zonneshijnduurschatting zijn de metingen van de directe straling gebruikt. De tijdsduur waarover de directe straling groter was dan 120 W/m^2 is per 10 minuten berekend uit het aantal meetwaarden waarbij die grens werd overschreden, en het totaal aantal meetwaarden per 10 minuten (ca. 25). De zo gevonden referentiewaarden zijn eveneens vergeleken met de metingen van de Campbell-Stokes zonneshijn-autograaf, waarmee nog steeds routinematig zonneshijnduur in Nederland gemeten wordt. Het desbetreffende instrument staat op het dak van het KNMI opgesteld. Het betreft type 96D van het fabrikaat Fuess (Middleton, 1947; Biber, 1959). De ingebrande stroken worden met de hand uitgetrokken, waarbij urregegevens met een resolutie van 0.1 uur worden verkregen.

3. BEREKENING VAN DIFFUSE EN DIRECTE STRALING

De Zonneconstante is de ontvangen stralingsflux I_0 van de zon, gemeten op een afstand van één Astronomische Eenheid (de gemiddelde afstand zon-aarde) op een vlak loodrecht op de invallende straling, en geïntegreerd over het gehele spectrum. I_0 bedraagt gemiddeld 1367 W/m^2 (Fröhlich, 1988). De in werkelijkheid "aangeboden" straling kan tot ca. 3.5% meer of minder bedragen ten gevolge van de elliptische baan van de aarde om de zon. Bij berekeningen met de hierna volgende formules en in de voorbeelden is met dit effect rekening gehouden.

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 $I \sin(h)$, waarin h de zonshoogte is in graden, dan geldt voor de globale straling G op het horizontale vlak:

$$G = I \sin(h) + D \quad (1)$$

Met behulp van een dataset bestaande uit individuele metingen van G , I en D zullen nu relaties worden gezocht om I en D te berekenen uit de globale stralingsmetingen per 10 minuten. Gestreefd is naar eenvoudige formules, immers, hoe meer parameters worden meegenomen, hoe meer relaties nodig zijn om het stelsel vergelijkingen oplosbaar te houden. Een overzicht van de procedures wordt in 3.5 gegeven. De verschillende stralingssituaties zijn hiervoor ingedeeld in klassen. De maximum- en minimumwaarde van G gedurende een 10-minuutvak zijn voor deze classificatie een belangrijk hulpmiddel en zijn daarom meegeregistreerd.

Naast de zonshoogte is de mate van verstrooiing in de atmosfeer van belang. De directe straling aan het aardoppervlak is wat aan intensiteit overblijft na verstrooiing en absorptie in de atmosfeer. Een maat voor deze verstrooiing en absorptie is de Linke-turbiditeit T_L (Linke, 1922). Dit is een dimensieloze grootheid, die de invloed van de werkelijke atmosfeer geeft t.o.v. het theoretisch gedrag van een "schone" atmosfeer zonder waterdamp, sporegassen en aerosolen. Als δ een optische dikte is en s staat voor schoon, is dus

$$T_L = \frac{\delta}{\delta_s} \quad (2)$$

In de praktijk ligt T_L meestal tussen 4 en 7; extreme waarden zijn ca. 2.5 en 10.

3.1 Geen bewolking

Bij onbewolkt weer is de situatie betrekkelijk eenvoudig. Gegeven I_0 , is het nu mogelijk I uit te rekenen als T_L en h bekend zijn. We zullen hier de parameterisatie gebruiken, zoals gegeven door

Kasten (1980):

$$I = I_0 \exp [-T_L / \{0.9 + 9.4 \sin(h)\}] \quad (h > 10^\circ) \quad (3)$$

Ook voor de intensiteit van de diffuse straling zijn de Linke-turbiditeit en de zonshoogte de belangrijkste factoren. Figuur 1 laat dit zien. Page (1986) geeft enkele voorbeelden van parameterisaties. Om de bruikbaarheid van de in dit rapport voorgestelde schattingsprocedure te onderzoeken, hebben we gekozen voor een eenvoudige relatie gebaseerd op onze eigen, in De Bilt verzamelde dataset, waarbij voor D evenredigheid met T_L en $\sin(h)$ verondersteld is. Door middel van lineaire regressie is voor de onbewolkte periodes tussen mei 1986 en mei 1988 uit uurgemiddelden gevonden:

$$D = 40.3 + 41.3 T_L \sin(h) \quad (\text{W/m}^2) \quad (T_L < 12.5; h > 5^\circ) \quad (4)$$

De spreiding bedraagt ca. $\pm 30 \text{ W/m}^2$. Vergelijking met het EC-model (Page, 1986) (figuur 1) laat zien dat (4) i.h.a. wat hoger uitvalt. Daarbij moeten we ons realiseren dat onze dataset geen metingen bevat met $h > 60^\circ$, en evenmin metingen met $T_L = 2$. Waarden beneden $T_L = 4$ komen weinig voor en zijn zeer zeldzaam in combinatie met grote waarden voor h . Enige verfijning van (4) is zeker nog mogelijk.

Aangezien voor een gegeven situatie I_0 en h bekend zijn, kunnen uit een meting van G nu D , I (en T_L) worden berekend met (1), (3) en (4).

Bij de classificatie van de stralingssituatie zijn de meegeregistreerde maximum- en minimumwaarde van G per 10-minuutvak van belang. Voor verdere bewerking en presentatie zijn de gemeten waarden van G (inclusief minimum en maximum) en D veelal genormeerd met de straling G_0 die buiten de atmosfeer op een horizontaal vlak valt. Er geldt dus:

$$G_0 = I_0 \sin(h) \quad (5)$$

We zullen hierna, ook in figuren, tegenkomen G/G_0 , eventueel met toevoeging "max" of "min", en D/G_0 , eventueel met toevoeging "gem" = gemeten of "ber" = berekend. Een voordeel van deze dimensieloze vorm is de - in eerste benadering - onafhankelijkheid van h , zodat we waarden van verschillende tijdstippen op de dag en van verschillende seizoenen gemakkelijker kunnen vergelijken. Tengevolge van de relatie tussen h en de weglengte door de atmosfeer blijft er echter nog enige invloed van h over.

Een eerste criterium voor een wolkenloze hemel is de aanwezigheid van directe straling. Op grond van de waarnemingen blijkt dat er vrijwel zeker enige directe straling is als $(G/G_0)_{\max} > 0.4$. Voor een volledig zonnige periode is dan nodig dat alle waarden van G/G_0 groter zijn dan 0.4, dus $(G/G_0)_{\min} > 0.4$. Een volledig zonnige periode hoeft echter niet wolkenloos te zijn. Op de aanwezigheid van bewolking kan worden getest door de extreme waarden van G/G_0 binnen een 10-minuut periode met elkaar te vergelijken. De reflectie aan steeds wisselende bewolking zorgt voor een groter verschil tussen deze extremen dan in een onbewolkte situatie. In de praktijk blijkt een goede test voor

het ontbreken van bewolking $(G/G_o)_{\max} - (G/G_o)_{\min} \leq 0.05$.

De figuren 2 en 3 zijn voorbeelden van registraties van onbewolkte dagen. Op de horizontale assen staat steeds de tijd. In de bovenste figuur is uitgezet $(G/G_o)_{\max}$ (bovenste lijn), G/G_o als 10-minuutwaarden (punten) en $(G/G_o)_{\min}$ (middelste lijn). Bij $(G/G_o)_{\min}$ waarden groter dan 0.4 is arcering aangebracht. In de bovenste figuur is ook D/G_o weergegeven, zoals berekend gebruikmakend van de gemeten waarde van I en relatie (1).

In de onderste figuur is voor de duidelijkheid deze berekende D/G_o nogmaals uitgezet, nu samen met de met behulp van de schaduwscijf gemeten waarde. Tussen de figuren 2 en 3 is een opvallend verschil: in figuur 3 is G/G_o kleiner dan in figuur 2, maar D/G_o is juist groter. Oorzaak is de grotere turbiditeit bij de situatie van figuur 3, waardoor I kleiner wordt en D juist groter. De gevonden waarden voor de turbiditeit bedragen resp. 3.5 en 8 à 9.

In figuur 3 zien we in de onderste grafiek een verschil tussen de gemeten en de berekende waarde van D/G_o aan het eind van de middag. Het bleek dat de schaduwscijf niet goed was ingesteld. Dit illustreert de controlemogelijkheid die deze dubbele registratie oplevert.

3.2 Geheel bewolkt

Bij geheel bewolkt weer is de berekening van de componenten triviaal. De directe straling is identiek nul en de diffuse straling is gelijk aan de gemeten globale straling.

Een geschikt criterium voor geheel bewolkt weer is $(G/G_o)_{\max} < 0.4$. Door verschillen in de dikte van de bewolking kunnen verschillen optreden tussen $(G/G_o)_{\max}$ en $(G/G_o)_{\min}$. Een voorbeeld van een geheel bewolkte situatie is de registratie gedurende de laatste drie uur in figuur 4.

3.3 Gedeeltelijk bewolkt; soms een wolk voor de zon

Bij bewolking is formule (4) voor de berekening van D niet geldig en moet een andere methode worden gehanteerd. Een wolk in een verder wolkenloze hemel geeft in het algemeen (door reflectie) meer straling dan het stukje blauwe lucht dat hij afschermt. Zowel D als $(G/G_o)_{\max}$ zijn i.h.a. groter dan bij een onbewolkte hemel. In figuur 4 is deze verandering bij het binnentrekken van de bewolking halverwege de dag goed te zien. Bij dit soort bewolking zal $(G/G_o)_{\min}$ altijd optreden op een moment dat er een wolk voor de zon is. Op zo'n moment geldt dus $D = G$. In feite is in zo'n geval $(G/G_o)_{\min}$ van een tijdvak dus tevens een registratie van de minimumwaarde van de diffuse straling. De gemiddelde diffuse straling over datzelfde tijdvak zal iets groter zijn. Zo zal een wolk naast de zon via reflectie een bijdrage leveren aan de diffuse straling, die wegvalt op het moment dat de wolk voor de zon schuift. Voor dit soort situaties kunnen we nu de diffuse component schatten uit het minimum van de globale straling:

$$D = 1.2 G_o (G/G_o)_{\min} \quad (6)$$

Uit (1) volgt dan ook de directe component $I \sin(h)$. De factor 1.2 in (6) is gebaseerd op de voor dit rapport gemaakte dataset. Aan de hand van nader onderzoek is wellicht nog enige verfijning van (6) mogelijk.

Dit soort situaties wordt gekarakteriseerd door duidelijke verschillen tussen $(G/G_o)_{\max}$ en $(G/G_o)_{\min}$ (van de orde 0.1 of meer). In het algemeen geldt daarbij $(G/G_o)_{\max} > 0.4$ en $(G/G_o)_{\min} < 0.4$. Figuur 6 geeft een voorbeeld van een dergelijke dag.

3.4 Gedeeltelijk bewolkt; soms een wolk voor de zon; toch $(G/G_o)_{\min} \geq 0.4$

De hierboven genoemde categorieën, waarbij we de diffuse straling goed kunnen schatten, beslaan een aanzienlijk deel van alle stralingssituaties. In ca. 13% van de gevallen kunnen we echter geen van de hiervoor beschreven procedures gebruiken. Het gaat daarbij om die situaties waarbij geldt $(G/G_o)_{\min} > 0.4$, wat volgens 3.1 in de richting van een wolkenloze situatie lijkt te wijzen, terwijl tevens geldt $(G/G_o)_{\max} - (G/G_o)_{\min} > 0.05$, wat juist wel op bewolking wijst. Voor deze gevallen kunnen we twee situaties onderscheiden:

- A. De diffuse straling ligt dicht bij de waarde die voor een onbewolkte hemel geldt (er is dus weinig bewolking), en de directe straling wordt gedeeltelijk onderschept (bijv. door een contrail of dunne flarden). Een voorbeeld is gegeven in figuur 5 (tot ca. 14.00 UTC).
- B. De diffuse straling is aanmerkelijk groter dan de waarde die voor een onbewolkte hemel geldt t.g.v. de aanwezigheid van sterk reflecterende wolken. D/G_o is dan van de orde 0.4 of zelfs groter; maximale waarden van D/G_o liggen in de orde van 0.6. In zulke situaties kan zelfs $G/G_o > 1$ voorkomen.

Voor situatie B is nog geen algoritme gevonden. Situatie A kan mogelijk worden behandeld als een onbewolkte situatie. Er is echter nog geen methode ontwikkeld om beide situaties van elkaar te onderscheiden. Wellicht kan de extra informatie die aanwezig is in het verschil tussen maximum en minimum waarde, en de hoogte van het maximum hiervoor gebruikt worden. Voorlopig hanteren we voor deze situaties de algoritmen voor onbewolkt weer.

3.5 Overzicht van alle situaties Survey of all situations

Hereafter a summary is given of the estimation procedures of the radiation components, and the selection criteria for four cloud situations. Moreover, the relative occurrence of these situations is given as a percentage.

- A. **No clouds**
 $(G/G_o)_{\min} > 0.4$ and $(G/G_o)_{\max} - (G/G_o)_{\min} \leq 0.05$
 formulas (1), (3) and (4)
 16%
- B. **Overcast**
 $(G/G_o)_{\max} < 0.4$
 $I = 0$; $D = G$
 49%
- C. **Partly clouded; sometimes obscuring the sun**
 $(G/G_o)_{\max} > 0.4$ and $(G/G_o)_{\min} < 0.4$
 $(G/G_o)_{\max} - (G/G_o)_{\min} > 0.1$
 formulas (6) and (1)
 22%
- D. **Partly clouded; sometimes obscuring the sun; $(G/G_o)_{\min} \geq 0.4$**
 $(G/G_o)_{\min} \geq 0.4$ and $(G/G_o)_{\max} - (G/G_o)_{\min} > 0.05$
 no algorithm available yet; to be treated as situation A
 13%, of which 2% with $D/G_o > 0.4$

Formulas used.

- (1) $G = I \sin(h) + D$
- (3) $I = I_o \exp [-T_L / \{0.9 + 9.4 \sin(h)\}]$
- (4) $D = 40.3 + 41.3 T_L \sin(h)$ (W/m²)
- (5) $G_o = I_o \sin(h)$
- (6) $D = 1.2 G_o (G/G_o)_{\min}$

where:

- G global radiation on a horizontal surface in W/m²
 I direct radiation on a surface perpendicular to the direction of the sun in W/m²
 D diffuse radiation on a horizontal surface in W/m²
 h elevation angle of the sun in degrees
 T_L Linke-turbidity (dimensionless)

- the indication _o (like for G_o) means "outside the atmosphere"
- min and max denote extreme values within a period of time; otherwise mean values are meant

4. EVALUATIE

4.1 Vergelijking met metingen

Teneinde een indruk te geven van de bruikbaarheid van de hier voorgestelde schattingsmethoden, is voor de reeds genoemde vijf dagen de berekende directe straling vergeleken met de gemeten waarden. Voor de diffuse straling is het resultaat niet weergegeven. Dit zou immers geen extra informatie opleveren aangezien D via (1) rechtstreeks gekoppeld is aan G en $I \sin(h)$. Van de in 3.5 gegeven "recepten" werden A, B en C gebruikt. De situatie D is behandeld als ware het onbewolkt, dus volgens A.

Ter vergelijking wordt tevens het resultaat gegeven van de schattingen van I volgens De Jong (1980), gemodificeerd door Raaff. Bij deze methode worden uurgemiddelden van de globale straling uitgesplitst in vier categorieën. Bij elke categorie is een formule gegeven om uit de gemeten waarde van G rechtstreeks I te berekenen. De actuele zonshoogte en Linke-turbiditeit spelen bij deze procedure geen rol. De categorieën en formules zijn:

| | |
|--------------------------|--------------------------------------|
| $0.00 < G/G_0 \leq 0.22$ | $I = 0$ |
| $0.22 < G/G_0 \leq 0.35$ | $I = 6.4 I_0 (G/G_0 - 0.22)^2 G/G_0$ |
| $0.35 < G/G_0 \leq 0.80$ | $I = I_0 (1.6 G/G_0 - 0.47) G/G_0$ |
| $0.80 < G/G_0$ | $I = 0.86 I_0 G/G_0$ |

In figuur 7 zijn deze relaties uitgezet in een plot van de uurwaarden van onze dataset. Daarbij is voor I_0 de gemiddelde waarde van 1367 W/m^2 genomen. Het algemene beeld is redelijk, de spreiding is echter vrij groot: bij een gegeven waarde van G/G_0 bestrijkt de directe straling een band van ca 200 W/m^2 . Het weglaten van de invloed van de turbiditeit en de variatie in de diffuse straling spelen hierbij een rol. Bij deze uurwaarden valt bovendien op dat bij waarden van $G/G_0 < 0.4$ al directe straling kan optreden. Dit lijkt in strijd met het in het vorige hoofdstuk aangegeven criterium, dat $G/G_0 = 0.4$ een grens is voor het optreden van directe straling. (Strikt genomen keken we daarbij naar de extreme waarden van G/G_0). De oorzaak is dat bij de in figuur 7 gegeven uurwaarden situaties voorkomen waarbij gedurende een korte periode in dat uur directe straling aanwezig was terwijl tengevolge van bewolking gedurende de rest van het uurvak G/G_0 toch laag uitvalt. Daarbij is bovendien het verband tussen G/G_0 en I niet lineair. Dit effect van middeling van verschillende stralingssituaties treedt veel minder op als 10-minuut perioden worden genomen. In de praktijk blijkt, gekeken over 10 minuten, vrijwel nooit directe straling op te treden als $G/G_0 < 0.3$; de door ons gehanteerde grens van 0.4 is dus niet in strijd met het beeld van figuur 7.

De formule van De Jong/Raaff voor $0.80 < G/G_0$ is weinig doordacht en sluit bovendien slecht aan bij de aangrenzende categorie. Dergelijke situaties worden niet veroorzaakt door een verdere toename van I , maar door een extra hoge bijdrage van D tengevolge van sterke reflectie aan bewolking. Het is in dit geval beter de schatting van de directe component te limiteren tot bijvoorbeeld de waarde behorend bij $G/G_0 = 0.8$; wat overblijft is dan diffuse straling. Zoals al vermeld in 3.4 hebben we hiervoor echter nog geen geschikt algoritme.

In de figuren 8 t/m 12 zijn nu de gemeten en de op twee manieren berekende waarden voor de verhouding $(I \sin(h))/G_0$ weergegeven. Het betreft dezelfde vijf dagen als - in dezelfde volgorde - weergegeven in de figuren 2 t/m 6. Bovendien werden voor deze dagen de berekende dagsommen van de directe straling vergeleken met de metingen. Het resultaat is weergegeven in tabel 1.

| datum | fig. | dagsom (kJ/m^2) | | | verhouding ber/gem | |
|-----------|-------|----------------------------|--------|-------|--------------------|------|
| | | gemeten | De J/R | Slob | De J/R | Slob |
| 23.5.1989 | 2, 8 | 23657 | 21282 | 21314 | 0.90 | 0.90 |
| 20.5.1989 | 3, 9 | 11983 | 12986 | 11666 | 1.08 | 0.97 |
| 10.3.1989 | 4, 10 | 5683 | 5697 | 5869 | 1.00 | 1.03 |
| 06.3.1989 | 5, 11 | 6857 | 6946 | 7594 | 1.01 | 1.11 |
| 21.3.1989 | 6, 12 | 5662 | 6294 | 6158 | 1.11 | 1.09 |

Tabel 1. Dagsommen $I \sin(h)$

Vergelijking van de grafieken leert het volgende:

23.5.1989 Fig. 8 Een zonnige dag met lage turbiditeit. *Algorithmme A.*

Beide methoden geven in het daggemiddelde een onderschatting van ca 10%. Vooral de directe straling in de ochtenduren wordt te laag berekend. Aan het begin en aan het einde van de dag is De J/R onnauwkeuriger dan Slob. Midden op de dag is het juist andersom. De abrupte afkap in de ochtend en avond komt door een niet vrije horizon. Blijkbaar behoeft *algorithmme A* voor lage turbiditeiten nog verbetering.

20.5.1989 Fig. 9 Een zonnige dag met hoge turbiditeit. *Algorithmme A.*

De methode De J/R geeft systematisch te hoge waarden. De andere methode vertoont regelmatig dippen, maar tendeeert naar iets betere overeenstemming met de metingen. Dat blijkt ook uit de dagsommen. De dippen worden veroorzaakt doordat bij extreem hoge waarden voor T_L de formules (3) en (4) geen juiste verhouding van D en $I \sin(h)$ opleveren; voor deze hoge waarden moeten de parameterisaties nog iets worden aangepast.

10.3.1989 Fig. 10 Een dag die zonnig begint, overgaat in wisselend bewolkt en totaal bewolkt eindigt. *Algorithmen A, B en C.*

Bij het zonnige stuk is de schatting van De J/R te laag, voor het wisselend bewolkte deel echter te hoog. Deze fouten compenseren elkaar in de dagsom, die beter is dan methode Slob. Deze is echter op de afzonderlijke perioden meer in overeenstemming met de metingen. De sterke stijging van de diffuse straling bij het binnentrekken van de bewolking is hier goed te zien. Dit leidt tot pieken van G/G_0 boven 0.8. Zie daartoe ook figuur 4.

6.3.1989 Fig. 11 *Een zonnige dag met lichte cirrus of vliegtuigwolken. Algorithme A, als gevolg van situatie D.*

De bewolking onderschept de straling enigszins, maar de minima van G/G_0 blijven meestal boven 0.4 (figuur 5). We hebben te maken met situatie D, waarbij voorlopig nog algorithme A wordt toegepast. De diffuse straling wordt zodoende onderschat, dus de directe straling overschat. Dit blijkt ook uit de schatting van de dagsom. De J/R geeft in deze situatie acceptabele resultaten. De grove overschatting (De J/R) rond 15 uur wordt veroorzaakt door de reeds genoemde weinig doordachte formule voor $G/G_0 > 0.8$. Voor dagen van type D moet nog een geschikt algorithme gevonden worden.

21.3.1989 Fig. 12 *Een wisselend bewolkte dag. Algorithme C.*

Het betreft een dag waarbij in vrijwel elke 10-minuutperiode de zon wel eens achter een wolk verdween. In principe kan de diffuse straling nu redelijk geschat worden. Toch vallen (voor beide methodes) de dagsommen ca 10% te hoog uit.

4.2 Conclusie

Uit de gemiddelde 10-minuut waarden van globale straling, en de in dat tijdvak opgetreden minimum- en maximum-waarde, is in het algemeen een goede schatting van de in dat tijdvak opgetreden gemiddelde directe straling af te leiden. De nauwkeurigheid ligt daarbij in de orde van $\pm 10\%$.

5. BEPALING VAN DE ZONNESCHIJNDUUR

Enkele jaren geleden is de Campbell-Stokes door de WMO afgeschaft als standaard-instrument voor de bepaling van de zonneshijnduur. Bovendien is een meer fysische definitie van zonneshijnduur ingevoerd: de tijd waarover $I > 120 \text{ W/m}^2$ is. Als gevolg van dit WMO-besluit is het Nederlandse zonneshijnduur netwerk verouderd. Met deze nieuwe definitie zijn betrouwbare zonneshijnduur metingen alleen mogelijk met een pyrheliometer, die op ieder moment de grootte van I meet, en eventueel met commerciële zonneshijnduurmeters. In het algemeen zijn dit soort instrumenten duur en vergen in het gebruik het nodige aan controle en onderhoud.

Het onderzoek naar de relaties tussen de verschillende stralingscomponenten, zoals in de vorige hoofdstukken besproken, was een aanleiding om na te gaan of aan de hand van de globale stralingsmetingen en hun extrema op 10 min.-basis, ook een schatting van de zonneshijnduur mogelijk is. Op basis van de hiervoor reeds besproken dataset werd een algoritme ontwikkeld. Toetsing aan de WMO-eisen is daarbij uitvoerbaar, aangezien sinds oktober 1989 om de 10 seconde wordt nagegaan of de directe straling groter dan 120 W/m^2 was. Voor vergelijking met de Campbell-Stokes was de registratie van De Bilt beschikbaar.

Het zal duidelijk zijn dat voor zonneshijnduur schattingen het herkennen van stralingssituaties van groot belang is. We zullen hier aansluiten bij criteria die reeds in hoofdstuk 3 zijn gebruikt. Bovendien moet natuurlijk rekening worden gehouden met het WMO-criterium van 120 W/m^2 .

Een eerste eenvoudige schatting - zon als $G/G_0 > 0.4$ - blijkt onvoldoende nauwkeurig. In figuur 13 is het resultaat van zo'n schatting uitgezet voor de beschikbare metingen, verwerkt tot dagsommen, met als referentie de bepaling uit pyrheliometer metingen. Dit eenvoudige criterium levert een duidelijke overschatting van het aantal zonneshijnduren. De onderstaande procedure, die in de hier gegeven volgorde moet worden afgewerkt, voldoet beter. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen enkele stralingssituaties en zonshoogtes. Fr geeft van een bepaalde periode steeds de fractie waarin de zon scheen, dus $0 \leq Fr \leq 1$. Een schematisch overzicht van deze procedure wordt in 5.5 gegeven.

5.1 $\sin(h) < 0.1$

Bij deze zeer kleine zonshoogten ($h < 5.7^\circ$) is de verzwakking door de atmosfeer zo groot, dat de $I = 120 \text{ W/m}^2$ grens alleen bij zeer heldere atmosfeer overschreden wordt. Bovendien komen deze zonshoogten slechts korte tijd voor. De geringe bijdrage die in deze situatie aan de zonneshijnduur kan worden geleverd, wordt verwaarloosd, dus $Fr = 0$.

5.2 $0.1 \leq \sin(h) < 0.3$

Deze categorie zonshoogten ($5.7^\circ \leq h < 17.5^\circ$) komt in het hart van de winter de hele dag voor en daarbuiten slechts kort na zonsopkomst en kort voor zonsondergang. Het is bij deze zonshoogten

moelijk een onderscheid te maken tussen de verschillende stralingssituaties. Een rol daarbij spelen bijvoorbeeld de grote weglengte door de atmosfeer, de snelle toe- (of af-) name van de zonshoogte in de zomer, resulterend in vrij grote verschillen tussen $(G/G_o)_{max}$ en $(G/G_o)_{min}$, en het effect van bewolking die van onderen door de zon wordt beschreven. We nemen hier nu een grof criterium, waarbij niet wordt getracht onderscheid te maken voor verschillende stralingssituaties. Er wordt slechts een keus gemaakt tussen totaal zonnig en totaal geen zon. Enige verfijning van dit criterium is wellicht nog mogelijk.

We maken een schatting van de globale straling die optreedt bij onbewolkt weer en een gemiddelde turbiditeit. Wordt deze (10-minuutgemiddelde) grenswaarde daadwerkelijk bereikt of overschreden, dan nemen we aan dat er directe straling was gedurende die 10 minuten. We nemen aan dat $T_L = 6$. Uit de metingen blijkt dat een redelijke schatting van de diffuse component gegeven wordt door:

$$D/G_o = 0.2 + (\sin(h))/3 \quad (7)$$

De directe straling bepalen we met de parameterisatie van Kasten (1980):

$$I (\sin(h))/G_o = \exp \{-T_L / (0.9 + 9.4 \sin(h))\} \quad (8)$$

In een iets andere vorm (3) kwamen we deze formule reeds eerder tegen. Voor deze toepassing gebruiken we deze parameterisatie voor iets kleinere hoeken dan in 3.1 gegeven werden. We berekenen nu de grenswaarde $(G/G_o)_{gr}$ met een iets anders geschreven vorm van (1):

$$(G/G_o)_{gr} = D/G_o + (I \sin(h))/G_o \quad (9)$$

Indien nu voor de werkelijk gemeten globale straling geldt dat deze groter is dan de grenswaarde uit (9) stellen we $Fr = 1$; zoniet, dan geldt $Fr = 0$.

Het ligt voor de hand (7) te vergelijken met (4). Normeren we (4) door ook te delen door G_o , dan vinden we met (5), $I_o = 1367 \text{ W/m}^2$ en $T_L = 6$:

$$D/G_o = 0.03/\sin(h) + 0.18 \quad (10)$$

Het lijkt nu alsof (7) en (10) (dus (4)) met elkaar in strijd zijn. We moeten ons daarbij echter realiseren dat (4) gefit is aan data tussen 5° en 60° , terwijl (7) slechts tot 17.5° geldig is. Inderdaad neemt D/G_o voor kleine hoeken toe met $\sin(h)$. Gemiddeld over alle hoeken overheerst echter de (geringe) afname met $\sin(h)$ volgens (10). De registraties van D/G_o in de figuren illustreren dit gedrag (de figuren zijn in principe symmetrisch voor $\sin(h)$ met de symmetrie-as midden op de dag).

5.3 $\sin(h) \geq 0.3$

Bij zonshoogten vanaf 17.5° onderscheiden we de categorieën geen zon, geheel zonnig en wisselend bewolkt (af en toe zon).

5.3.1 Geen zon

Voor deze grotere zonshoogten kunnen we met het reeds in hoofdstuk 3 gehanteerde criterium $(G/G_o)_{\max} < 0.4$ vaststellen of het in een 10-minuutperiode geheel bewolkt was. Als dat zo is, stellen we $Fr = 0$.

5.3.2 Geheel zonnig

Om geheel zonnige situaties te herkennen, onderstellen we dat $D/G_o = 0.3$. We berekenen opnieuw een grenswaarde voor de globale straling met (8) en (9), waarbij we echter nu kiezen $T_L = 10$. In het algemeen kan deze grenswaarde alleen worden overschreden als er directe straling is. Kijken we naar de minimum opgetreden waarde in een tijdvak, en vinden we dat $(G/G_o)_{\min} > (G/G_o)_{gr}$, dan nemen we aan dat er voortdurend directe straling was en dus is $Fr = 1$. Alleen in situaties met zeer hoge diffuse straling, in combinatie met geen of af en toe directe straling werkt deze test niet; ook dan wordt (ten onrechte) $Fr = 1$ gevonden. Voor de overgebleven gevallen met heel hoge turbiditeit waarbij de $(G/G_o)_{\min}$ de grenswaarde net niet haalt, wordt vervolgens getest of $(G/G_o)_{\max} > (G/G_o)_{gr}$, en zo ja of $(G/G_o)_{\max} - (G/G_o)_{\min} < 0.1$. Als dat het geval is, wordt dit tijdvak ook nog als geheel zonnig beschouwd en $Fr = 1$ gesteld. Situaties met continu directe straling maar tevens enige wolken worden volgens deze test (terecht) gehonoreerd met $Fr = 1$.

5.3.3 Wisselend bewolkt (af en toe zon)

Als alle vorige testen geen uitsluitsel hebben opgeleverd, is dit de laatste categorie die nog een bijdrage aan de zonneschijnduur kan opleveren. Als er af en toe zon is, zal de fractie zonneshijn tussen nul en één liggen. We kunnen Fr nu voor een bepaald tijdvak berekenen door de werkelijke gemiddelde directe straling te delen door de fictieve waarde voor het geval de zon continu zou hebben geschinen. Deze beide waarden moeten we schatten uit de gemeten globale straling.

De werkelijke directe straling vinden we door van de gemeten globale straling de volgens (6) geschatte diffuse component af te trekken (procedure C). Indien met (6) een waarde $D/G_o > 0.4$ wordt gevonden, kiezen we $D/G_o = 0.4$. Grotere waarden dan 0.4 zouden ertoe leiden dat in situaties met weinig globale straling en een relatief hoge bijdrage van de diffuse component, de hele periode als zonloos wordt gekenmerkt, terwijl er toch enige directe straling was. De fictieve, maximale waarde (continu zon) schatten we vervolgens met (3) (en (5)) volgens procedure A. Voor de fractie zonneshijn vinden we zo:

$$Fr = \frac{G/G_o - D/G_o}{(I \sin(h))/G_o} \quad 0 \leq Fr \leq 1 \quad (11)$$

Daarbij kiezen we voor T_L in (3) de relatief lage waarde 4. Daarmee corrigeren we enigszins voor het feit dat in de zonneschijnduur schatting met (11) alle perioden met directe straling meetellen, ook voor intensiteiten kleiner dan 120 W/m^2 , hetgeen in strijd is met de WMO-definitie.

5.4 Vergelijking met metingen

In figuur 14 zijn de dagsommen, zoals berekend met het hier beschreven algoritme, uitgezet tegen de dagsommen bepaald uit de pyrhelio-metermetingen. Gemiddeld over alle dagsommen vertoont het algoritme een afwijking van 0.56 u. De Campbell-Stokes resultaten zijn in figuur 15 uitgezet tegen de pyrhelio-meter meting. Hier bedraagt de gemiddelde afwijking 0.60 u. De reeds eerder genoemde ruwe schatting ($G/G_0 > 0.4$), weergegeven in figuur 13, vertoont een gemiddelde afwijking van 0.89 uur. We zien dus dat het algoritme zeker geen slechtere resultaten geeft dan de Campbell-Stokes. Het algoritme geeft over het algemeen een goede schatting. De Campbell-Stokes overschat de wisselend bewolkte situaties (overburn), evenals de ruwe schattingsmethode.

Tenslotte is voor vier dagen het resultaat van de verschillende methoden in wat meer detail weergegeven. De grafische presentatie in de figuren is dezelfde als in bijvoorbeeld de bovenste helft van figuur 2. Voor elk van de 4 methoden zijn steeds de uursommen (in de figuur) en de dagsom (hieronder) gegeven.

9.3.1990, figuur 16

Een bewolkte dag met af en toe iets zon

| Pyrh | alg | ruw | C-S | |
|------|------|------|------|-----|
| 0.50 | 0.55 | 0.83 | 0.80 | uur |

Het algoritme geeft een goed resultaat. De andere twee methoden geven een overschatting.

12.3.1990, figuur 17

Soms zonnig, soms wisselend bewolkt

| Pyrh | alg | ruw | C-S | |
|------|------|------|------|-----|
| 8.07 | 7.81 | 8.33 | 9.10 | uur |

Met name bij wisselende bewolking treedt bij de Campbell-Stokes een overschatting op. De ingebrande gaatjes zijn te groot voor de verschillende betrekkelijk korte periodes. Het algoritme en de ruwe methode voldoen redelijk goed.

13.3.1990, figuur 18

Een situatie met hoge diffuse straling; af en toe zon

| Pyrh | alg | ruw | C-S | |
|------|------|------|-----|-----|
| 4.87 | 6.31 | 7.83 | 3.0 | uur |

Dit is een lastige situatie; het is moeilijk te bepalen wanneer de zon schijnt. Het algoritme geeft een duidelijke overschatting, de ruwe methode is nog slechter. De Campbell-Stokes geeft een duidelijke onderschatting. Geen der methodes voldoet.

16.3.1990, figuur 19

Een zonnige dag

| Pyrh | alg | ruw | C-s | |
|------|-------|------|------|-----|
| 9.90 | 10.17 | 9.67 | 9.80 | uur |

Alle methoden voldoen in deze situatie goed. De dip rond 14 uur is veroorzaakt door een obstakel.

5.5 Schattingsprocedure Estimation procedure

The sunshine duration is estimated by following the scheme step by step. Here "Fr" means fraction of sunshine within a period of time; "gr" denotes "limit" (in Dutch "grens"). See 3.5 for the other symbols.

1. $\sin(h) < 0.1$?
yes: Fr = 0
no: go to 2

2. $0.1 \leq \sin(h) < 0.3$?
yes: $T_L = 6$
 $D/G_o = 0.2 + (\sin(h))/3$
 $(I \sin(h))/G_o = \exp \{-T_L / (0.9 + 9.4 \sin(h))\}$
 $(G/G_o)_{gr} = D/G_o + (I \sin(h))/G_o$
 $G/G_o < (G/G_o)_{gr}$?
yes: Fr = 0
no: Fr = 1
no: go to 3

3. $T_L = 10$
 $D/G_o = 0.3$
 $(I \sin(h))/G_o = \exp \{-T_L / (0.9 + 9.4 \sin(h))\}$
 $(G/G_o)_{gr} = D/G_o + (I \sin(h))/G_o$
 $(G/G_o)_{min} > (G/G_o)_{gr}$?
yes: Fr = 1
no: $(G/G_o)_{max} > (G/G_o)_{gr}$ and $(G/G_o)_{max} - (G/G_o)_{min} < 0.1$?
yes: Fr = 1
no: go to 4

4. $T_L = 4$
 $D/G_o = 1.2 (G/G_o)_{min}$ where $D/G_o \leq 0.4$
 $(I \sin(h))/G_o = \exp \{-T_L / (0.9 + 9.4 \sin(h))\}$

$$Fr = \frac{G/G_o - D/G_o}{(I \sin(h))/G_o} \quad \text{where} \quad 0 \leq Fr \leq 1$$

5.6 Conclusie

Uit de gemiddelde 10-minuut waarden van globale straling en de in dat tijdvak opgetreden minimum- en maximum-waarde, is een goede schatting te maken van de in dat tijdvak opgetreden zonneshijnduur. De nauwkeurigheid van deze schatting is vergelijkbaar met die van een Campbell-Stokes meting en is voor dagsommen van de orde van ± 0.6 uur.

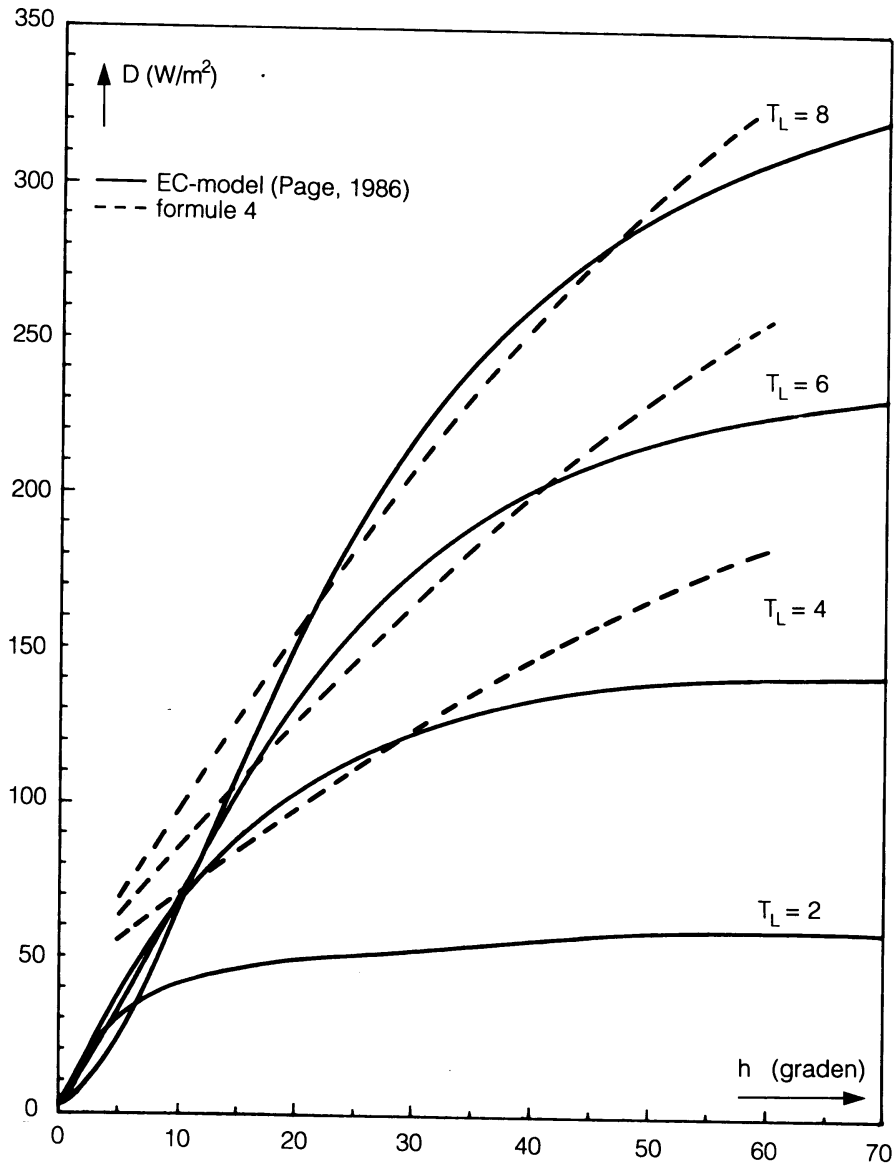
6. DANKBETUIGING

Gaarne bedanken wij Hofman, Van der Luit en Rauw voor hun ondersteuning bij de metingen. Kohsiek en Velds zijn wij dank verschuldigd voor het kritisch doorlezen en becommentariëren van het manuscript. Mw. Kaltoven heeft het typewerk verzorgd.

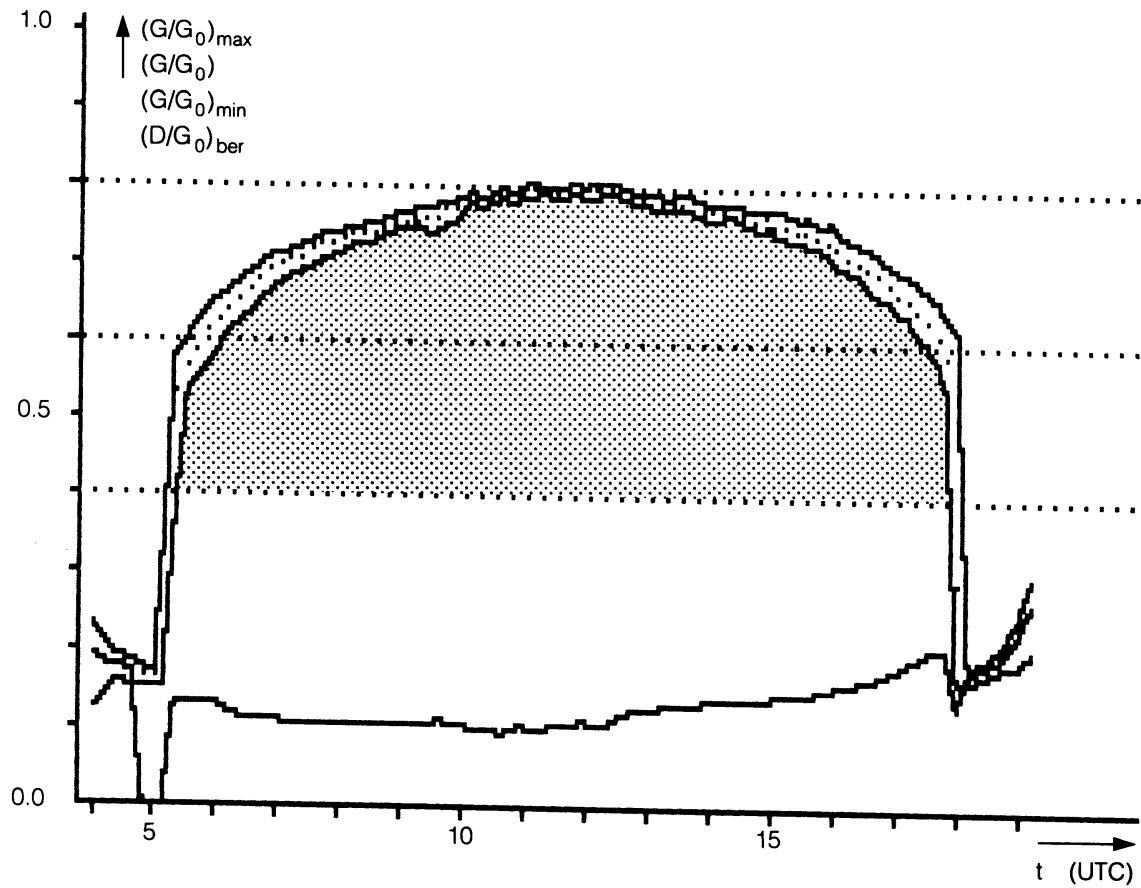
7. LITERATUUR

- Bider, M., 1959: Über die Genauigkeit der Registrierungen des Sonnenscheinautographen Campbell-Stokes. Arch. Met. Geoph. Biokl. B. Bd. 9, H. 2, 199-230.
- Frantzen, A.J. en W.R. Raaff, 1982: De relatie tussen de globale straling en de relatieve zonneshijnduur in Nederland. KNMI-WR 82-5, Kon. Ned. Met. Inst., De Bilt.
- Fritschen, L.J. and L.W. Gay, 1979: Environmental instrumentation. Springer-Verlag, New York.
- Fröhlich, C., 1988: Variability of the solar "constant". In: H. Wanner and U. Siegenthaler (Eds): Lecture notes in earth sciences 16; Springer-Verlag, Berlin, 1988, 6-17.
- Jong, J.B.R.M. de, 1980: Een karakterisering van de zonnestraling in Nederland. Afstudeerverslag TU Eindhoven, 1980.
- Kasten, F., 1980: A simple parameterization of the pyrheliometric formula for determining the Linke turbidity factor. Meteorol. Rdsch. 33, 124-127.
- Li, Z. and S. Kruizinga, 1989: Statistical forecast of sunshine duration. KNMI-WR 89-5, Kon. Ned., Met. Inst., De Bilt.
- Linke, F., 1922: Transmissions-Koeffizient und Trübungsfaktor. Beitr. Phys. fr. Atmos. 10, 91-103.
- Middleton, W.E.K., 1947: Meteorological instruments. The university of Toronto press, Toronto, Canada. Second edition, Revised.
- Page, J.K., (Ed), 1986: Prediction of solar radiation on inclined surfaces. Solar energy R&D in the European Community, Series F, Vol. 3. D. Reidel publ. comp., Dordrecht, 1986.
- Slob, W.H., 1981: Globale stralingsmeting. KNMI-memorandum FM-81-26 (ongepubl. manuscript).
- Slob, W.H., 1989: Klimaat-onderzoek Westland ten behoeve van kustuitbreiding. KNMI-publikatie nr. 175, Kon. Ned. Met. Inst., De Bilt.
- WMO, 1986: Revised instruction manual on radiation instruments and measurements. WMO/TD-No. 149, ed. C. Frohlich and J. London (World Climate Research Programme publications series; 7), WMO, Geneva.

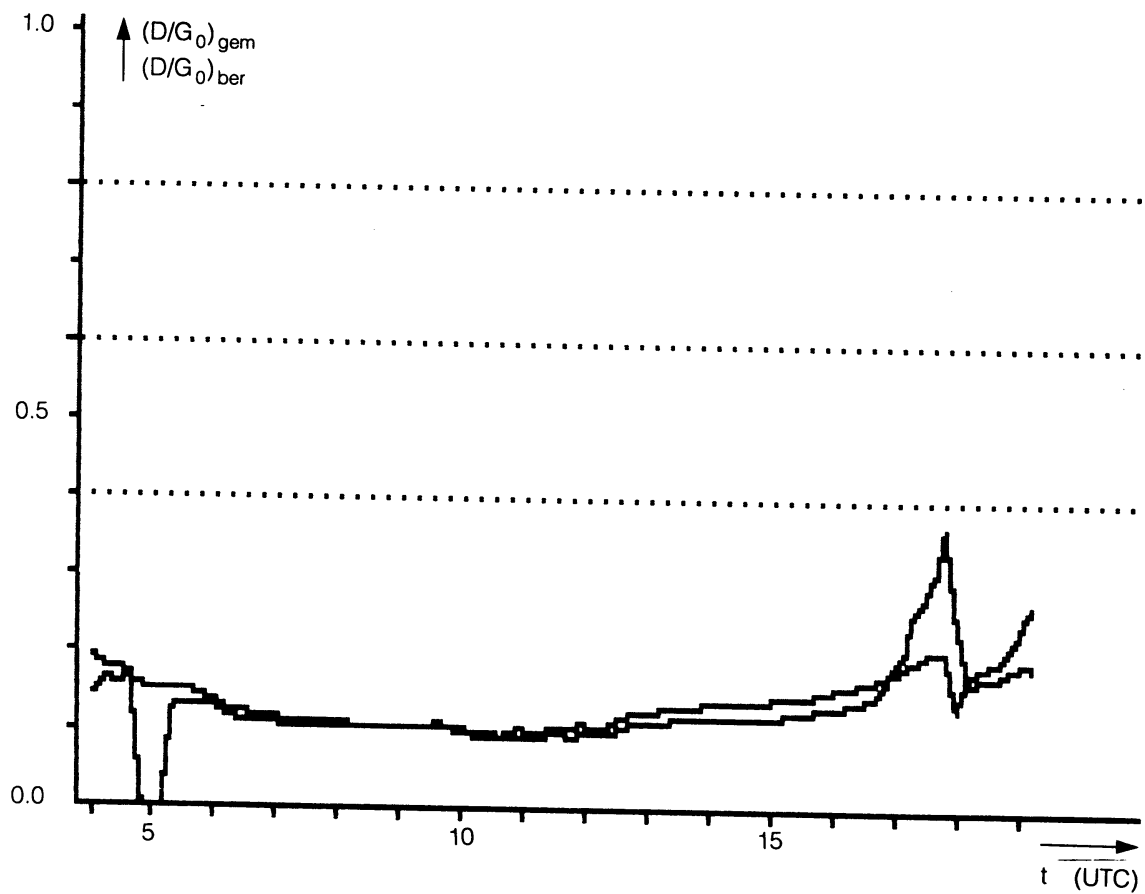
8. FIGUREN

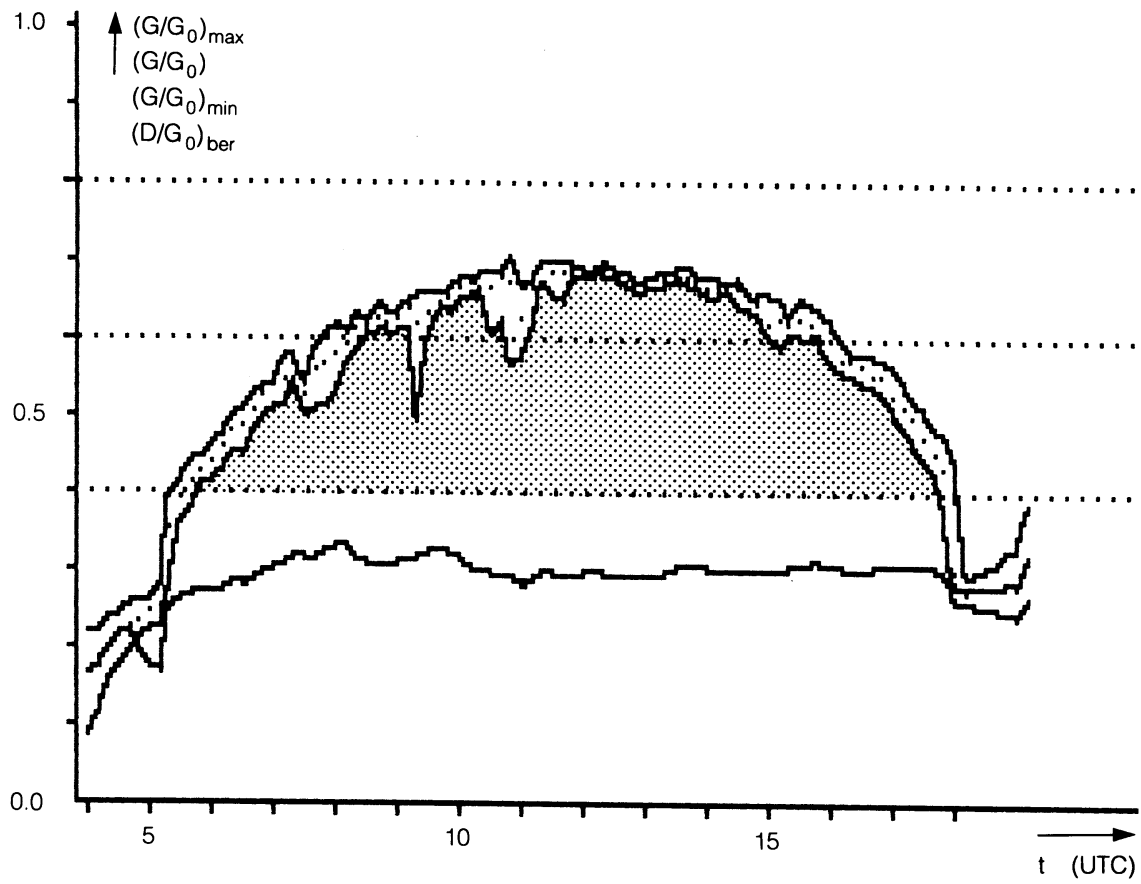


figuur 1. Diffuse straling D als functie van zonshoogte h en van de Linke-turbiditeit T_L bij onbewolkt weer

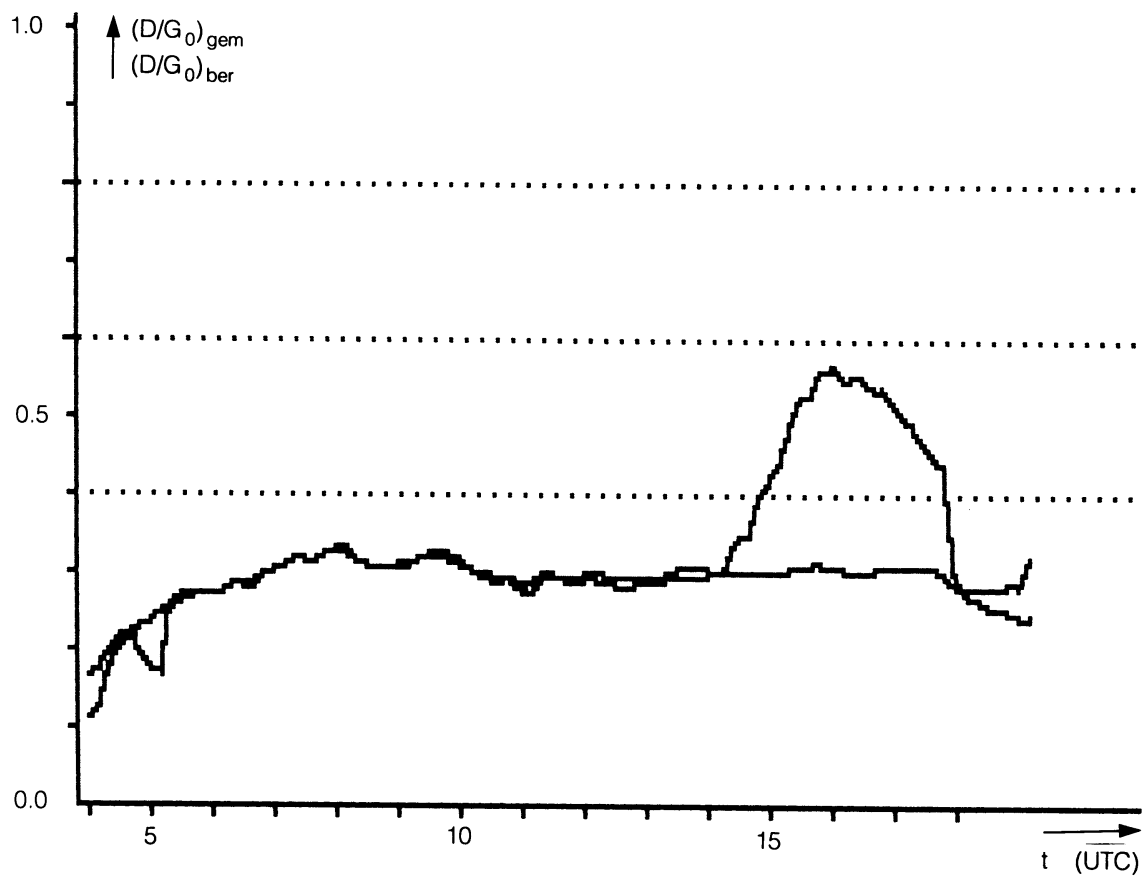


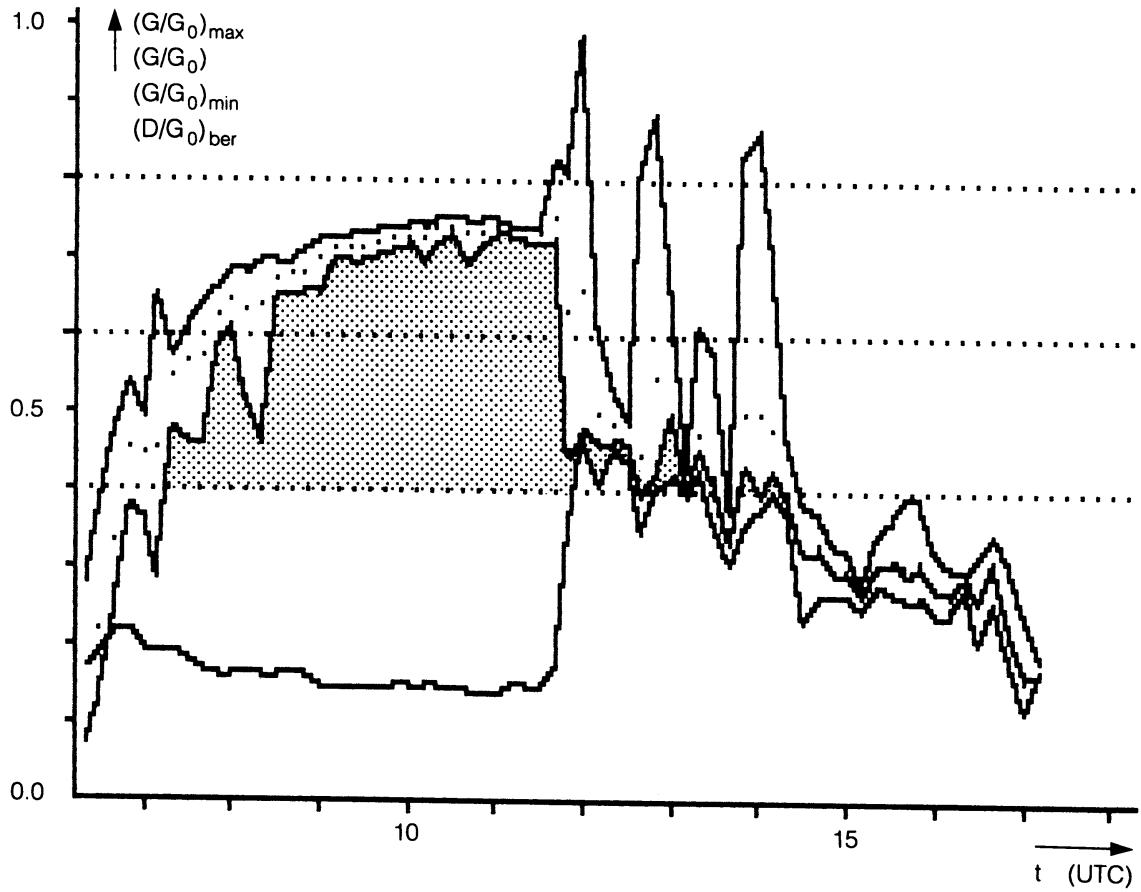
figuur 2. Verloop van gemeten en met relatie 1 "berekende" stralingscomponenten
23. 5. 1989



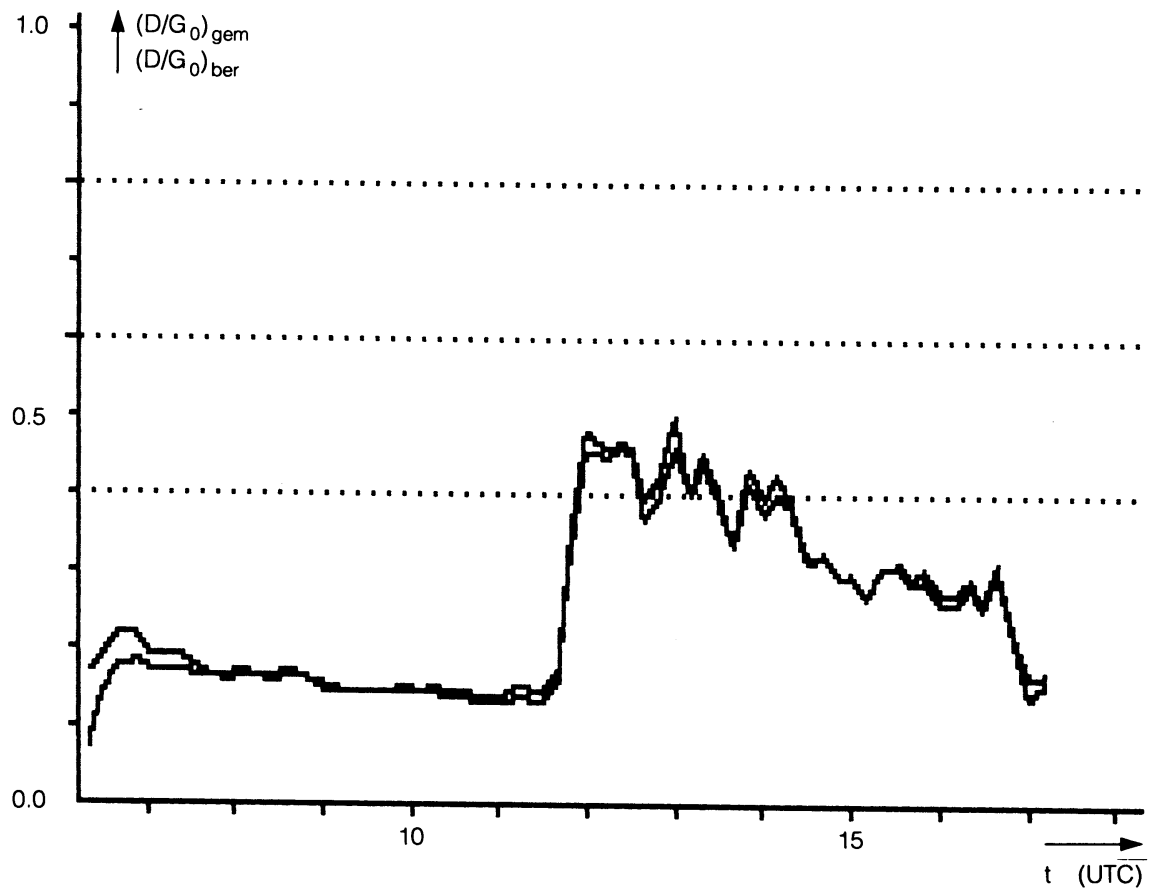


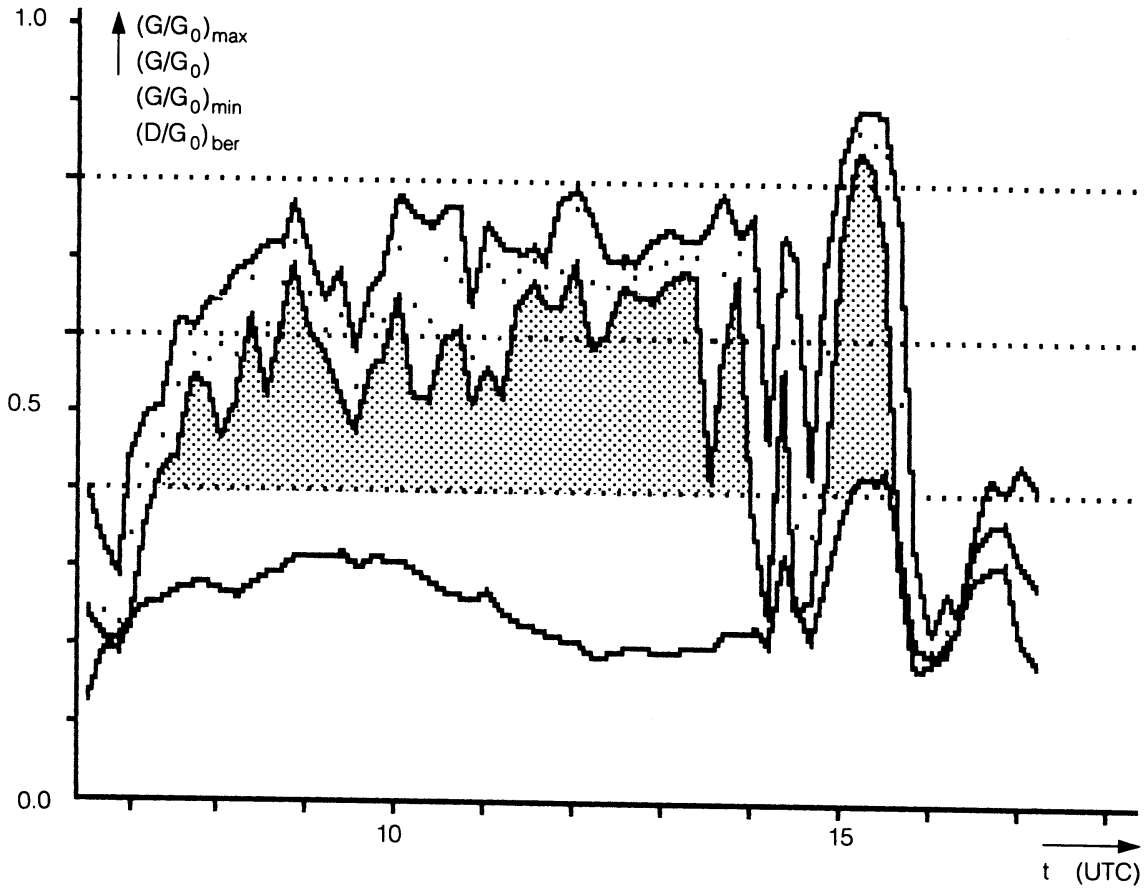
figuur 3. Verloop van gemeten en met relatie 1 "berekende" stralingscomponenten
 20. 5. 1989



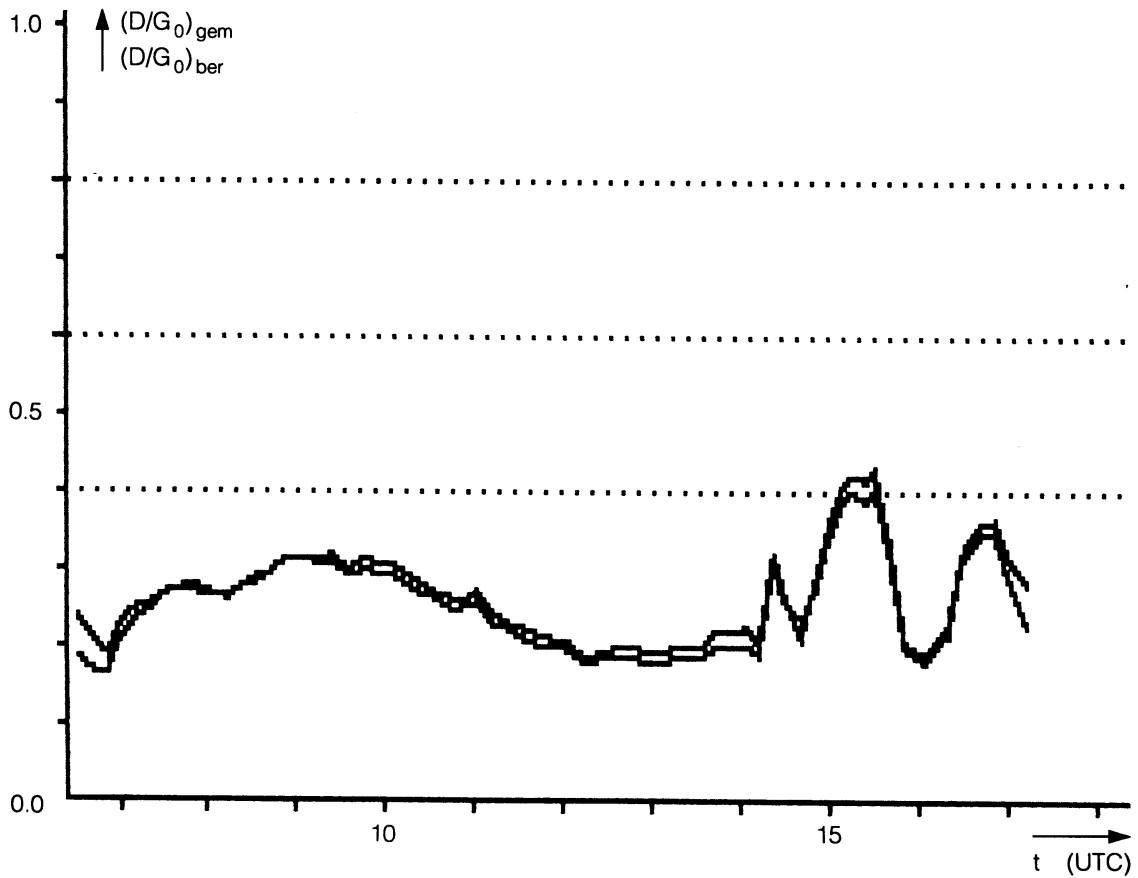


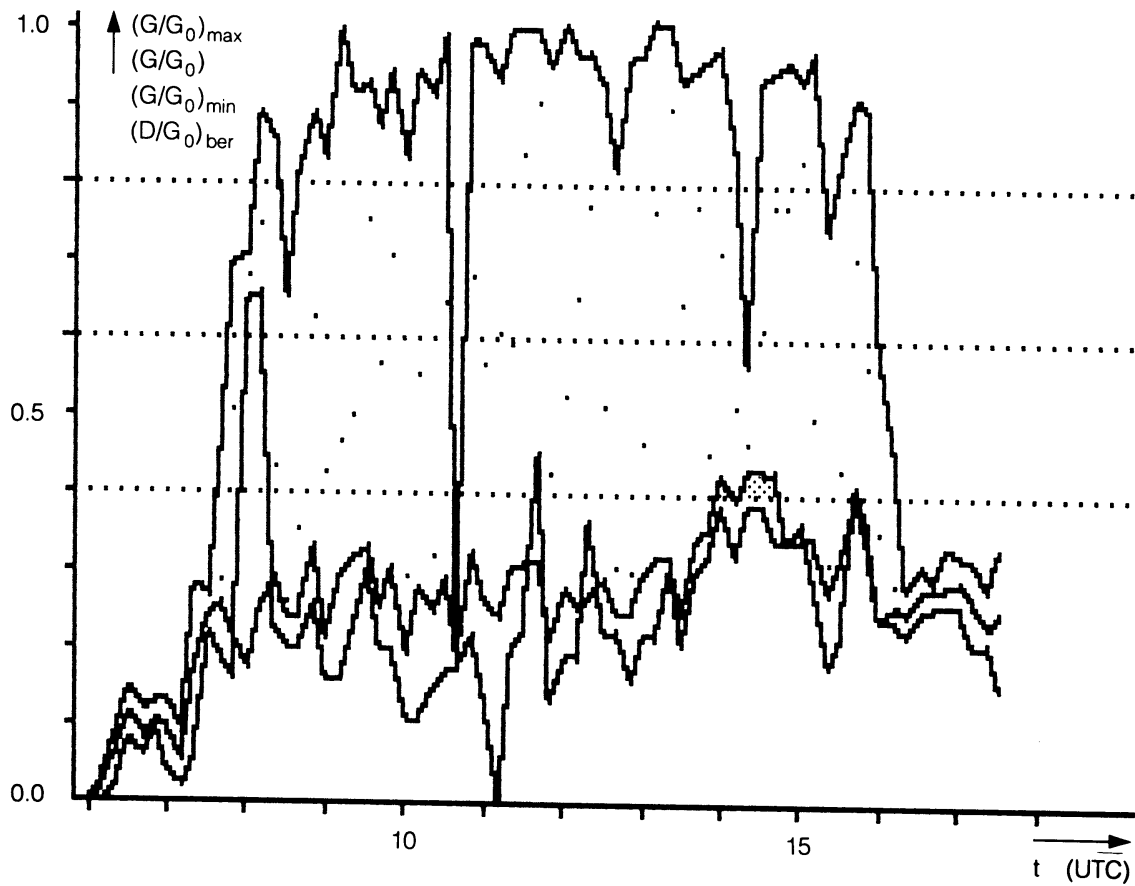
figuur 4. Verloop van gemeten en met relatie 1 "berekende" stralingscomponenten
10. 3. 1989



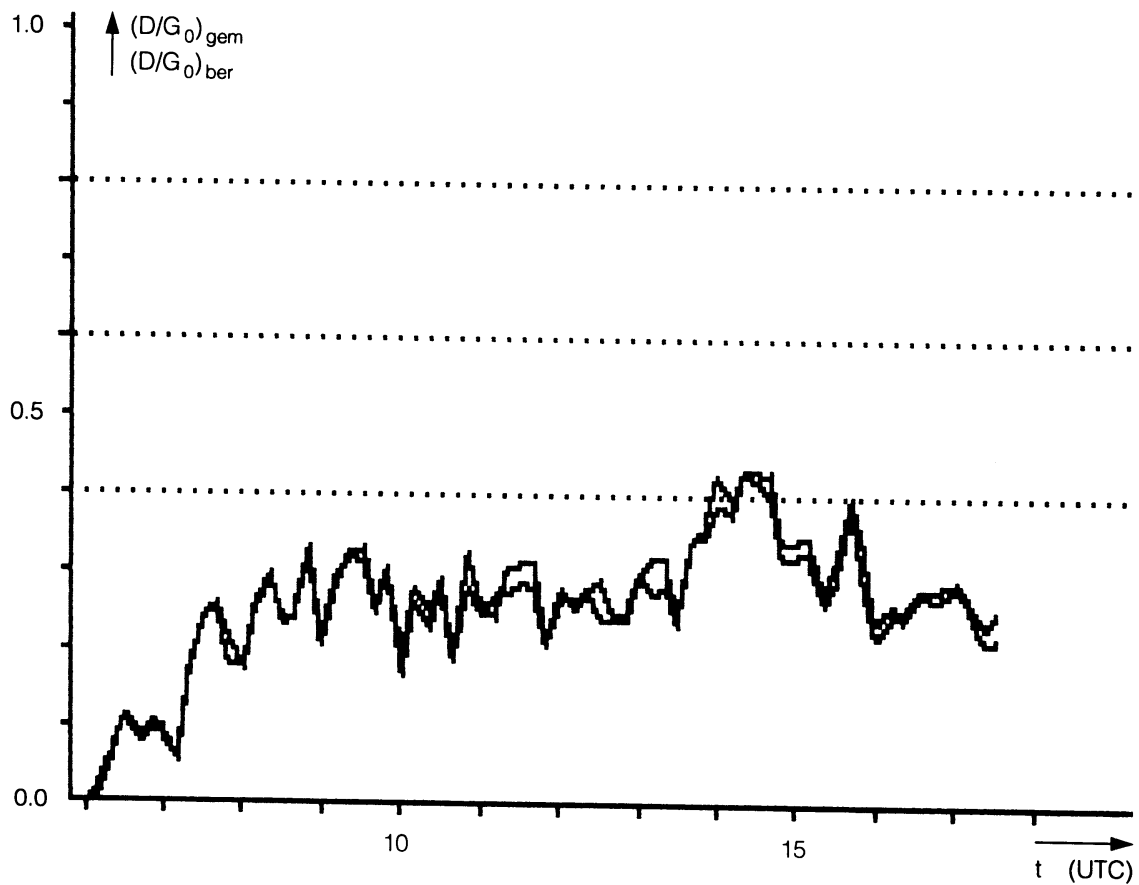


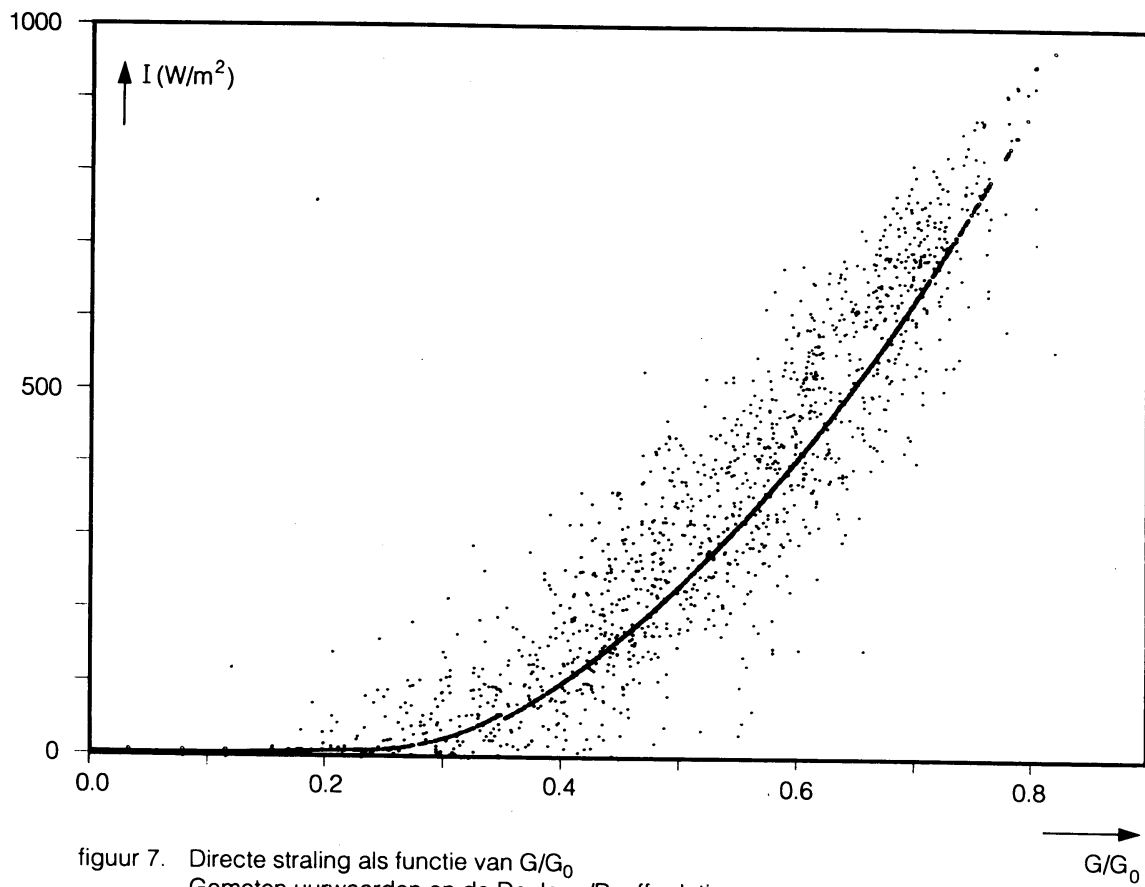
figuur 5. Verloop van gemeten en met relatie 1 "berekende" stralingscomponenten
6. 3. 1989



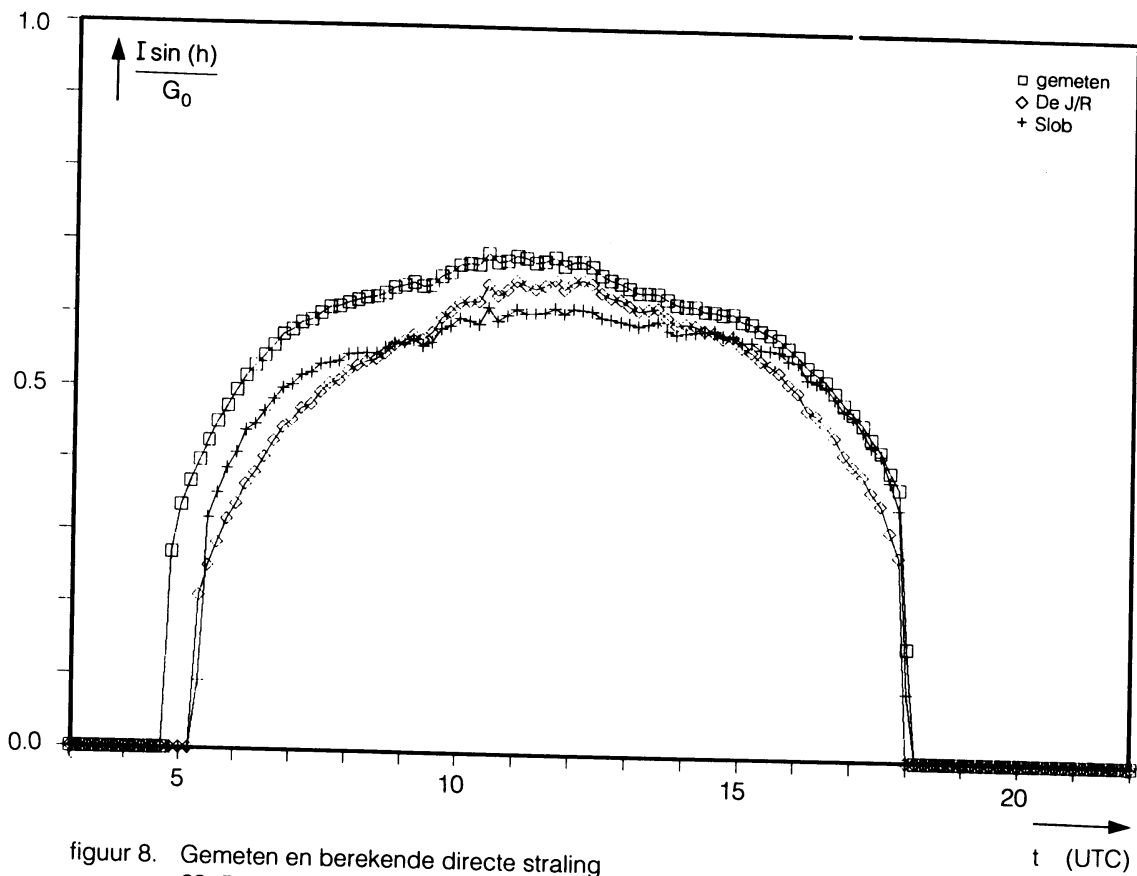


figuur 6. Verloop van gemeten en met relatie 1 "berekende" stralingscomponenten
21. 3. 1989

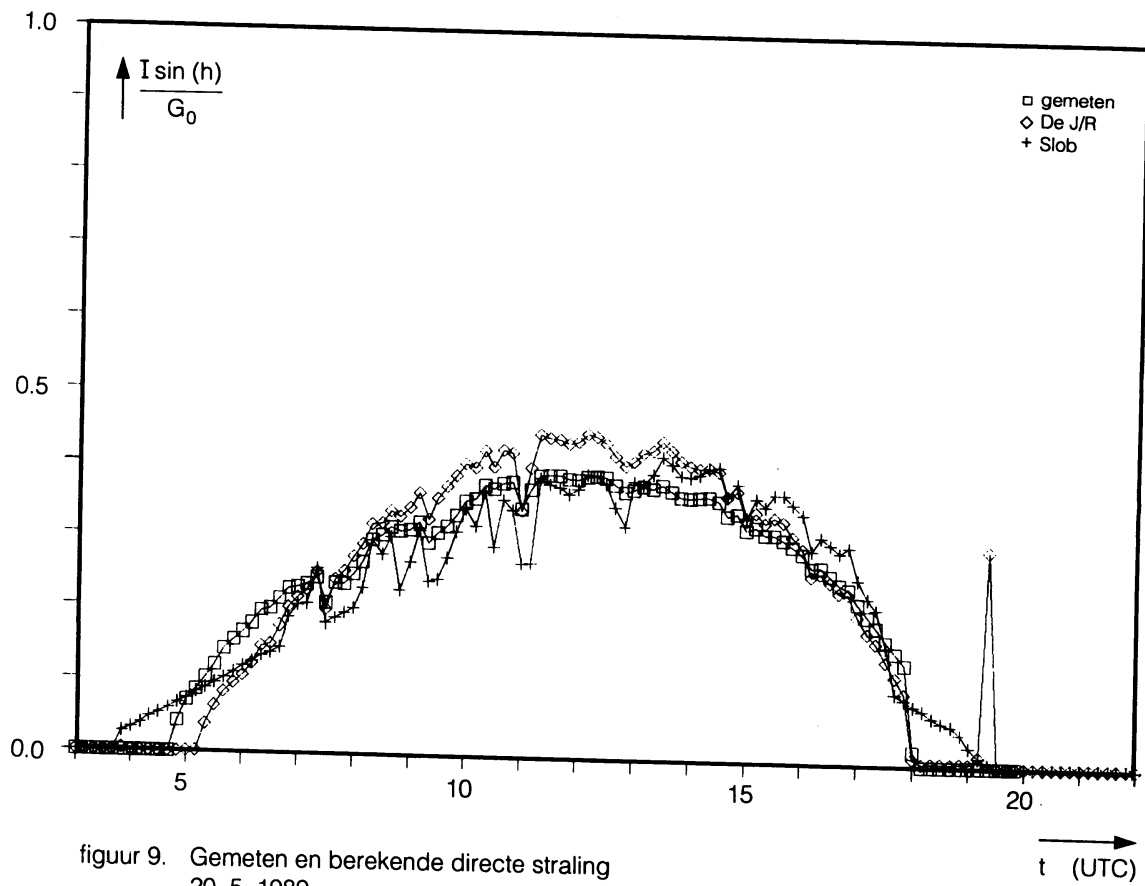




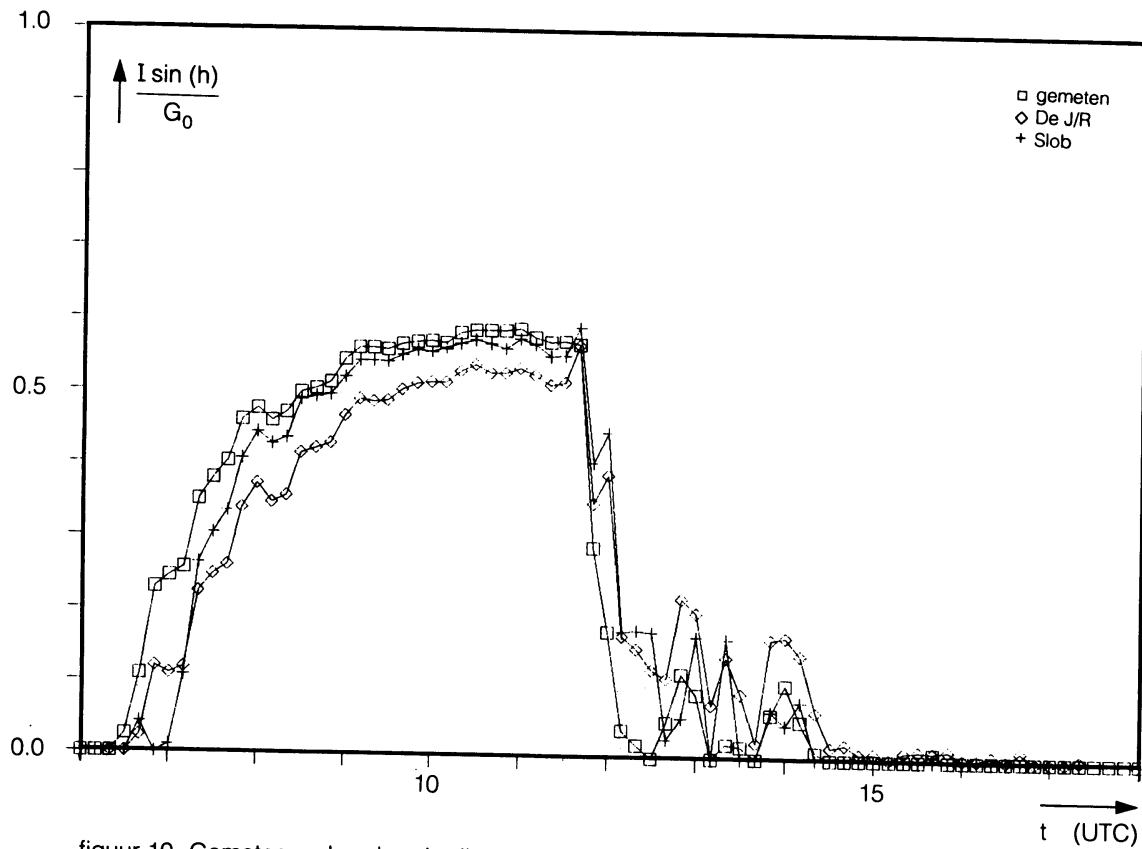
figuur 7. Directe straling als functie van G/G_0
Gemeten uurwaarden en de De Jong/Raaff-relaties



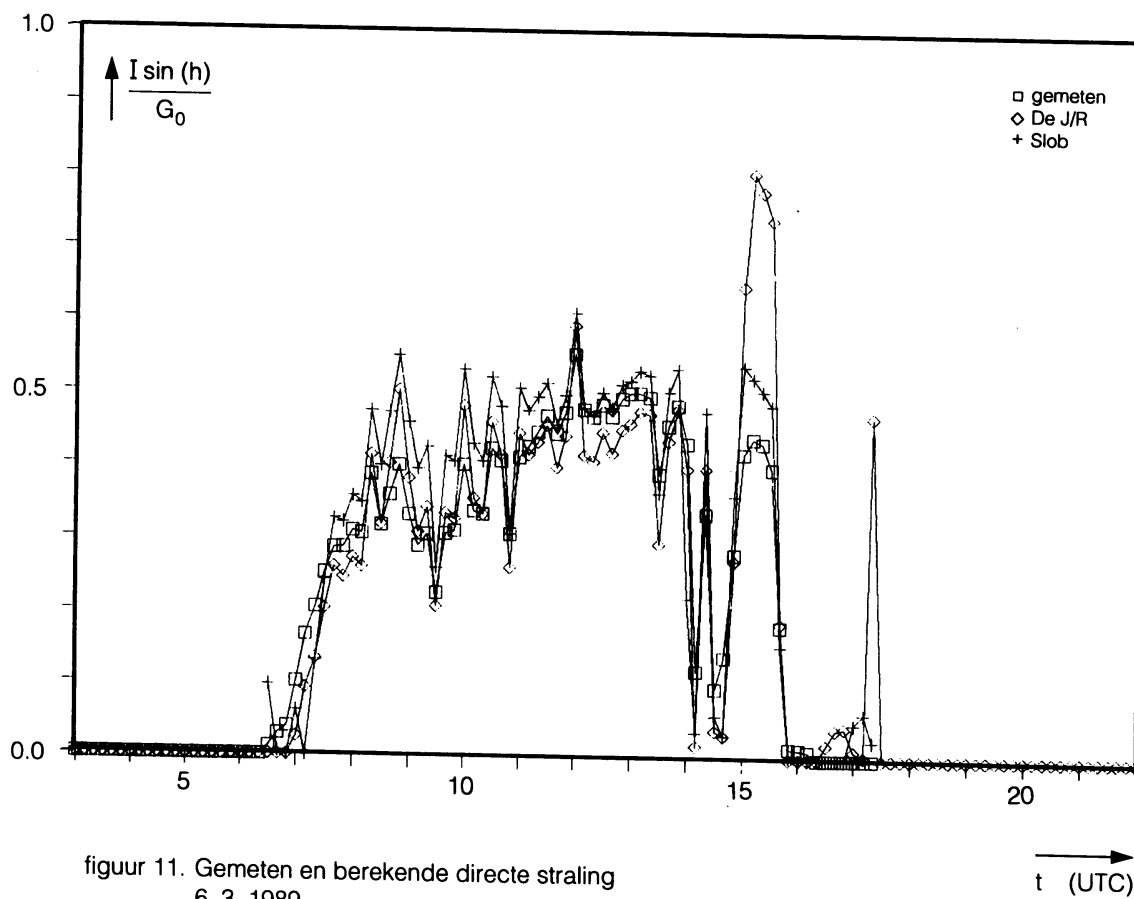
figuur 8. Gemeten en berekende directe straling
23. 5. 1989



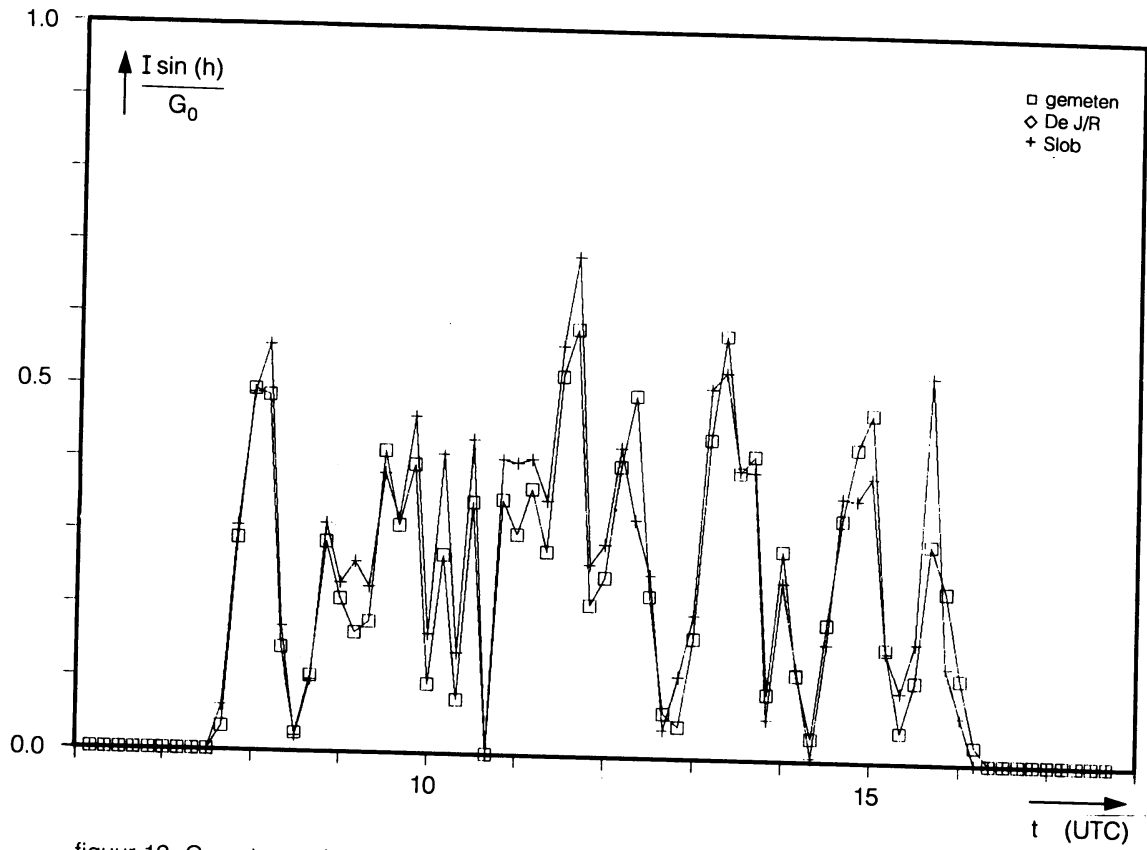
figuur 9. Gemeten en berekende directe straling
20. 5. 1989



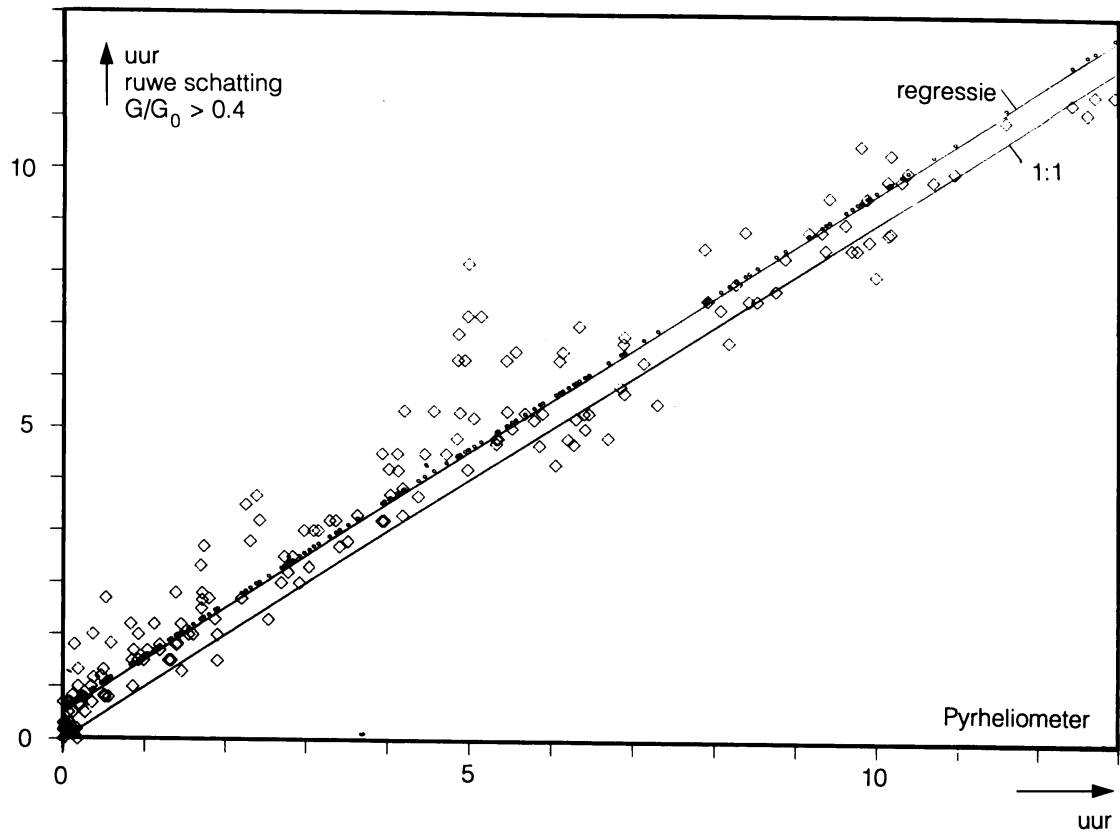
figuur 10. Gemeten en berekende directe straling
10. 3. 1989



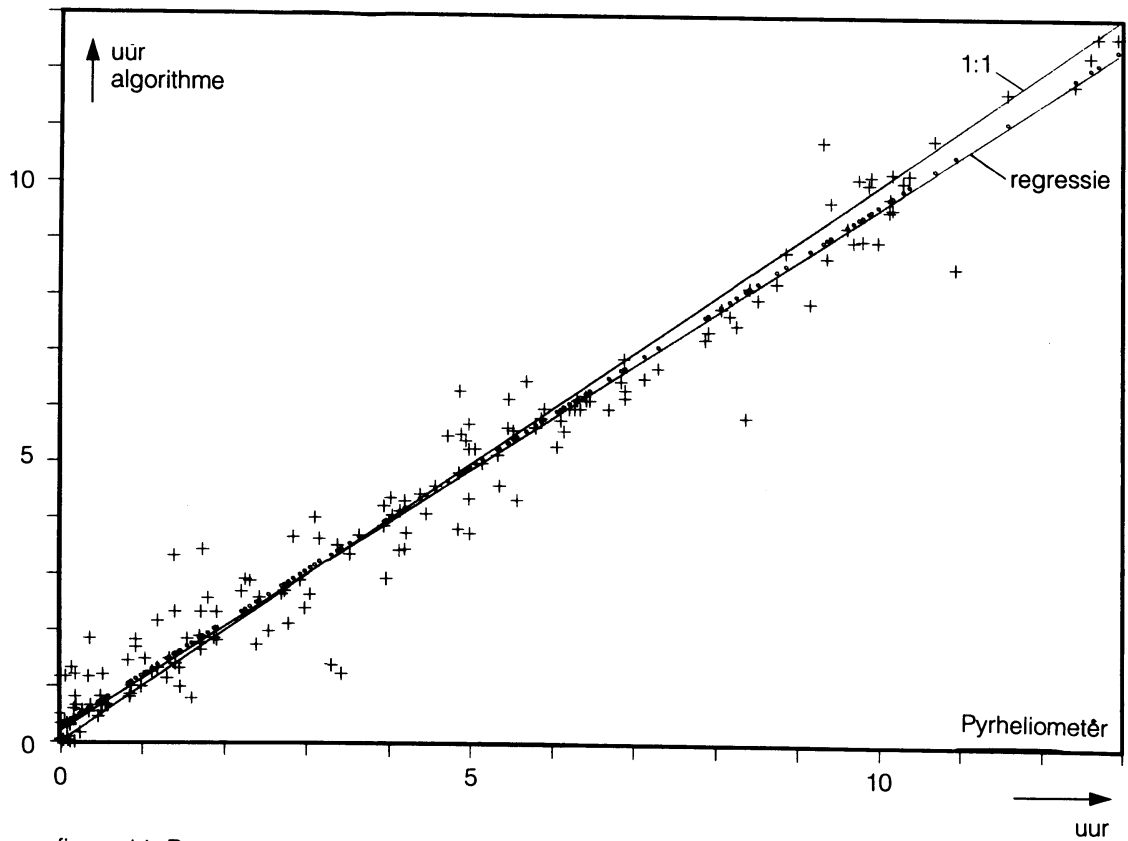
figuur 11. Gemeten en berekende directe straling
6. 3. 1989



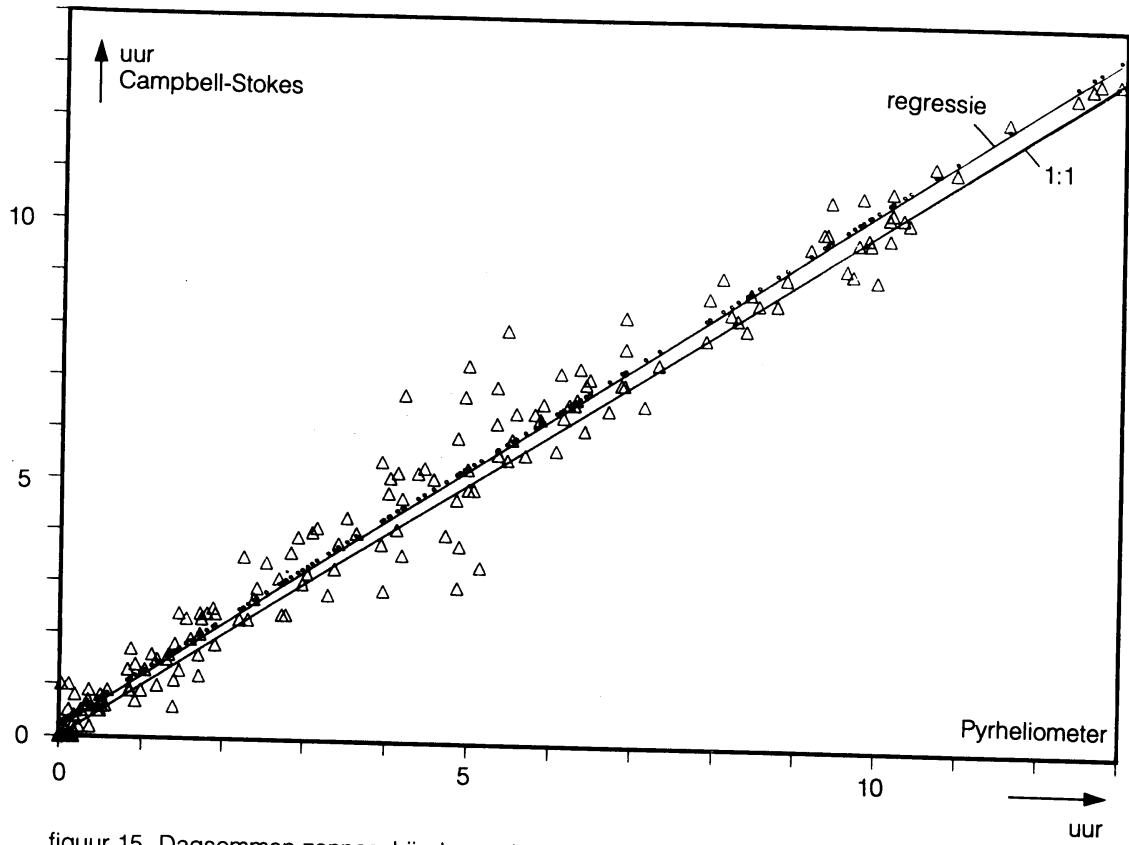
figuur 12. Gemeten en berekende directe straling
21. 3. 1989



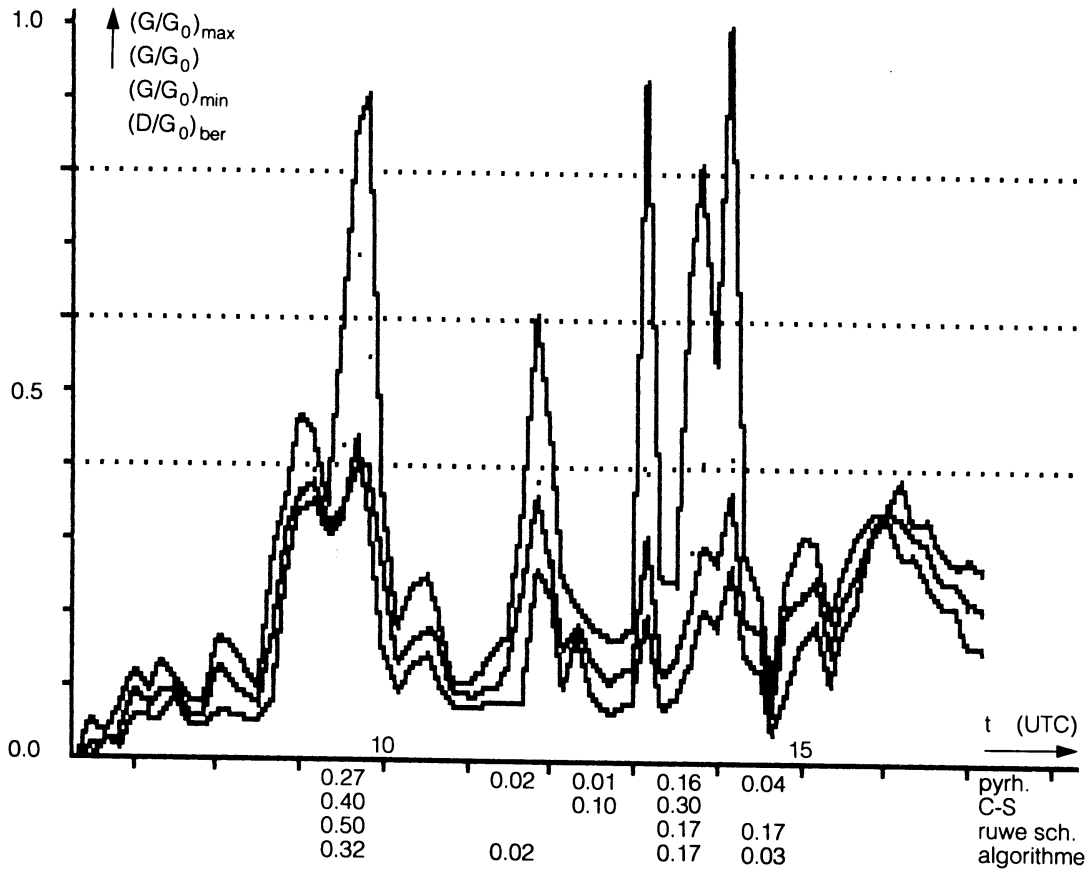
figuur 13. Dagsommen zonschijnduur volgens ruwe schatting



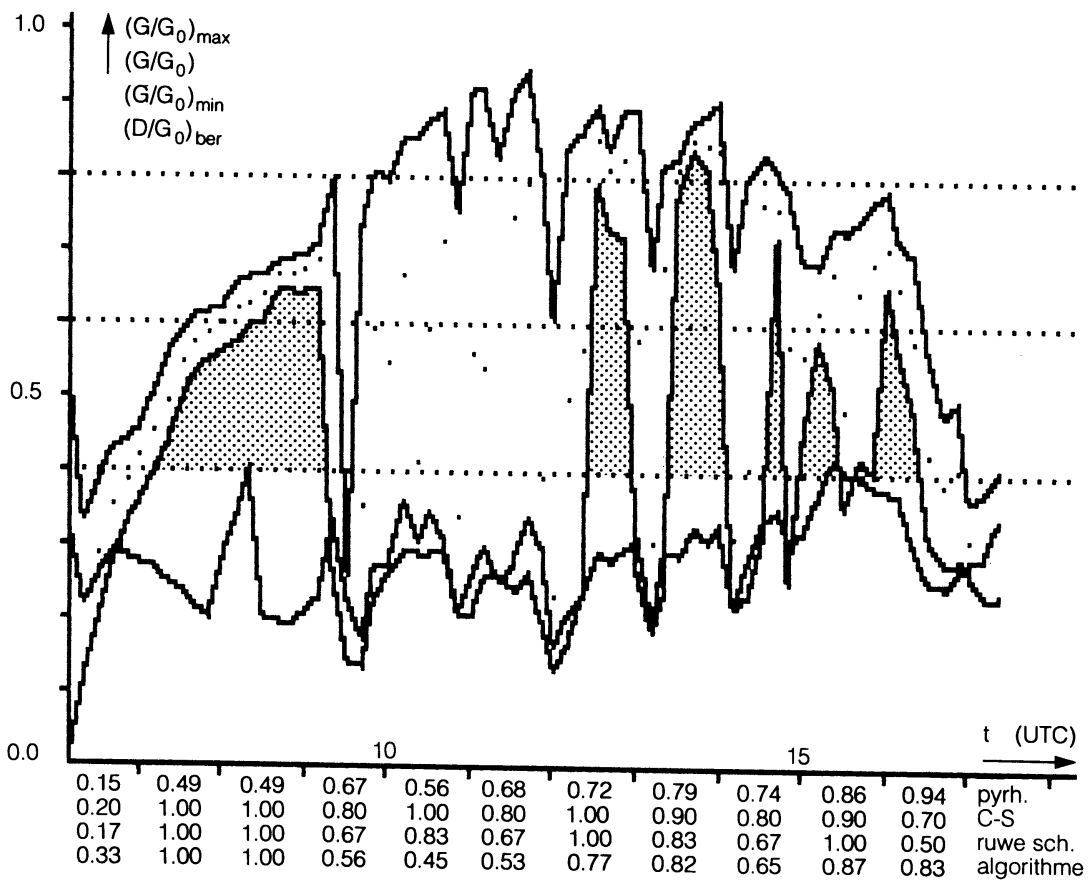
figuur 14. Dagsommen zonschijnduur volgens algorithme



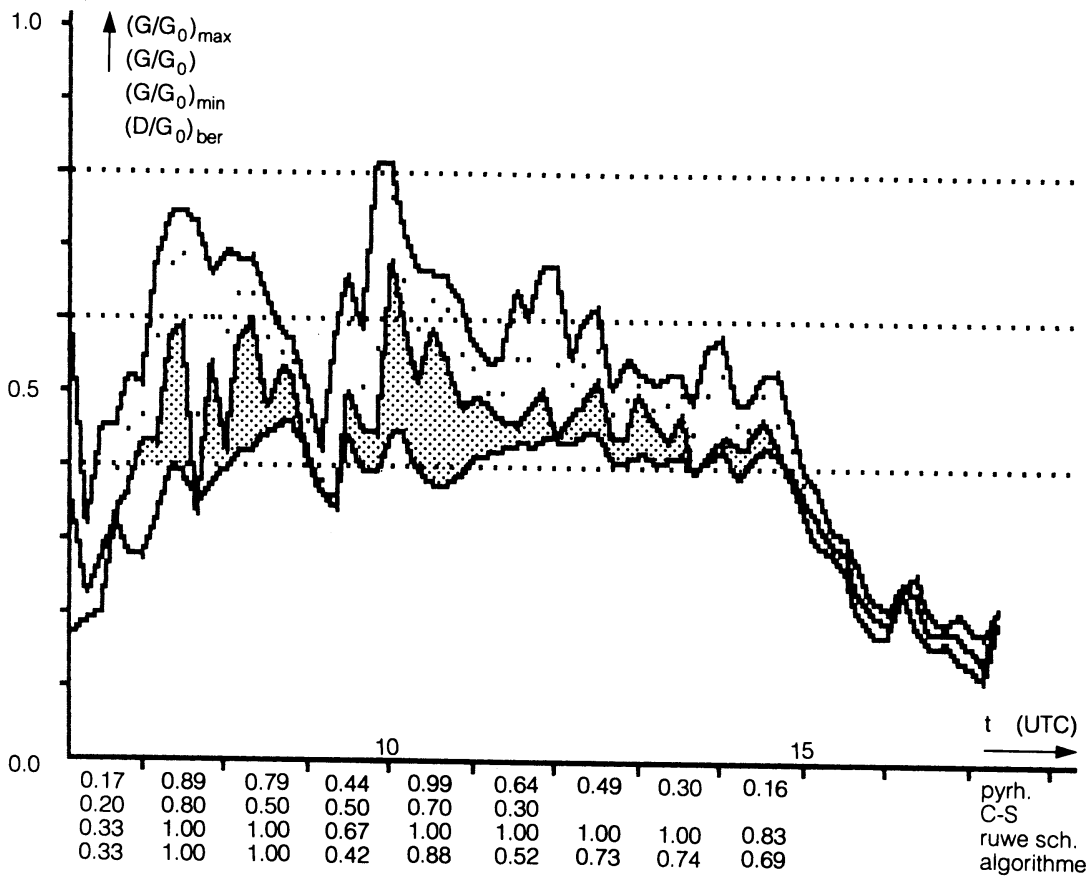
figuur 15. Dagsommen zonneshijnduur volgens Campbell-Stokes



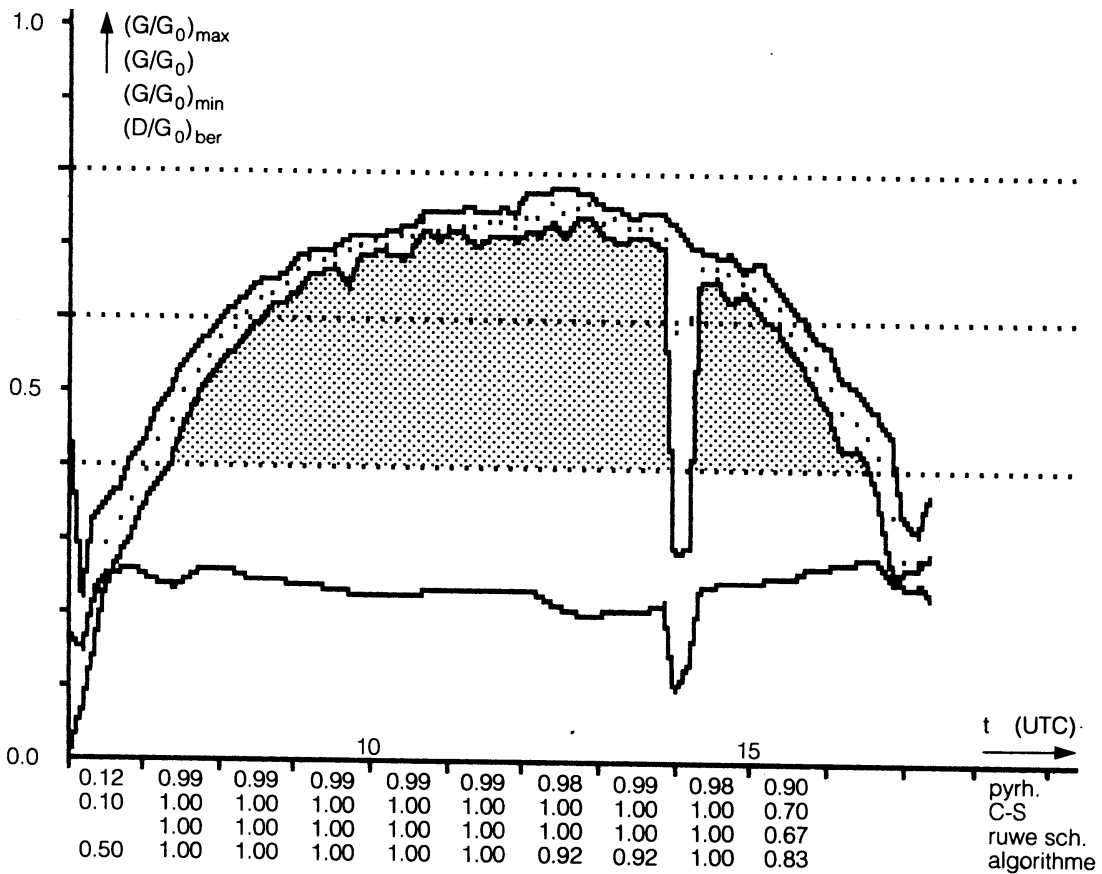
figuur 16. Fractie zonschijnduur per uur
Gemeten en berekende stralingscomponenten
9. 3. 1990



figuur 17. Fractie zonschijnduur per uur
Gemeten en berekende stralingscomponenten
12. 3. 1990



figuur 18. Fractie zonneshijnduur per uur
 Gemeten en berekende stralingscomponenten
 13. 3. 1990



figuur 19. Fractiezonneshijnduur per uur
 Gemeten en berekende stralingscomponenten
 16. 3. 1990