

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
De Bilt

Klimaat van Nederland 3

C.A. Velds

Zonnestraling in Nederland

met medewerking van:
P.C.T. van der Hoeven
J.M. Koopstra
W.R. Raaff
W.H. Slob

THIEME-BAARN / KNMI

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Velds, C.A.

Zonnestraling in Nederland / C.A. Velds ; met medew. van:

P.C.T. van der Hoeven ... [et al.]. - De Bilt : KNMI ;

Baarn : Thieme. - Ill. - (Klimaat van Nederland ; 3)

Met lit. opg., reg. - Met samenvatting in het Engels.

ISBN 90-5210-140-X

NUGI 819

Trefw.: zonnestraling ; Nederland

©MCMXCII KNMI / BV Uitgeversmaatschappij Tirion, Baarn
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar
gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke
andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke
toestemming van de uitgever.

INHOUD

Voorwoord – 7

1. Inleiding – 9

2. Straling in de atmosfeer – 14

2.1 Inleiding – 15

2.2 Absorptie, emissie en verstrooiing van straling – 17

2.2.1 Absorptie en emissie – 17

2.2.2 Absorptie in de atmosfeer – 20

2.2.3 Verstrooiing – 21

2.2.4 De energiebalans van het Aarde-atmosfeersysteem – 22

2.2.5 Absorptie, verstrooiing en extinctie in formules – 23

2.2.6 De weglengte door de atmosfeer – 27

2.3 Turbiditeit of troebelheid – 29

2.3.1 De turbiditeitsfactor van Linke – 29

2.3.2 De turbiditeitscoëfficiënt van Ångström – 30

2.3.3 De turbiditeitscoëfficiënt van Schüepp – 31

2.4 Transmissie en reflectie van straling – 32

2.4.1 Transmissie – 32

2.4.2 Reflectie – 37

2.5 Inkomende langgolvlige straling – 40

3. Hoe wordt de straling gemeten en waar? – 41

3.1 Stralingsmeters – 41

3.1.1 De pyrhelimeter – 41

3.1.2 De pyranometer – 44

3.1.3 De diffusometer – 46

3.1.4 De zonneshijnmeter – 46

3.2 Het stralingsmeetnet – 49

4. Resultaten op het horizontale vlak – 53

4.1 Globale straling en zonneshijnduur – 53

4.1.1 De jaarlijkse gang – 53

4.1.2 De variabiliteit van jaar tot jaar in de globale straling en de zonneshijnduur – 56

4.1.3 De dagelijkse gang in de globale straling – 58

4.1.4 De kansverdeling van de globale straling – 61

4.1.5	Runlengten – 69
4.2	Directe en diffuse straling – 70
4.2.1	De jaarlijkse gang – 71
4.2.2	De dagelijkse gang in de directe en de diffuse straling – 74
4.3	De invallende langgolvlige straling – 80
4.3.1	De jaarlijkse gang – 80
4.3.2	De dagelijkse gang in de langgolvlige straling – 81
4.4	Zonneschijnduur gemiddeld per maand en per jaar – 83
4.5	Ruimtelijke verdeling van de globale straling op kleine schaal – 86
4.5.1	Invloed van de stad en van luchtverontreiniging op de invallende globale straling – 87
4.5.2	Verschillen in globale straling in de kuststrook (Westland) – 88
4.6	Bespreking van enkele kenmerkende dagen – 89
5.	Modellen, schuine vlakken en spectra – 97
5.1	Modellen voor de berekening van zonnestraling op het horizontale vlak – 97
5.1.1	Inleiding – 97
5.1.2	Berekening van de straling aan de rand van de atmosfeer – 97
5.1.3	Berekening van de straling op het horizontale vlak – 101
5.2	Modellen voor de berekening van zonnestraling op schuine vlakken – 106
5.2.1	De directe straling op een schuin vlak – 107
5.2.2	De diffuse straling op een schuin vlak – 109
5.2.3	De globale straling op een schuin vlak – 113
5.2.4	De totale straling op een schuin vlak – 113
5.3	Resultaten van metingen en berekeningen op schuine vlakken – 114
5.4	Spectrale verdeling van de globale straling – 120
5.5	Daglicht – 122
6.	Appendices – 125
6.1	Berekening van de positie van de Zon – 125
6.2	Tijdrekening – 136
6.2.1	Tijdrekening in Nederland – 137
6.2.2	En nu de praktijk – 137
6.3	Eenheden en definities – 142
6.3.1	Eenheden – 142
6.3.2	Definities – 143
6.3.3	Zonnestralingsschalen – 146
6.4	Symbolenlijst – 147
	Summary – 151
	Literatuur – 155
	Trefwoordenregister – 167

V O O R W O O R D

Het bewuste gebruik van wind- en zonneënergie voor de energievoorziening van Nederland begint een steeds grotere rol te spelen. Ten behoeve van de windenergie heeft het KNMI in 1983 een publikatie "Windklimaat van Nederland" uitgegeven. Als logisch vervolg lag het voor de hand dat ook de basiskennis en gegevens over de zonnestraling in Nederland in boekvorm zouden verschijnen.

De laatste KNMI-studie over zonnestraling werd door Braak in 1937 gepubliceerd. Het betrof toen slechts de bewerking van het aantal uren zonneshijn in Nederland. Inmiddels wordt op een aantal meetpunten de zonnestraling in energie-eenheden gemeten, waarbij in De Bilt een reeks van meer dan 30 jaar is opgebouwd. Het is daarom nu de moeite waard om deze gegevens in een overzichtelijke vorm bij elkaar te brengen en dit aan te vullen met meetresultaten en theorieën over de straling op niet-horizontale vlakken.

Dit boek is in de eerste plaats bedoeld voor degenen die vanwege hun beroep met stralingsgegevens geconfronteerd worden, zoals ontwerpers van zonneënergieinstallaties en bouwkundigen. Daarom zijn naast meetgegevens ook veel praktische formules gegeven. Verder kan het boek van nut zijn voor landbouwkundigen en een ieder die geïnteresseerd is in het zonneklimaat van Nederland. Als achtergrondinformatie zijn een hoofdstuk over de fysische aspecten van straling in de atmosfeer en een hoofdstuk over stralingsinstrumenten opgenomen. Tenslotte wordt de plaatsbepaling van de Zon aan de hemelkoepel en de daarmee samenhangende tijdrekening behandeld.

Bij de totstandkoming van dit boek werd van vele kanten medewerking verleend. Voor de samenstelling van de gegevensbestanden en het uitvoeren van de nodige berekeningen was de steun van P.C.T. van der Hoeven en J.M. Koopstra onmisbaar. A.J. Frantzen, W.R. Raaff en W.H. Slob zijn, met de door hen verrichte metingen, in feite de grondleggers van dit boek. Hun ben ik zeer erkentelijk voor vele goede raadgevingen en het kunnen gebruiken van hun resultaten.

Voor het kritisch doorlezen van de concept-manuscripten van dit boek ben ik dank verschuldigd aan A.W. Donker, W.N. Lablans, I.B.M. Lammers, S.H. Muller, C.W. van Scherpenzeel, W.H. Slob, H. Tennekes, A.P. van Ulden, J. Wieringa en de sectie Stationszaken van de Klimatologische Dienst.

Het tekenwerk werd vakkundig verzorgd door S.J.M. Krooshof. Het boek had tenslotte niet tot stand kunnen komen zonder de vaardigheden van M.H. Kaltoven aan de tekstverwerker.

C.A. Velds

1 INLEIDING

Bij gesprekken over het weer en studies over het klimaat spelen drie elementen steeds een grote rol: de neerslag, de temperatuur en de hoeveelheid zonneshijjn.

In dit boek komt het laatste element aan de orde.

De zonneshijjduur wordt al vele jaren gemeten (Braak, 1937; Levert, 1957; De Boer, 1959; KNMI, 1972). De resultaten zijn onder meer verwerkt in gidsen en brochures over vakantiebestemmingen, waarin ons wordt verteld hoeveel uren zon we tijdens onze vakantie gemiddeld kunnen verwachten.

Natuurlijk zijn er ook andere gebruikers van deze gegevens, zoals de landbouw en de bouwwereld. In wezen gaat het daar echter niet om het aantal uren zon, maar om de energie die de Zon levert aan het gewas of een gebouw.

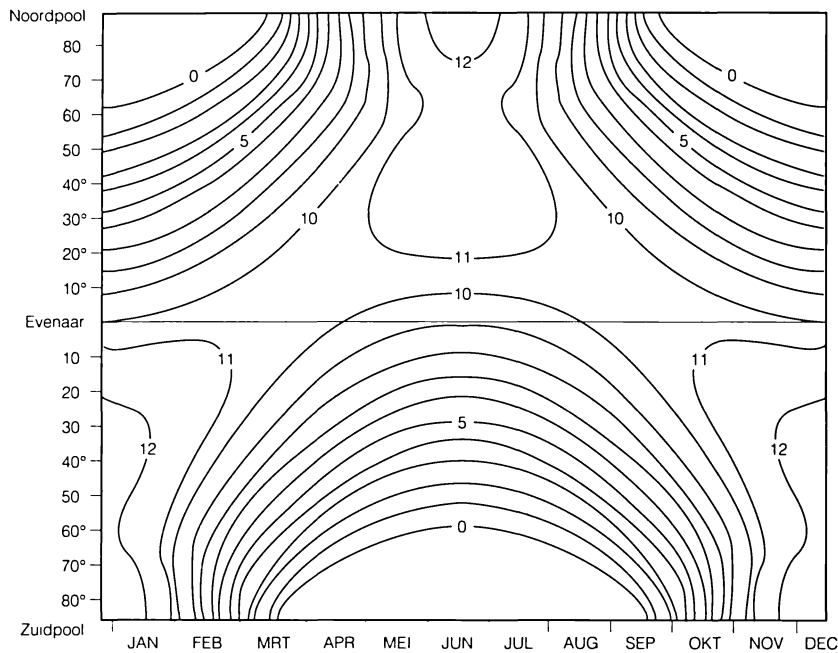
De belangstelling voor de energie van de Zon (zonneënergie) is de laatste jaren toegenomen door het besef dat we hebben gekregen van de negatieve bijverschijnselen van het gebruik van fossiele brandstoffen. Er wordt nu serieus gewerkt aan het actieve en passieve gebruik van de Zon als energiebron. Daarom zal in dit boek meer aandacht worden geschonken aan de zonneënergie dan aan de zonneshijjduur.

Van alle hemellichamen is de Zon onze belangrijkste externe energiebron. Als we de energie die van de Zon op Aarde komt op 100 stellen, dan is die van de maan 0,01 en van de sterren 10^{-5} . De zonneënergie wordt geleverd door kernfusiereacties in het binnenste van de Zon, waarbij o.a. waterstofkernen in heliumkernen worden omgezet.

Langjarige metingen hebben aangetoond dat die energiestroom niet noemenswaard met de tijd is veranderd. We kunnen daarom spreken van de zonneconstante. Dat is de energie die iedere seconde aan de rand van de atmosfeer wordt opgevangen door een vlak van 1 m^2 dat loodrecht op de richting van de zonnestrallen is gericht. De zonneconstante is gemiddeld 1367 Wm^{-2} (Fröhlich, 1988). Het is dan mogelijk de energie uit te rekenen die op een bepaalde plaats aan de rand van de atmosfeer binnenvalt.

Door de scheve stand van de aardas en de elliptische vorm van de baan van de Aarde rond de Zon (figuur 6.2) is die energie niet voor elke plaats op Aarde gelijk. Figuur 1.1 geeft de dagelijkse hoeveelheid zonneënergie in kWh m^{-2} op een horizontaal vlak aan de rand van de atmosfeer als functie van de breedtegraad en de tijd van het jaar. We zien duidelijk de maxima in de zomer - juni, juli - op het Noordelijk Halfrond en - december, januari - op het Zuidelijk Halfrond. Verder neemt de hoeveelheid invallende energie in het grootste deel van het jaar toe van de polen naar de evenaar.

De zonnestraling aan de rand van de atmosfeer wordt verzwakt op haar weg door de atmosfeer. Wolken hebben een grote invloed op de hoeveelheid zonnestraling die het aardoppervlak bereikt. Maar ook de gasen in de atmosfeer als zuurstof, kooldioxyde, ozon, stikstof, waterdamp en vaste deeltjes (stof, roet) verzwakken de zonnestraling. Dit komt doordat die gasen energie van de zonnestraling kunnen opnemen (absorptie) of de zonnestrallen kunnen verstrooien. De straling die het aardoppervlak rechtstreeks bereikt

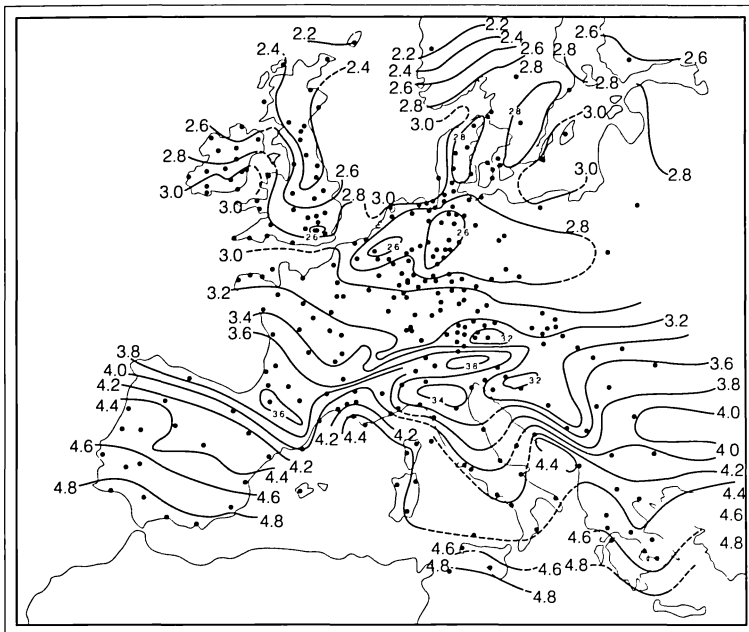


Figuur 1.1 Gemiddelde instraling per dag in kWh m² aan de rand van de atmosfeer als functie van de breedtegraad en de tijd in het jaar (naar Fröhlich en London, 1986)

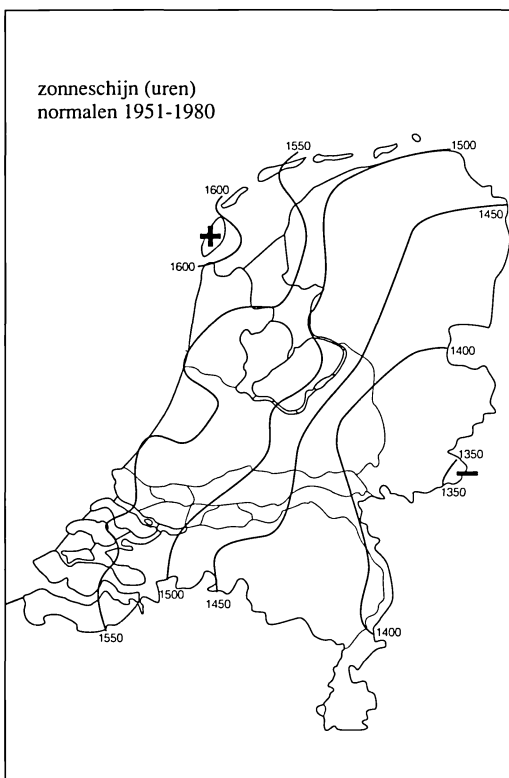
noemen we directe straling. Omdat de Zon in Nederland nooit loodrecht boven ons staat, valt de directe straling onder een hoek met het aardoppervlak in. De directe straling op een vlak van 1 m² loodrecht op de richting van de zonnestralen noemen we als I , de directe straling loodrecht op 1 m² aardoppervlak met B . Als de zonshoogte γ (graden) is, is dus $B = I \sin \gamma$. De straling die via verstrooiing en reflectie op het aardoppervlak wordt ontvangen heet diffuse straling (D). De som van directe en diffuse straling wordt globale straling (G) genoemd. Er geldt dus $G = B + D = I \sin \gamma + D$. Daar de bewolking van plaats tot plaats kan variëren kunnen er aanzienlijke verschillen optreden in de zonnestraling aan het aardoppervlak. Kennis van deze variabiliteit is nodig om zonnestraling voor energietoepassingen te kunnen gebruiken.

Dit boek behandelt de hoeveelheid zonnestraling in Nederland. We zullen daarom van de wereldschaal uit figuur 1.1 moeten afdalen naar kleinere ruimteschalen. Als "tussenstap" geeft figuur 1.2 de gemiddelde dagelijkse instraling aan het aardoppervlak in kWh m² voor Europa. In deze figuur is meer detail te zien dan in figuur 1.1, en tevens valt op dat de lijnen van gelijke instraling (isolijnen) niet strikt west-oost lopen. De hoeveelheid zonneënergie neemt nog wel toe van noord naar zuid, maar duidelijk zijn ook kusteffecten en effecten van gebergten te onderkennen.

Voor Nederland is zo'n kaart nog niet gepubliceerd, omdat het stralingsmeetnet daarvoor nog niet dicht genoeg was. Beschouwen we echter een verwante grootheid als de duur van de zonnenschijn in uren, dan zien we in figuur 1.3 dat de isolijnen van de totale duur van de zonnenschijn over het hele jaar vrijwel gemiddeld noord-zuid lopen. Op de schaal van Nederland is dus het land-zee effect belangrijker dan de gemiddelde toeneming van zonnestraling in de richting van de evenaar. Dit kusteffect is het grootst in de zomer.



*Figuur 1.2
Gemiddelde instraling per dag in
kWh m⁻² aan het aardoppervlak in
Europa (naar Palz, 1984)*

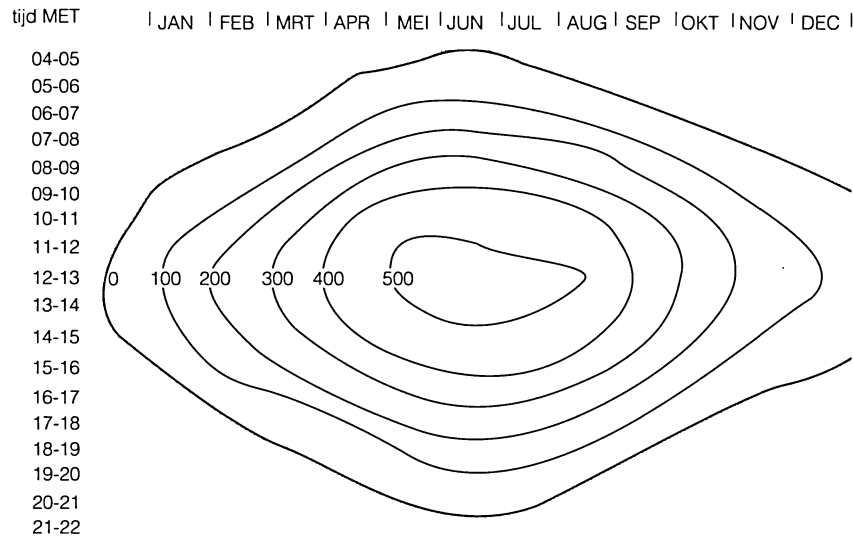


*Figuur 1.3
Gemiddelde duur van de zonneshijn
in uren per jaar in Nederland,
gebaseerd op het tijdvak 1951-1980*

De figuren 1.2 en 1.3 geven de energiehoeveelheden en uren zonneshijn gemiddeld over het jaar. De gebruiker van stralingsgegevens zal echter meer geïnteresseerd zijn in het energieaanbod over kortere tijdvakken, zoals een maand, een dag of een uur. We zullen dus ook kleinere tijdschalen moeten bekijken.

Zoals bekend vertoont de hoeveelheid zonnestraling een variatie in de loop van een jaar en gedurende een etmaal. We spreken in dat verband van een jaarlijkse gang en een dagelijkse gang van de straling. Deze zijn duidelijk te zien in figuur 1.4, waarin voor het station De Bilt de globale straling in Wm^{-2} is uitgezet tegen de maanden van het jaar en de uren van de dag. Bij nadere beschouwing valt op dat de dagelijkse gang niet symmetrisch is ten opzichte van 12 uur 's middags. Dat heeft o.a. te maken met onze tijdrekening.

De in Nederland gebruikte Midden Europese Tijd (MET), ook wel klokktijd genoemd, komt niet overeen met de zonnetijd. Daarom zullen we in dit boek ook aandacht schenken aan de tijdrekening, waarbij de beginselen uit de sterrenkunde voor de berekening van de plaats van de Zon aan de hemelkoepel aan de orde zullen komen.



Figuur 1.4 Gemiddelde instraling per uur in Wm^{-2} te De Bilt als functie van de maand en tijd van de dag

In hoofdstuk 2 zullen we dieper ingaan op de vraag wat straling precies is en wat er mee gebeurt in de atmosfeer. Eerst worden de begrippen absorptie, emissie en verstrooiing van straling van de fysische kant bekeken; daarna worden deze processen in de atmosfeer behandeld. Vervolgens komen de formules voor absorptie, verstrooiing, extinctie en turbiditeit aan de orde, waarmee de lezer een indruk krijgt van het belang van deze processen voor de doorlatendheid (transmissie) van de atmosfeer voor straling. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een bespreking van de reflectie (terugkaatsing) van straling en van de inkomende langgolvlige straling.

Hoofdstuk 3 geeft een beschrijving van de gebruikte meetapparatuur: de pyrhelimeter voor het meten van de directe straling, de pyranometer voor de globale straling, de diffusometer voor de diffuse straling en de zonneshijnmeter voor de bepaling van het aantal uren zonneshijn. Verder wordt in dit hoofdstuk een overzicht gegeven van de meetnetten voor globale straling en zonneshijn.

Meetresultaten komen in hoofdstuk 4 aan de orde en wel achtereenvolgens die van de globale straling, de directe en diffuse straling, van de inkomende langgolvlige straling en van de zonneshijnduur. Daarna wordt aandacht besteed aan de ruimtelijke verdeling van de globale straling op een schaal van enkele kilometers. Om de lezer inzicht te geven hoe de globale, directe en diffuse straling in de loop van een dag kunnen veranderen worden tenslotte enkele voorbeelden gegeven van registraties op een aantal kenmerkende dagen.

Hoofdstuk 5 is eerst gewijd aan wiskundige modellen met hun formules voor de berekening van de straling op het horizontale vlak en op schuine vlakken. Vervolgens worden de resultaten van stralingsmetingen en -berekeningen op het schuine vlak behandeld. Het hoofdstuk eindigt met een bespreking van de spectrale verdeling van de globale straling, met als speciale toepassing het zichtbare gebied of het daglicht.

In hoofdstuk 6 is een aantal appendices bij elkaar gebracht. In 6.1 gaat het om de berekening van de plaats van de Zon aan de hemelkoepel, die van belang is als men de modellen uit hoofdstuk 5 wil toepassen. In de tweede appendix komt de tijdrekening ter sprake met begrippen als Universal Time, Midden Europese Tijd, tijdvereffening, e.d. De derde appendix (6.3) geeft de eenheden en definities van stralings- en daglichtgrootheden en een overzicht van internationaal vastgestelde zonnestralingsschalen. In de laatste appendix (6.4) vindt men een lijst van gebruikte symbolen.

In de literatuurlijst zijn de verwijzingen uit het boek opgenomen per hoofdstuk alfabetisch volgens auteursnaam. Verder wordt er per hoofdstuk aanvullende literatuur vermeld voor degenen die dieper op een onderwerp willen ingaan.

We besluiten hiermee de inleiding over zonneënergie en de indeling van het boek. Lezers die alleen geïnteresseerd zijn in de meetresultaten van zonnestraling kunnen direct doorgaan naar hoofdstuk 4 en volgende.

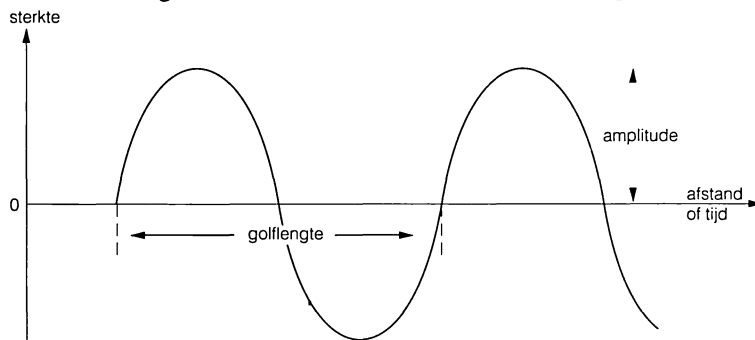
2 STRALING IN DE ATMOSFEER

2.1 Inleiding

Uit het feit dat we op Aarde de zonnestraling voelen als warmte kunnen we concluderen dat de stralen zich ook door het luchtledige kunnen voortplanten. Immers in de ruimte tussen Zon en Aarde, ver buiten de aardse atmosfeer, bevindt zich nauwelijks meer “lucht”, zodat het daar luchtledig is.

We kunnen nu ook de definitie van straling begrijpen: *straling* is een proces waarbij energie wordt overgedragen door elektromagnetische golven, zonder tussenkomst van materie. Straling kan beschreven worden als een golfverschijnsel. Net als bij golven in de zee kunnen we kijken naar de “hoogte” van de elektromagnetische golven, de richting waarin die golven lopen en de snelheid van de golven.

Bij elektromagnetische golven in het algemeen, dus ook bij zonnestraling, noemen we de “hoogte” van de golf de amplitude (zie figuur 2.1). Dit is de maximale afwijking van het gemiddelde niveau. De snelheid van elektromagnetische golven c is constant en wel $2,998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$, de zgn. *lichtsnelheid*. De afstand tussen twee toppen (of dalen) van opeenvolgende golven heet de *golflengte* λ [m]. Verder kunnen we nog de *frequentie* ν van de elektromagnetische straling definiëren als $\nu = c/\lambda$ met de dimensie $[\text{s}^{-1}]$.



Figuur 2.1
Een golfbeweging

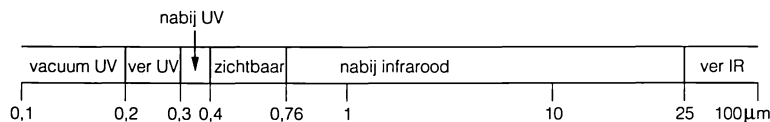


fig. 2.2

Figuur 2.2
Het spectrum van de elektromagnetische straling (UV = ultraviolet, IR = infrarood)

De elektromagnetische golven worden ingedeeld naar hun golflengte λ of frequentie ν in zogenoemde spectrale gebieden, zie figuur 2.2 en tabel 2.1. Het menselijk oog is gevoelig voor elektromagnetische golven met golflengten tussen 0,4 en 0,76 μm , daarom wordt dat het *zichtbare licht* genoemd. Straling met een golflengte kleiner dan 0,4 μm heet *ultraviolet* (UV) en met een golflengte groter dan 0,76 μm *infrarood* (IR).

Tabel 2.1 Het elektromagnetische spectrum

type straling	golflengtegebied in μm	frequentiegebied in s^{-1}
kosmische straling		
γ -straling	< 0,001	$> 0,3 \cdot 10^{18}$
röntgenstraling		
vacuum-ultraviolet	0,001-0,2	$1,5 \cdot 10^{15}$ - $0,3 \cdot 10^{18}$
UV-C	0,2-0,28	$1,1 \cdot 10^{15}$ - $1,5 \cdot 10^{15}$
UV-B	0,28-0,32	$0,9 \cdot 10^{15}$ - $1,1 \cdot 10^{15}$
UV-A	0,32-0,4	$0,7 \cdot 10^{15}$ - $0,9 \cdot 10^{15}$
violet	0,4-0,455	$0,7 \cdot 10^{15}$
donkerblauw	0,455-0,485	$0,6 \cdot 10^{15}$ - $0,7 \cdot 10^{15}$
lichtblauw	0,485-0,505	$0,6 \cdot 10^{15}$
groen	0,505-0,550	$0,5 \cdot 10^{15}$ - $0,6 \cdot 10^{15}$
geelgroen	0,550-0,575	$0,5 \cdot 10^{15}$
geel	0,575-0,585	$0,5 \cdot 10^{15}$
oranje	0,585-0,620	$0,5 \cdot 10^{15}$
rood	0,620-0,76	$0,4 \cdot 10^{15}$ - $0,5 \cdot 10^{15}$
nabij infrarood	0,76-25	$1,2 \cdot 10^{13}$ - $0,4 \cdot 10^{15}$
ver infrarood	25-1000	$3 \cdot 10^{11}$ - $1,2 \cdot 10^{13}$
microgolven	1000- $10 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^7$ - $3 \cdot 10^{11}$
radiogolven	$> 10 \cdot 10^6$	$< 3 \cdot 10^7$

De golflengten van de zonnestraling lopen van minder dan 0,2 μm tot lengten groter dan 1 meter die behoren tot het gebied van de radiogolven. Men noemt het bereik van deze golflengten het *spectrum* van de zonnestraling. Voor de dagelijkse praktijk is vooral het gebied van 0,2 tot 4 μm belangrijk waarin 99% van de zonneënergie is gelegen. We kunnen het zonnespectrum ruwweg verdelen in ultraviolette straling, zichtbaar licht en infrarode straling.

In dit hoofdstuk komen absorptie, emissie en verstrooiing van straling aan de orde. Eerst worden de natuurkundige principes uitgelegd, die daarna worden toegepast op de straling in de atmosfeer. Deze kennis is niet alleen van belang als achtergrond bij het interpreteren van de metingen van zonnestraling, maar wordt ook gebruikt om straling te kunnen berekenen in gevallen waar geen meetresultaten beschikbaar zijn, zoals vaak bij schuine en verticale vlakken (zie 5.2).

2.2 Absorptie, emissie en verstrooiing van straling

2.2.1 Absorptie en emissie

Elektromagnetische golven kunnen energie afstaan aan materie. Zo kan de UV-straling van de Zon door de huid van de mens worden opgenomen (*geabsorbeerd*) waarbij scheikundige reacties optreden die de huid rood of bruin kleuren. Bij planten wordt na opname van zonlicht celmateriaal gemaakt door de omzetting van kooldioxyde in koolhydraten. Een derde voorbeeld is de overdracht van zonnestralingsenergie aan zonnecollectoren, waarbij de geabsorbeerde energie water of lucht in de collector verwarmt.

Absorptie gebeurt in afgepaste hoeveelheden. De grootte van zo'n energieportie ΔE of *lichtquant* hangt af van de frequentie van de straling en bedraagt

$$\Delta E = h \nu \quad [\text{J}]$$

waarin h de constante van Planck¹⁾ is: $6,62 \cdot 10^{-34}$ J s. Een lichtquant wordt ook wel een *foton* genoemd.

Hoe gaat de absorptie nu in haar werk? Iedere stof, zowel de gassen in de lucht als de vaste materie, is opgebouwd uit moleculen, atomen en elektronen. Het molecuul kan als geheel draaien (roteren) en de atomen kunnen trillen langs hun bindingslijn. De elektronen zitten in bepaalde formaties met karakteristieke energie. Door de absorptie van elektromagnetische straling kunnen de moleculen in een hogere energietoestand geraken. Wat er precies gebeurt hangt af van de energie $h \nu$ of de golflengte λ van het lichtquant. Een foton met weinig energie ($\lambda \approx 0,1$ mm tot 10 mm) kan de rotatie van het molecuul vergroten, fotonen met hogere energie ($\lambda \approx 1$ μm tot 40 μm) zijn nodig om de trillingsenergie van de atomen te vergroten en fotonen met nog hogere energie ($\lambda \approx 0,1$ tot 1 μm) kunnen de elektronenformatie veranderen. Voor al deze processen worden alleen fotonen met energieën ΔE geabsorbeerd, die volgen uit de formule $\Delta E = h \nu$, waarbij ΔE het verschil is tussen de karakteristieke energietoestanden van de absorberende stof. Iedere stof heeft zijn eigen ΔE -waarden.

De mate van de absorptie hangt in de eerste plaats af van de aard van het medium: vast, vloeibaar of gasvormig. Terwijl b.v. water of glas in niet te dikke lagen alle zichtbare licht vrijwel onverzwakt doorlaat, is een metaallaagje van enkele μm dikte reeds volkomen ondoorlatend voor zichtbaar licht. In dikke lagen absorberen glas en water ook merkbaar: een glaslaag van enkele tientallen cm dikte is duidelijk groen gekleurd, een waterlaag van enkele meters dikte blauw. Dat wijst erop dat ook hier absorptie optreedt, maar tevens dat deze absorptie voor licht van onderling afwijkende golflengten verschillend is. De mate van de absorptie bij de verschillende golflengten bepaalt de kleur van de stof. Wordt b.v. van het doorvallende witte licht door een doorzichtige stof het groen geabsorbeerd, dan zal het oog de mengkleur van de overige kleuren, d.w.z. rood, waarnemen. Ook is het b.v. mogelijk dat een stof alle kleuren absorbeert, behalve het blauw, de kleur van het doorvallende licht zal dan blauw zijn.

Wordt een groot aaneengesloten golflengtegebied geabsorbeerd, dan spreekt men van continue absorptie in brede *banden*; is echter de absorptie beperkt tot een smal spectraalgebied dan noemt men de absorptie selectief en spreekt men van *absorptielijnen*.

De *absorptiefactor* α (dimensieloos) is de verhouding tussen de geabsorbeerde hoeveelheid straling en de hoeveelheid invallende straling.

Omgekeerd kan een overgang naar een lager energieniveau in een stof gepaard gaan met het uitzenden (*emissie*) van een foton met een karakteristieke frequentie. Ieder lichaam kan zowel

¹⁾ Max Planck, Duits natuurkundige, 1858-1947

stralingsenergie emitteren als absorberen. We noemen de stralingsenergie die per tijdseenheid en per oppervlakte-eenheid wordt uitgezonden de *emittantie* M in $[\text{W m}^{-2}]$, zie ook 6.3.2.

Een zogenaamd *zwart lichaam* heeft een oppervlak dat alle opvallende straling, van alle golflengten, volledig absorbeert, dus $\alpha = 1$. Het oppervlak hoeft daarom nog niet zichtbaar zwart te zijn, dat hangt af van zijn temperatuur. Een zwart lichaam kan dus afhankelijk van de temperatuur een bepaalde kleur hebben. Een zwart lichaam kan b.v. worden verkregen in de vorm van een kleine opening in een verder afgesloten holle ruimte met een zwarte binnenwand (Camera obscura!). Een lichtstraal die door de opening naar binnenvalt wordt bij iedere botsing tegen de binnenwand bijna geheel geabsorbeerd. Wanneer de lichtstraal na een aantal terugkaatsingen toch weer door de opening zou ontsnappen is zijn intensiteit door de vele botsingen tot vrijwel nul afgenomen. Binnen de holle ruimte stelt zich een stralingsevenwicht in waarbij de binnenwanden per golflengte evenveel fotonen emitteren als ze absorberen. Een deel van die geëmitteerde fotonen vindt zijn weg door de opening naar buiten, dat is de karakteristieke straling van een zwart lichaam. Die straling is niet afhankelijk van het soort lichaam, maar alleen afhankelijk van de temperatuur.

De wetten van zwarte lichamen vormen de basis van de natuurkundige warmteleer. We geven enige uitkomsten, die men in ieder goed natuurkunde-leerboek kan terugvinden.

1. De straling van een zwart lichaam is *isotroop*, d.w.z. de eigenschappen en intensiteit van de straling zijn gelijk in iedere richting in de ruimte.
2. De totale emittantie M_b van een zwarte straler is:

$$M_b = \sigma T^4 \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (2.1)$$

waarin $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

T is de absolute temperatuur uitgedrukt in de eenheid Kelvin [K].

$T = 273,15 + C$, waarbij C de temperatuur in $^{\circ}\text{C}$ is.

Dit is de *wet van Stefan-Boltzmann*.²⁾³⁾

De emittantie is dus evenredig met de vierde macht van de absolute temperatuur.

3. De emittantie van een zwart lichaam $M_{\lambda b}$ bij golflengte λ wordt gegeven door de *wet van Planck* (1900):

$$M_{\lambda b} = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad [\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}] \quad (2.2)$$

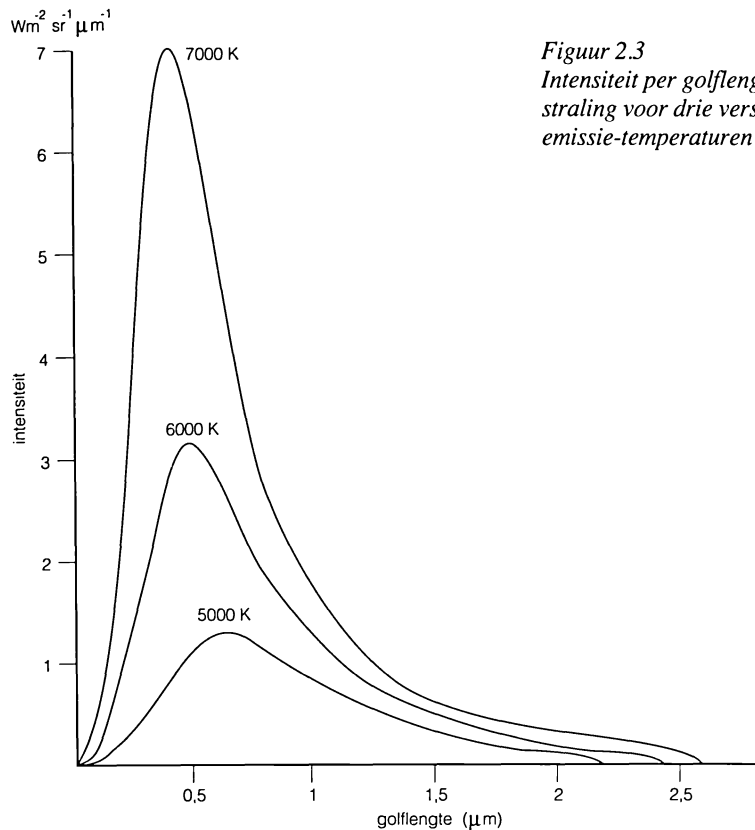
waarin $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$, de constante van Boltzmann. De wet van Planck geeft de verdeling over de golflengten van de energie, die door een zwart lichaam wordt geëmitteerd; zie figuur 2.3, waar drie krommen zijn uitgezet die bij drie verschillende temperaturen horen. We zien dat het maximum naar kortere golflengten verschuift als de temperatuur stijgt.

We kunnen dat waarnemen als we metaal verhitten: het gloeien begint met een rode kleur en deze wordt steeds witter en helderder als de temperatuur toeneemt. Dit verschuiven van de golflengte met maximale energie met de temperatuur heet de *verschuivingswet van Wien*⁴⁾

²⁾ Josef Stefan, Oostenrijks natuurkundige, 1853-1893

³⁾ Ludwig Boltzmann, Oostenrijks natuurkundige, 1844-1906

⁴⁾ Wilhelm Wien, Duits natuurkundige, 1864-1928



Figuur 2.3
Intensiteit per golflengte van zwarte
straling voor drie verschillende
emissie-temperaturen

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{constant} = 2897 \mu\text{m K} . \quad (2.3)$$

Bijvoorbeeld, een zwarte straler met een temperatuur van 500°C heeft $M_b = 20,3 \text{ kWm}^{-2}$ en $\lambda_{\max} = 3,75 \mu\text{m}$.

4. De wet van Kirchhoff⁵⁾ (1859). De spectrale emittantie van elk niet-reflecterend en niet-doorlatend lichaam bij een bepaalde temperatuur is gelijk aan de absorptiefactor $\alpha_\lambda(T)$ vermenigvuldigd met de emittantie van een zwart lichaam van dezelfde vorm bij diezelfde temperatuur:

$$M_\lambda(T) = \alpha_\lambda(T) M_{\lambda b}(T) . \quad [\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}] \quad (2.4)$$

In andere woorden $M_\lambda(T)/\alpha_\lambda(T)$ hangt niet van de aard van het lichaam af, maar alleen van de temperatuur. Lichamen, die bij een zekere golflengte meer absorberen, zullen bij diezelfde golflengte ook meer emitteren. Relatie (2.4) wordt ook vaak geschreven als

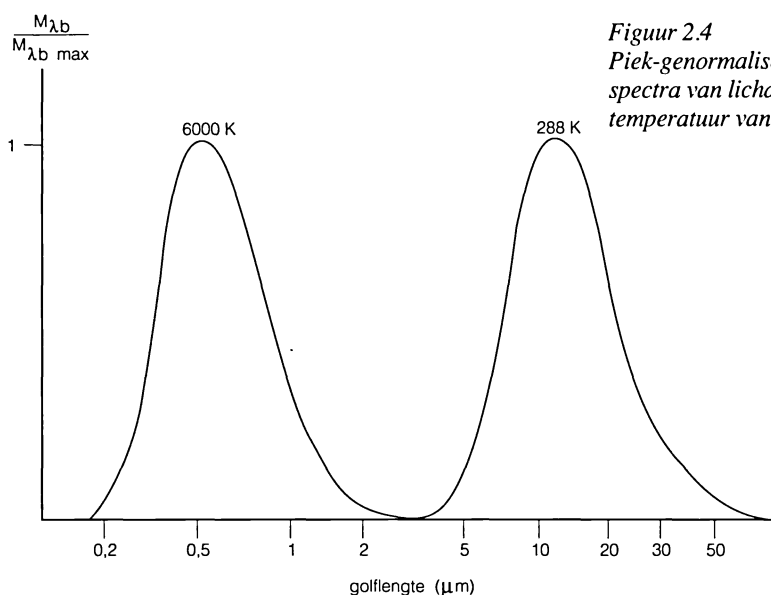
$$M_\lambda(T) = \epsilon_\lambda(T) \cdot M_{\lambda b}(T) \quad (2.5)$$

⁵⁾Gustav Kirchhoff, Duits natuurkundige, 1824-1887

waarbij ϵ_λ de spectrale emissiefactor is. De emissiefactor van een zwart lichaam is gelijk aan 1 dus $\epsilon_{\lambda b} = 1$.

Verder geldt voor ieder lichaam $\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda$, dus is de emissiefactor bij dezelfde golflengte gelijk aan de absorptiefactor. Let op dat dit niet geldt over een golflengtegebied: $\epsilon = \alpha$ is geen algemene waarheid.

Uit de wetten van Planck en Wien is een interessante gevolgtrekking te maken. De Zon is een zwarte straler van ongeveer 6000 K. De Aarde en wolken emitteren bij een temperatuur van gemiddeld 288 K. Door dit grote temperatuurverschil liggen de emissiespectra zo ver uiteen (figuur 2.4), dat ze elkaar nauwelijks overlappen. We



Figuur 2.4
Piek-genormaliseerde stralings-
spectra van lichamen met een
temperatuur van 6000 K en 288 K

kunnen ze voor een bepaling van het stralingsevenwicht dus apart beschouwen, zoals we in 2.2.4 zullen doen. In dit verband wordt het spectrum van de Zon (0,2 - 4 μm) wel *kortgolvig* genoemd en straling van aardoppervlak en atmosfeer (4 - 100 μm) *langgolvig*. De langgolvige straling van het aardoppervlak staat ook bekend onder de naam *terrestrische*⁶⁾ straling.

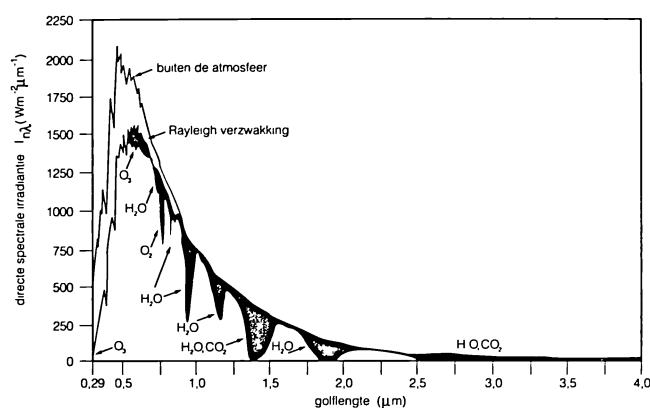
2.2.2 Absorptie in de atmosfeer

Laten we de zonnestraling eens volgen op haar weg van de Zon naar de Aarde. Bij het binnendringen in de atmosfeer worden de energierijkste fotonen geabsorbeerd door atomen en moleculen, die daarbij uit elkaar vallen of elektronen verliezen. Het laatste effect wordt ionisatie genoemd. De atmosfeer boven ongeveer 80 km hoogte heeft daardoor een hoge ionendichtheid en heet de ionosfeer.

Minder energierijke straling kan dieper in de atmosfeer doordringen. Daarbij neemt de kans op botsingen met moleculen en in de lucht zwevende deeltjes toe, doordat de dichtheid van de lucht richting Aarde steeds groter wordt. Zonnestraling met golflengten kleiner dan 0,24 μm

⁶⁾ van het Latijnse "terra" = aarde

wordt door zuurstof en ozon geabsorbeerd. Voor absorptie in het golflengtegebied tussen 0,24 en 0,32 μm is alleen het ozon verantwoordelijk. Dit ozon bevindt zich tussen 10 en 50 km hoogte in de stratosfeer met een maximum tussen 20 en 25 km hoogte. Dus niet te verwarren met het ozon, dat bij het aardoppervlak ontstaat als produkt van door de Zon beschonene luchtverontreinigingscomponenten! Golflengten kleiner dan 0,29 μm , b.v. UV-C (zie tabel 2.1), worden vrijwel geheel door het stratosferisch ozon geabsorbeerd. De absorptie door ozon neemt van 0,3 tot 0,35 μm sterk af. Golflengten kleiner dan 0,32 μm zijn schadelijk voor levende wezens. Vandaar de aandacht die geschonken wordt aan de afname van het ozon in de atmosfeer. Het zichtbare licht wordt weinig geabsorbeerd, afgezien van een zwakke absorptielijn van zuurstof bij 0,69 μm en enige absorptie door ozon, de z.g. Chappuisbanden (zie figuur 2.5). Op de absorptie door in de lucht zwevende deeltjes (aerosolen) wordt later teruggekomen (2.3).



Figuur 2.5
Identificatie van verschillende moleculaire absorptiebanden en -lijnen buiten de atmosfeer en door Rayleigh-verzwakking.

Ozon, waterdamp en kooldioxyde zijn voornamelijk verantwoordelijk voor de absorptie in het infrarode deel van het spectrum, zowel voor het invallende zonlicht als voor het door de Aarde uitgezonden infrarood. Waterdamp absorbeert in enige banden met $\lambda < 4 \mu\text{m}$, bij 5-8 μm en in een brede band, die begint bij 11 μm en voor grotere λ steeds sterker absorbeert. Kooldioxyde absorbeert in een band van 13-17 μm en ozon in een sterke nauwe band bij 9,7 μm .

Het resultaat is dat de atmosfeer het grootste deel van de langgolvlige straling absorbeert door de aanwezigheid van waterdamp en CO_2 , behalve tussen 8 en 11 μm . In dat gebied is de atmosfeer doorlatend (transparant) voor langgolvlige straling, dit wordt het *atmosferisch venster* genoemd.

De gassen die de uitgaande infrarode straling van het Aarde-atmosfeersysteem absorberen, worden tegenwoordig broeikasgassen genoemd, omdat ze net als het glas in een broeikas de uitgaande warmtestraling tegenhouden.

2.2.3 Verstrooiing

Het meeste licht dat onze ogen bereikt komt niet direct van een lichtbron (de Zon, de gloei-draad van een lamp), maar indirect via verstrooiing. We zien de dingen omdat ze het daarop invallende licht verstrooien. *Verstrooiing* is een natuurkundig proces dat te maken heeft met

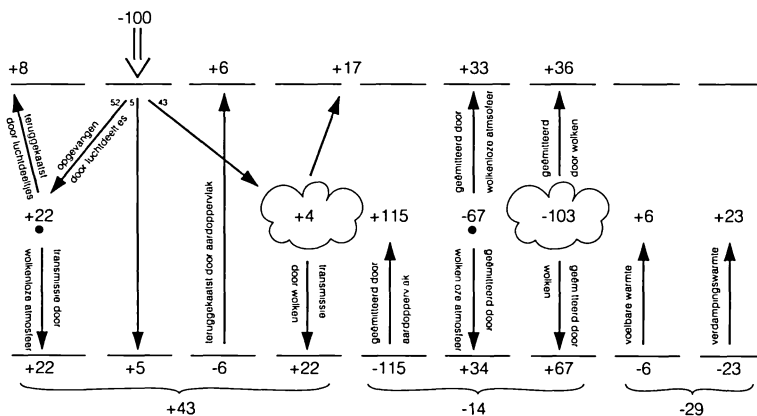
de wisselwerking tussen licht en materie. Het treedt bij alle golflengten van het elektromagnetische spectrum op. De deeltjes nemen energie van de lichtgolf op en zenden die weer in alle richtingen uit. We kunnen de deeltjes dus opvatten als verstrooiingscentra.

In de atmosfeer zijn er verstrooiende deeltjes in alle afmetingen, van gasatomen met een doorsnede van 10^{-4} μm tot hagelstenen van 0,1 m. We noemen de verstrooiing *isotroop* als de sterkte van het verstrooide licht in alle richtingen gelijk is. In werkelijkheid hangt het verstrooiingspatroon af van de verhouding van de afmetingen van het deeltje tot de golflengte van de opvallende straling. De hoek tussen de richting van de invallende en verstrooide straal wordt de verstrooiingshoek θ genoemd. Voor een niet-verstrooide straal geldt dus $\theta = 0^\circ$, voor volledige terugkaatsing $\theta = 180^\circ$.

Door de aanwezigheid van deze deeltjes wordt de directe straling uit de richting van de Zon verstrooid en verzwakt. Een deel van het verstrooide licht komt ook op het aardoppervlak terecht en wordt *diffuse straling* genoemd.

2.2.4 De energiebalans van het Aarde-atmosfeersysteem

In het volgende wordt een korte beschouwing gegeven over de jaargemiddelde *energiehuishouding* van de Aarde en de atmosfeer, om de hiervoor besproken effecten van absorptie en verstrooiing nader toe te lichten. Willen we een beeld krijgen van de totale energiehuishouding van een systeem, of dat nu de Aarde en atmosfeer zijn, of een gebouw en zijn omgeving, dan moeten we onderscheid maken tussen de kortgolvlige en langgolvlige straling, alsmede andere energiestromen. Figuur 2.6 toont een schematisch diagram van deze



Figuur 2.6
Jaargemiddelde energiebalans van het systeem Aarde plus atmosfeer (naar Liou, 1980)

grootheden aan de rand van de atmosfeer, aan het aardoppervlak en voor de atmosfeer als geheel. Dit schema is overgenomen uit Liou (1980).

Aan de rand van de atmosfeer is de (kortgolvlige) energiestroomdichtheid of irradiantie van de Zon $E = 1367 \text{ Wm}^{-2}$. De totale energie die de Aarde van de Zon ontvangt is gelijk aan $\pi R^2 E$, waar R de straal van de Aarde is. Aangezien het oppervlak van de Aarde gelijk is aan $4 \pi R^2$, is de gemiddelde irradiantie gelijk aan $1/4 E = 342 \text{ Wm}^{-2}$.

In figuur 2.6 wordt deze op 100 eenheden gesteld. Van deze 100 eenheden bereiken 5 het aardoppervlak rechtstreeks (de *directe straling*). Wolken vangen 43 eenheden op en de gassen en deeltjes (o.a. luchtverontreiniging) in de atmosfeer 52 eenheden. Door de wolken worden

17 eenheden terugverstrooid en door de gassen en deeltjes in de lucht 8 eenheden. Zes eenheden worden direct door het aardoppervlak terugverstrooid.

Aan de rand van de atmosfeer is er stralingsevenwicht: 100 eenheden komen binnen, waarvan er 31 (17 + 8 + 6) worden terugverstrooid als kortgolvlige straling. Deze terugverstrooide of gereflecteerde straling wordt ook wel het *albedo*⁷⁾ van het Aarde-atmosfeersysteem genoemd. De resterende 69 eenheden worden gecompenseerd door de uitgaande langgolvlige straling, nl. 33 eenheden van de deeltjes en gassen in de lucht en 36 eenheden van de wolken.

Aan het aardoppervlak is er wat de kort- en langgolvlige straling betreft geen evenwicht. Via verstrooiing aan gassen en deeltjes bereiken 22 eenheden het aardoppervlak en via verstrooiing aan wolken ook 22 eenheden. De straling die via verstrooiing aan het aardoppervlak ten goede komt wordt diffuse straling genoemd.

Het totaal van directe plus diffuse straling heet *globale straling* en bedraagt dus gemiddeld over het aardoppervlak $5 + 22 + 22 = 49$ eenheden of ongeveer 168 Wm^{-2} . De globale straling minus de door het aardoppervlak terugverstrooide straling, dus $49 - 6 = 43$ eenheden, noemt men de *netto kortgolvlige straling*.

Het aardoppervlak straalt in het langgolvlige spectrum zelf 115 eenheden uit en ontvangt 34 eenheden, die door de gassen en deeltjes in de atmosfeer zijn geëmitteerd en 67 eenheden van de wolken: een verlies van $115 - 34 - 67 = 14$ eenheden. Aan het aardoppervlak is dus een stralingsoverschot van $43 - 14 = 29$ eenheden.

Het omgekeerde geldt voor de atmosfeer. Door deeltjes en luchtmoleculen worden 22 eenheden in het kortgolvlige spectrum geabsorbeerd, waarvan 3 in het ultraviolet door ozon. De wolken absorberen 4 eenheden. In het langgolvlige spectrum is de stralingsbalans van de atmosfeer $+ 115 - 67 - 103 = - 55$ eenheden. In het kort- en langgolvlige spectrum tezamen heeft de atmosfeer als geheel dus een stralingstekort van $55 - 22 - 4 = 29$ eenheden.

Gemiddeld is er een stralingsonbalans, die het aardoppervlak verwarmt en de atmosfeer afkoelt. Deze onbalans wordt gecompenseerd door andere energiestromen die warmte van het aardoppervlak transporteren naar de atmosfeer. Het grootste deel (23 eenheden) wordt getransporteerd door het verdampen en weer condenseren van water: voor het verdampen van water is immers energie nodig! Een kleiner gedeelte (6 eenheden) verdwijnt van het aardoppervlak door rechtstreekse warmteoverdracht, namelijk het opstijgen van warme luchtballen (thermiek).

Hier wordt nogmaals opgemerkt, dat dit een gemiddeld beeld is voor het hele aardoppervlak. De componenten verschillen van plaats tot plaats. Zo is bijvoorbeeld de reflectie, het albedo van sneeuwoppervlakken zeer hoog (75% tot 95%) en van wateroppervlakken maar 2% tot 30% afhankelijk van de hoek van inval van de zonnestralen.

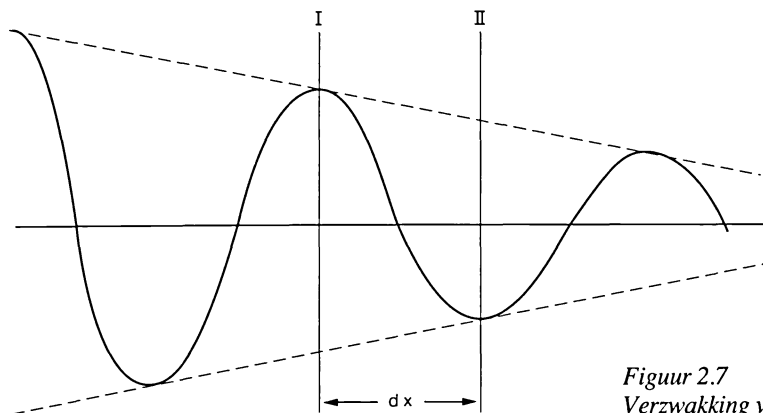
2.2.5 Absorptie, verstrooiing en extinctie in formules

Absorptie

De *wet van Lambert*⁸⁾ zegt dat de fractie van het invallende licht, die geabsorbeerd wordt, onafhankelijk is van de intensiteit van dat licht. De *intensiteit* is de stralingsenergie per tijdseenheid die door een puntbron in een zeer kleine kegel langs een bepaalde richting wordt uitgezonden, gedeeld door de ruimtehoek van die kegel (zie 6.3.2). Volgens de wet van Lambert is dan de verandering in de intensiteit van de golf tussen de plaatsen I en II (zie figuur 2.7), waarbij de afstand dx wordt afgelegd:

⁷⁾ van het Latijnse "albus" = wit

⁸⁾ Johann Heinrich Lambert, Duits wiskundige, 1728-1777



Figuur 2.7
Verzwakking van een golf

$$d I_{\lambda} = - a_{\lambda} I_{\lambda} dx \quad (2.6)$$

waarbij I_{λ} de intensiteit van de invallende golf
 a_{λ} de monochromatische of spectrale volume-absorptiecoëfficiënt voor de golflengte λ [m^{-1}]

Formule (2.6) heet de *wet van Bouguer*⁹⁾: als de fotonendichtheid van de straling niet te groot is, is de afname van de intensiteit over een kleine afstand evenredig met de invallende intensiteit en met de doorlopen weg.

Relatie (2.6) kan ook geschreven worden als

$$\frac{d I_{\lambda}}{dx} = - a_{\lambda} I_{\lambda} \quad (2.7)$$

Deze differentiaalvergelijking heeft als oplossing:

$$I_{\lambda} = I_{\lambda,0} e^{-a_{\lambda} x} \quad (2.8)$$

waarbij $I_{\lambda,0}$ de oorspronkelijke intensiteit is. Legt de straling dus een afstand s af in de absorberende lucht dan wordt de intensiteit aan het eind bepaald door

$$I_{\lambda} = I_{\lambda,0} e^{-a_{\lambda} s} \quad (2.9)$$

Deze basisformule voor absorptie wordt ook wel de *wet van Bouguer-Lambert-Beer* genoemd. De naam van Beer¹⁰⁾ is hieraan toegevoegd, omdat die zich heeft beziggehouden met de absorptie van straling in vloeistofoplossingen. De coëfficiënt a_{λ} wordt voor dat geval bepaald door de concentratie van de bijmengselen in de vloeistof.

De absorptie is dus des te sterker naarmate de absorptiecoëfficiënt a_{λ} groter is. De absorptiecoëfficiënt is afhankelijk van de golflengte λ , van de aard van de absorberende stof en van de concentratie waarin die stof aanwezig is.

Vaak wordt in plaats van a_{λ} de massa-absorptiecoëfficiënt $k_{\lambda} = a_{\lambda}/\rho$ ingevoerd, waarbij k_{λ} de dimensie [$m^2 \text{ kg}^{-1}$] heeft en ρ de specifieke massa of dichtheid [kg m^{-3}] van het absorberende medium is. Dan worden (2.6) en (2.9) respectievelijk

⁹⁾ Pierre Bouguer, Frans wiskundige, 1698-1758

¹⁰⁾ August Beer, Duits natuurkundige, 1825-1863

$$d I_{\lambda} = -k_{\lambda} \rho I_{\lambda} dx \quad (2.10)$$

$$I_{\lambda} = I_{\lambda,0} e^{-k_{\lambda} \rho s} \quad (2.11)$$

De spectrale volume-absorptiecoëfficiënt a_{λ} kan gevonden worden in boeken over straling. Deze gegevens zijn belangrijk voor de keuze van spectraal-selectieve lagen voor zonneënergie-toepassingen (Agnihotri and Gupta, 1981). Iqbal (1983) geeft uitgebreide tabellen van a_{λ} voor ozon, waterdamp en de andere gassen gezamenlijk. Vanwege de ruimte beperken we ons in paragraaf 2.4.1 tot enkele voorbeelden.

Verstrooiing

Voor de verstrooiing van zonnestraling kunnen we formules analoog aan de absorptieformules opschrijven. Door verstrooiing verzwakt de oorspronkelijke bundel:

$$d I_{\lambda} = -\sigma_{\lambda} \rho I_{\lambda} dx \quad (2.12)$$

waarbij

σ_{λ} de monochromatische of spectrale massa-verstrooiingscoëfficiënt voor de golflengte λ [$m^2 kg^{-1}$];

ρ de dichtheid van het verstrooiende medium [$kg m^{-3}$].

Verder kan een volume-verstrooiingscoëfficiënt β_{λ} worden gedefinieerd als $\beta_{\lambda} = \sigma_{\lambda} \rho$ met dimensie [m^{-1}] waardoor:

$$d I_{\lambda} = -\beta_{\lambda} I_{\lambda} dx \quad (2.13)$$

$$I_{\lambda} = I_{\lambda,0} e^{-\beta_{\lambda} x} \quad (2.14)$$

De verstrooiing aan bolvormige deeltjes met een straal r , die kleiner is dan $0,1 \lambda$, kan worden beschreven met de *theorie van Rayleigh*¹¹⁾. Dit geldt b.v. voor luchtmoleculen. De volume-verstrooiingscoëfficiënt in de richting θ is dan:

$$\beta_{\lambda}(\theta) = \frac{\pi^2 \left(n_{\lambda}^2 - 1 \right)^2}{2\lambda^4 N} \left(1 + \cos^2 \theta \right) \quad (2.15)$$

waarbij

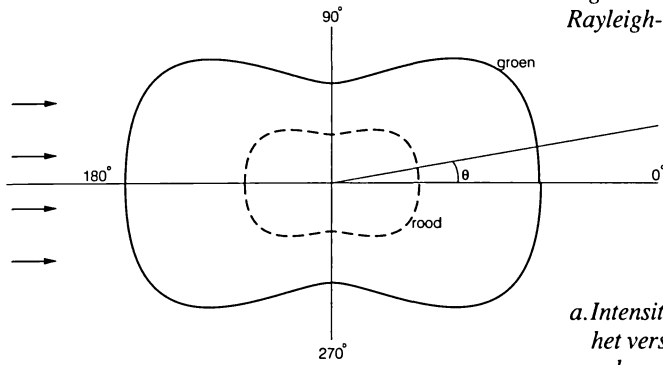
n_{λ} de brekingsindex voor lucht bij golflengte λ

N het aantal deeltjes per m^3

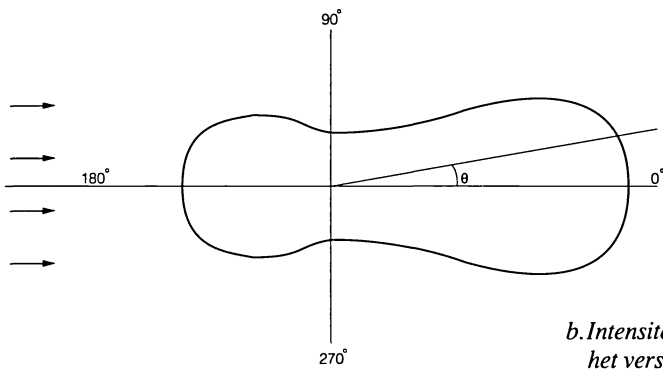
Formule 2.15 is weergegeven in figuur 2.8a. Hierin zien we dat maximale verstrooiing plaatsvindt in voorwaartse richting ($\theta = 0^\circ$) en achterwaartse richting ($\theta = 180^\circ$) en de helft van deze maxima loodrecht op de voortplantingsrichting ($\theta = 90^\circ$ of 270°).

¹¹⁾ Lord Rayleigh = John William Strutt, Engels natuurkundige, 1842-1919

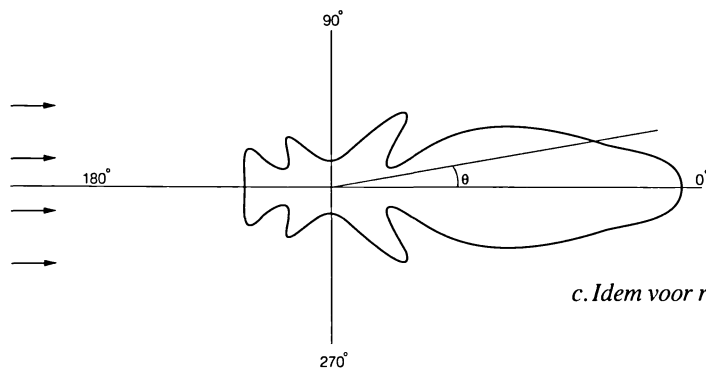
*Figuur 2.8
Rayleigh- en Mie-verstrooiingspatronen*



*a. Intensiteitsverdeling van
het verstrooide licht
volgens Rayleigh ($r/\lambda < 0,1$)*



*b. Intensiteitsverdeling van
het verstrooide licht
volgens Mie ($r/\lambda \approx 0,25$)*



c. Idem voor $r/\lambda \approx 1$

Verder blijkt de Rayleigh-verstrooiing omgekeerd evenredig met de golflengte tot de vierde macht te zijn. Dat wil zeggen, de kleuren met kortere golflengten zoals groen en blauw worden sterker verstrooid dan rood. Daardoor ziet de hemel tegenover de Zon er blauw uit; niet violet, omdat de energie in het violette deel van het spectrum klein is en het menselijk oog voor violet minder gevoelig is. Als de Zon dicht bij de horizon staat, bij zonsopkomst of zonsondergang, moet het licht een langere weg door de atmosfeer afleggen met meer verstrooiing. Het blauwe licht wordt dan nog meer uit de directe straling verstrooid: de Zon is dan rood en de hemel bij heldere lucht dieper blauw dan midden op de dag.

De verstrooiing door de grotere deeltjes ($r > 0,1 \lambda$) kan worden beschreven met de *theorie van Mie*¹²⁾. Het gaat dan om de verstrooiing aan waterdruppeltjes en stofdeeltjes. De Mie-verstrooiing kan doorgaans niet met een eenvoudige analytische functie als formule 2.15 beschreven worden, maar vraagt complexe numerieke berekeningen. In het algemeen wordt hierbij meer energie in voorwaartse richting ($\theta = 0^\circ$) verstrooid dan in achterwaartse richting ($\theta = 180^\circ$), zoals de figuren 2.8 b en c laten zien. Figuur 2.8b geeft het geval dat de straal van het deeltje r ongeveer $\lambda/4$ is. Als $r \approx \lambda$ (figuur 2.8c) ontstaat een ingewikkeld patroon waarbij de verstrooiing zeer sterk van hoek en golflengte afhangt. De volume-verstrooiingscoëfficiënt β_λ wordt constant voor deeltjes groter dan enkele μm . Dat betekent dat dan de verstrooiing onafhankelijk van de golflengte wordt. Het verstrooide licht in wolken, in mist en in sterk verontreinigde lucht is dan ook wit.

Extinctie

Tenslotte kunnen we absorptie en verstrooiing tezamen beschrijven door het begrip extinctie in te voeren, hetgeen uitdoving betekent.

De monochromatische of spectrale volume-extinctiecoëfficiënt μ_λ' wordt gedefinieerd door:

$$\mu_\lambda' = a_\lambda + \beta_\lambda \text{ [m}^{-1}\text{]}$$

en de spectrale massa-extinctiecoëfficiënt μ_λ'' door:

$$\mu_\lambda'' = k_\lambda + \sigma_\lambda \text{ [m}^2 \text{ kg}^{-1}\text{]}$$

Men krijgt dan:

$$\begin{aligned} d I_\lambda &= -\mu_\lambda' I_\lambda dx & \text{of} & & d I_\lambda &= -\mu_\lambda'' \rho I_\lambda dx \\ I_\lambda &= I_{\lambda,0} e^{-\mu_\lambda' x} & & & I_\lambda &= I_{\lambda,0} e^{-\mu_\lambda'' \rho x} \end{aligned} \quad (2.16)$$

De extinctie is van belang voor het berekenen van de hoeveelheid straling die op het aardoppervlak terechtkomt. We zullen formule (2.16) dan ook - in enigszins gewijzigde vorm - weer tegenkomen in paragraaf 2.4.1 over de transmissie of doorlating door de atmosfeer.

2.2.6 De weglengte door de atmosfeer

Het bepalen van de weglengte s in formule (2.9) is niet zo eenvoudig als het lijkt. Het pad dat de directe stralingsbundel volgt door de atmosfeer, is afhankelijk van de zonshoogte en is

¹²⁾ Gustav Mie, Duits natuurkundige, 1868-1957

in het algemeen gekromd. De dichtheid van de lucht ρ en de coëfficiënten k_λ en σ_λ variëren bovendien met de hoogte.

Beschouwen we de invallende irradiantie $E_{\lambda,0}$ van de zonnestraling, dan moeten we die integreren over de weglengte s door de atmosfeer om de irradiantie $E_\lambda(s)$ aan het aardoppervlak te berekenen:

$$E_\lambda(s) = E_{\lambda,0} \exp \left\{ - \int_{s=0}^{s=\infty} \mu_\lambda'' \rho \, ds \right\} \quad (2.17)$$

We moeten hier de massa-extinctiecoëfficiënt μ_λ'' gebruiken om de variabele grootheid ρ expliciet in de formule te krijgen.

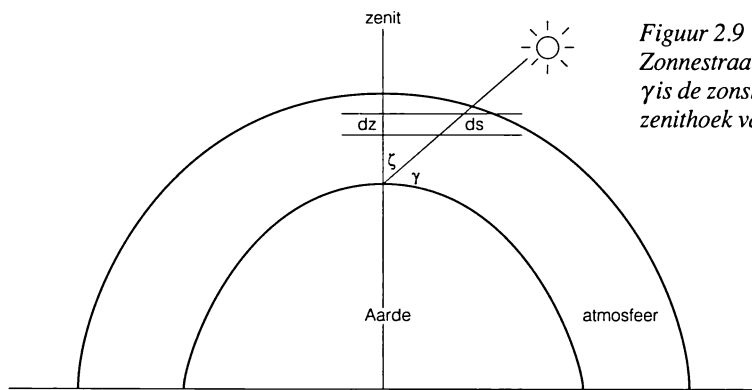
s is de lengte van de stralingsweg, gerekend van het aardoppervlak, $s = 0$. Omdat voor s groter dan de hoogte van de atmosfeer geldt $\mu'' = 0$, mag de integratieweg tot oneindig doorlopen.

$\int_0^\infty \mu_\lambda'' \rho \, ds = \int_0^\infty \mu_\lambda' \, ds$ wordt de *optische dikte* genoemd, [dimensieloos].

Sommige auteurs definiëren de optische dikte anders, n.l. als $\int_0^\infty \rho \, ds$ [kg m^{-2}]. Dit is eigen-

lijk de optische massa, want de integraal heeft de dimensie massa [kg] per eenheid van oppervlak. De massa van het absorberend materiaal in een verticale kolom boven een eenheid van het aardoppervlak is

$m = \int_0^\infty \rho \, dz$, de *optische massa* in verticale richting (zie figuur 2.9).



*Figuur 2.9
Zonnestraal door de atmosfeer;
 γ is de zonshoogte, ζ is de
zenithoek van de Zon*

De *relatieve optische massa* m_r is gedefinieerd als de verhouding van de optische massa langs het schuine pad tot de massa langs het verticale pad in de richting van het zenit, dus

$$m_r = \frac{\int_0^\infty \rho \, ds}{\int_0^\infty \rho \, dz} \quad [\text{dimensieloos}] \quad (2.18)$$

De relatieve optische massa wordt vaak verkort de optische massa genoemd. Als in een publikatie blijkt dat m een dimensieloos getal is, moet het dus de relatieve optische massa zijn.

Wanneer we de kromming van de Aarde verwaarlozen en veronderstellen dat de atmosfeer niet brekend is en volledig homogeen, dan kunnen we inzien dat de relatieve optische massa voor alle atmosferische bestanddelen gelijk is aan:

$$m_r = \frac{1}{\cos \zeta} = \frac{1}{\sin \gamma} \quad (2.19)$$

waarin ζ de zenithhoek van de Zon
 γ de zonshoogte.

De fout die we in deze vergelijking maken door de kromming van de Aarde en de breking van de echte atmosfeer te verwaarlozen, is 0,25% bij $\zeta = 60^\circ$ en neemt toe tot 10% bij $\zeta = 85^\circ$.

De dichtheid ρ is echter in werkelijkheid variabel met de hoogte en het schuine pad s is gebogen. Daarom moet men m_r door integratie langs alle schuine en verticale paden berekenen. Wanneer men alles netjes opschrijft, blijkt de integraal niet analytisch oplosbaar te zijn. Er zijn dus benaderingen nodig, waarvan die van Bemporad (1907) en Kasten (1966) het meest bekend zijn. Kasten heeft een benaderingsformule, die naar $1/\sin \gamma$ nadert voor grote zonshoogten en voor $\gamma = 0$ nog een eindige waarde heeft. De relatieve optische massa is volgens Kasten

$$m_r = \frac{1}{\sin \gamma + 0,15 (\gamma + 3,885)^{-1,253}} \quad \text{met } \gamma \text{ in graden .} \quad (2.20)$$

Voor metingen op zeeniveau is deze formule correct tot op 0,1% bij γ groter dan 4° . De grootste afwijking, 1,25% wordt gevonden bij $\gamma = 0,5^\circ$.

Voor punten die niet liggen op een hoogte met de standaard-zeeniveaudruk van 1013,25 mbar, maar op een hoogte met luchtdruk p moet de optische massa gecorrigeerd worden met de factor $p/1013,25$:

$$m = \frac{m_r \cdot p \text{ [mbar]}}{1013,25 \text{ [mbar]}} \quad (2.21)$$

waarbij m_r met (2.20) is berekend.

2.3 Turbiditeit of troebelheid

Iedere toestand, waarbij de doorlatendheid van de atmosfeer voor (zichtbare) straling is verminderd, kan met de term *turbiditeit* of *troebelheid* worden aangegeven. Er zijn verschillende methoden ontwikkeld om de turbiditeit van de atmosfeer te beschrijven. De drie meest gebruikte worden hieronder behandeld, nl. de turbiditeitsfactor T_L van Linke (1922), de turbiditeitscoëfficiënt β van Ångström (1929) en de turbiditeitscoëfficiënt B van Schüepp (1949).

2.3.1 De turbiditeitsfactor van Linke

Linke bracht de extinctie in de atmosfeer in verband met de extinctie door Rayleigh-verstrooiing in een schone en droge atmosfeer. Hij stelde vast dat de verhouding van de

extinctiecoëfficiënt van de werkelijke atmosfeer tot die van een droge Rayleigh-atmosfeer onafhankelijk was van de zonnestand en noemde deze verhouding de turbiditeitsfactor T_L

$$T_L = \frac{\bar{\mu}}{\bar{\mu}_r(m)}$$

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

Men zegt ook wel: de turbiditeitsfactor T_L van Linke is het hypothetisch aantal stofvrije en waterdamploze atmosferen, dat gezamenlijk eenzelfde vermindering van de directe zonnestraling zou geven als de werkelijke met waterdamp en stof vervuilde atmosfeer.

Aangezien T_L de troebelheid van de atmosfeer bepaalt ten opzichte van een droge schone Rayleigh-atmosfeer, betekent dit dat T_L een maat is voor de turbiditeit van de atmosfeer door aerosolen en waterdamp gezamenlijk. Dat is een bezwaar, als men geïnteresseerd is in de turbiditeit door de aerosolen alleen, b.v. bij luchtverontreinigingsonderzoek.

Uit de definitie volgt dat T_L nooit kleiner kan zijn dan 1. In een tamelijk schone atmosfeer is $T_L = 1,5$, terwijl een T_L -waarde van 5,0 een zeer troebele atmosfeer betekent.

Voor Nederland werden de volgende gemiddelde waarden van de jaarlijkse gang gevonden (Slob, 1982):

1 jan. 2,2	1 mrt. 3,9	1 mei 5,1	1 juli 5,6	1 sep. 5,4	1 nov. 3,6
15 jan. 2,5	15 mrt. 4,3	15 mei 5,3	15 jul. 5,9	15 sep. 4,7	15 nov. 3,5
1 feb. 2,9	1 apr. 4,5	1 jun. 5,3	1 aug. 6,0	1 okt. 3,9	1 dec. 2,9
15 feb. 3,3	15 apr. 4,7	15 jun. 5,3	15 aug. 5,8	15 okt. 3,5	15 dec. 2,3

2.3.2 De turbiditeitscoëfficiënt van Ångström

Om het verschil in doorlating tussen aerosolen en "Rayleigh-deeltjes" (gasmoleculen) in rekening te brengen beschreef Ångström (1929, 1930) de verzwakking van zonnestralen door aerosolen met behulp van een turbiditeitscoëfficiënt β en een golflengte-exponent α als

$$\mu_A(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (2.22)$$

waarbij λ in μm en de index A op aerosolen slaat.

De exponent α is een maat voor de afmetingen van de aerosolen en varieert van $\alpha = 0$ voor zeer grote deeltjes - waarbij de verstrooiing en absorptie onafhankelijk zijn van de golflengte, zie ook 2.2.5 - tot $\alpha = 4$ voor zeer kleine deeltjes zoals moleculen. Bij vulkaanuitbarstingen bleek α in de buurt van 0,5 te liggen.

Uit een aantal spectrale metingen is gebleken dat $\alpha = 1,3$ een realistische gemiddelde waarde is, die gebruikt kan worden om β te bepalen (Ångström (1930), Volz (1956)).

De coëfficiënt β heeft ook een eenvoudige natuurkundige betekenis. Uit vergelijkingen (2.17) en (2.22) volgt dat het gedeelte van de directe zonnestraling met golflengte λ , dat de Aarde bereikt na verzwakking door aerosolen, wordt gegeven door:

$$\exp(-m_r \mu_{\lambda A}) = \exp\left(-m_r \beta \lambda^{-\alpha}\right).$$

Voor de Zon in het zenit ($m_r = 1$) en golflengte $\lambda = 1 \mu\text{m}$ wordt dit $\exp(-\beta)$ hetgeen ongeveer gelijk is aan $1 - \beta$ voor β veel kleiner dan 1. In andere woorden: β is de fractie van de zonnestraling bij golflengte $\lambda = 1 \mu\text{m}$ die door aerosolen wordt verstrooid of geabsorbeerd in een

atmosfeer met relatieve optische massa $m_r = 1$. Nemen we voor α de waarde 1,3, dan wordt voor de golflengte $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$ $\lambda^{-\alpha} = 0,6^{-1,3} = 2$. Voor $m_r = 1$ wordt dan de exponent 2β ; met andere woorden: 2β is de fractie waarmee de directe zonnestraling wordt verzwakt bij $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$, dus in het zichtbare deel van het spectrum.

De coëfficiënt β is dus een maat voor de concentratie van de aerosolen. Typische waarden zijn 0,05 voor schone berglucht, 0,10 voor schone lucht op zeeniveau en 0,20 voor een heilige stedelijke atmosfeer. β is meestal het grootst in de zomer. De atmosfeer wordt dan door verwarming van het aardoppervlak minder stabiel. Stofdeeltjes kunnen zo gemakkelijker met verticale luchtbewegingen in de atmosfeer geraken.

2.3.3 De turbiditeitscoëfficiënt van Schüepf

De z.g. tiendelige turbiditeitscoëfficiënt B werd door Schüepf in 1949 geïntroduceerd. Schüepfs turbiditeitscoëfficiënt berust in principe op dezelfde beschouwingen als die van Ångström, maar is betrokken op de $^{10}\log$ in plaats van op de natuurlijke logaritme.

De extinctie door aerosolen wordt volgens de vergelijking van Schüepf geschreven als

$$\mu_A(\lambda) = B (2\lambda)^{-\alpha} \quad (2.23)$$

De exponent α is hier weer een maat voor de afmetingen van de aerosolen en B een maat voor het aantal deeltjes.

Analoog aan de behandeling van de turbiditeitscoëfficiënt van Ångström kunnen we voor de extinctie noteren

$$\exp(-m_r \mu_{\lambda A}) = 10^{-m_r B (2\lambda)^{-\alpha}}$$

Voor $m_r = 1$ en een golflengte $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ wordt dit 10^{-B} of bij benadering $1 - 2,3 B$. De turbiditeitscoëfficiënt B van Schüepf vermenigvuldigd met 2,3 is dus de fractie van de zonnestraling bij golflengte $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ die bij $m_r = 1$ door aerosolen wordt verstrooid of geabsorbeerd. Het voordeel van de coëfficiënt van Schüepf boven die van Ångström is dus, dat B slaat op de extinctie van de golflengte $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ die midden in het zichtbare deel van het spectrum ligt.

Er is een eenvoudig verband tussen B en β

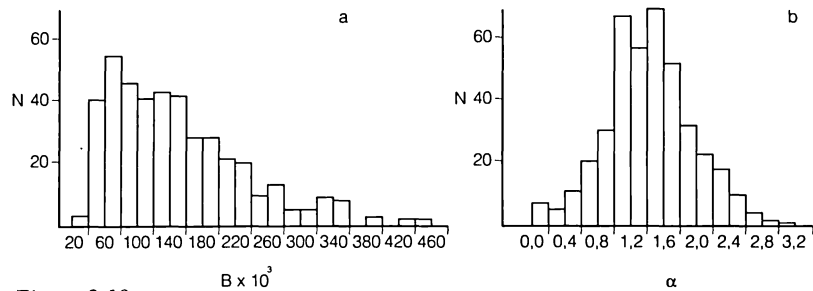
$$\exp(-\beta \lambda^{-\alpha}) = 10^{-B (2\lambda)^{-\alpha}}$$

$$\text{of } -\beta \lambda^{-\alpha} \log e = -B (2\lambda)^{-\alpha}$$

Daaruit volgt $B = \beta \cdot 2^\alpha \log e = 0,4343 \cdot 2^\alpha \cdot \beta$. Voor de gemiddelde waarde $\alpha = 1,3$ in Ångströms formule wordt dit:

$$B = 1,07 \beta.$$

Frantzen (1977) heeft B en α gemeten in De Bilt op 406 heldere dagen in de jaren 1957-1971. De metingen werden verricht met een Linke-Feussner pyrhelimeter (zie 3.1.1) met behulp van verschillende spectraalfilters. Uit de metingen bleek, dat B en α liggen in het gebied $0,03 < B < 0,45$ en $0,0 < \alpha < 3,1$. In de zomer was B het grootst. In de zomer zijn de omstandigheden gunstig voor het opwerpen van stof van de bodem door verticale luchtbewegingen. Dat leidt tot een toeneming in het aantal deeltjes en dus tot een hogere waarde van B . Er was geen systematische dagelijkse gang in B en α te constateren. De frequentiever-



Figuur 2.10
Frequentieverdeling van de dagelijkse gemiddelden van de turbiditeitscoëfficiënten B (links) en α (rechts) te De Bilt in het tijdvak 1957-1971. N is het aantal waarnemingen

delingen van de dagelijkse gemiddelden van B en α zijn in figuur 2.10 gegeven.

2.4 Transmissie en reflectie van straling

Tot nu toe hebben we het steeds gehad over de verzwakking van straling tengevolge van absorptie en verstrooiing langs de stralingsweg door de atmosfeer. De gebruiker van stralingsgegevens is natuurlijk meer geïnteresseerd in de hoeveelheid straling die terechtkomt op het aardoppervlak of op een zonnecollector. Het gaat dan om de *doorlating* of *transmissie* door de atmosfeer.

We hebben in 2.2.1 al de absorptiefactor α gedefinieerd als de verhouding tussen de geabsorbeerde hoeveelheid straling en de hoeveelheid invallende straling. Bij verstrooiing kan een deel van de invallende straling terugverstrooid (gereflecteerd) worden in achterwaartse richting (zie 2.2.4 en 2.2.5). Dit is dan evenals de absorptie een verliesterm voor de invallende straling. We definiëren de *reflectiefactor* ρ als de verhouding van de hoeveelheid gereflecteerde straling tot de invallende straling.

De *transmissiefactor* τ geeft de fractie van de straling aan die het beschouwde oppervlak bereikt. Op basis van de wet van het behoud van energie moet gelden:

$$\tau + \alpha + \rho = 1 \quad \text{of} \quad \tau = 1 - \alpha - \rho .$$

Het kan ook zijn, dat de straling die wordt gereflecteerd door oppervlakken, zoals de aardbodem en gebouwen bijdraagt aan de invallende straling op een bepaald vlak. De gereflecteerde straling is dan een winstterm voor dat bepaalde oppervlak.

In het algemeen zijn absorptie, transmissie en reflectie afhankelijk van de golflengte, d.w.z. voor de spectrale factoren geldt dan:

$$\tau_{\lambda} = 1 - \alpha_{\lambda} - \rho_{\lambda} .$$

In de laatste delen van dit hoofdstuk zullen we wat dieper ingaan op de transmissie en reflectie van straling.

2.4.1 Transmissie

Als we vergelijking (2.16) opschrijven voor de invallende straling, de irradiantie E_{λ} , en tevens de optische massa m introduceren krijgen we

$$E_{\lambda} = E_{\lambda,0} e^{-\mu_{\lambda} m}$$

waarbij μ_λ de spectrale massa-extinctiecoëfficiënt is voor golflengte λ . De spectrale transmissiefactor τ_λ wordt dan:

$$\tau_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{\lambda,0}} = e^{-\mu_\lambda m} \quad (2.24)$$

Uitdrukking (2.24) geeft de transmissie voor één bepaald extinctieproces, zoals verstrooiing door lucht moleculen, absorptie door gassen en waterdamp, of verstrooiing en absorptie door aerosolen.

De totale transmissiefactor τ wordt dan het produkt van die voor de enkele processen:

$$\tau_\lambda = \prod_{i=1}^{i=j} \tau_{i\lambda}$$

waarbij j het totale aantal beschouwde extinctieprocessen is.

Wanneer we nu nog integreren over alle golflengten λ , krijgen we voor de irradiantie van de directe straling

$$E_n = \int_{\lambda=0}^{\infty} E_{\lambda,0} \prod_{i=1}^{i=j} \tau_{i\lambda} d\lambda$$

De index n komt van het Engelse “normal” en betekent de directe straling uit de richting van de Zon op een vlak loodrecht op de straling. De irradiantie op het horizontale vlak afkomstig uit de richting van de Zon kan dan berekend worden met

$$E = E_n \sin \gamma \quad (2.25)$$

waarin γ de zonshoogte is.

In de meeste gevallen is het voldoende om de volgende processen te beschrijven:

- $\tau_{o\lambda}$ de transmissie na absorptie door ozon,
 - $\tau_{g\lambda}$ de transmissie na absorptie door de goed gemengde gassen CO_2 en O_2 ,
 - $\tau_{w\lambda}$ de transmissie na absorptie door waterdamp,
 - $\tau_{r\lambda}$ de transmissie na Rayleigh-verstrooiing,
 - $\tau_{a\lambda}$ de transmissie na extinctie door aerosolen,
- dus τ_λ wordt: $\tau_{o\lambda} \cdot \tau_{g\lambda} \cdot \tau_{w\lambda} \cdot \tau_{r\lambda} \cdot \tau_{a\lambda}$.

Absorptie door ozon

De spectrale transmissiefactor voor ozon kan worden geschreven als

$$\tau_{o\lambda} = \exp(-a_{o\lambda} l m_r) \quad (2.26)$$

- waarbij $a_{o\lambda}$ de spectrale volume-absorptiecoëfficiënt van ozon voor de golflengte λ [cm^{-1}], af te lezen uit een tabel (Iqbal, 1983)
- l is de dikte in cm van de totale verticale hoeveelheid ozon, als het verzameld zou worden aan het aardoppervlak bij normale temperatuur en druk. l is in de orde van 0,2 tot 0,4 cm.

De grootste absorptie treedt op tussen $\lambda = 0,29 \mu\text{m}$, met $a_{o\lambda} = 38 \text{ cm}^{-1}$ en $\lambda = 0,320 \mu\text{m}$ met $a_{o\lambda} = 0,8 \text{ cm}^{-1}$. Dit betekent dat $\tau_{o\lambda}$ voor $m_r = 1$ bij $\lambda = 0,29 \mu\text{m}$ nog 0 is; het ozon absorbeert al het UV-licht. Bij $\lambda = 0,32 \mu\text{m}$ is $\tau_{o\lambda}$ 79% en in het zichtbare deel van het spectrum 97%.

In veel berekeningen wordt de absorptie door ozon verwaarloosd, omdat deze slechts bij golflengten $\lambda < 0,32 \mu\text{m}$ optreedt.

Absorptie door andere gassen

Voor de spectrale transmissie na absorptie door CO_2 , zuurstof en andere gasvormige bestanddelen heeft Leckner (1978) de volgende empirische formule afgeleid

$$\tau_{g\lambda} = \exp \left[-1,41 a_{g\lambda} m_r / \left(1 + 118,93 a_{g\lambda} m_r \right)^{0,45} \right]. \quad (2.27)$$

Hierin zijn 1,41 en 118,93 constanten met de dimensie km. De spectrale volume-absorptiecoëfficiënt $a_{g\lambda}$ [km^{-1}] wordt door Leckner in een tabel gegeven voor golflengten λ van 0,76 tot 4 μm . Uit die tabel blijkt dat de transmissie slechts duidelijk van 1 verschilt voor de zuurstoflijn bij 0,76 μm en de CO_2 -lijnen bij 1,45; 1,60; 2,04 en 2,75 μm .

Vullen we bij $m_r = 1$ voor $\lambda = 0,76 \mu\text{m}$ de waarde $a_{g\lambda} = 3 \text{ km}^{-1}$ in, dan berekenen we met formule (2.27) $\tau_{g,0,76} = 0,74$ en voor $\lambda = 2,75 \mu\text{m}$, met de waarde $a_{g\lambda} = 150 \text{ km}^{-1}$ $\tau_{g,2,75} = 0,08$. Deze absorptie is alleen belangrijk voor degenen die in de desbetreffende spectraalgebieden zijn geïnteresseerd. Voor het totale zonnenspectrum kan dit energieverlies verwaarloosd worden.

Josefsson (1986) neemt in zijn model voor de berekening van de directe straling aan het aardoppervlak voor de gezamenlijke transmissie door ozon, kooldioxyde en zuurstof de vaste factor

$$\tau_o \tau_g = 0,95545. \quad (2.28)$$

Absorptie door waterdamp

De absorptie door waterdamp is afhankelijk van de wisselende hoeveelheid damp, die de stralingsbundel van de Zon op zijn weg door de atmosfeer tegenkomt. Deze hoeveelheid w wordt uitgedrukt in cm of g cm^{-2} vloeibaar water bij standaard temperatuur en druk. Het is de hoeveelheid water die verkregen zou worden, als alle waterdamp, die zich bevindt in de verticale kolom vochtige lucht boven de plaats van waarneming, zou condenseren. Daarom wordt w ook wel “condenseerbaar water” genoemd, in het Engels “precipitable water vapour”. Om de absorptie door waterdamp te vinden moet w met de relatieve optische massa m_r worden vermenigvuldigd: $m_r w$.

De verticale verdeling van waterdamp kan worden bepaald met behulp van de radiosondeballonnen, die op een groot aantal meteorologische stations tweemaal daags worden opgelaten. Helaas zijn de vochtigheidsmetingen hiervan niet zo betrouwbaar en zijn ze vrijwel niet statistisch bewerkt, zodat men zijn toevlucht neemt tot een praktijkformule voor de berekening van w . Atwater en Ball (1976) hebben voor Amerikaanse stations gevonden dat de verschillen in de uitkomst bij het gebruik van waterdampgegevens uit radiosondeoplatingen of bij gebruik van een empirische formule niet meer dan 1% bedragen. Verder merken Davies et al. (1975) op dat de stralingsmodellen niet erg gevoelig zijn voor w . Men kan daarom de volgende uitdrukking voor w gebruiken

$$w = 0,17 e \quad [\text{cm}] \text{ of } [\text{g cm}^{-2}] \quad (2.29)$$

waarbij e de waterdampdruk aan het aardoppervlak in mbar [hPa].

Ter oriëntatie worden in tabel 2.2 de over Nederland gemiddelde maandgegevens van de waterdampdruk en de daaruit afgeleide waarden van w gegeven.

Tabel 2.2 Gemiddelde waterdampdruk voor Nederland (tijdvak 1951-1980) en daaruit afgeleide hoeveelheid condenseerbaar water volgens formule 2.29

	gemiddelde dampdruk op zeeniveau in mbar	hoeveelheid condenseerbaar water in cm
januari	6,6	1,12
februari	6,5	1,10
maart	7,1	1,21
april	8,3	1,41
mei	10,6	1,80
juni	13,0	2,21
juli	14,8	2,52
augustus	14,9	2,53
september	13,3	2,26
oktober	11,0	1,87
november	8,4	1,43
december	7,2	1,22
jaar	10,2	1,73

Voor de transmissiefactor $\tau_{w\lambda}$ geeft Leckner (1978) de volgende formule

$$\tau_{w\lambda} = \exp \left[-0,2385 k_{w\lambda} w m_r / \left(1 + 20,07 k_{w\lambda} w m_r \right)^{0,45} \right] \quad (2.30)$$

waarbij de spectrale massa-absorptiecoëfficiënt $k_{w\lambda}$ voor λ van $0,69 \mu\text{m}$ tot $4 \mu\text{m}$ in een tabel is gegeven in $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$. In die tabel zijn de waterdamplijnen bij $0,72$; $0,82$; $0,95$; $1,1$; $1,38$; $1,87$ en $2,7 \mu\text{m}$ terug te vinden. Nemen we de minimale waarde $w = 1,10 \text{ g cm}^{-2}$ en het maximum $w = 2,53 \text{ g cm}^{-2}$ uit tabel 2.2, dan vinden we bij $m_r = 1$ met formule (2.30) voor $\lambda = 0,95 \mu\text{m}$, waarbij $k_{w\lambda} = 41 \text{ cm}^2 \text{g}^{-1}$ voor $w = 1,10$: $\tau_{w,0,95} = 0,61$ en voor $w = 2,53$: $\tau_{w,0,95} = 0,45$. Voor $\lambda = 2,7 \mu\text{m}$, met $k_{w\lambda} = 22000 \text{ cm}^2 \text{g}^{-1}$ is $\tau_{w\lambda} = 0$, onafhankelijk van de waarde van w .

Volgens Lacis en Hansen (1974) is de transmissiefactor voor waterdamp, geïntegreerd over alle golflengten:

$$\tau_w = 1 - \frac{2,9 w m_r}{\left(1 + 141,5 w m_r \right)^{0,635} + 5,925 w m_r} \quad (2.31)$$

Hiermee vinden we, met $m_r = 1$, voor $w = 1,10 \text{ cm}$: $\tau_w = 0,90$ en voor $w = 2,53 \text{ cm}$: $\tau_w = 0,87$.

Rayleigh-verstrooiing

In 2.2.5 waren we ervan uitgegaan dat de verstrooiende luchtmoleculen bolvormig zijn. Omdat dat niet het geval is, en doordat de brekingsindex n van de golflengte afhangt verandert de exponent van λ enigszins, zoals blijkt uit de volgende formule voor de spectrale transmissiefactor:

$$\tau_{r\lambda} = \exp \left(-0,008735 \lambda^{-4,08} m_r \right) \quad (2.32)$$

waarbij m_r de relatieve optische massa is bij de actuele luchtdruk. Voor andere waarden van

de luchtdruk (b.v. op grote hoogte) moet m_r met behulp van (2.21) worden gecorrigeerd.

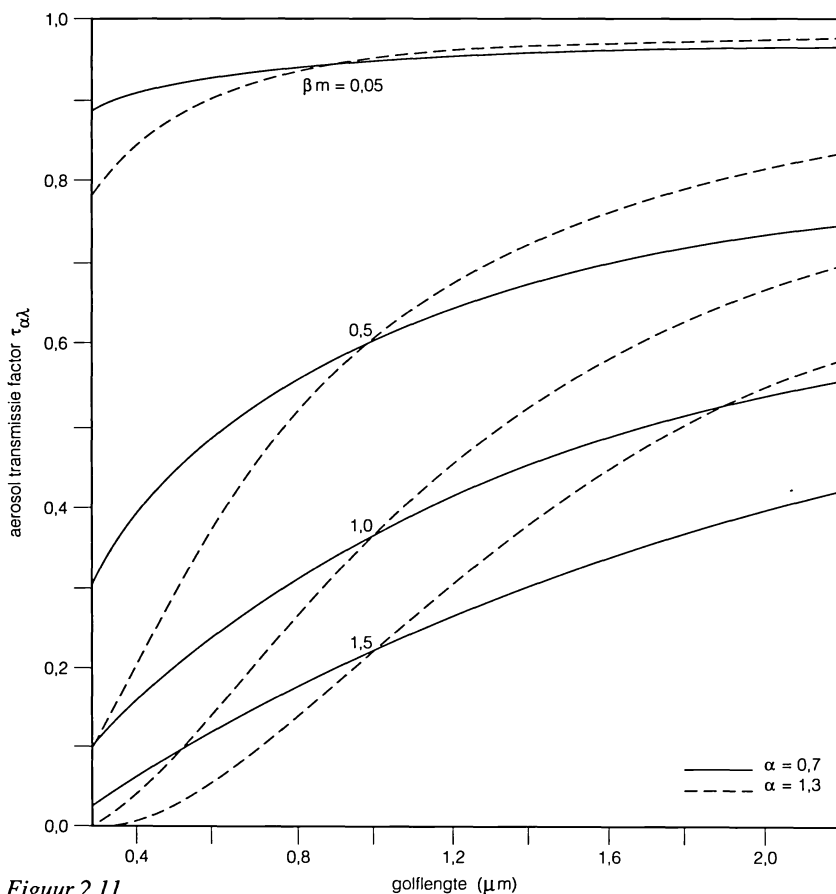
Uit (2.32) volgt dat voor golflengten groter dan $\lambda = 1 \mu\text{m}$ de Rayleigh-verstrooiing verwaarloosbaar is: $\tau_{a\lambda} = 99\%$ bij $m_r = 1$. Bij de golflengte $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ en $m_r = 1$ is $\tau_{a\lambda} = 86\%$. Rayleigh-verstrooiing is dus beperkt tot de kortgolvlige straling.

Absorptie door aerosolen

Door gebruik te maken van de turbiditeitscoëfficiënt van Ångström (2.22) kunnen we de spectrale transmissiefactor voor aerosolen $\tau_{a\lambda}$ schrijven als

$$\tau_{a\lambda} = \exp\left(-\beta \lambda^{-\alpha} m_r\right) \quad (2.33)$$

Figuur 2.11 toont de variatie van $\tau_{a\lambda}$ met λ voor een aantal βm_r -combinaties en twee waarden van α , nl. $\alpha = 0,7$ en de veel gebruikte waarde $\alpha = 1,3$. We zien dat de invloed van λ groot is als βm_r groot is. Een βm_r van 0,5 wordt bijvoorbeeld bereikt in een stedelijke atmosfeer ($\beta = 0,20$) bij een zonshoogte $\gamma = 25^\circ$ ($m_r = 2,35$). Dus in het algemeen bij vrij lange weglengten door de atmosfeer.



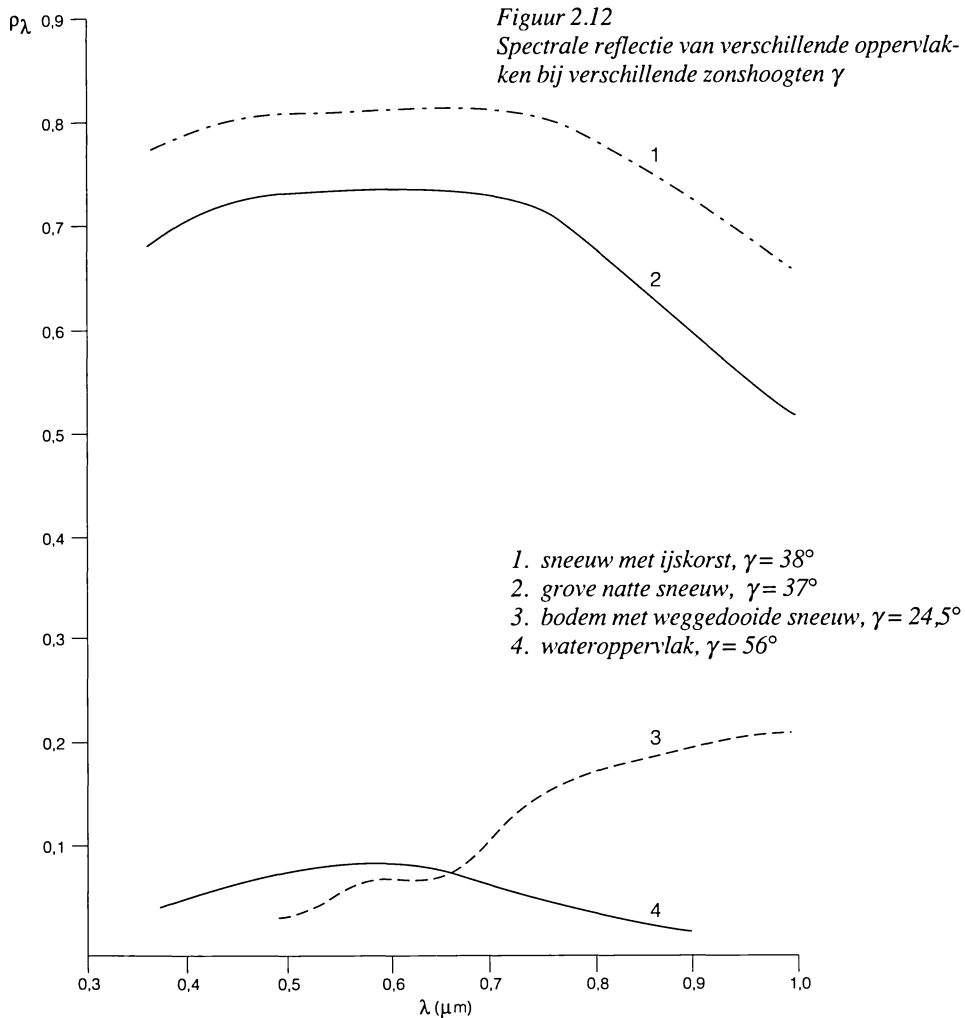
Figuur 2.11 Spectrale transmissiefactor voor aerosolen $\tau_{a\lambda}$ als functie van α en βm_r , waarin α en β de turbiditeitscoëfficiënten van Ångström zijn

Verder fungeert $\lambda = 1 \mu\text{m}$ als een omslagpunt voor de twee beschouwde exponenten α . Voor $\lambda = 1 \mu\text{m}$ is $\tau_{a\lambda}$ onafhankelijk van α en alleen afhankelijk van βm_r , zoals figuur 2.11 laat zien. Voor golflengten kleiner dan $1 \mu\text{m}$, dus in het zichtbare licht, laten de kleine deeltjes (grote α) minder straling door dan de grote deeltjes. Bij golflengten groter dan $1 \mu\text{m}$, dus in het infrarood, is het omgekeerde het geval: de grote deeltjes absorberen meer dan de kleine.

2.4.2 Reflectie

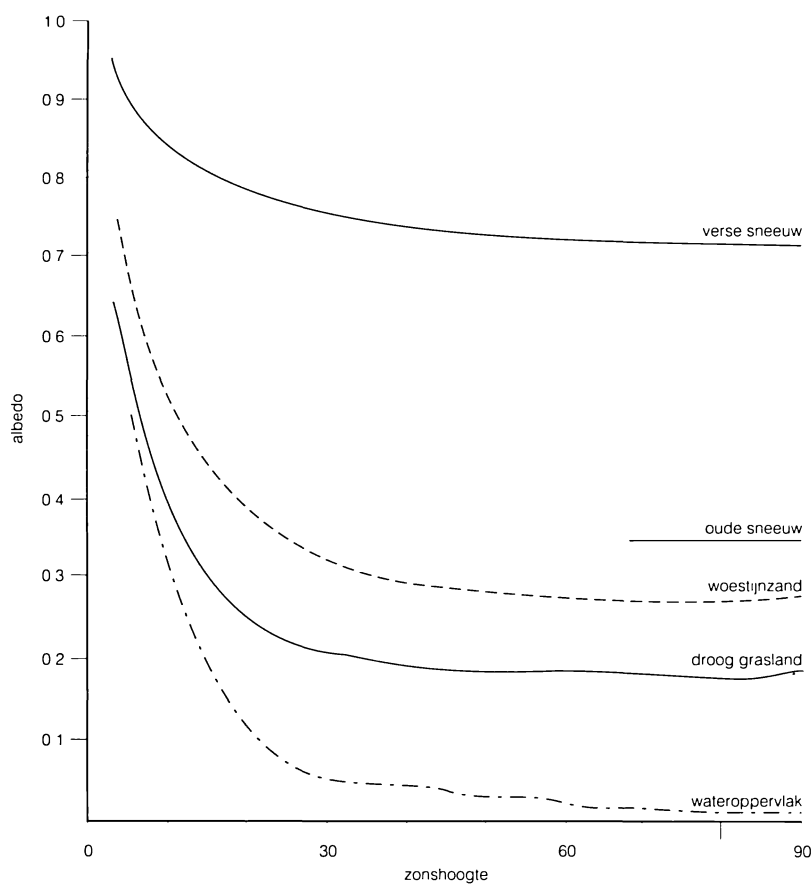
Bij het vaststellen van de totale instraling op een gebouw of zonnecollector is een nauwkeurige bepaling van de gereflecteerde straling van andere oppervlakken belangrijk.

De reflectie van een bepaald oppervlak is gewoonlijk afhankelijk van de golflengte van de invallende straling (ρ_λ), van de zonshoogte γ en van de aard van het oppervlak. In de meteorologie wordt van "albedo" gesproken als het gaat om de reflectie van kortgolvlige straling.



In figuur 2.12 zijn enige voorbeelden gegeven van de golflengteafhankelijkheid van ρ_λ voor verschillende oppervlakken. Voor de meeste begroeide oppervlakken - niet in figuur 2.12 weergegeven - neemt het albedo toe met de golflengte van ultraviolet tot in het nabije infrarood. In tegenstelling daarmee nemen de albedo's van sneeuw en water af met de golflengte. Voor sneeuw is ρ_λ nog maar 0,12 bij een golflengte van $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. Sneeuw is in infraroodlicht zwart.

De invloed van de zonshoogte op het totale kortgolvlige albedo van enige oppervlakken is in figuur 2.13 weergegeven. Hieruit blijkt dat bij zonshoogten groter dan 50° het albedo tamelijk constant is, maar snel toeneemt bij lage zonshoogten. Bij lage zonnestand kan de reflectie aan



Figuur 2.13 Kortgolvlige oppervlakte-albedo als functie van de zonshoogte

water- en sneeuwoppervlakken zo groot zijn dat deze hinderlijk wordt.

In tabel 2.3 zijn enige waarden gegeven van het totale kortgolvlige albedo voor bodemoppervlakken en bouwmaterialen. Uitgebreide lijsten komen voor in Iqbal (1983) en Fröhlich en London (1986). In die tabel komt duidelijk de invloed van de aard van het oppervlak op het albedo tot uiting. Bij kale bodem hangt het albedo af van de vochtigheid, de kleur van het oppervlak en van de korrelgrootte (zie het verschil tussen klei en zand in tabel 2.3). Het albedo neemt af met toenemende vochtigheid, omdat het albedo van water kleiner is dan dat

van de bodem. Het albedo van een plantendek hangt af van de soort plant en haar ouderdom. In het algemeen neemt het albedo toe met de ouderdom. In tabel 2.3 zijn daarom voor veel plantendecken twee getallen voor ρ opgenomen.

Tabel 2.3 Totale reflectiefactor (albedo) voor kortgolvlige straling ρ (λ : 0,2 - 4 μm)

aard van het oppervlak	ρ	aard van het oppervlak	ρ
<i>Bodemoppervlakken</i>		<i>Bouwmaterialen e.d.</i>	
gras		Asfalt nieuw	0,09
groen	0,26	„ wegdek	0,15
vochtig groen	0,14 - 0,26	„ wegdek verweerd	0,18
droog	0,15 - 0,25	Beton	0,40
verdroogd in de Zon	0,19	„ nieuw	0,33 - 0,37
heide	0,10	„ oud	0,22 - 0,28
bos		Steenslag	0,17 - 0,20
naaldbossen	0,10 - 0,14	Rode baksteen	0,32
loofbomen	0,10 - 0,19	Betontegels wit	0,35
bouwland		„ zwart	0,09
mais	0,16 - 0,23	„ bruin	0,15
winterrogge	0,21	Dakleer	0,12
zomerrogge	0,15 - 0,18	Pleister	0,73
tarwe	0,10 - 0,25	Kalksteen	0,4 - 0,6
aardappelen	0,15 - 0,25	Leisteen	0,10 - 0,14
sla	0,22	Hout	0,22
suikerbieten	0,18 - 0,25	Aluminium	0,85
onbebouwd bouwland		IJzer	0,35
kleigrond	0,16 - 0,23	„ vuil	0,08
grijs zand droog	0,25	Staal	0,80
„ „ vochtig	0,18	Koper	0,74
zwarte grond droog	0,13	Verf	0,5 - 0,7
„ „ vochtig	0,08		
droge geploegde grond	0,20 - 0,25		
fijn licht zand	0,37		
rivierzand	0,43		
nat zand	0,09		
sneeuw			
vers gevallen	0,82		
nat fijnkorrelig	0,65		
nat grofkorrelig	0,47		
vervuilde sneeuw	0,40 - 0,50		
natte sneeuw met water	0,35		
ijs	0,4 - 0,5		

2.5 Inkomende langgolvlige straling

In hoofdstuk 4 worden naast de gemeten stralingscomponenten ook waarden gegeven van de invallende langgolvlige straling. Deze is niet routinematig gemeten maar berekend.

De invallende langgolvlige straling komt van de emissiebanden van waterdamp en kool-dioxyde in de atmosfeer. Nauwkeurige berekeningen kunnen alleen worden gemaakt als de verticale profielen van temperatuur en waterdamp bekend zijn.

Er zijn echter verschillende empirische formules afgeleid die de invallende langgolvlige straling L^+ relateren aan de gemeten luchttemperatuur op 1 à 2 m hoogte en de waterdamp-druk e in de onderste laag van de atmosfeer (Wartena et al, 1973). Swinbank (1963) kwam tot de conclusie dat zowel L^+ als e gecorreleerd zijn aan de luchttemperatuur en dat de emissie kan worden opgevat als die van een zwarte straler: $\epsilon_\lambda = 1$. Voor een wolkeloze hemel leidde Swinbank af dat $L^+ = 5,43 \cdot 10^{-13} T^6$, waarbij de constante 5,31, die Swinbank gebruikte is omgerekend naar de thans gebruikelijke World Radiometer Reference schaal (zie 6.3.3). Volgens Arnfield (1979) is de relatie van Swinbank nauwkeurig tot op $\pm 5\%$.

Om de bewolking in rekening te brengen, volgen we de lineaire correctie van Paltridge en Platt (1976), zie ook Holtslag en Van Ulden (1983):

$$L^+ = 5,43 \cdot 10^{-13} T^6 + 61,3 N \quad [\text{Wm}^{-2}] \quad (2.34)$$

waarbij T de absolute temperatuur van de lucht op 1 à 2 m hoogte [K]
 N de totale bedekkingsgraad door wolken
($N = 0$, onbewolkt; $N = 1$, geheel bewolkt).

3 HOE WORDT DE STRALING GEMETEN EN WAAR?

3.1 Stralingsmeters

Om de verschillende componenten van de stralingshuishouding van de Aarde (figuur 2.6) te kunnen bepalen zijn diverse soorten stralingsmeters ontwikkeld. In de buitenlandse literatuur wordt voor de algemene naam stralingsmeter nog wel eens de term “radiometer” gebruikt, die komt van het Latijnse “radius” dat staaf en in afgeleide vorm “straal” betekent.

In het kader van dit boek zullen we kort de werking en nauwkeurigheid bespreken van:

- de pyrheliumeter (van het Griekse “pyr” = vuur en “helios” = Zon), een instrument om de energie van de directe zonnestraling te meten in een vlak loodrecht op de straling;
- de pyranometer, een instrument om de energie te meten van de globale straling die vanuit de hele hemelkoepel op het horizontale vlak valt;
- de diffusometer, schaduwband-, of schaduw-schijfpyranometer, een pyranometer waarbij de direct invallende straling door middel van een ring of schijf wordt afgeschermd en die dus alleen de diffuse straling meet;
- de zonneshijnmeter, die de duur van de zonneshijn meet.

3.1.1 De pyrheliumeter

Een *pyrheliumeter* bestaat in principe uit een meetelement dat gevoelig is voor zonnestraling en dat aan de onderkant van een buis zit. De bovenkant van de buis heeft een kleine ronde of rechthoekige opening waardoor directe straling binnenvalt.

Om de directe straling van de Zon te meten moet de pyrheliumeter op de Zon gericht worden. Teneinde dit gemakkelijk te kunnen doen is de openingshoek van de pyrheliumeterbuis groter dan de hoek waaronder wij de diameter van de Zon zien ($0,5^\circ$). De pyrheliumeter meet dan ook nog een deel van de hemelstraling vlak rondom de Zon, de *circumsolaire straling* genoemd.

De openingshoek van de pyrheliumeter moet zo klein zijn dat er slechts weinig circumsolaire straling wordt gemeten, maar ook weer niet te klein, omdat het dan moeilijk is de meter precies op de Zon te richten. Voor moderne pyrheliumeters wordt een cirkelvormige opening met een openingshoek van 5° als standaard aanbevolen.

De meetfout van een pyrheliumeter kan veroorzaakt worden door drie soorten foutenbronnen:

- a. Zonzichtfout: de pyrheliumeter is niet goed op de Zon gericht. Deze foutenbron is in principe te vermijden.
- b. Grote openingshoek, waardoor er te veel circumsolaire straling wordt gemeten. Bij hoge turbiditeit van de atmosfeer, waardoor er veel diffuse straling is, kan de hierdoor veroorzaakte fout enige procenten bedragen.
- c. Instrumentele fouten, afhankelijk van het type instrument, van de ouderdom van het meetoppervlak (verminderde absorptie) en van het onderhoud (verlopen ijkfactor).

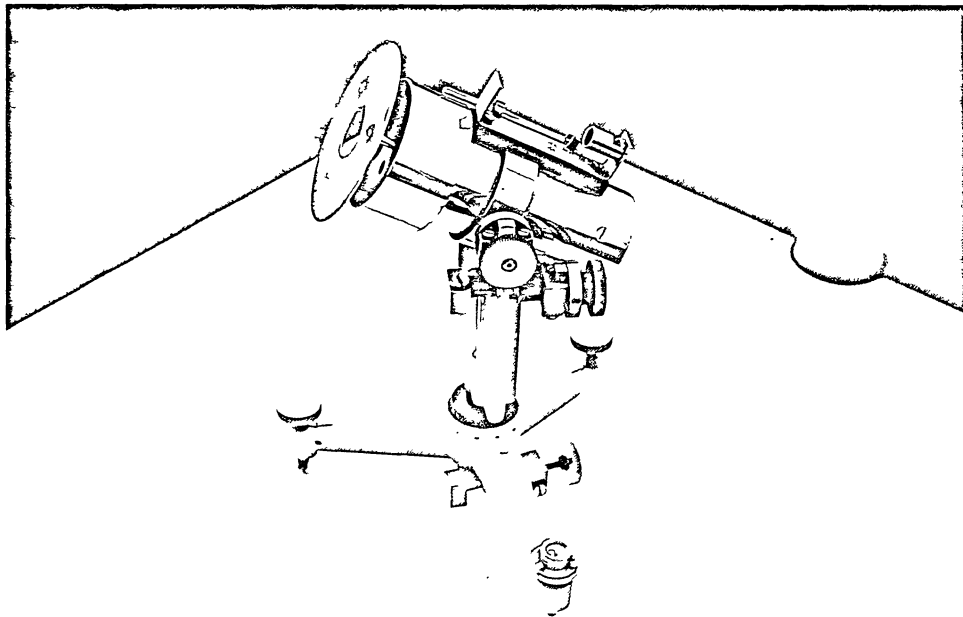
Pyrheliometers kunnen worden ingedeeld in absolute en relatieve instrumenten. Relatieve instrumenten moeten in de Zon geijkt worden door vergelijking met een absolute pyrheliometer, zie verder WMO (1983). Als voorbeelden worden hier de Ångström en de Linke-Feussner pyrheliometer besproken. Sinds de jaren zestig worden er steeds meer absolute pyrheliometers ontwikkeld die de irradiantie van de directe straling kunnen meten zonder ijking aan standaard-stralingsbronnen.

Het meetgedeelte van de Ångström pyrheliometer bestaat uit twee identieke zwartgemaakte manganinstrookjes (een legering van mangaan, koper en nikkel) die aan de onderkant van de buis zitten. Een van de strookjes wordt blootgesteld aan de zonnestraling, terwijl het andere is afgeschermd. Beide zijn verbonden met een elektrisch circuit. Doordat de zonnestraling in het eerste strookje wordt geabsorbeerd, zal dit in temperatuur toenemen. De afgeschermd strookje wordt elektrisch verwarmd totdat hij dezelfde temperatuur heeft als de beschreven strook. Dan is de elektrische energie, die nodig is voor verwarming, gelijk aan de geabsorbeerde zonnenergie. De directe zonnestraling I kan dan worden berekend uit $I = k \cdot i^2$, waarbij i de stroomsterkte van de compenserende elektrische stroom is en k een constante van het instrument. In principe kan k uit de eigenschappen van het instrument worden bepaald, maar meestal wordt k gemeten door het instrument te ijken tegen een standaard.

Gedurende een meting worden de strookjes afwisselend blootgesteld aan de zonnestraling en afgeschermd. Door het gemiddelde van beide uitkomsten te nemen worden kleine verschillen tussen de strookjes gecompenseerd.

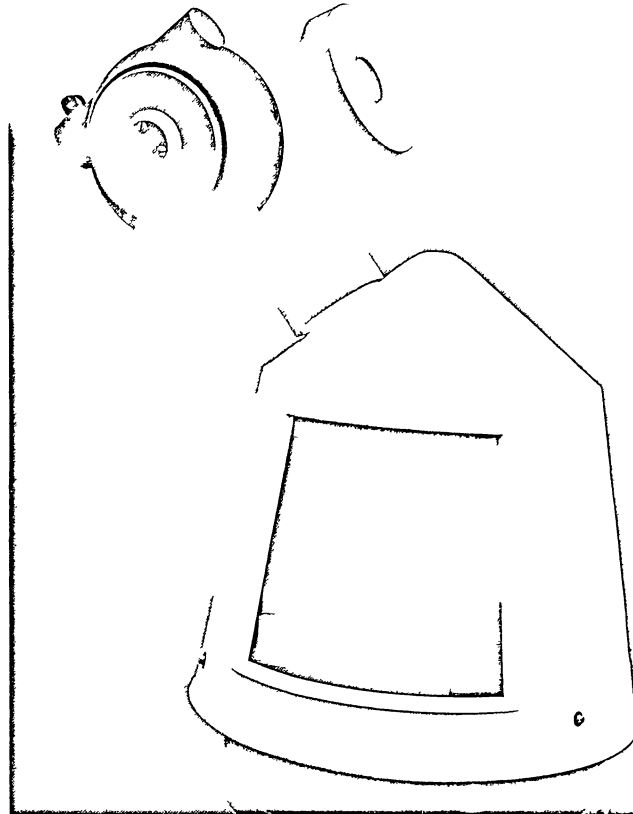
De Ångström pyrheliometer (figuur 3.1) heeft een rechthoekige opening aan de bovenkant van de buis waarvan de openingshoek 3° bij 9° is.

De nauwkeurigheid van de Ångström pyrheliometer is ongeveer 1%, wat wil zeggen dat de gemeten waarden 1% kunnen verschillen van de werkelijke waarden.



Figuur 3.1 De Ångström pyrheliometer

*Figuur 3.2
De Linke-Feussner
pyrheliometer
gemonteerd op
een zonzolger*



Met de Ångström pyrheliometer kunnen slechts losse waarnemingen worden gedaan. De *Linke-Feussner pyrheliometer* is in staat de directe zonnestraling continu te meten, mits hij bevestigd is op een zonzolger; dat is een apparaat met verticaal en horizontaal beweegbare assen waarop de meter de baan van de Zon langs de hemelkoepel kan volgen (figuur 3.2).

Het gevoelige element van de Linke-Feussner bestaat uit twee gelijke secties van een thermoziuil met ieder 20 thermokoppels van manganin-constantaan. De ene helft van de lassen is gezwart, ligt in de as van de pyrheliometerbuis en wordt blootgesteld aan de zonnestraling (de "warme" lassen). De andere helft ligt aan de rand van de buis en is in goed warmtecontact met het koperen huis, zodat die ongeveer de temperatuur van de buitenlucht houdt (de "koude" lassen). Hierdoor ontstaat er een elektrische spanning over de thermoziuil, die evenredig is met het temperatuurverschil tussen warme en koude lassen en daarmee een maat is voor de energie van de invallende zonnestraling.

De pyrheliometer volgens Linke-Feussner heeft een openingshoek van 10° en een gevoeligheid van ongeveer $20 \mu\text{V}$ per W m^{-2} invallende straling. De moderne apparaten hebben een compensatie voor temperatuurveranderingen van de omgeving. De nauwkeurigheid ligt in

principe in de orde van grootte van 1 à 2%, maar die wordt, net als bij die van Ångström, alleen behaald als de meter precies op de Zon is gericht. Bij continu meten moet dit zeker iedere dag gecontroleerd worden.

De Linke-Feussner pyrhelimeter wordt ook wel “actinometer” genoemd, afgeleid van het Griekse “aktinos” (= straal).

Alle moderne *absolute pyrhelimeters* hebben een kegelvormige of cilindervormige holte (Engels: “cavity”) voor de absorptie van de invallende directe straling. Een elektrische schakeling zet de daarin geproduceerde warmte om in een elektrische spanning. Bij de ijking van het apparaat wordt de zonnestraling afgeschermd en wordt in een verwarmingsspiraaltje om de absorberende holte een elektrische energie opgewekt die gelijk is aan de opgevangen zonneënergie.

De absolute fout van een cavity pyrhelimeter ligt in de orde van 0,1% bij een volle schaaluitslag overeenkomend met een zonneënergie van 1000 W m^{-2} .

Spectrale metingen van de directe straling kunnen worden gedaan door aan de bovenkant van de buis van de pyrhelimeter een filter te plaatsen, dat slechts die spectrale banden doorlaat waarin men is geïnteresseerd. Deze metingen zijn van belang bij de bepaling van de troebelheid van de atmosfeer (zie 2.3.3) en voor bepaalde zonneënergie-toepassingen.

3.1.2 De pyranometer

Pyranometers registreren de totale kortgolvlige straling die uit de hele hemelkoepel op een vlak valt. Ze meten dus de globale straling, zijnde de som van de directe en de diffuse straling. Volgens internationale regels (WMO, 1983) worden de pyranometers horizontaal opgesteld.

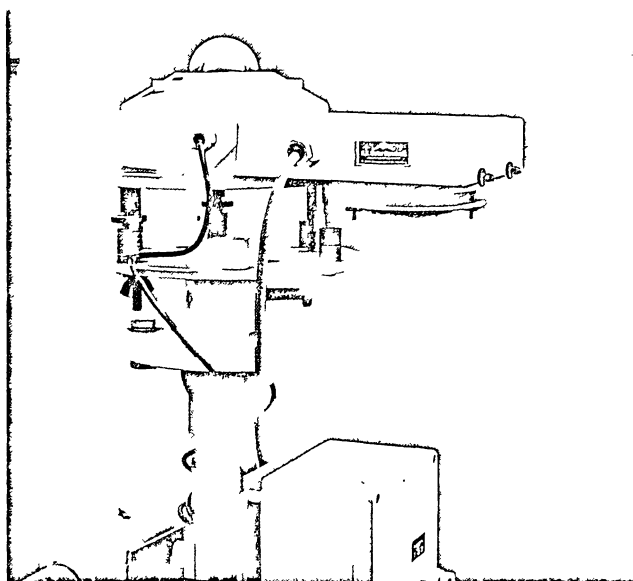
Pyranometers worden gebruikt voor routinemetingen van de globale straling. Ze moeten dus onder alle weersomstandigheden kunnen werken. Het gevoelige meetoppervlak is daarom gewoonlijk afgeschermd met één of twee halve bolletjes.

In het Nederlandse stralingsmeetnet (zie 3.2) staan CM 11 pyranometers van het fabriekaat Kipp en Zonen (Delft) opgesteld. Een andere veel gebruikte pyranometer is de Precision Spectral Pyranometer (PSP) van Eppley in Newport, Verenigde Staten. Deze beide typen zullen we wat nader beschouwen.

Het meetgedeelte van de *Kipp en Zonen CM 11 solarimeter* (figuur 3.3) bestaat uit 100 thermokoppels die met behulp van een dikke-filmtechniek op een keramisch aluminiumoxyde blok zijn geprint. De thermokoppels liggen als de stralen in een cirkel. De lassen in het centrum zijn gezwart (de warme lassen), die aan de rand van de cirkel (de koude lassen) zijn in goed warmtecontact verbonden met het huis van de pyranometer. Het huis van de pyranometer is bovendien door een witte ronde plaat (in figuur 3.3 goed te zien) tegen de directe zonnestraling afgeschermd. Wanneer de pyranometer aan de zonnestraling wordt blootgesteld, worden de gezwarte lassen warm en omdat de koude lassen de temperatuur van het huis (luchttemperatuur) behouden, ontstaat er een elektrische spanning over de thermoziil, die evenredig is met het verschil in temperatuur tussen warme en koude lassen en dus een maat is voor de invallende zonnestraling. De gevoeligheid van de thermoziil is ongeveer $5 \mu\text{V}$ per W m^{-2} .

Een enkele halve bol beschermt de thermoziil tegen de invloeden van het weer, zoals temperatuurwisselingen, wind en neerslag. Deze bol wordt beïnvloed door de luchttemperatuur en absorbeert langgolvlige straling aan de zonzijde. De afwijkende temperatuur van de bol ten opzichte van de temperatuur van het huis geeft dan aanleiding tot een netto langgolvlige stralingstransport binnen de bol. Om dat effect van langgolvlige stralingsuitwisseling zo klein mogelijk te houden is een tweede halve bol binnen de eerste aangebracht, waarvan de tempe-

*Figuur 3.3
De Kipp & Zonen
pyranometer:
Solarimeter-CM11 met
registratie-apparatuur*



atuur zoveel mogelijk gelijk wordt gehouden aan de temperatuur van het huis. Een nadeel van de halve bollen is dat er zich dauw en stof op kan afzetten en in de winter rijp of ijs. De halve bol moet dus regelmatig worden schoongemaakt. Doordat de halve bollen van glas zijn gemaakt, laat de CM 11 straling door in het spectraalgebied van 305-2800 nm, d.w.z. vrijwel het hele spectrum van de Zon.

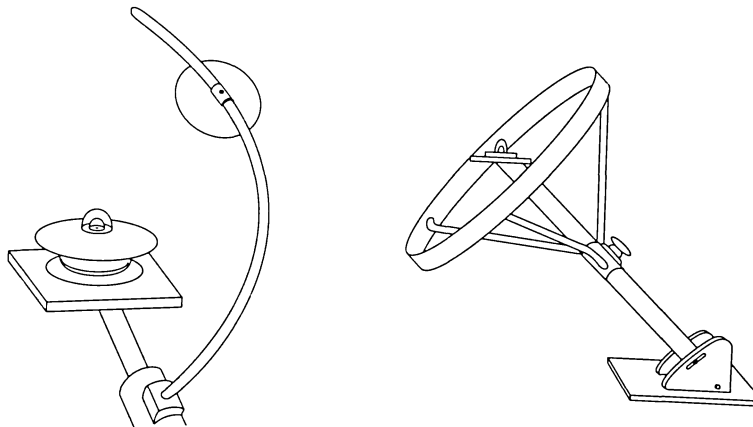
Door wisselende buitenluchttemperaturen kunnen in het pyranometerhuis (sensorblok) warmtestromen optreden. In de CM 11 is hiervoor een voorziening aangebracht om die ongewenste stromen te compenseren. De gevoeligheid van het instrument blijft daardoor constant binnen $\pm 1\%$ bij buitenluchttemperaturen van -10° tot 40°C .

De *Eppley PSP-pyranometer* lijkt in uitvoering veel op die van Kipp. Hij heeft ook een cirkelvormige thermoziil, waarvan de lassen in het centrum zijn gezwart. De pyranometer ontleent zijn naam Precision Spectral Pyranometer aan de hoedanigheid dat de beide halve bolletjes gemakkelijk vervangen kunnen worden door één bol van filtermateriaal. Dit kan gekleurd glas zijn, maar ook een filter dat alleen langgolvlige straling ($4-40\ \mu\text{m}$) doorlaat. Een voorbeeld daarvan is een silicon halve bol met een opgedampt interferentiefilter om de

kortgolvlige straling te reflecteren. Zo'n stralingsmeter die alleen de infrarode straling van b.v. atmosfeer of aardoppervlak meet, wordt een *pyrgeometer* genoemd. De thermozuil van de PSP heeft een gevoeligheid van ongeveer $10 \mu\text{V}$ per W m^{-2} .

3.1.3 De diffusometer

Om alleen de diffuse straling met een pyranometer te kunnen meten is het nodig het meetgedeelte af te schermen tegen de directe straling. Dat kan op twee manieren (figuur 3.4). De



Figuur 3.4 Een pyranometer met schaduw-schijf (links) en schaduw-band (rechts) voor de meting van de diffuse straling

meest gebruikelijke is om over de pyranometer een schaduwband aan te brengen, die evenwijdig is met de baan van de Zon langs de hemelkoepel, zodat het meetgedeelte de hele dag is afgeschermd. Dat is een relatief goedkope oplossing, maar die heeft als nadeel dat ook een deel van de diffuse straling wordt afgeschermd. Daarvoor moet gecorrigeerd worden. De correctie is afhankelijk van de afmetingen van de ring, van de zonshoogte en de hoeveelheid bewolking en kan wel 10 tot 15% bedragen (Dehne, 1980).

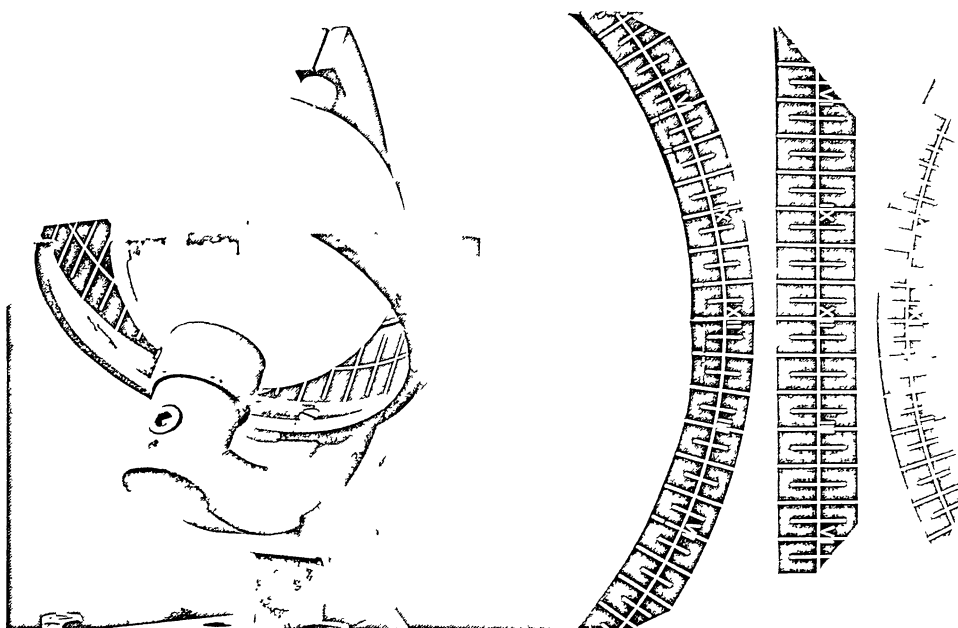
Een meer bevredigende oplossing is een kleine ondoorschijnende schijf op een dunne arm, die door een mechanisme de beweging van de Zon volgt en daardoor de glazen bollen van de pyranometer tegen de directe straling afschermt. De juiste instelling van het geheel vereist echter wel veel aandacht en bewaking.

3.1.4 De zonneshijnmeter

De duur van de zonneshijn wordt gemeten met een *Campbell-Stokes zonneshijn-autograaf*. Dit apparaat bestaat uit een glazen bol van 10 cm doorsnede die gecentreerd is bevestigd in een gedeelte van een bolvormige schaal (zie figuur 3.5).

De opstelling is zo gemaakt dat de zonnestralen precies worden gefocuseerd op een strook papier die tussen twee groeven in de schaal is geschoven. Er zijn drie paren groeven aangebracht, op verschillende hoogten in verband met de wisselende zonshoogte door de seizoenen heen. De hoogste kaartpositie wordt gebruikt bij lage zonshoogte, in de winter.

Wanneer de Zon schijnt, brandt die op de strook een spoor in. De strook is voorzien van een tijdsindeling (figuur 3.5). Aan het eind van de dag wordt de kaart uit de groef gehaald en wordt per uur, in eenheden van 0,1 uur, aan de hand van de lengte van het brandspoor afgelezen hoelang de Zon heeft geschinen.



Figuur 3.5 De Campbell-Stokes zonnenschijnautograaf (links) met registratiestroken (rechts)

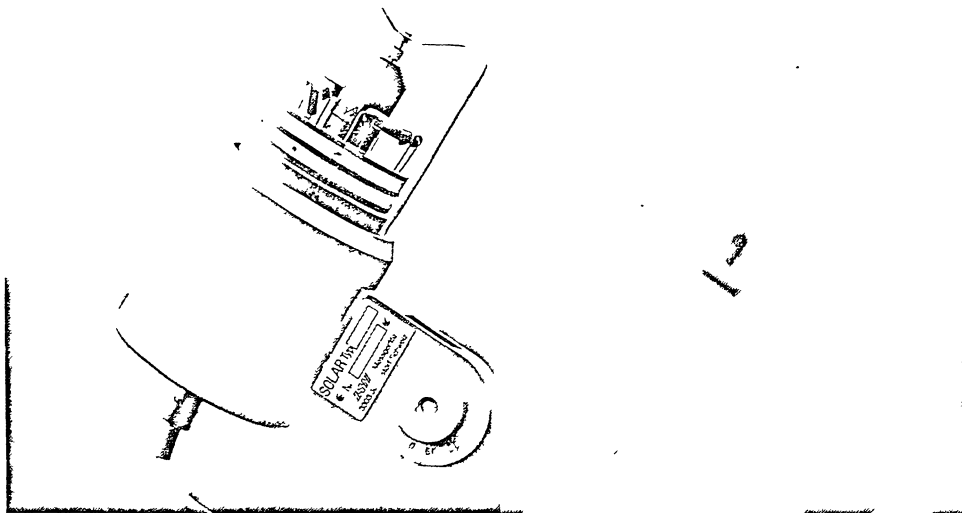
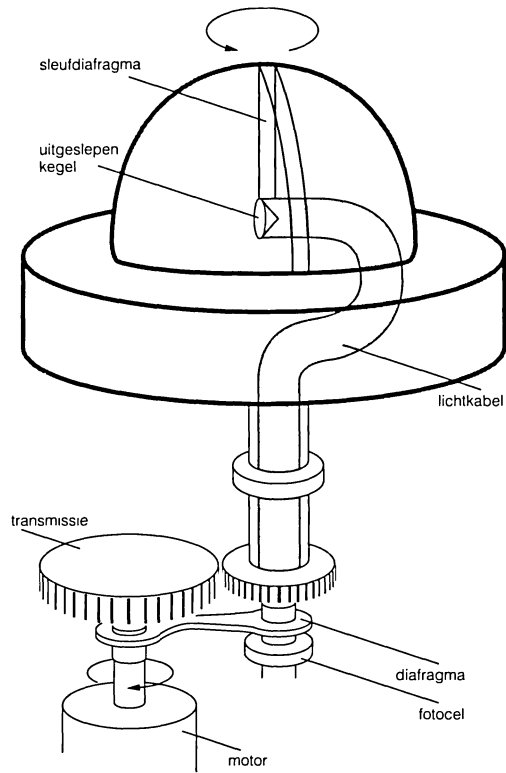
Het zal duidelijk zijn dat de zonnestralen een zekere energie moeten hebben voordat ze een brandspoor kunnen maken. De waarde varieert tussen de 100 en 200 $W m^{-2}$, afhankelijk van de soort papier, de vochtigheid van het papier en de vervuiling van de bol. Dit geeft aanleiding tot fouten. De Wereld Meteorologische Organisatie heeft daarom in september 1989 de Campbell-Stokes als standaard-meetinstrument afgeschaft en een meer precieze definitie van zonnenschijnduur ingevoerd, nl. de tijd waarover de *directe* straling - gemeten in een vlak loodrecht op de richting van de Zon - groter is dan 120 $W m^{-2}$.

Mede in verband met de hoeveelheid werk die met het uitwerken van de registreerstroken is gemoeid, is er momenteel een tendens dit type zonnenschijnmeters door automatische meters te vervangen. Deze automatische meters berusten op het principe dat een draaiend schijfje een fotocel afwisselend aan de directe zonnestraling blootstelt of daarvan afschermt. Zo wordt door de fotocel een wisselspanning opgewekt die gemeten kan worden.

De *SONI-zonnenschijnmeter* van Horst Siggelkow (Hamburg) heeft een roterende zwarte halve bol waarin een sleuf van $1,2^\circ$ bij 90° is aangebracht (figuur 3.6). Deze sleuf tast de radiantie van smalle hemelsegmenten af. De daarbij ontvangen straling wordt gereflecteerd aan het oppervlak van een uitgeslepen kegel in een lichtgeleidende siliconen kabel. De lichtkabel draait met de roterende halve bol mee. Tegenover het einde van deze kabel zit een fotocel die de ontvangen straling omzet in een elektrische stroom. Tussen het einde van de kabel en de fotocel is een diafragma aangebracht dat na iedere omwenteling van de halve bol de lichtstroom onderbreekt om de nulstand te meten. Daardoor wordt o.a. de invloed van temperatuurveranderingen gecompenseerd. De sleuf in de halve bol is zo smal dat de diffuse hemelstraling niet wordt gemeten en de fotocel alleen reageert als de sleuf "de Zon ziet". Daarbij is volgens de aanbeveling van de WMO de drempelwaarde 120 $W m^{-2}$ ingebouwd.

In de as van de cilindervormige *zonnenschijnmeter van Haenni* (Jegenstorf, Bern) zijn zes fotocellen aangebracht. Deze meten de radiantie van dat deel van de hemel dat de Zon in de loop van een jaar doorloopt. Een smal afschermplaatje roteert om de fotocellen (figuur 3.7).

Figuur 3.6 Schema van de SONI-zonneschijnmeter



Figuur 3.7 De zonneschijnmeter van Haenni

Als de Zon schijnt neemt het signaal van de fotocel iedere keer af als het afschermplaatje passeert. Bij heiligheid of bewolking daarentegen verandert het signaal maar weinig als het plaatje voor een fotocel langsgaat. Dit verschillende effect bij zonneshijn en bewolking is een maat voor de tijd dat de Zon schijnt.

Onder auspiciën van de WMO is in Duitsland een aantal automatische zonneshijnmeters met elkaar vergeleken (Dehne, 1989).

In Nederland zal de zonneshijn duur in de toekomst berekend worden uit de globale straling (Slob en Monna, 1991); Duitsland gaat waarschijnlijk over tot het installeren van automatische zonneshijnmeters.

3.2 Het stralingsmeetnet

In hoofdstuk 4 worden de resultaten gegeven van de metingen van de globale straling. De zeven meetpunten in Nederland waar de globale straling op het horizontale vlak al sinds langere tijd wordt gemeten zijn: Naaldwijk, Den Helder/De Kooy, De Bilt, Luchthaven Eelde, Vlissingen, Luchthaven Zuid-Limburg in Beek en Oostvoorne. De ligging van deze meetpunten is gegeven in figuur 3.8. De metingen zijn verricht met pyranometers van het fabrikaat



Figuur 3.8 Het meetnet voor globale straling

Kipp en Zonen. Aanvankelijk met het model CM 5, later met het model CM 11.

Verder worden in het volgende hoofdstuk de meetresultaten van de directe straling in De Bilt besproken. Deze metingen zijn verricht met een Linke-Feussner pyrhelimeter. In hoofdstuk 5 worden tenslotte de metingen van de straling op twaalf verschillend georiënteerde vlakken besproken, die van 1979 t/m 1981 in Cabauw met PSP's van Eppley zijn verricht.

Het meetnet is in de jaren tachtig aanmerkelijk uitgebreid met een aantal stations, die eveneens in figuur 3.8 zijn gegeven, maar waarvan de meetreeksen nog te kort zijn voor een goede statistische uitwerking. Meetresultaten van deze stations zijn op aanvraag beschikbaar bij de Klimatologische Dienst van het KNMI.

Tabel 3.1 Overzicht van de globale stralingsstations

stations nummer	stationsnaam	N.B.	O.L.	hoogte boven maaiveld in m	tijdvak van waarnemingen
017	Wilhelminadorp	51°32'	03°54'	5,00	06.1981 - 10.1989
038	Naaldwijk	51°59'	04°12'	2,35	01.1971 - 10.1988
210	Valkenburg Z.H.	52°11'	04°25'	1,50	03.1987 -
230	Den Helder	52°58'	04°45'	13,00	11.1964 - 07.1972
235	De Kooy	52°55'	04°47'	1,50	08.1972 -
240	Schiphol	52°18'	04°46'	1,50	09.1987 -
260	De Bilt	52°06'	05°11'	38,50 ¹⁾	07.1957 -
270	Leeuwarden	53°13'	05°45'	1,50	04.1987 -
275	Deelen	52°04'	05°53'	1,50	04.1987 -
280	Eelde	53°08'	06°35'	2,20	01.1965 -
290	Twenthe	52°16'	06°54'	1,50	04.1987 -
310	Vlissingen	51°27'	03°36'	12,50	07.1963 -
344	Rotterdam	51°57'	04°27'	1,50	09.1987 -
348	Meetmast Cabauw	51°58'	04°56'	2,00	06.1986 -
350	Gilze-Rijen	51°34'	04°56'	1,50	04.1987 -
380	Zuid-Limburg	50°55'	05°47'	1,50	06.1964 -
808	Oostvoorne	51°55'	04°05'	10,00	01.1971 - 11.1990
909	Wieringerwerf	52°48'	05°03'	5,50	05.1988 -
920	Biddinghuizen	52°27'	05°37'	5,50	09.1988 -
974	Eindhoven	51°27'	05°25'	7,00	05.1988 - ²⁾
991	Vredepeel	51°32'	05°51'	1,50	05.1988-
992	Eibergen	52°06'	06°36'	5,50	05.1988-
993	Philippine	51°18'	03°45'	5,50	05.1988-

¹⁾ vanaf okt. 1978 op 23,00 m

²⁾ tot op heden nog weinig gegevens



Figuur 3.9 Het meetnet voor de duur van de zonneshijn

Tabel 3.1 geeft tenslotte een overzicht van de stations en het tijdvak waarover gegevens beschikbaar zijn.

Op 1 augustus 1972 werden de waarnemingen in Den Helder beëindigd en voortgezet op het op 5 km afstand gelegen Vliegveld de Kooy. De waarnemingen te Den Helder en De Kooy worden hier als één reeks beschouwd.

In hoofdstuk 4 wordt ook nog in het kort ingegaan op meetresultaten van de zonneshijnduur. Het betreft hier gegevens van 35 meetlocaties, die in tabel 3.2 worden genoemd en in figuur 3.9 in kaart zijn gebracht. Bij deze metingen is de Campbell-Stokes zonneshijnauto-graaf gebruikt.

Tabel 3.2 Overzicht van de zonneshijnstations

stations nummer	stationsnaam	N.B.	O.L.	hoogte boven maaiveld in m	tijdvak van waarnemingen
008	Lelystad-Haven	52°30'	05°25'	6,00	06.1953 - 03.1981
033	Gemert	51°33'	05°41'	2,20	08.1949 -
036	Numansdorp	51°43'	04°27'	1,50	08.1948 -
128	Dedemsvaart	52°36'	06°26'	1,50	03.1949 - 12.1980
135	Kornwerderzand	53°04'	05°20'	2,20	05.1944 -
153	Stavoren	52°53'	05°21'	3,50	05.1952 -
166	Schiermonnikoog	53°29'	06°10'	1,50	01.1973 -
210	Valkenburg Z.H.	52°11'	04°25'	6,00	09.1951 -
235	De Kooy	52°55'	04°47'	11,00	08.1972 -
240	Schiphol	52°18'	04°46'	30,00	01.1963 -
250	Terschelling	53°22'	05°13'	57,00	07.1951 -
260	De Bilt	52°06'	05°11'	37,00 ^{*)}	01.1899 -
270	Leeuwarden	53°13'	05°45'	1,50	09.1955 -
275	Deelen	52°04'	05°53'	1,50	01.1963 -
280	Eelde	53°08'	06°35'	10,00	03.1952 -
290	Twenthe	52°16'	06°54'	26,00	01.1963 -
310	Vlissingen	51°27'	03°36'	12,50	01.1907 -
325	Zierikzee	51°39'	03°46'	6,00	05.1960 - 04.1988
344	Rotterdam	51°57'	04°27'	26,00	01.1978 -
350	Gilze-Rijen	51°34'	04°56'	1,50	11.1951 -
370	Eindhoven	51°27'	05°25'	7,00	01.1978 -
380	Zuid-Limburg	50°55'	05°47'	7,00	06.1946 -
412	Amsterdam-Hortus B.	52°22'	04°54'	15,00	07.1940 - 11.1990
414	Bern	51°45'	05°11'	1,50	07.1948 - 06.1982
417	Stellendam	51°50'	04°03'	40,00	07.1977 -
420	Harderwijk	52°22'	05°36'	1,50	07.1952 -
421	Kootwijk Radio	52°10'	05°51'	1,50	09.1951 -
422	IJmuiden	52°28'	04°35'	1,50	01.1972 - 10.1985
423	Heel	51°11'	05°55'	1,50	01.1981 -
427	Ouddorp	51°48'	03°52'	57,00	09.1951 -
429	Scheveningen	52°06'	04°16'	1,50	08.1977 - 10.1982
430	Urk	52°39'	05°36'	1,50	02.1979 - 07.1984
433	Winterswijk	51°58'	06°43'	36,85	09.1951 - 06.1987
438	Wieringerwerf	52°48'	05°03'	1,50	03.1959 -
441	Bergen op Zoom	51°30'	04°16'	1,50	10.1969 - 01.1985

^{*)} vanaf okt. 1978 op 23,00 m

4 RESULTATEN OP HET HORIZONTALE VLAK

4.1 Globale straling en zonneshijnduur

4.1.1 De jaarlijkse gang

We beginnen dit hoofdstuk met een bespreking van de *jaarlijkse gang* in de globale straling. Dat is het verloop van de invallende straling door het jaar heen. Het betreft gemeten waarden van de globale straling op de zeven stations Vlissingen, Oostvoorne, Naaldwijk, Den Helder/De Kooy, Eelde, Zuid-Limburg en De Bilt.

Tabel 4.1 geeft de, over vele jaren gemiddelde, resultaten. In het bovenste deel staan de dagsommen van de globale straling per decade in MJ m⁻². Een *decade* is in principe een tijdvak van 10 dagen. Om de maanden steeds uit 3 decaden te kunnen laten bestaan geldt voor

de eerste decade I dag 1 t/m dag 10,
de tweede decade II dag 11 t/m dag 20,
de derde decade III dag 21 t/m de laatste dag van de maand.

De derde decade heeft dus een variabele lengte en kan bestaan uit 8 of 9 dagen (februari), 10 dagen (april, juni, september, november) of 11 dagen (de overige maanden).

We lezen in de tabel b.v. af dat in De Kooy de dagsom van de globale straling van 1 t/m 10 juli gemiddeld 20,61 MJ m⁻², dat is ruim 5,7 kWh m⁻², bedraagt.

Tabel 4.1 Gemiddelde dagsommen van de globale straling per decade, maand, seizoen en jaar in MJ m⁻²

	De Bilt	De Kooy	Eelde	Naaldwijk	Oostvoorne	Vlissingen	Zuid-Limburg
JAN I	1,79	1,77	1,67	1,86	1,88	1,97	2,02
II	2,35	2,39	2,18	2,43	2,45	2,62	2,62
III	2,59	2,73	2,43	2,77	2,82	3,01	2,84
FEB I	3,60	3,83	3,38	3,81	3,80	3,80	3,77
II	5,03	5,03	4,64	5,11	5,14	5,28	5,34
III	6,04	6,15	5,80	6,03	6,13	6,45	6,76
MRT I	7,02	7,45	6,86	7,34	7,40	7,58	7,44
II	7,62	8,54	7,48	8,15	8,27	8,29	7,88
III	9,06	10,65	9,25	9,91	10,07	10,02	9,50
APR I	10,68	11,88	10,72	11,79	11,85	11,72	10,69
II	13,56	14,58	13,71	14,63	14,66	14,36	13,84
III	14,77	16,23	15,39	15,55	15,27	15,27	14,40
MEI I	14,85	16,80	15,35	16,25	16,16	15,84	14,85
II	17,70	19,83	17,94	19,07	18,94	18,57	17,65
III	17,00	19,28	16,95	18,25	18,10	17,76	17,20

	De Bilt	De Kooy	Eelde	Naaldwijk	Oostvoorne	Vlissingen Zuid-Limburg	
JUN I	17,74	19,81	17,78	19,41	19,27	18,75	17,21
II	17,91	20,45	17,83	20,36	20,07	19,96	17,24
III	17,26	19,79	17,56	19,13	19,03	19,00	16,98
JUL I	18,99	20,61	19,11	20,28	20,24	20,44	19,14
II	16,67	18,57	16,59	18,54	18,11	18,03	16,74
III	15,30	16,94	15,53	16,71	16,55	16,82	15,75
AUG I	15,29	16,89	15,73	16,64	16,55	16,87	16,02
II	15,40	16,49	15,30	15,92	15,56	15,67	14,98
III	14,15	14,53	14,05	14,40	14,33	14,85	13,73
SEP I	11,88	12,59	11,83	12,23	12,19	12,74	12,33
II	10,16	10,66	10,18	10,27	10,15	10,56	10,34
III	8,82	9,13	8,75	9,35	9,37	9,74	9,51
OKT I	7,54	7,39	7,19	7,59	7,58	7,85	8,14
II	6,05	5,97	5,70	6,06	6,10	6,52	6,18
III	5,00	4,82	4,60	4,98	4,98	5,29	5,44
NOVI	3,57	3,50	3,42	3,69	3,75	3,93	4,07
II	2,78	2,81	2,71	2,78	2,82	3,14	3,00
III	2,10	2,05	2,01	2,16	2,22	2,39	2,36
DEC I	2,07	1,95	1,78	2,10	2,12	2,23	2,31
II	1,66	1,56	1,45	1,70	1,72	1,89	1,90
III	1,59	1,56	1,36	1,68	1,73	1,88	1,81
JAN	2,25	2,31	2,10	2,37	2,39	2,55	2,51
FEB	4,82	4,93	4,53	4,92	4,95	5,10	5,20
MRT	7,94	8,94	7,91	8,51	8,63	8,68	8,31
APR	13,00	14,23	13,27	13,99	13,92	13,78	12,98
MEI	16,53	18,66	16,75	17,87	17,75	17,40	16,59
JUN	17,64	20,02	17,72	19,63	19,46	19,24	17,14
JUL	16,94	18,65	17,03	18,45	18,24	18,38	17,16
AUG	14,92	15,92	14,99	15,61	15,44	15,76	14,87
SEP	10,29	10,79	10,25	10,62	10,57	11,01	10,73
OKT	6,16	6,02	5,79	6,17	6,18	6,51	6,55
NOV	2,82	2,79	2,71	2,88	2,93	3,16	3,14
DEC	1,77	1,68	1,52	1,82	1,85	2,00	2,00
WIN	2,89	2,92	2,66	2,98	3,01	3,16	3,17
LEN	12,49	13,94	12,64	13,45	13,43	13,28	12,62
ZOM	16,49	18,18	16,57	17,88	17,70	17,78	16,38
HST	6,42	6,53	6,25	6,55	6,55	6,89	6,80
JAAR	9,61	10,44	9,57	10,26	10,22	10,32	9,79

In het tweede deel van tabel 4.1 staan de dagsommen van de globale straling per maand in MJ m⁻². Dat deel laat ons b.v. zien dat in De Bilt de dagsom in juli 16,94 MJ m⁻² of wel 4,7 kWh m⁻² is.

In het onderste deel van tabel 4.1 staan de dagsommen van de globale straling gemiddeld per seizoen en per jaar. Voor het seizoen neemt men bij stralings- en temperatuurmetingen:

winter (W) de maanden december, januari en februari,
lente (L) de maanden maart, april en mei,
zomer (Z) de maanden juni, juli en augustus,
herfst (H) de maanden september, oktober, november.
Onder jaar wordt het kalenderjaar verstaan.

In hoeverre zijn de resultaten van De Bilt nu representatief voor het hele land? Daartoe vergelijken we de resultaten van De Bilt met die van de andere stations. We lezen in tabel 4.1 af, dat Eelde in de eerste tien dagen van december een gemiddelde dagsom van $1,78 \text{ MJ m}^{-2}$ heeft, die 14% minder is dan de dagsom in De Bilt ($2,07 \text{ MJ m}^{-2}$). De dagsom in De Kooy, eind maart ($10,65 \text{ MJ m}^{-2}$) is 17,5% hoger dan die van De Bilt ($9,06 \text{ MJ m}^{-2}$) in dezelfde decade. De spreiding over de stations in de seizoensommen is kleiner. Eelde heeft in de winter 8% minder straling en De Kooy in de lente 11,6% meer dan De Bilt.

Van september tot half maart is Eelde het station met de minste globale straling, in de andere maanden geldt dit voor De Bilt of Zuid-Limburg. In het voorjaar en de zomer ontstaat er door de hogere temperatuur boven land vaak meer bewolking dan boven zee, waardoor de landstations minder straling ontvangen dan de kuststations.

Van maart tot september wordt de meeste globale straling gemeten in De Kooy of Vlissingen, in de andere maanden is dat in Zuid-Limburg of Vlissingen. In het najaar en de winter speelt ook de daglengte een grote rol: midden december duurt de dag in Zuid-Limburg bijna een half uur langer dan in het noorden van het land, zie 6.2.2.

Wat is nu de betekenis van b.v. het gegeven dat de gemiddelde dagsom van de globale straling te De Bilt in januari $2,25 \text{ MJ m}^{-2}$ is? Met andere woorden wat zijn de afwijkingen daarvan, die we van jaar tot jaar kunnen verwachten? Daartoe beschouwen we de standaarddeviatie van de gemiddelde dagsommen per maand van de jaren 1961 t/m 1980. In tabel 4.2

Tabel 4.2 *De gemiddelde dagsom per maand van de globale straling in De Bilt in MJ m^{-2} (tijdvak 1961-1980), de standaarddeviatie en de standaarddeviatie gedeeld door het gemiddelde*

maand	gem. dagsom [MJ m^{-2}]	stand.dev. [MJ m^{-2}]	stand.dev. ge- deeld door gem.
jan	2,26	0,45	19,8%
feb	4,63	0,71	15,4%
mrt	7,92	1,06	13,4%
apr	12,51	1,76	14,1%
mei	16,51	1,63	9,9%
jun	18,05	2,03	11,3%
jul	16,07	1,60	10,0%
aug	14,43	1,83	12,7%
sep	10,29	1,02	9,9%
okt	6,06	0,75	12,4%
nov	2,74	0,34	12,5%
dec	1,82	0,28	15,7%

zijn gegeven de, over 1961 t/m 1980 gemiddelde, dagsommen per maand, \bar{x} (die enigszins afwijken van de gegevens in tabel 4.1, omdat het een ander tijdvak betreft), de standaarddeviatie (s.d.) en de standaarddeviatie gedeeld door het gemiddelde. We zien dan dat $s.d./\bar{x}$ bijna 20% (in januari) kan bedragen van de gemiddelde waarde. In de winter (december t/m februari) is de relatieve standaardafwijking groter dan in de zomermaanden. Dat betekent dat men in individuele maanden zonneënergie opbrengsten kan verwachten die 10% in de zomer en 15 à 20% in de winter kunnen afwijken van de gemiddelde gegevens in tabel 4.1.

4.1.2 De variabiliteit van jaar tot jaar in de globale straling en de zonnenschijnduur

Tabel 4.3 Jaarsommen van de globale straling en de zonnenschijnduur te De Bilt

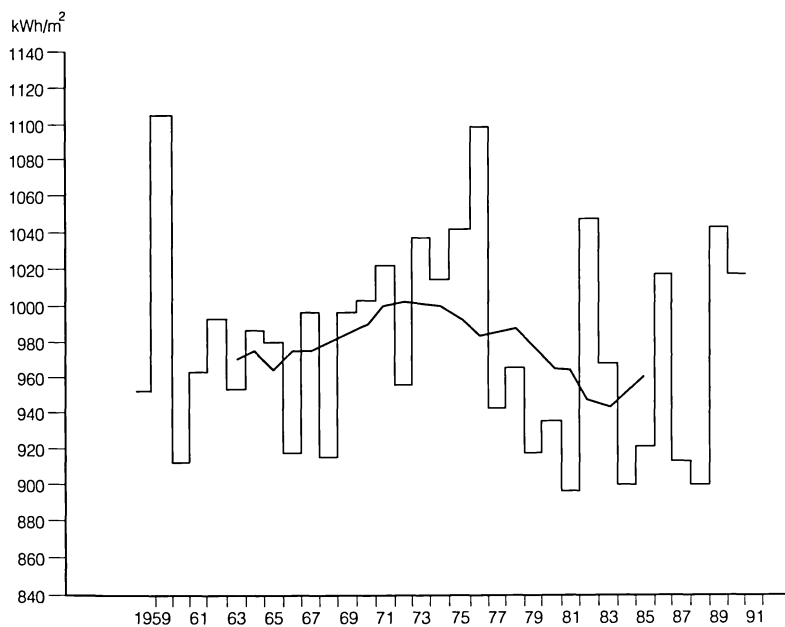
jaar	G [MJ m ⁻²]	G [kWh m ⁻²]	S [uren]	S/S _o [%]
1958	3432	953	1413	32
1959	3981	1106	1986	44
1960	3287	913	1355	30
1961	3468	963	1435	32
1962	3576	993	1398	31
1963	3434	954	1425	32
1964	3549	986	1531	34
1965	3529	980	1509	34
1966	3303	917	1319	29
1967	3586	996	1498	33
1968	3300	917	1332	30
1969	3585	996	1535	34
1970	3614	1004	1487	33
1971	3679	1022	1602	36
1972	3441	956	1496	33
1973	3735	1038	1608	36
1974	3654	1015	1528	34
1975	3752	1042	1643	37
1976	3956	1099	1814	40
1977	3395	943	1365	30
1978	3478	966	1317	29
1979	3306	918	1331	30
1980	3368	936	1427	32
1981	3231	897	1308	29
1982	3773	1048	1649	37
1983	3485	968	1551	35
1984	3242	901	1392	31
1985	3319	922	1390	31
1986	3663	1018	1550	35
1987	3287	913	1308	29
1988	3240	900	1218	27
1989	3757	1044	1719	38
1990	3661	1017	1622	36

Uit tabel 4.1 blijkt dat de jaargemiddelde dagsom van de globale straling in Nederland varieert tussen $9,57 \text{ MJ m}^{-2}$ in Eelde en $10,44 \text{ MJ m}^{-2}$ in De Kooy. Hoe groot is nu de spreiding van jaar tot jaar?

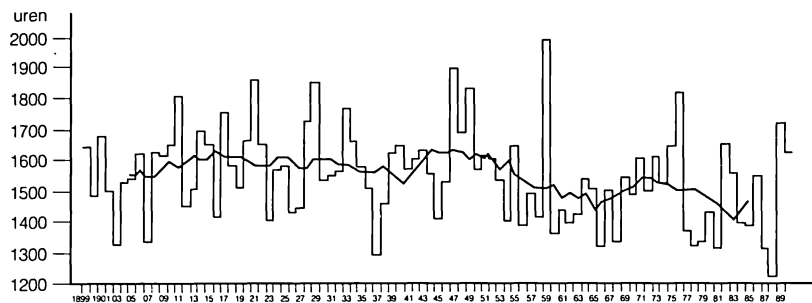
Daartoe beschouwen we de reeks jaarsommen van De Bilt, waarvan we tot nu toe 33 jaar tot onze beschikking hebben. In tabel 4.3 zijn de jaarsommen van de globale straling (G) gegeven in MJ m^{-2} en kWh m^{-2} , het aantal uren zonnenschijn (S) en het jaargemiddelde van de relatieve zonnenschijnduur (S/S_0). Onder het laatste verstaan we de tijd die de Zon heeft geschenen (S) gedeeld door de maximale tijd dat de Zon zou kunnen schijnen (S_0), dus in wezen de daglengte. We zien dat wat de straling betreft 1959 het zonnigste jaar was met 1106 kWh m^{-2} , ruim 13% hoger dan het langjarige gemiddelde. Het somberste jaar blijkt 1981 te zijn met slechts 897 kWh m^{-2} , 8% lager dan het langjarige gemiddelde. De standaardafwijking van de gemiddelde jaarsom in De Bilt bedraagt $56,5 \text{ kWh m}^{-2}$.

Ook voor het aantal uren zonnenschijn en de relatieve zonnenschijnduur geldt 1959 volgens tabel 4.3 als het zonnigste jaar met 1986 uur, dat is 44% van de tijd dat de Zon boven de horizon staat. Als het somberste jaar komt hier 1988 uit de bus met slechts 1218 uur, dat is een relatieve zonnenschijnduur van 27%.

In figuur 4.1a zijn de jaarsommen van de globale straling van 1958 t/m 1990 grafisch weergegeven. We zien daarin een grote variabiliteit van jaar tot jaar. Om na te gaan of er een trend is in de straling, zijn de lopende jaargemiddelden van een oneven (11) aantal jaren uitgezet bij het middelste (6e) jaar. Daaruit blijkt een toeneming in de jaren zestig tot halverwege de jaren zeventig, waarna de irradiantie weer afneemt.



Figuur 4.1 a. Jaarsommen van de globale straling te De Bilt in kWh m^{-2} van 1958 t/m 1990



b. Jaarsommen van de duur van de zonschijn te De Bilt in uren van 1899 t/m 1990
De gebroken lijn in de figuren 4.1a en b geeft het lopende 11-jaargemiddelde weer

Hier is de volgende waarschuwing op haar plaats. Verschillende instituten werken met stralingsbestanden van het KNMI. Daarbij wordt het decennium 1971 t/m 1980 veel gebruikt. Dit wijkt met zijn gemiddelde jaarsom van 3576 MJ m^{-2} of $993,5 \text{ kWh m}^{-2}$ meer dan 2% af van het tijdvak 1961 t/m 1970 (3494 MJ m^{-2} of $970,6 \text{ kWh m}^{-2}$) en 3% van het recente tijdvak 1981 t/m 1990 (3466 MJ m^{-2} of $962,7 \text{ kWh m}^{-2}$). Deze verschillen liggen dus niet aan fouten in de gegevensbestanden, maar hebben te maken met fluctuaties in het stralingsklimaat.

Wat de toekomst ons zal brengen valt niet te voorspellen. Wel kunnen we met behulp van de gegevens over de zonschijnduur verder terugkijken. Daarvan bestaat voor De Bilt een reeks van 1899 tot heden. De jaarsommen zijn in figuur 4.1b uitgezet met eveneens de lopende 11-jaargemiddelden. Voor het tijdvak 1963 t/m 1985 lopen deze vrijwel analoog aan de globale straling en bedragen gemiddeld ongeveer 1480 uur. Van 1904 tot 1941 schommelt de waarde rond de 1575 uur. Daarna is er een sterke stijging tot boven de 1600 uur, waarmee de jaren veertig het zonnigste decennium zijn. Vanaf 1944 neemt het aantal uren zon echter af, afgezien van de jaren zeventig. Het op twee na laatste 11-jaargemiddelde is zelfs het laagste van de hele negentigjarige reeks.

4.1.3 De dagelijkse gang in de globale straling

Een volgende stap in de detaillering van de globale straling, van jaarsom via seizoen- en maand- naar decade- en dagsom, is de verdeling van de straling over de dag. We noemen dat laatste de *dagelijkse gang*.

Alle gegevens zijn genoteerd in de Wereldtijd UT (vroeger "Greenwich tijd" genoemd). Het etmaal loopt daarbij van 0-24 uur UT. In Nederland wordt de Midden Europese Tijd (MET) gebruikt: MET = UT + 1 uur. Wanneer de zomertijd geldt hebben we Midden Europese Zomertijd (MEZT) waarvoor geldt: MEZT = UT + 2 uur (zie ook paragraaf 6.2.1).

In de tabellen betekent:

uurvak 1 = 00-01 UT = 01-02 uur MET = 02-03 uur MEZT

uurvak 2 = 01-02 UT = 02-03 uur MET = 03-04 uur MEZT

enzovoort.

We beperken ons bij de dagelijkse gang in de globale straling tot de "oude" vijf hoofdstations van het KNMI: De Bilt, De Kooy, Eelde, Vlissingen en Zuid-Limburg. In tabel 4.4 zijn voor deze stations de over vele jaren gemiddelde uurwaarden van de globale straling in W m^{-2} gegeven. Daaruit blijkt b.v. dat tussen 11 en 12 uur UT in juni te De Bilt de gemiddelde globale straling 531 W m^{-2} is; in De Kooy is dat om dezelfde tijd 611 W m^{-2} , dat is 15% meer.

Tabel 4.4 *Dagelijkse gang van de globale straling per maand voor De Bilt, De Kooy, Eelde, Vlissingen en Zuid-Limburg in Wm²*

DE BILT

uurvak	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
4	---	---	---	---	---	3	---	---	---	---	---	---
5	---	---	---	3	28	47	31	6	---	---	---	---
6	---	---	---	36	103	119	100	56	11	---	---	---
7	---	---	28	119	203	211	189	147	78	17	---	---
8	---	22	97	217	303	311	289	256	167	78	17	---
9	28	86	178	311	397	400	375	342	256	156	64	22
10	72	150	250	386	469	461	444	433	325	222	111	64
11	108	206	303	433	511	506	486	483	367	264	144	97
12	125	228	319	447	517	531	519	503	389	275	150	108
13	122	228	306	439	500	522	511	489	369	256	133	97
14	97	192	272	397	453	489	481	436	333	211	100	69
15	56	136	222	333	397	431	428	372	264	144	56	31
16	14	72	144	253	314	350	350	292	181	72	11	---
17	---	14	69	158	219	261	258	200	94	14	---	---
18	---	---	11	69	125	167	161	100	22	---	---	---
19	---	---	---	8	44	81	72	28	---	---	---	---
20	---	---	---	---	3	17	14	---	---	---	---	---

DE KOOY

uurvak	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
4	---	---	---	---	---	6	---	---	---	---	---	---
5	---	---	---	3	31	50	33	6	---	---	---	---
6	---	---	---	36	106	125	106	56	11	---	---	---
7	---	---	28	125	203	222	197	147	72	14	---	---
8	---	19	103	222	314	322	303	253	164	75	14	---
9	25	83	192	322	417	419	400	353	253	147	58	19
10	69	150	275	408	500	514	472	439	333	211	108	58
11	111	208	331	464	558	578	542	506	389	256	139	92
12	131	236	358	497	592	611	575	539	419	269	150	106
13	128	236	356	494	589	614	572	536	403	256	139	94
14	103	200	322	447	544	578	547	492	356	214	103	67
15	61	144	253	381	475	503	478	422	283	144	56	31
16	14	75	169	286	378	411	394	319	194	69	11	---
17	---	17	81	181	261	303	286	214	97	14	---	---
18	---	---	14	77	150	192	178	111	25	---	---	---
19	---	---	---	11	58	92	81	31	---	---	---	---
20	---	---	---	---	6	22	17	---	---	---	---	---

EELDE

uurvak	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
4	---	---	---	---	---	8	3	---	---	---	---	---
5	---	---	---	3	36	58	39	8	---	---	---	---
6	---	---	3	44	117	136	114	67	14	---	---	---
7	---	---	33	131	211	233	211	156	81	17	---	---
8	---	22	103	228	314	331	303	267	169	81	17	---
9	28	86	186	325	406	419	389	367	258	153	64	22
10	72	147	253	397	475	475	456	444	333	214	108	58
11	108	194	300	444	517	519	497	481	378	250	139	89
12	119	219	322	464	517	528	511	492	392	256	147	94
13	111	214	306	450	508	511	500	478	372	236	131	83
14	86	178	272	400	461	472	464	442	328	192	97	56
15	47	122	214	336	394	411	414	372	250	133	47	22
16	8	61	136	244	308	336	342	289	169	64	8	---
17	---	11	64	153	217	247	250	189	86	11	---	---
18	---	---	8	64	125	156	156	94	19	---	---	---
19	---	---	---	6	44	72	69	22	---	---	---	---
20	---	---	---	---	3	14	11	---	---	---	---	---

VLISSINGEN

uurvak	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
5	---	---	---	---	22	39	22	3	---	---	---	---
6	---	---	---	31	94	111	89	47	8	---	---	---
7	---	---	25	111	192	206	181	139	67	14	---	---
8	---	19	94	208	297	308	283	244	161	75	14	---
9	28	83	186	306	397	408	381	344	256	156	61	22
10	78	153	258	386	483	492	475	436	336	228	117	67
11	122	211	322	444	533	564	544	497	394	272	156	100
12	142	242	347	481	550	594	575	525	417	297	167	117
13	139	239	342	486	547	594	581	522	411	278	153	114
14	108	208	311	444	506	561	556	492	369	225	119	83
15	67	153	250	378	436	497	478	422	297	161	69	42
16	22	86	175	283	347	400	389	333	206	83	19	6
17	---	22	86	178	242	289	289	222	108	19	---	---
18	---	---	17	81	136	178	178	117	31	---	---	---
19	---	---	---	11	50	83	75	31	---	---	---	---
20	---	---	---	---	6	19	14	---	---	---	---	---

ZUID-LIMBURG

uurvak	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
4	---	---	---	---	---	3	---	---	---	---	---	---
5	---	---	---	3	25	42	28	6	---	---	---	---
6	---	---	---	36	100	117	100	56	11	---	---	---
7	---	---	31	117	197	208	192	147	78	19	---	---
8	3	28	103	211	297	297	286	253	175	86	22	---
9	33	97	183	306	397	392	389	350	275	167	75	31
10	83	167	256	383	475	467	472	433	347	233	125	72
11	122	219	311	431	519	514	525	489	386	286	158	106
12	139	244	344	453	542	533	539	508	414	289	161	117
13	131	239	333	447	519	519	525	489	389	269	147	108
14	103	206	286	403	475	478	483	447	344	222	111	78
15	61	147	231	333	394	408	425	375	267	150	61	36
16	19	81	150	250	303	328	339	281	183	78	14	3
17	---	17	72	156	208	233	242	186	92	14	---	---
18	---	---	11	64	117	144	147	94	22	---	---	---
19	---	---	---	6	39	67	64	22	---	---	---	---
20	---	---	---	---	3	11	8	---	---	---	---	---

Vrijwel altijd wordt de meeste straling in uurvak 12 gemeten, alleen in De Kooy (juni) en Vlissingen (april en juli) is dat in uurvak 13. Omstreeks die tijd worden ook de grootste verschillen over het land gemeten, zoals in uurvak 13 in juni: Eelde met 511 W m^{-2} tegenover De Kooy om diezelfde tijd 614 W m^{-2} . Hier komt net als in paragraaf 4.1.1 tot uiting, dat de kuststations in de zomer meer globale straling ontvangen. In april zijn de verschillen in uurvak 11 en 12 voor de Bilt, Eelde, Vlissingen en Zuid-Limburg klein, alleen de irradiantie in De Kooy is dan 6 à 8% groter.

4.1.4 De kansverdeling van de globale straling

De hierboven gegeven gemiddelde waarden van de irradiantie geven de gebruiker van stralingsgegevens een eerste oriëntatie. Vaak heeft men echter behoefte aan gegevens over de kans dat de zonneënergie boven of onder een bepaalde waarde ligt. Uit de volgende percentielen en frequentieverdelingen kan men hiervoor een schatting maken.

In tabel 4.5 zijn voor vijf meetpunten percentielen gegeven van de etmaalsommen van de globale straling, uitgesplitst naar maand, seizoen en jaar. Een *percentiel* geeft de waarde aan die met een gegeven kans niet overschreden wordt. Deze kans is in tabel 4.5 in de kolom procentpunt vermeld. Uit de tabel leest men voor De Bilt af dat in juni 5% van alle

Tabel 4.5 *Percentielen van etmaalsommen van de globale straling (tijdvak 1965-1980) in MJ m²*

station en nummer	procent-punt	JAN	FEB	MRT	APR	MEI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEC	W	L	Z	H JAAR		
DE KOOY 235	1%	0,36	0,77	1,67	2,57	4,09	5,33	4,31	2,91	1,90	1,04	0,41	0,24	0,29	2,20	4,13	0,59	0,50	
	2	0,46	0,84	1,97	2,93	4,55	6,01	4,85	4,14	2,23	1,22	0,49	0,28	0,42	2,51	4,84	0,70	0,64	
	5	0,59	1,15	2,49	4,29	6,47	7,66	6,23	6,08	3,08	1,80	0,68	0,44	0,59	3,43	6,50	1,03	0,96	
	10	0,76	1,52	3,12	5,53	8,61	9,29	8,51	8,17	4,48	2,41	0,88	0,60	0,77	4,69	8,64	1,50	1,46	
	20	1,05	2,17	4,55	8,18	12,45	13,05	11,87	11,38	6,86	3,34	1,25	0,79	1,09	7,43	11,86	2,47	2,57	
	50	1,96	4,30	9,65	14,74	19,96	21,59	19,12	16,37	11,21	6,17	2,65	1,55	2,26	13,36	18,50	5,52	8,42	
	80	3,18	6,88	12,88	19,57	25,09	26,75	24,13	20,73	14,68	8,45	4,22	2,71	4,07	20,53	24,05	10,70	18,45	
	90	3,96	8,26	14,85	21,16	26,61	27,89	26,08	22,32	16,09	9,91	5,21	3,09	5,91	23,61	26,43	13,58	22,85	
	95	4,65	9,34	16,35	22,78	27,64	29,01	27,23	23,05	17,21	10,89	5,83	3,48	7,49	25,88	27,67	15,27	25,35	
	98	5,57	10,43	17,14	23,82	28,20	29,79	28,86	24,08	18,06	11,92	6,51	3,95	9,10	27,39	29,03	16,97	27,46	
	99	5,65	10,98	17,30	24,46	28,70	30,24	29,08	24,55	18,38	12,79	6,84	4,08	9,87	28,01	29,57	17,63	28,24	
	EELDE 280	1%	0,34	0,80	1,27	2,36	3,07	4,37	4,06	3,50	2,22	1,01	0,53	0,27	0,32	1,77	4,29	0,61	0,48
		2	0,44	0,87	1,60	3,13	4,08	4,91	4,73	4,49	2,86	1,16	0,56	0,32	0,38	2,20	4,81	0,68	0,60
		5	0,56	1,19	2,10	3,96	5,96	6,22	6,34	6,41	3,54	1,39	0,67	0,42	0,51	3,10	6,36	1,00	0,88
10		0,68	1,46	2,81	4,77	7,80	8,68	8,23	7,87	4,83	2,07	0,84	0,51	0,67	4,25	8,29	1,35	1,32	
20		0,98	1,97	4,09	6,95	10,31	12,04	10,85	10,24	6,54	3,12	1,17	0,67	1,00	6,36	10,95	2,35	2,35	
50		1,76	4,07	8,07	13,40	16,76	19,06	16,74	15,66	10,43	5,66	2,50	1,34	1,97	11,79	16,95	5,33	7,86	
80		3,22	6,55	11,67	18,26	23,44	24,97	23,34	20,34	13,97	8,26	4,18	2,47	3,92	18,81	22,61	10,05	16,81	
90		3,90	8,11	13,33	20,68	25,85	27,03	25,74	21,88	15,33	9,50	5,20	3,02	5,69	22,24	25,26	12,78	21,35	
95		4,54	9,04	15,40	22,02	26,98	28,39	27,56	22,91	16,72	10,48	5,98	3,44	7,06	24,73	27,30	14,63	24,16	
98		5,28	10,48	16,77	23,79	27,93	29,53	28,34	24,11	18,00	12,28	6,76	4,06	8,73	26,85	28,58	16,48	26,81	
99		5,68	10,81	17,25	24,61	28,62	30,01	28,80	24,58	18,94	13,10	7,03	4,81	9,83	27,73	29,23	17,57	27,92	
DE BILT 260		1%	0,35	0,63	1,21	2,17	3,38	3,93	3,64	3,74	2,20	1,11	0,37	0,23	0,30	1,73	3,76	0,53	0,44
		2	0,42	0,79	1,61	2,66	4,28	4,91	4,44	4,43	2,72	1,24	0,45	0,25	0,36	2,15	4,56	0,71	0,58
		5	0,52	1,02	2,12	3,25	5,79	6,27	6,15	5,66	3,42	1,51	0,64	0,37	0,50	2,92	6,16	1,05	0,87
	10	0,65	1,43	2,83	4,77	7,73	8,33	7,46	7,86	4,58	2,26	0,87	0,50	0,67	3,94	7,80	1,47	1,35	
	20	0,93	2,00	3,77	7,03	10,50	11,53	9,95	10,10	6,66	3,21	1,28	0,71	0,96	6,14	10,37	2,36	2,49	
	50	1,82	4,14	7,60	12,72	17,30	18,17	16,26	14,91	10,38	6,02	2,44	1,47	2,22	11,67	16,40	5,43	7,76	
	80	3,37	6,70	11,43	18,35	22,99	24,41	22,29	19,49	13,70	8,74	4,42	2,88	4,07	18,84	22,06	10,25	16,42	
	90	4,07	7,94	13,54	20,04	24,79	26,48	24,19	21,34	15,12	9,95	5,29	3,45	5,66	21,80	24,32	12,81	20,67	
	95	4,64	8,96	15,32	21,48	26,53	27,76	26,57	22,48	16,35	11,21	5,93	3,86	7,17	23,88	26,47	14,42	23,41	
	98	5,46	10,28	16,10	23,12	27,42	28,71	27,61	23,60	17,61	12,17	6,66	4,21	8,81	26,35	27,81	16,01	26,19	
	99	6,02	10,91	16,55	24,17	27,72	29,13	28,02	24,10	18,19	12,60	7,09	4,44	9,89	27,24	28,60	17,08	27,26	
	VLISSINGEN 310	1%	0,43	0,71	1,55	2,89	4,26	3,72	3,48	3,73	2,57	1,16	0,56	0,32	0,42	2,01	3,68	0,71	0,58
		2	0,57	0,90	1,72	3,30	4,62	4,69	4,56	5,09	2,94	1,39	0,66	0,42	0,49	2,67	4,71	0,88	0,72
		5	0,70	1,24	2,48	4,09	6,37	6,72	5,88	6,54	3,45	1,86	0,85	0,49	0,63	3,62	6,53	1,26	1,09
10		0,85	1,63	3,45	5,26	8,84	8,60	8,03	8,27	4,65	2,40	1,06	0,59	0,83	4,87	8,29	1,73	1,63	
20		1,18	2,22	4,89	7,91	11,39	11,97	11,29	10,56	6,90	3,36	1,51	0,87	1,21	6,81	11,21	2,69	2,80	
50		2,24	4,24	8,30	13,49	18,24	20,13	18,57	16,46	11,55	6,67	2,94	1,67	2,47	12,82	17,82	5,92	8,48	
80		3,78	7,47	12,90	19,08	23,77	26,16	23,70	20,02	14,90	9,51	4,79	3,05	4,37	19,63	23,35	11,09	17,62	
90		4,47	8,68	14,58	21,02	25,58	27,54	25,60	21,63	16,19	10,63	5,66	3,74	6,30	22,71	25,77	13,93	21,94	
95		4,96	9,68	15,76	22,42	26,90	28,55	26,45	22,83	17,34	11,87	6,68	4,00	7,92	24,69	27,12	15,38	24,62	
98		5,92	10,36	17,26	23,77	27,86	28,97	27,34	23,80	18,75	12,74	7,41	4,41	9,53	26,52	28,51	17,02	26,78	
99		6,32	11,00	17,86	24,29	28,14	29,60	28,11	24,21	19,26	12,88	8,01	4,54	10,16	27,34	28,89	18,20	27,84	
ZUID-LIMB. 380		1%	0,34	0,58	1,35	1,74	2,72	3,90	3,37	2,82	2,38	0,92	0,42	0,33	0,36	1,60	3,51	0,64	0,48
		2	0,40	0,77	1,43	2,18	3,33	4,37	4,22	4,31	2,59	1,21	0,58	0,36	0,41	1,98	4,35	0,76	0,62
		5	0,50	0,95	2,06	3,08	5,19	5,54	5,88	5,66	3,85	1,87	0,73	0,44	0,52	2,94	5,82	1,19	0,96
	10	0,68	1,38	2,97	4,41	7,29	7,61	7,43	7,63	5,06	2,18	0,97	0,56	0,75	4,13	7,54	1,72	1,50	
	20	1,04	2,10	4,21	7,39	10,18	10,63	10,15	9,86	6,89	3,54	1,42	0,83	1,10	6,28	10,13	2,60	2,67	
	50	2,10	4,36	7,75	12,62	17,55	17,61	16,04	14,75	10,52	6,13	2,76	1,58	2,33	11,83	16,05	5,84	8,08	
	80	3,78	7,27	11,90	18,38	22,89	24,12	22,50	19,69	14,56	9,57	4,99	3,05	4,53	19,02	21,97	10,69	16,58	
	90	4,73	8,76	13,94	20,18	25,12	26,22	24,95	21,38	16,29	10,80	6,00	3,69	6,21	21,96	24,68	13,34	20,71	
	95	5,61	9,90	16,52	21,29	26,27	27,25	26,24	22,67	17,23	11,74	6,67	4,20	7,85	24,23	26,22	15,31	23,38	
	98	6,15	11,19	17,82	23,01	27,08	27,94	27,37	23,38	18,22	12,51	7,34	4,76	9,65	26,17	27,42	17,09	26,02	
	99	7,01	11,33	18,23	24,27	27,57	28,53	28,07	23,92	18,93	12,90	7,98	4,94	10,73	26,83	27,94	17,77	26,97	

etmaalsommen van G kleiner is dan 6,27 MJ m⁻² en 99% van alle etmaalsommen kleiner dan 29,13 MJ m⁻², anders gezegd er is in juni slechts 1% kans dat de globale etmaalsom groter is dan 29,13 MJ m⁻². Voor percentielen die niet in de tabel worden genoemd, geeft lineaire interpolatie voldoende nauwkeurige resultaten.

In hoeverre is het nu verantwoord gegevens van één station te gebruiken voor het hele land? Nauwkeurige beschouwing van de tabel laat zien, dat de spreiding over het land bij de lage procentpunten relatief groot is (10 à 16%), doch boven de mediaan (het 50%-punt) nog maar 2 à 7%. De lezer kan dus voor zichzelf uitmaken of hij alleen de tabel van De Bilt wil hanteren of geografische spreiding wenst.

Tabel 4.6 Gemiddeld aantal dagen per maand dat de etmaalsom van de globale straling te De Bilt boven een gegeven drempelwaarde ligt

drempel MJm ⁻²	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
>0	31,0	28,2	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0
2	14,9	23,1	29,4	29,9	31,0	30,0	31,0	31,0	29,8	28,2	18,1	11,6
4	4,6	15,5	24,2	28,1	30,2	29,5	30,6	30,6	27,8	22,2	7,4	1,1
6	0,6	9,7	19,8	25,8	29,0	28,7	29,8	29,5	24,8	15,6	1,6	-
8	-	4,6	15,4	22,6	26,6	26,8	27,6	27,9	20,5	8,4	-	-
10	-	1,3	10,4	19,9	24,5	24,9	25,6	25,3	15,7	3,8	-	-
12	-	0,1	5,1	16,7	21,9	22,6	22,9	21,6	11,0	1,2	-	-
14	-	-	1,9	13,3	18,9	20,7	19,9	18,1	6,2	-	-	-
16	-	-	0,8	9,9	16,1	17,9	17,2	14,2	2,5	-	-	-
18	-	-	0,2	7,3	14,1	14,6	14,6	9,5	0,8	-	-	-
20	-	-	-	4,6	11,3	11,6	11,2	5,4	0,1	-	-	-
22	-	-	-	1,5	8,2	9,5	8,1	2,1	-	-	-	-
24	-	-	-	0,3	5,5	6,6	4,9	0,7	-	-	-	-
26	-	-	-	-	3,0	4,1	2,5	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	0,8	1,5	0,9	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	0,1	0,1	-	-	-	-	-	-
extremen												
MJm ⁻²												
MIN	0,27	0,42	1,01	1,74	2,34	2,08	3,07	2,41	1,62	0,71	0,21	0,17
MAX	6,60	12,48	19,82	25,68	30,10	30,15	29,99	25,63	20,75	13,87	8,00	4,64

drempel MJm ⁻²	win	len	zom	hst	jaar
>0	30,1	30,7	30,7	30,3	30,4
2	16,5	30,1	30,7	25,4	25,7
4	7,1	27,5	30,3	19,1	21,0
6	3,4	24,8	29,3	14,0	17,9
8	1,5	21,5	27,4	9,6	15,0
10	0,4	18,3	25,3	6,5	12,6
12	-	14,6	22,4	4,1	10,3

drempel MJm ⁻²	win	len	zom	hst	jaar
14	-	11,4	19,6	2,1	8,3
16	-	8,9	16,5	0,8	6,6
18	-	7,2	12,9	0,3	5,1
20	-	5,3	9,4	-	3,7
22	-	3,3	6,5	-	2,4
24	-	1,9	4,1	-	1,5
26	-	1,0	2,2	-	0,8
28	-	0,3	0,8	-	0,3
30	-	-	-	-	-

Wil men voor een bepaalde etmaalsom van de globale straling weten, op hoeveel dagen die gemiddeld wordt bereikt of overschreden, dan geeft tabel 4.6 uitkomst. Hierin is voor De Bilt per maand, seizoen en jaar aangegeven het gemiddelde aantal dagen waarin de etmaalsom G een drempelwaarde 0, 2, 4, ..., 30 MJ m⁻² overschrijdt. Het blijkt dat in augustus de drempelwaarde van 18 MJ m⁻² op 9,5 dagen wordt overschreden en in april op 7,3 dagen. In de tabel zijn tevens de minimale en maximale etmaalsommen per maand opgenomen, die ooit zijn gemeten.

Vanwege de plaatsruimte zijn hier alleen de gegevens van De Bilt gegeven. Voor andere delen van het land zijn verschillen tot 30% te verwachten. Zo wordt de 18 MJ m⁻² etmaalsom in Vlissingen in augustus op 12,3 dagen overschreden en in Eelde op 10,6 dagen. Gegevens van andere stations dan De Bilt zijn op aanvraag bij de Klimatologische Dienst van het KNMI verkrijgbaar.

Wanneer voor berekeningen uursommen nodig zijn kan gebruik worden gemaakt van tabel 4.7. Hierin staan, per decade, voor de 14 drempelwaarden 0,01, 0,05, 0,1, ..., 3 MJ m⁻² de

Tabel 4.7 Percentage van de uurvakken waarvoor de uursom van de globale straling te De Bilt boven een gegeven drempelwaarde ligt

drempel → MJm ⁻²	0,01	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Wm ⁻²	2,8	13,9	27,8	41,7	55,6	83,3	111	167	222	278	417	556	694	833
DECADE														
JAN I	32,9	26,2	21,1	17,1	13,3	9,2	6,1	3,0	1,0	-	-	-	-	-
II	33,1	29,5	23,4	19,8	16,6	12,8	9,8	5,5	2,3	0,2	-	-	-	-
III	35,0	30,6	25,9	21,5	18,1	13,0	10,0	6,0	3,1	1,4	-	-	-	-
FEB I	39,9	32,7	29,1	25,8	23,0	17,9	14,3	9,8	6,3	3,8	-	-	-	-
II	41,4	37,9	33,6	29,9	27,6	24,0	20,4	14,4	10,2	7,2	0,8	-	-	-
III	42,6	39,6	37,1	34,0	30,9	26,0	22,4	17,2	13,1	9,8	2,7	-	-	-
MRT I	47,2	41,8	38,5	36,0	33,3	29,0	24,8	19,3	15,7	12,0	4,8	0,1	-	-
II	49,5	44,9	41,0	38,3	35,4	31,1	26,9	21,2	16,8	12,9	5,5	0,6	-	-
III	51,8	48,2	44,9	41,8	39,2	35,2	30,8	24,4	19,6	15,3	7,9	2,5	0,1	-
APR I	54,4	51,0	48,1	45,2	43,0	38,7	34,7	28,3	23,0	18,6	9,7	4,5	0,7	-
II	58,4	53,3	51,3	49,2	46,9	42,7	39,4	33,4	28,7	24,9	15,5	8,2	2,5	-
III	61,1	56,3	52,8	50,7	48,8	45,5	41,6	35,5	30,0	26,3	17,6	10,4	4,0	0,1

DECADE

MEI	I	62,1	59,0	55,3	52,1	49,7	46,2	42,6	35,5	30,0	26,1	17,4	10,2	4,4	0,3
	II	64,3	61,2	58,8	56,6	53,8	48,9	46,3	40,3	35,1	31,8	21,8	14,0	7,1	1,2
	III	67,4	61,6	58,8	56,8	54,8	50,0	45,5	40,2	34,3	29,4	19,8	12,3	5,9	1,5
JUN	I	69,1	64,1	59,8	58,0	55,9	51,3	46,7	40,7	35,5	30,7	21,7	13,5	6,8	1,3
	II	69,4	64,9	60,5	58,7	56,7	52,5	48,3	41,5	36,0	31,4	21,6	12,8	6,5	1,2
	III	69,4	64,6	61,1	57,8	55,9	51,5	47,6	41,1	35,3	30,5	20,4	12,0	5,6	1,1
JUL	I	68,8	64,7	60,2	58,4	56,4	52,6	49,2	42,9	38,1	33,1	23,5	15,1	8,3	1,4
	II	67,1	63,7	59,4	57,5	55,0	51,3	47,2	40,9	35,3	30,2	19,5	10,6	4,5	0,6
	III	66,3	61,0	58,1	55,2	53,1	49,0	44,7	37,9	32,2	27,2	17,1	9,7	3,3	-
AUG	I	63,8	59,4	56,5	54,6	52,3	48,2	44,5	38,7	32,6	27,7	17,5	9,7	3,2	-
	II	61,1	57,2	54,7	52,4	50,0	46,9	43,4	37,9	32,6	28,4	18,4	10,7	3,1	-
	III	58,8	54,8	52,3	50,1	48,4	45,1	41,3	36,1	31,6	27,0	16,4	8,2	1,6	-
SEP	I	55,4	52,3	49,6	47,1	44,7	40,8	37,9	31,6	26,3	22,4	12,7	5,1	0,2	-
	II	53,5	49,6	45,6	43,3	41,2	37,3	33,9	27,9	23,2	18,9	9,6	2,5	-	-
	III	51,3	45,6	43,6	41,3	39,4	34,9	30,8	25,3	20,1	15,4	6,9	0,9	-	-
OKT	I	45,7	43,8	40,7	37,5	34,5	30,1	26,7	21,6	17,1	13,5	5,4	0,2	-	-
	II	45,2	40,6	36,2	33,5	31,6	27,8	24,2	17,5	13,4	9,0	2,4	-	-	-
	III	42,0	36,7	33,8	31,1	28,1	24,1	20,0	14,6	10,2	6,8	0,6	-	-	-
NOV	I	37,8	34,6	30,3	25,9	22,8	18,4	14,6	9,5	6,2	3,0	-	-	-	-
	II	36,7	31,3	26,2	22,7	19,5	15,3	11,3	6,4	3,6	1,4	-	-	-	-
	III	35,5	27,9	22,8	19,2	15,9	11,3	8,0	3,9	1,7	0,2	-	-	-	-
DEC	I	32,9	27,1	22,1	19,0	15,9	11,3	8,6	4,1	1,2	-	-	-	-	-
	II	29,0	25,9	20,4	16,3	12,4	8,3	5,8	2,6	0,6	-	-	-	-	-
	III	32,3	25,5	19,5	15,1	11,9	7,9	5,6	2,4	0,5	-	-	-	-	-

overschrijdingskansen (uitgedrukt in procenten) van de uursommen. De overschrijdingskans van de laagste drempel $0,01 \text{ MJ m}^{-2}$, varieert van ongeveer 33% in december tot 70% in juni, hetgeen samenhangt met het feit dat de dag in december maar 8 uur duurt en in juni ruim 16 uur. Door de kansen in de tabel met 24 te vermenigvuldigen krijgt men dus het aantal uren dat een bepaalde drempelwaarde wordt overschreden. Zo blijkt in De Bilt tussen 20 en 30 juni 20,4% van de uurwaarden, dat zijn 4,9 uren per etmaal, de globale straling groter te zijn dan $1,5 \text{ MJ m}^{-2}$ of 417 Wm^{-2} .

Tabel 4.8 Gemiddeld aantal uren per etmaal dat de uursom van de globale straling gelijk is aan nul of binnen een gegeven interval ligt, en grootste uurwaarde ooit in De Bilt gemeten

interval MJm ⁻²	Wm ⁻²	JAN	FEB	MRT	APR	MEI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEC
NUL		15,9	14,1	12,1	10,1	8,5	7,4	7,8	9,3	11,2	13,4	15,2	16,4
0-0,2	0- 56	4,4	3,5	3,3	2,9	3,0	3,2	3,1	2,7	2,9	3,2	4,2	4,5
0,2-0,4	56-111	1,7	1,9	2,0	1,8	1,9	2,1	1,8	1,7	1,8	1,9	1,9	1,5
0,4-0,6	111-167	0,9	1,3	1,4	1,5	1,4	1,5	1,6	1,3	1,4	1,4	1,1	0,8
0,6-0,8	167-222	0,6	0,9	1,0	1,2	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,0	0,6	0,5
0,8-1	222-278	0,4	0,7	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,1	1,0	0,9	0,5	0,2
1-1,2	278-333	0,1	0,6	0,8	0,9	1,0	0,9	1,0	1,1	0,9	0,8	0,3	-
1,2-1,4	333-389	-	0,5	0,7	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	0,6	0,1	-
1,4-1,6	389-444	-	0,3	0,6	0,8	0,7	0,9	0,9	0,9	0,8	0,5	-	-
1,6-1,8	444-500	-	0,1	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7	0,3	-	-
1,8-2	500-555	-	-	0,4	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7	0,6	0,1	-	-
2-2,2	555-611	-	-	0,2	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,4	-	-	-
2,2-2,4	611-667	-	-	0,1	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,2	-	-	-
2,4-2,6	667-722	-	-	-	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	0,1	-	-	-
2,6-2,8	722-778	-	-	-	0,3	0,5	0,5	0,5	0,3	-	-	-	-
2,8-3	778-833	-	-	-	0,1	0,4	0,4	0,3	0,1	-	-	-	-
3-3,2	833-889	-	-	-	-	0,2	0,2	0,1	-	-	-	-	-
maxima MJm ⁻²		1,26	1,91	2,60	3,03	3,30	3,30	3,26	3,06	2,74	2,15	1,42	1,04
Wm ⁻²		350	531	722	842	917	917	906	850	761	597	394	289

interval MJm ⁻²	Wm ⁻²	WIN	LEN	ZOM	HST	JAAR
NUL		15,5	10,2	8,2	13,3	11,8
0-0,2	0- 56	4,2	3,1	3,0	3,4	3,4
0,2-0,4	56-111	1,7	1,9	1,9	1,9	1,8
0,4-0,6	111-167	1,0	1,5	1,5	1,3	1,3
0,6-0,8	167-222	0,7	1,2	1,3	0,9	1,0
0,8-1	222-278	0,4	0,9	1,1	0,8	0,8
1-1,2	278-333	0,2	0,9	1,0	0,7	0,7
1,2-1,4	333-389	0,2	0,8	1,0	0,5	0,6
1,4-1,6	389-444	0,1	0,7	0,9	0,4	0,5
1,6-1,8	444-500	-	0,6	0,8	0,3	0,4
1,8-2	500-555	-	0,6	0,7	0,2	0,4
2-2,2	555-611	-	0,4	0,7	0,1	0,3
2,2-2,4	611-667	-	0,4	0,6	0,1	0,3
2,4-2,6	667-722	-	0,3	0,5	-	0,2
2,6-2,8	722-778	-	0,2	0,4	-	0,2
2,8-3	778-833	-	0,2	0,3	-	0,1
3-3,2	833-889	-	0,1	0,1	-	-

In tabel 4.8 zijn de gegevens over de uursommen enigszins anders weergegeven. Daarin staat voor De Bilt het gemiddelde aantal uren per etmaal dat de globale straling in een bepaald interval ligt, nl. tussen 0 en 0,2, tussen 0,2 en 0,4, enz. tot tussen 3,0 en 3,2 MJ m². Dit alles is opgesplitst per maand, seizoen en jaar. Tevens zijn het aantal uren dat de globale straling 0 is (de nachturen) en de maximale uursommen gegeven. De Bilt heeft in de winter gemiddeld één uur per etmaal met een globale straling tussen 0,4 en 0,6 MJ m². De grootste uursom ooit gemeten in De Bilt is 3,3 MJ m² of 917 W m².

In de tabellen 4.7 en 4.8 waren de overschrijdingskansen van de uurwaarden gegeven onafhankelijk van het tijdstip van de dag. We weten dan niet, hoe laat het ene uur met een G tussen 0,4 en 0,6 MJ m² uit de vorige alinea optreedt. Daartoe moeten we de gegevens ook nog uitsplitsen naar uren van de dag.

Tabel 4.9 *Percentielen van de uursommen in MJm² van de globale straling te De Bilt voor verschillende uurvakken van de dag*

uurvak	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
JANUARI																		
MAX	0	0	0	0	0,02	0,37	0,82	1,09	1,26	1,23	1,06	0,72	0,28	0	0	0	0	0
G95	0	0	0	0	0,02	0,27	0,61	0,90	1,00	0,99	0,79	0,50	0,19	0	0	0	0	0
G75	0	0	0	0	0	0,14	0,40	0,59	0,69	0,67	0,54	0,30	0,09	0	0	0	0	0
G50	0	0	0	0	0	0,08	0,20	0,32	0,37	0,36	0,27	0,17	0,06	0	0	0	0	0
GEM	0	0	0	0	0	0,10	0,26	0,39	0,45	0,44	0,35	0,20	0,05	0	0	0	0	0
G25	0	0	0	0	0	0,04	0,11	0,17	0,19	0,18	0,14	0,07	0,03	0	0	0	0	0
G05	0	0	0	0	0	0,01	0,02	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02	0,01	0	0	0	0	0
MIN	0	0	0	0	0	0	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	0	0	0	0	0	0
FEBRUARI																		
MAX	0	0	0	0,02	0,42	0,99	1,44	1,76	1,91	1,89	1,69	1,33	0,83	0,25	0	0	0	0
G95	0	0	0	0,01	0,29	0,79	1,20	1,49	1,59	1,59	1,43	1,07	0,63	0,19	0	0	0	0
G75	0	0	0	0	0,11	0,45	0,80	1,10	1,26	1,24	1,05	0,74	0,39	0,10	0	0	0	0
G50	0	0	0	0	0,07	0,25	0,47	0,69	0,73	0,80	0,63	0,43	0,21	0,06	0	0	0	0
GEM	0	0	0	0	0,08	0,31	0,54	0,74	0,82	0,82	0,69	0,49	0,26	0,05	0	0	0	0
G25	0	0	0	0	0,03	0,12	0,24	0,35	0,39	0,38	0,31	0,22	0,09	0,03	0	0	0	0
G05	0	0	0	0	0,03	0,11	0,14	0,15	0,14	0,12	0,05	0,02	0	0	0	0	0	0
MIN	0	0	0	0	0	0,05	0,07	0,06	0,06	0,04	0,03	0,01	0	0	0	0	0	0
MAART																		
MAX	0	0	0,05	0,54	1,20	1,72	2,22	2,48	2,60	2,53	2,29	1,91	1,38	0,82	0,22	0	0	0
G95	0	0	0,04	0,30	0,84	1,36	1,75	2,03	2,10	2,07	1,92	1,58	1,08	0,57	0,17	0	0	0
G75	0	0	0	0,15	0,50	0,96	1,37	1,64	1,71	1,68	1,49	1,19	0,77	0,37	0,09	0	0	0
G50	0	0	0	0,08	0,31	0,57	0,88	1,06	1,13	1,06	0,97	0,80	0,50	0,23	0,05	0	0	0
GEM	0	0	0	0,10	0,35	0,64	0,90	1,09	1,15	1,10	0,98	0,80	0,52	0,25	0,04	0	0	0
G25	0	0	0	0,03	0,14	0,29	0,41	0,53	0,57	0,55	0,46	0,37	0,24	0,10	0,02	0	0	0
G05	0	0	0	0	0,03	0,07	0,17	0,21	0,23	0,22	0,17	0,13	0,04	0,02	0	0	0	0
MIN	0	0	0	0	0,02	0,03	0,02	0,07	0,13	0,06	0,07	0,05	0,04	0,01	0	0	0	0
APRIL																		
MAX	0	0,07	0,51	1,11	1,69	2,26	2,65	2,99	3,03	2,95	2,82	2,39	1,85	1,30	0,69	0,13	0	0
G95	0	0,06	0,37	0,91	1,47	2,00	2,43	2,69	2,80	2,72	2,53	2,14	1,63	1,09	0,54	0,10	0	0
G75	0	0,01	0,21	0,65	1,18	1,67	2,08	2,28	2,32	2,31	2,09	1,73	1,32	0,80	0,35	0,07	0	0
G50	0	0	0,10	0,39	0,76	1,12	1,42	1,57	1,60	1,61	1,44	1,22	0,94	0,56	0,23	0,03	0	0
GEM	0	0,01	0,13	0,43	0,78	1,12	1,39	1,56	1,61	1,58	1,43	1,20	0,91	0,57	0,25	0,03	0	0
G25	0	0	0,05	0,18	0,39	0,55	0,73	0,86	0,89	0,88	0,80	0,67	0,51	0,32	0,12	0	0	0
G05	0	0	0	0,03	0,13	0,22	0,30	0,34	0,35	0,32	0,27	0,22	0,17	0,06	0,03	0	0	0
MIN	0	0	0	0,02	0,06	0,08	0,16	0,13	0,17	0,17	0,12	0,10	0,08	0,02	0	0	0	0

uurvak	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
MEI																			
MAX	0,01	0,35	0,89	1,46	2,03	2,53	2,95	3,19	3,30	3,24	3,00	2,65	2,20	1,60	1,09	0,49	0,05	0	
G95	0,01	0,27	0,75	1,31	1,88	2,37	2,76	3,03	3,11	3,05	2,82	2,44	1,96	1,40	0,86	0,37	0,05	0	
G75	0	0,16	0,55	1,09	1,64	2,11	2,48	2,65	2,71	2,57	2,36	2,08	1,67	1,16	0,65	0,25	0,03	0	
G50	0	0,09	0,36	0,75	1,09	1,53	1,86	1,95	1,87	1,62	1,47	1,19	0,79	0,45	0,15	0	0	0	
GEM	0	0,10	0,37	0,73	1,09	1,43	1,69	1,84	1,86	1,80	1,63	1,43	1,13	0,79	0,45	0,16	0,01	0	
G25	0	0,04	0,17	0,35	0,57	0,82	0,94	1,07	1,06	1,06	0,91	0,77	0,61	0,42	0,23	0,08	0	0	
G05	0	0,01	0,03	0,12	0,21	0,27	0,32	0,37	0,39	0,39	0,37	0,33	0,23	0,13	0,05	0,02	0	0	
MIN	0	0	0,02	0,03	0,05	0,09	0,14	0,09	0,10	0,08	0,06	0,07	0,09	0,01	0,01	0	0	0	
JUNI																			
MAX	0,03	0,41	0,97	1,55	2,12	2,62	3,00	3,26	3,28	3,30	3,13	2,78	2,35	1,80	1,17	0,60	0,10	0	
G95	0,03	0,34	0,82	1,36	1,89	2,39	2,78	3,04	3,15	3,08	2,87	2,55	2,08	1,59	1,02	0,50	0,10	0	
G75	0,02	0,25	0,64	1,14	1,65	2,11	2,46	2,64	2,76	2,67	2,46	2,17	1,78	1,31	0,86	0,40	0,08	0	
G50	0,01	0,16	0,41	0,77	1,16	1,52	1,73	1,88	1,95	1,91	1,84	1,67	1,34	1,01	0,64	0,30	0,05	0	
GEM	0,01	0,17	0,43	0,76	1,12	1,44	1,66	1,82	1,91	1,88	1,76	1,55	1,26	0,94	0,60	0,29	0,06	0	
G25	0	0,08	0,23	0,39	0,60	0,79	0,93	1,04	1,15	1,15	1,05	0,92	0,73	0,51	0,32	0,16	0,03	0	
G05	0	0,02	0,05	0,15	0,23	0,31	0,35	0,38	0,46	0,47	0,38	0,33	0,26	0,16	0,11	0,04	0,01	0	
MIN	0	0	0,02	0,04	0,07	0,10	0,16	0,14	0,15	0,16	0,13	0,07	0,11	0,01	0,03	0	0	0	
JULI																			
MAX	0,02	0,39	0,90	1,45	2,09	2,49	2,96	3,20	3,26	3,24	3,11	2,76	2,29	1,73	1,20	0,63	0,10	0	
G95	0,02	0,27	0,73	1,28	1,80	2,30	2,67	2,96	3,07	3,01	2,84	2,50	2,06	1,54	0,99	0,48	0,10	0	
G75	0	0,17	0,52	1,02	1,50	1,96	2,29	2,51	2,63	2,59	2,43	2,16	1,77	1,31	0,82	0,37	0,08	0	
G50	0	0,10	0,34	0,65	1,10	1,38	1,63	1,79	1,94	1,90	1,77	1,63	1,31	0,98	0,60	0,26	0,05	0	
GEM	0	0,11	0,36	0,68	1,04	1,35	1,60	1,75	1,87	1,84	1,73	1,54	1,26	0,93	0,58	0,26	0,05	0	
G25	0	0,05	0,17	0,34	0,55	0,74	0,91	0,99	1,14	1,14	1,04	0,95	0,76	0,55	0,35	0,15	0,03	0	
G05	0	0,01	0,05	0,12	0,21	0,32	0,42	0,42	0,44	0,45	0,41	0,35	0,26	0,22	0,12	0,04	0,01	0	
MIN	0	0	0,01	0,02	0,07	0,07	0,02	0,08	0,12	0,12	0,18	0,08	0,10	0,02	0,04	0	0	0	
AUGUSTUS																			
MAX	0	0,13	0,58	1,14	1,73	2,21	2,54	3,00	3,06	2,95	2,81	2,44	1,95	1,44	0,94	0,39	0,01	0	
G95	0	0,10	0,45	0,96	1,52	1,99	2,40	2,69	2,80	2,76	2,54	2,17	1,75	1,24	0,69	0,26	0,01	0	
G75	0	0,06	0,29	0,75	1,27	1,70	2,15	2,36	2,46	2,37	2,15	1,83	1,44	0,99	0,50	0,15	0	0	
G50	0	0,02	0,19	0,54	0,98	1,34	1,69	1,87	1,96	1,83	1,63	1,40	1,08	0,73	0,35	0,08	0	0	
GEM	0	0,02	0,20	0,53	0,92	1,23	1,56	1,74	1,81	1,76	1,57	1,34	1,05	0,72	0,36	0,10	0	0	
G25	0	0	0,10	0,32	0,55	0,78	1,02	1,17	1,15	1,21	1,06	0,92	0,68	0,46	0,21	0,04	0	0	
G05	0	0	0,02	0,11	0,23	0,32	0,43	0,43	0,45	0,47	0,42	0,34	0,25	0,16	0,06	0,01	0	0	
MIN	0	0	0	0,02	0,05	0,13	0,17	0,12	0,14	0,13	0,08	0,07	0,07	0,03	0,01	0	0	0	
SEPTEMBER																			
MAX	0	0	0,21	0,83	1,47	1,90	2,23	2,52	2,68	2,74	2,30	2,10	1,62	0,92	0,36	0,02	0	0	
G95	0	0	0,16	0,60	1,15	1,63	2,00	2,25	2,37	2,30	2,07	1,73	1,25	0,73	0,27	0,02	0	0	
G75	0	0	0,08	0,40	0,87	1,31	1,67	1,88	1,95	1,86	1,66	1,32	0,89	0,48	0,13	0	0	0	
G50	0	0	0,04	0,25	0,58	0,92	1,23	1,39	1,46	1,35	1,24	0,98	0,63	0,30	0,07	0	0	0	
GEM	0	0	0,04	0,28	0,60	0,92	1,17	1,32	1,40	1,33	1,20	0,95	0,65	0,34	0,08	0	0	0	
G25	0	0	0	0,13	0,30	0,50	0,65	0,76	0,85	0,86	0,75	0,58	0,37	0,18	0,04	0	0	0	
G05	0	0	0	0,03	0,12	0,20	0,26	0,27	0,33	0,28	0,26	0,18	0,12	0,04	0	0	0	0	
MIN	0	0	0	0	0,04	0,07	0,08	0,07	0,12	0,13	0,09	0,08	0,04	0,02	0	0	0	0	
OKTOBER																			
MAX	0	0	0	0,32	0,87	1,37	1,78	2,15	2,13	1,99	1,85	1,33	0,86	0,33	0	0	0	0	
G95	0	0	0	0,21	0,67	1,14	1,54	1,77	1,84	1,73	1,48	1,08	0,63	0,20	0	0	0	0	
G75	0	0	0	0,09	0,40	0,81	1,16	1,36	1,44	1,35	1,10	0,76	0,37	0,09	0	0	0	0	
G50	0	0	0	0,06	0,25	0,54	0,79	0,94	0,98	0,89	0,76	0,48	0,22	0,05	0	0	0	0	
GEM	0	0	0	0,06	0,28	0,56	0,80	0,95	0,99	0,92	0,76	0,52	0,26	0,05	0	0	0	0	
G25	0	0	0	0,02	0,12	0,28	0,39	0,51	0,51	0,51	0,38	0,26	0,11	0,01	0	0	0	0	
G05	0	0	0	0	0,03	0,06	0,14	0,18	0,20	0,17	0,13	0,05	0,03	0	0	0	0	0	
MIN	0	0	0	0	0,01	0,04	0,06	0,06	0,07	0	0,03	0,04	0	0	0	0	0	0	

uurvak	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
NOVEMBER																		
MAX	0	0	0	0,01	0,31	0,77	1,12	1,39	1,42	1,39	1,00	0,61	0,22	0	0	0	0	0
G95	0	0	0	0	0,20	0,59	0,93	1,14	1,20	1,08	0,84	0,49	0,15	0	0	0	0	0
G75	0	0	0	0	0,09	0,34	0,60	0,80	0,83	0,74	0,54	0,29	0,09	0	0	0	0	0
G50	0	0	0	0	0,06	0,19	0,33	0,43	0,46	0,40	0,30	0,16	0,06	0	0	0	0	0
GEM	0	0	0	0	0,06	0,23	0,40	0,52	0,54	0,48	0,36	0,20	0,04	0	0	0	0	0
G25	0	0	0	0	0,02	0,10	0,17	0,23	0,25	0,21	0,15	0,08	0,03	0	0	0	0	0
G05	0	0	0	0	0	0,02	0,04	0,06	0,05	0,05	0,03	0,02	0	0	0	0	0	0
MIN	0	0	0	0	0	0	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0	0	0	0	0	0	0
DECEMBER																		
MAX	0	0	0	0	0,02	0,34	0,70	0,86	1,04	0,91	0,65	0,31	0,01	0	0	0	0	0
G95	0	0	0	0	0,01	0,24	0,54	0,78	0,88	0,79	0,57	0,28	0,01	0	0	0	0	0
G75	0	0	0	0	0	0,13	0,35	0,54	0,60	0,55	0,37	0,18	0,01	0	0	0	0	0
G50	0	0	0	0	0	0,08	0,17	0,28	0,32	0,29	0,19	0,09	0	0	0	0	0	0
GEM	0	0	0	0	0	0,08	0,23	0,35	0,39	0,35	0,25	0,11	0	0	0	0	0	0
G25	0	0	0	0	0	0,04	0,08	0,15	0,17	0,15	0,08	0,05	0	0	0	0	0	0
G05	0	0	0	0	0	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	0	0	0	0	0	0
MIN	0	0	0	0	0	0	0,03	0,03	0,03	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 4.9 geeft per maand voor ieder uurvak van de dag de 5, 25, 50, 75 en 95 procentpunten van de verdeling, benevens de maximale, gemiddelde en minimale waarde. In deze tabel betekent uurvak 4: 03-04 UT = 04-05 MET = 05-06 MEZT net als in tabel 4.4. De tabel toont b.v. aan dat in augustus in uurvak 12, dus tussen 13 en 14 uur MEZT het 75%-punt 2,46 MJ m⁻² is; d.w.z. in 75% van de uren wordt deze waarde niet overschreden, in 25% van de dagen kunnen we in augustus tussen 13 en 14 uur zomertijd meer dan 2,46 MJ m⁻² of 683 Wm⁻² verwachten.

4.1.5 Runlengten

In dit deel komen tenslotte runlengten van de globale straling in De Bilt aan de orde. Onder *runlengte* wordt verstaan een serie van opeenvolgende dagen, die aan een gesteld criterium voldoen, voorafgegaan en gevolgd door één of meer dagen, die niet aan het criterium voldoen. Als criterium wordt hier een bepaalde waarde van de dagsom G in MJ m⁻² genomen. Dit geeft dan antwoord op de vraag: hoe vaak komt het voor dat een aantal opeenvolgende dagen (runs) een dagsom G boven een bepaalde drempelwaarde heeft.

Hiertoe zijn de meetgegevens van het tijdvak 1966 t/m 1985 bewerkt. Voor elke maand uit dit 20-jarig tijdvak is voor 30 drempelwaarden (1 t/m 30 MJ m⁻²) de langste run uitgezocht. De lengten van deze runs zijn daarna gemiddeld over de 20 jaar om zo de gemiddelde langste run te bepalen.

Runs kunnen aan het eind van een maand beginnen en doorlopen in de volgende maand. Met deze runs is hier geen rekening gehouden, hetgeen betekent dat de waarden in werkelijk-

Tabel 4.10 Gemiddelde langste runlengten van etmaalsommen van de globale straling te De Bilt boven gegeven drempelwaarden in MJm⁻²

drempel- waarde MJm ⁻²	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
1	10	24	31	30	31	30	31	31	30	29	15	7
2	5	13	24	30	31	30	31	31	29	19	7	4
3	3	8	18	25	29	29	31	30	24	12	4	2
4	2	6	13	21	27	27	28	29	17	9	3	1

drempel- waarde MJm ⁻²	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
5	1	5	10	19	24	26	27	25	14	6	2	0
6	0	4	8	16	24	24	25	21	12	5	1	0
7	0	3	6	13	20	22	20	20	10	4	1	0
8	0	2	5	12	16	18	18	17	9	3	0	0
9	0	1	5	11	14	16	16	16	7	2	0	0
10	0	1	4	10	12	14	15	14	6	2	0	0
11	0	0	4	9	10	13	13	12	5	1	0	0
12	0	0	3	8	9	11	11	10	4	1	0	0
13	0	0	2	7	9	11	11	9	3	0	0	0
14	0	0	2	6	7	10	10	8	3	0	0	0
15	0	0	1	5	7	10	9	7	2	0	0	0
16	0	0	1	5	6	9	8	7	2	0	0	0
17	0	0	0	4	6	8	7	6	1	0	0	0
18	0	0	0	4	5	7	6	5	1	0	0	0
19	0	0	0	3	5	6	5	4	0	0	0	0
20	0	0	0	3	4	5	4	3	0	0	0	0
21	0	0	0	2	4	5	4	2	0	0	0	0
22	0	0	0	1	3	4	3	1	0	0	0	0
23	0	0	0	1	3	4	3	1	0	0	0	0
24	0	0	0	0	2	3	2	1	0	0	0	0
25	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

heid iets later zullen zijn dan die in tabel 4.10 zijn gegeven. In deze tabel zijn de gemiddelde langste runs uitgesplitst naar maand. We lezen in tabel 4.10 bijvoorbeeld af, dat in juni een etmaalsom van 11 MJ m⁻² gemiddeld op 13 achtereenvolgende dagen is bereikt, een etmaalsom van 20 MJ m⁻² slechts op 5 achtereenvolgende dagen. Etmaalsommen van 27 MJ m⁻² kwamen slechts op losse dagen voor, daarvoor is de runlengte 1.

4.2 Directe en diffuse straling

Van de directe (B) en de diffuse (D) straling zijn veel minder meetgegevens beschikbaar dan van de globale straling (G). De directe straling op het horizontale vlak is in De Bilt gemeten van 1 januari 1971 t/m 31 december 1980 en van 1 mei 1986 tot heden. De diffuse straling wordt in De Bilt gemeten sinds mei 1986.

Voor De Kooy, Eelde, Vlissingen en Zuid-Limburg zijn de uursommen van de directe straling berekend met de formule van De Jong (1980), zie paragraaf 5.1, formule 5.24. Deze formule is door Raaff op basis van gemeten waarden van de directe straling aangepast tot

$$B/G = 0$$

$$G/G_0 \leq 0,22$$

$$B/G = 6,4 (G/G_0 - 0,22)^2$$

$$0,22 < G/G_0 \leq 0,35$$

$$\begin{aligned}
 B/G &= 1,66 G/G_0 - 0,47 & 0,35 < G/G_0 \leq 0,80 \\
 B/G &= 0,86 & G/G_0 > 0,80
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

De gegevens van de diffuse straling die in deze paragraaf aan de orde komen, zijn verkregen als het verschil tussen globale straling en directe straling. De korte reeks van gemeten diffuse straling in De Bilt heeft daarbij als controlereeks gefungeerd.

4.2.1 De jaarlijkse gang

Tabel 4.11 geeft de resultaten van de jaarlijkse gang in de directe straling en tabel 4.12 van de diffuse straling. In het bovenste deel van beide tabellen staan de dagsommen per decade in MJ m⁻², waarbij geldt

de eerste decade I is dag 1 t/m dag 10 van de maand,

de tweede decade II is dag 11 t/m dag 20,

de derde decade III is dag 21 t/m de laatste dag van de maand.

Tabel 4.11 Gemiddelde dagsommen van de directe straling per decade, maand, seizoen en jaar in MJ m⁻². De Bilt gemeten, andere stations berekend (zie tekst)

	De Bilt	De Kooy	Eelde	Vlissingen Zuid-Limburg	
JAN I	0,40	0,42	0,39	0,47	0,55
II	0,70	0,73	0,61	0,81	0,82
III	0,73	0,87	0,68	0,96	0,80
FEB I	1,13	1,35	1,11	1,25	1,27
II	1,71	2,03	1,70	2,05	2,18
III	2,42	2,60	2,33	2,60	2,87
MRT I	3,53	3,37	2,86	3,21	3,04
II	3,43	3,74	2,72	3,07	2,81
III	4,24	4,90	3,51	4,22	3,72
APR I	4,47	5,31	4,23	5,16	4,19
II	7,16	7,38	6,41	7,00	6,44
III	7,70	8,49	7,44	7,39	6,59
MEI I	6,52	8,35	6,92	7,28	6,37
II	8,96	11,18	9,03	9,65	8,42
III	7,94	10,47	7,93	8,35	7,96
JUN I	7,55	10,25	8,02	9,21	7,53
II	7,45	10,61	7,88	10,32	7,19
III	6,74	9,89	7,42	9,30	6,80
JUL I	9,28	10,82	9,18	10,77	8,95
II	6,46	8,69	6,79	8,09	6,61
III	5,90	7,48	5,93	7,43	6,21
AUG I	6,06	7,84	6,50	7,63	6,61
II	6,53	8,09	6,95	7,02	6,22
III	6,02	6,65	6,20	6,86	5,62
SEP I	4,88	5,57	4,74	5,64	5,10
II	3,91	4,45	3,85	4,34	3,87
III	3,36	3,69	3,35	3,99	3,73

	De Bilt	De Kooy	Eelde	Vlissingen Zuid-Limburg	
OKT I	2,86	2,79	2,66	2,99	3,17
II	2,04	2,06	1,80	2,45	2,17
III	1,81	1,67	1,55	1,98	2,02
NOV I	1,18	0,99	0,97	1,21	1,33
II	0,85	0,77	0,75	0,94	0,83
III	0,56	0,45	0,49	0,58	0,57
DEC I	0,58	0,47	0,44	0,63	0,69
II	0,42	0,33	0,31	0,47	0,47
III	0,37	0,36	0,28	0,48	0,38
JAN	0,61	0,68	0,57	0,76	0,73
FEB	1,71	1,96	1,68	1,93	2,06
MRT	3,75	4,03	3,04	3,52	3,21
APR	6,45	7,06	6,03	6,52	5,74
MEI	7,81	10,01	7,96	8,43	7,59
JUN	7,25	10,25	7,77	9,61	7,17
JUL	7,17	8,95	7,26	8,72	7,22
AUG	6,20	7,50	6,54	7,16	6,13
SEP	4,05	4,57	3,98	4,66	4,23
OKT	2,22	2,16	1,99	2,46	2,44
NOV	0,86	0,74	0,73	0,91	0,91
DEC	0,45	0,39	0,35	0,53	0,51
WIN	0,90	0,98	0,84	1,04	1,07
LEN	6,00	7,04	5,67	6,15	5,51
ZOM	6,87	8,88	7,18	8,48	6,84
HST	2,37	2,48	2,23	2,67	2,53
JAAR	4,05	4,87	4,00	4,61	4,00

Tabel 4.12 Gemiddelde dagsommen van de diffuse straling per decade, maand, seizoen en jaar in MJ m²

	De Bilt	De Kooy	Eelde	Vlissingen Zuid-Limburg	
JAN I	1,39	1,34	1,28	1,51	1,47
II	1,65	1,67	1,56	1,81	1,80
III	1,86	1,86	1,75	2,04	2,04
FEB I	2,47	2,48	2,27	2,55	2,50
II	3,32	3,00	2,95	3,23	3,15
III	3,62	3,55	3,46	3,85	3,89
MRT I	3,49	4,08	4,00	4,37	4,40
II	4,19	4,79	4,76	5,23	5,07
III	4,82	5,75	5,74	5,80	5,78
APR I	6,21	6,56	6,49	6,56	6,50
II	6,40	7,20	7,30	7,36	7,40
III	7,07	7,74	7,95	7,87	7,81

	De Bilt	De Kooy	Eelde	Vlissingen Zuid-Limburg	
MEI I	8,33	8,45	8,44	8,56	8,49
II	8,74	8,65	8,91	8,92	9,23
III	9,06	8,81	9,01	9,41	9,24
JUN I	10,19	9,56	9,76	9,54	9,68
II	10,46	9,84	9,95	9,64	10,05
III	10,52	9,91	10,13	9,70	10,18
JUL I	9,71	9,79	9,93	9,66	10,18
II	10,21	9,89	9,80	9,94	10,13
III	9,40	9,46	9,60	9,39	9,54
AUG I	9,23	9,05	9,22	9,24	9,41
II	8,87	8,39	8,35	8,65	8,76
III	8,13	7,88	7,86	7,99	8,11
SEP I	7,00	7,02	7,09	7,10	7,23
II	6,25	6,21	6,33	6,22	6,47
III	5,46	5,45	5,40	5,75	5,79
OKT I	4,68	4,60	4,54	4,86	4,97
II	4,01	3,91	3,89	4,07	4,02
III	3,19	3,15	3,05	3,31	3,42
NOV I	2,39	2,51	2,46	2,72	2,75
II	1,93	2,04	1,96	2,20	2,17
III	1,54	1,60	1,52	1,81	1,79
DEC I	1,49	1,47	1,33	1,59	1,61
II	1,24	1,23	1,13	1,42	1,43
III	1,22	1,20	1,08	1,41	1,43
JAN	1,64	1,63	1,54	1,79	1,78
FEB	3,11	2,98	2,86	3,17	3,14
MRT	4,19	4,90	4,87	5,15	5,11
APR	6,55	7,17	7,25	7,26	7,24
MEI	8,72	8,64	8,79	8,98	8,99
JUN	10,39	9,77	9,95	9,62	9,97
JUL	9,77	9,70	9,77	9,66	9,94
AUG	8,72	8,42	8,46	8,61	8,74
SEP	6,24	6,22	6,27	6,35	6,50
OKT	3,94	3,86	3,80	4,06	4,11
NOV	1,96	2,05	1,98	2,24	2,23
DEC	1,32	1,30	1,18	1,47	1,49
WIN	1,99	1,94	1,83	2,11	2,10
LEN	6,49	6,90	6,97	7,13	7,11
ZOM	9,62	9,29	9,39	9,29	9,54
HST	4,05	4,04	4,01	4,21	4,28
JAAR	5,56	5,57	5,57	5,71	5,78

We vinden b.v. voor De Kooy in het tijdvak 1 t/m 10 juli in tabel 4.11 B = 10,82 MJ m⁻² of wel 3 kWh m⁻² en in tabel 4.12 D = 9,79 MJ m⁻² of 2,7 kWh m⁻². De som van B en D komt

overeen met de waarden $20,61 \text{ MJ m}^{-2}$ en $5,7 \text{ kWh m}^{-2}$ die we in 4.1.1 voor de globale straling hadden gevonden.

In het tweede deel van de tabellen 4.11 en 4.12 staan de dagsommen van de directe en diffuse straling per maand in MJ m^{-2} . Dat deel laat ons b.v. zien dat in juli te De Bilt de dagsom van de directe straling $7,17 \text{ MJ m}^{-2}$ of 2 kWh m^{-2} is en de dagsom van de diffuse straling $9,77 \text{ MJ m}^{-2}$ of $2,7 \text{ kWh m}^{-2}$.

In het onderste deel van de tabellen 4.11 en 4.12 staan de dagsommen van de directe en diffuse straling gemiddeld per seizoen en per jaar. Ook hier geldt voor de seizoenen winter de maanden december, januari en februari;
lente de maanden maart, april en mei;
zomer de maanden juni, juli en augustus;
herfst de maanden september, oktober en november.

Zoals te verwachten was hebben de directe en diffuse straling beide hun laagste waarden in de winter en hun hoogste in de zomer. Nauwkeurige beschouwing van de tabellen 4.11 en 4.12 toont echter aan dat er tussen de jaarlijkse gang van de directe en de diffuse straling wel verschillen bestaan.

Van half augustus tot midden december neemt de directe straling op alle vijf stations af. Daarbij worden de onderlinge verschillen ook steeds kleiner. De minima van de directe straling worden midden of eind december gevonden en variëren van $0,28 \text{ MJ m}^{-2}$ per dag in Eelde tot $0,47 \text{ MJ m}^{-2}$ per dag in Vlissingen. In januari begint de directe straling weer op te lopen tot april. Daarna tekent zich een grillig verloop af. Alle stations hebben een eerste piek in de tweede decade van mei en een tweede piek in de eerste decade van juli. Daartussen wordt voor de verschillende stations een grote variatie gevonden. Het maximum van de directe straling in Nederland ($11,18 \text{ MJ m}^{-2}$ per dag) wordt half mei in De Kooy bereikt.

De diffuse straling heeft een regelmatigere jaarlijkse gang dan de directe straling, met overal de minima in de derde decade van december van $1,08 \text{ MJ m}^{-2}$ per dag in Eelde tot $1,43 \text{ MJ m}^{-2}$ in Zuid-Limburg. De maxima in de diffuse straling vallen in de derde decade van juni, behalve in Vlissingen waar het maximum midden in juli wordt gevonden. Het verschil in de maxima, $9,91 \text{ MJ m}^{-2}$ per dag in De Kooy en $10,52 \text{ MJ m}^{-2}$ per dag in De Bilt, is minder groot dan dat van de directe straling. De gemiddelde spreiding over het land bedraagt voor de diffuse straling maar 5 à 10%, tegenover 20% bij de directe straling.

We kunnen tabel 4.12 van de diffuse straling D ook combineren met tabel 4.1 van de globale straling G en D/G per decade berekenen. Dan blijkt D/G van de derde decade in november t/m de eerste decade in januari overal groter te zijn dan 0,70. In de winter is de bijdrage van de directe straling B aan de globale straling dus minder dan 30%. In de derde decade van januari en in februari zakt D/G snel tot minima in midden mei van 0,44 in De Kooy en 0,52 in Zuid-Limburg. Het minimum in Vlissingen (0,47) in D/G wordt pas begin juli bereikt. De grootste bijdrage van de directe straling B aan de globale straling G is dus ruim 50% en wordt op de landstations midden mei gemeten en op het kuststation Vlissingen pas begin juli. De oorzaak hiervan is dat na mei door de verwarming van het aardoppervlak in het binnenland eerder convectieve bewolking ontstaat dan dicht bij de kust. Deze bewolking vermindert de directe straling.

4.2.2 De dagelijkse gang in de directe en de diffuse straling

In de tabellen 4.13 en 4.14 zijn de verdelingen van de directe en diffuse straling over de dag gegeven, de dagelijkse gang. Evenals voor de globale straling zijn de resultaten genoteerd in de Wereldtijd UT. Voor omrekening naar de in Nederland gebruikte Midden Europese Tijd (MET) of Midden Europese Zomertijd (MEZT) moet daar 1, resp. 2 uur bij worden opgeteld.

Tabel 4.13 *Dagelijkse gang van de directe straling per maand voor De Bilt, De Kooy, Eelde, Vlissingen en Zuid-Limburg in Wm²*

DE BILT

uurvak	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
5	---	---	---	---	3	6	3	---	---	---	---	---
6	---	---	---	8	31	31	22	11	---	---	---	---
7	---	---	8	36	81	69	64	44	22	3	---	---
8	---	6	39	103	142	117	117	100	64	19	3	---
9	8	25	81	158	203	169	161	147	111	50	19	3
10	17	50	128	206	253	206	203	200	136	83	36	14
11	31	75	142	247	269	225	228	225	153	106	50	28
12	36	89	158	256	269	239	228	233	161	111	47	33
13	36	86	161	261	250	231	225	222	156	103	42	25
14	25	72	142	189	217	214	211	186	133	78	31	17
15	11	44	103	156	186	183	200	147	100	47	11	6
16	6	25	58	106	142	144	156	111	61	17	---	---
17	---	3	22	56	92	103	103	67	25	3	---	---
18	---	---	---	11	39	56	56	25	3	---	---	---
19	---	---	---	---	8	19	17	3	---	---	---	---
20	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

DE KOOY

uurvak	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
5	---	---	---	---	6	8	6	---	---	---	---	---
6	---	---	---	6	31	36	25	8	---	---	---	---
7	---	---	6	39	81	83	67	47	17	---	---	---
8	---	3	33	89	147	142	125	100	53	17	---	---
9	3	25	78	147	217	200	181	158	97	47	11	3
10	17	56	125	206	275	269	231	214	147	75	28	11
11	33	89	158	242	319	317	278	258	178	100	42	25
12	44	106	181	272	350	347	303	283	200	111	44	28
13	42	106	175	269	353	353	306	286	192	103	39	22
14	33	83	158	242	322	333	300	256	164	81	28	14
15	14	53	117	203	272	283	253	211	122	44	11	3
16	3	22	67	142	206	222	197	147	72	17	---	---
17	---	3	22	78	128	147	131	83	25	---	---	---
18	---	---	3	25	61	78	67	31	3	---	---	---
19	---	---	---	---	17	28	19	6	---	---	---	---
20	---	---	---	---	---	3	---	---	---	---	---	---

EELDE

uurvak	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
5	---	---	---	---	6	11	6	---	---	---	---	---
6	---	---	---	8	33	42	31	11	---	---	---	---
7	---	---	6	42	83	92	75	47	19	3	---	---
8	---	3	31	92	147	142	125	108	56	19	3	---
9	3	28	69	150	203	197	169	169	97	47	14	3
10	17	56	106	192	247	228	208	214	136	81	28	14
11	33	78	128	219	272	253	231	233	158	97	42	22
12	39	92	139	228	267	253	231	236	172	97	47	25
13	31	86	125	219	258	236	228	222	161	89	36	19
14	22	69	106	194	228	217	208	203	136	67	25	11
15	8	39	78	153	186	181	186	164	92	39	8	3
16	---	14	42	103	139	142	150	114	53	14	---	---
17	---	---	14	56	89	94	100	61	19	---	---	---
18	---	---	---	17	42	53	53	22	3	---	---	---
19	---	---	---	---	8	14	14	3	---	---	---	---
20	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

VLISSINGEN

uurvak	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
5	---	---	---	---	3	6	3	---	---	---	---	---
6	---	---	---	6	25	28	19	8	---	---	---	---
7	---	---	3	33	72	75	58	42	14	---	---	---
8	---	3	28	83	133	133	111	94	53	17	---	---
9	3	22	69	136	200	200	167	150	103	53	11	3
10	19	53	103	186	256	253	231	208	147	92	33	14
11	42	86	139	225	283	308	281	247	183	114	53	28
12	47	103	153	247	289	333	306	264	197	128	53	36
13	44	103	150	253	292	336	317	269	194	117	50	33
14	33	83	136	228	264	317	303	247	169	86	36	22
15	17	56	103	186	214	275	247	200	122	53	14	8
16	3	25	64	131	161	197	181	142	72	22	3	---
17	---	3	22	72	100	128	122	81	28	3	---	---
18	---	---	3	22	44	61	61	31	6	---	---	---
19	---	---	---	---	8	17	14	3	---	---	---	---
20	---	---	---	---	---	3	---	---	---	---	---	---

ZUID-LIMBURG

uurvak	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
5	---	---	---	---	3	6	3	---	---	---	---	---
6	---	---	---	6	28	28	22	8	---	---	---	---
7	---	---	6	36	75	72	64	42	17	3	---	---
8	---	6	31	83	131	119	111	94	56	22	3	---
9	6	31	67	136	192	169	172	147	111	58	17	6
10	22	67	103	178	242	206	217	194	147	92	39	17
11	39	97	131	203	261	239	244	228	164	122	53	31
12	47	108	150	222	275	247	253	236	183	122	53	33
13	42	103	142	219	256	242	239	219	167	108	44	31
14	31	83	111	189	228	217	217	194	144	83	31	19
15	14	53	83	147	178	175	183	156	100	47	11	6
16	3	22	47	103	125	133	139	103	61	17	---	---
17	---	3	17	56	75	83	86	58	22	3	---	---
18	---	---	---	17	33	42	44	19	3	---	---	---
19	---	---	---	---	8	14	11	3	---	---	---	---
20	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Tabel 4.14 *Dagelijkse gang van de diffuse straling per maand voor De Bilt, De Kooy, Eelde, Vlissingen en Zuid-Limburg in Wm²*

DE BILT

uurvak	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
4	---	---	---	---	---	3	---	---	---	---	---	---
5	---	---	---	3	25	41	28	6	---	---	---	---
6	---	---	---	28	72	88	78	45	11	---	---	---
7	---	---	20	83	122	142	125	103	56	14	---	---
8	---	16	58	114	161	194	172	156	103	59	14	---
9	20	61	97	153	194	231	214	195	145	106	45	19
10	55	100	122	180	263	255	241	233	189	139	75	50
11	77	131	161	186	242	281	258	258	214	158	94	69
12	89	139	161	191	248	292	291	270	228	164	103	75
13	86	142	145	178	250	291	286	267	213	153	91	72
14	72	120	130	208	236	275	270	250	200	133	69	52
15	45	92	119	177	211	248	228	225	164	97	45	25
16	8	47	86	147	208	206	194	181	120	55	11	---
17	---	11	47	102	127	158	155	133	69	11	---	---
18	---	---	11	58	86	111	105	75	19	---	---	---
19	---	---	---	8	36	62	55	25	---	---	---	---
20	---	---	---	---	3	17	14	---	---	---	---	---

DE KOOY

uurvak	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
4	---	---	---	---	---	6	---	---	---	---	---	---
5	---	---	---	3	25	42	27	6	---	---	---	---
6	---	---	---	30	75	89	81	48	11	---	---	---
7	---	---	22	86	122	139	130	100	55	14	---	---
8	---	15	70	133	167	180	178	153	111	58	14	---
9	22	58	114	175	200	219	219	195	156	100	47	16
10	52	94	150	202	225	245	241	225	186	136	80	47
11	78	119	173	222	239	261	264	248	211	156	97	67
12	88	130	177	225	242	264	272	256	219	158	106	78
13	86	130	181	225	236	261	266	250	211	153	100	72
14	70	117	164	205	222	245	247	236	192	133	75	53
15	47	91	136	178	203	220	225	211	161	100	45	28
16	11	53	102	144	172	189	197	172	122	52	11	---
17	---	14	59	103	133	156	155	131	72	14	---	---
18	---	---	11	52	89	114	111	80	22	---	---	---
19	---	---	---	11	41	64	62	25	---	---	---	---
20	---	---	---	---	6	19	17	---	---	---	---	---

EELDE

uurvak	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
4	---	---	---	---	---	8	3	---	---	---	---	---
5	---	---	---	3	30	47	33	8	---	---	---	---
6	---	---	3	36	84	94	83	56	14	---	---	---
7	---	---	27	89	128	141	136	109	62	14	---	---
8	---	19	72	136	167	189	178	159	113	62	14	---
9	25	58	117	175	203	222	220	198	161	106	50	19
10	55	91	147	205	228	247	248	230	197	133	80	44
11	75	116	172	225	245	266	266	248	220	153	97	67
12	80	127	183	236	250	275	280	256	220	159	100	69
13	80	128	181	231	250	275	272	256	211	147	95	64
14	64	109	166	206	233	255	256	239	192	125	72	45
15	39	83	136	183	208	230	228	208	158	94	39	19
16	8	44	94	141	169	194	192	175	116	50	8	---
17	---	11	50	97	128	153	150	128	67	11	---	---
18	---	---	8	47	83	103	103	72	16	---	---	---
19	---	---	---	6	36	58	55	19	---	---	---	---
20	---	---	---	---	3	14	11	---	---	---	---	---

VLISSINGEN

uurvak	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
5	---	---	---	---	19	33	19	3	---	---	---	---
6	---	---	---	25	69	83	70	39	8	---	---	---
7	---	---	22	78	120	131	123	97	53	14	---	---
8	---	19	66	125	164	175	172	150	108	58	14	---
9	25	61	117	170	197	208	214	194	153	103	50	19
10	59	100	155	200	227	239	244	228	189	136	84	53
11	80	125	183	219	250	256	263	250	211	158	103	72
12	95	139	194	234	261	261	269	261	220	169	114	81
13	95	136	192	233	255	258	264	253	217	161	103	81
14	75	125	175	216	242	244	253	245	200	139	83	61
15	50	97	147	192	222	222	231	222	175	108	55	34
16	19	61	111	152	186	203	208	191	134	61	16	6
17	---	19	64	106	142	161	167	141	80	16	---	---
18	---	---	14	59	92	117	117	86	25	---	---	---
19	---	---	---	11	42	66	61	28	---	---	---	---
20	---	---	---	---	6	16	14	---	---	---	---	---

ZUID-LIMBURG

uurvak	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
4	---	---	---	---	---	3	---	---	---	---	---	---
5	---	---	---	3	22	36	25	6	---	---	---	---
6	---	---	---	30	72	89	78	48	11	---	---	---
7	---	---	25	81	122	136	128	105	61	16	---	---
8	3	22	72	128	166	178	175	159	119	64	19	---
9	27	66	116	170	205	223	217	203	164	109	58	25
10	61	100	153	205	233	261	255	239	200	141	86	55
11	83	122	180	228	258	275	281	261	222	164	105	75
12	92	136	194	231	267	286	286	272	231	167	108	84
13	89	136	191	228	263	277	286	270	222	161	103	77
14	72	123	175	214	247	261	266	253	200	139	80	59
15	47	94	148	186	216	233	242	219	167	103	50	30
16	16	59	103	147	178	195	200	178	122	61	14	3
17	---	14	55	100	133	150	156	128	70	11	---	---
18	---	---	11	47	84	102	103	75	19	---	---	---
19	---	---	---	6	31	53	53	19	---	---	---	---
20	---	---	---	---	3	11	8	---	---	---	---	---

In de tabellen betekent:

uurvak 4 = 03-04 UT = 04-05 uur MET = 05-06 MEZT,

uurvak 5 = 04-05 UT = 05-06 uur MET = 06-07 MEZT,

enzovoort.

In tabel 4.13 zijn de gemeten directe straling voor De Bilt en de berekende directe straling

voor de overige vier stations in Wm^{-2} gegeven. In tabel 4.14 staan de resultaten van de diffuse straling in Wm^{-2} , die zijn verkregen door de directe straling van de globale straling af te trekken.

Uit tabel 4.13 blijkt b.v. dat tussen 11 en 12 uur UT in juni te De Bilt de gemiddelde directe straling 239 Wm^{-2} is; tabel 4.14 geeft voor datzelfde uurvak in juni te De Bilt 292 Wm^{-2} aan diffuse straling. Het totaal van B en D, 531 Wm^{-2} , is terug te vinden in tabel 4.4.

De meeste directe straling wordt in het algemeen in uurvak 12 gemeten, maar ook enkele malen een uur later en tweemaal al in uurvak 11. De hoogste waarden van de diffuse straling treden voor 90% op in uurvak 12, viermaal in uurvak 13 en éénmaal, in april te De Bilt, in uurvak 14.

Vanwege de korte duur van de metingen van de directe straling in De Bilt en het feit dat B voor de andere stations noodgedwongen moest worden berekend, wordt er van afgezien frequentieverdelingen en runlengten van B en D te presenteren.

4.3 De invallende langgolvlige straling

Naast de irradiantie van de Zon ontvangt het aardoppervlak ook nog energie door invallende langgolvlige straling. Deze ontstaat door de stralingsemisatie van wolken, waterdamp en kooldioxyde in de atmosfeer.

Omdat de invallende langgolvlige straling niet routinematig wordt gemeten zijn hiervan met behulp van formule (2.34) benaderende berekeningen gemaakt. In deze paragraaf zullen de uitkomsten daarvan worden besproken.

Uit de berekeningen is gebleken dat de waarden van de invallende langgolvlige straling over het land weinig spreiding vertonen. Het grootste verschil tussen de gemiddelde etmaalsom van De Bilt en die van enig ander station in Nederland bedraagt niet meer dan 2,7%. Volgens Arnfield (1979) blijkt de gebruikte formule van Swinbank (1963) de langgolvlige radiantie van de atmosfeer voor onbewolkte hemel binnen 5% te benaderen. Gezien deze onnauwkeurigheid zullen we de spreiding over Nederland van de langgolvlige instraling verder verwaarlozen en alleen de berekende waarden voor De Bilt beschouwen.

4.3.1 De jaarlijkse gang

Tabel 4.15 geeft de dagsommen van de langgolvlige straling (L^+) gemiddeld per decade, per maand, per seizoen en per jaar. Ook hier geldt:

de eerste decade I : dag 1 t/m dag 10 van de maand,
de tweede decade II : dag 11 t/m dag 20 van de maand,
de derde decade III : dag 21 t/m de laatste dag van de maand;
winter : de maanden december, januari en februari,
lente : de maanden maart, april en mei,
zomer : de maanden juni, juli en augustus,
herfst : de maanden september, oktober en november.

Tabel 4.15 Gemiddelde dagsommen van de invallende langgolvlige straling te De Bilt per decade, maand, seizoen, jaar en minimale en maximale dagsom per maand in MJm⁻²

decade	L ⁺ [MJm ⁻²]	decade	L ⁺ [MJm ⁻²]	tijdvak	minimum	gemiddelde	maximum
JAN I	24,98	JUL I	31,26	januari	15,89	24,91	29,47
II	24,82	II	31,48	februari	18,14	24,48	29,26
III	24,92	III	31,52	maart	17,35	25,38	31,04
FEB I	24,84	AUG I	31,46	april	21,78	26,45	33,62
II	24,13	II	31,25	mei	23,61	28,66	33,61
III	24,46	III	30,38	juni	25,65	30,31	34,97
MRT I	24,92	SEP I	30,04	juli	27,05	31,42	36,03
II	25,36	II	29,62	augustus	26,83	31,01	35,03
III	25,82	III	28,98	september	23,92	29,55	34,22
APR I	26,18	OKT I	28,60	oktober	21,06	27,65	32,91
II	26,36	II	27,58	november	18,86	26,27	31,17
III	26,81	III	26,86	december	17,53	25,43	30,40
MEI I	28,01	NOVI	26,67	winter		24,95	
II	28,70	II	26,19	lente		26,84	
III	29,22	III	25,93	zomer		30,92	
JUN I	30,18	DEC I	25,25	herfst		27,82	
II	29,96	II	25,48	jaar		27,64	
III	30,79	III	25,53				

We lezen in tabel 4.15 b.v. af dat de dagsom van de invallende langgolvlige straling van 1 t/m 10 juli gemiddeld 31,26 MJ m⁻² of wel 8,7 kWh m⁻² is; in de winter is de dagsom gemiddeld 24,95 MJ m⁻² of 6,9 kWh m⁻².

De jaarlijkse gang in de dagsom van de langgolvlige straling blijkt een amplitude te hebben van ongeveer 14% van het jaargemiddelde (27,64 MJ m⁻²), met een maximum eind juli (31,52 MJ m⁻²) en een minimum midden februari (24,13 MJ m⁻²).

Om een indruk te krijgen van de spreiding in de gemiddelde dagsommen zijn in tabel 4.15 ook de minimale en maximale dagsommen gegeven die in een maand zijn bereikt. We zien daaruit dat de spreiding daarvan veel kleiner is dan bij de globale straling. Om die reden wordt er van afgezien om in deze paragraaf ook frequentieverdelingen van de invallende langgolvlige straling te geven.

4.3.2 De dagelijkse gang in de langgolvlige straling

Slob (1989) heeft in het kader van het "Westland-project" (zie ook paragraaf 4.5.2), gedurende 16 maanden, en te De Bilt sinds 1987 de invallende langgolvlige straling L⁺ gemeten. Zijn meetresultaten van de dagelijkse gang in L⁺, blijken verschillen te vertonen met de waarden die met behulp van formule (2.34) kunnen worden berekend.

Van april t/m september zijn de berekende waarden 's nachts lager en overdag hoger dan de meetgegevens. De amplitude van de dagelijkse gang is dan bij de berekende gegevens groter dan die voor de meetwaarden. De gemiddelde dagsommen per maand komen voor de meetgegevens in dit deel van het jaar echter goed overeen met de berekende gegevens uit tabel 4.15. Van oktober t/m maart zijn de berekende waarden zowel 's nachts als overdag lager dan

de meetgegevens aantonen. Voor dit deel van het jaar zijn de gemeten dagsommen gemiddeld per maand 3 tot 6% hoger dan de berekende gegevens uit tabel 4.15. Verder treden het hele jaar de hoogste waarden van L^+ bij de metingen vroeger op dan men uit de berekeningen zou verwachten.

De oorzaak van bovengenoemde verschillen ligt waarschijnlijk in het feit, dat de berekende waarden volgens formule (2.34) sterk worden bepaald door de luchttemperatuur T op 1 à 2 m hoogte; L^+ is evenredig met T^6 . De gemeten waarden zijn afhankelijk van de stralingsemissie van kooldioxyde en wolken in de atmosfeer. De grootte van deze emissie wordt bepaald door de temperatuur van de wolken, die in het algemeen afwijkt van de luchttemperatuur op 1 à 2 m hoogte.

De berekende invallende langgolvlige straling L^+ heeft dus dezelfde dagelijkse gang als die van de luchttemperatuur op 1 à 2 m hoogte met een maximum tussen 14 en 15 UT. Uit de metingen blijkt dat L^+ al om 12 UT zijn maximale waarde bereikt en dan vrij sterk daalt, terwijl de gemeten luchttemperatuur dan nog uren stijgt. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de gemiddelde wolkenbasis in de loop van de dag stijgt, met de daarbij behorende lagere temperatuur. De stralingsemissie van de wolken treedt dan bij een lagere temperatuur op dan die om 12 UT.

Hoewel de gemeten reeks van L^+ maar van korte duur is, zijn in tabel 4.16 toch de gemeten dagelijkse gang per maand van de uurwaarden van de invallende langgolvlige straling gegeven, omdat die de atmosferische processen beter representeren dan de berekende waarden.

Tabel 4.16 *Dagelijkse gang van de gemeten, invallende langgolvlige straling per maand in Wm^2 (tijdvak 1987-1989)*

tijd UT	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
1	296	294	300	296	308	331	346	346	341	329	292	302
2	295	294	297	297	310	329	349	345	338	333	290	301
3	296	296	303	296	307	328	352	342	339	332	292	304
4	297	296	305	294	304	330	352	343	339	330	294	301
5	298	297	305	294	309	334	354	344	339	326	295	298
6	298	298	307	298	321	338	355	345	340	327	294	297
7	300	296	307	304	333	345	359	354	345	330	289	300
8	300	296	310	311	343	356	360	360	350	334	289	302
9	304	303	319	318	354	362	363	366	356	338	294	304
10	307	305	326	323	363	367	369	374	361	344	298	313
11	311	308	331	326	368	370	373	378	364	350	303	316
12	314	309	332	328	371	371	374	381	367	351	305	315
13	314	309	334	330	376	370	374	380	365	350	307	314
14	311	308	332	331	375	368	369	379	363	347	303	313
15	311	306	329	328	369	364	366	376	360	344	298	309
16	309	298	323	326	360	358	363	372	354	336	296	305
17	306	293	316	321	352	352	357	368	347	330	295	305
18	306	291	311	312	340	346	351	361	342	328	293	307
19	302	291	309	309	325	340	348	355	340	330	292	308
20	298	291	309	304	321	338	347	349	337	330	292	311
21	296	293	307	297	317	336	346	346	335	327	290	311
22	294	292	303	296	313	334	346	346	338	326	289	305
23	293	292	305	295	313	333	346	340	341	327	286	302
24	293	294	303	294	313	334	347	340	341	328	286	303

Door de korte reeks kunnen in werkelijkheid afwijkingen van 6% van de gegeven waarden optreden. In tabel 4.16 is L^+ in Wm^{-2} gegeven, waarbij de tijden in UT zijn genomen.

Uit deze tabel blijkt bijvoorbeeld dat in juni L^+ om 12 UT $371 Wm^{-2}$ is en om 3 UT 's nachts $328 Wm^{-2}$. Tabel 4.16 geeft een heel ander beeld dan de tabellen 4.4, 4.13 en 4.14 van de globale, directe en diffuse straling, omdat de langgolvlige straling ook in de nachturen een bijdrage levert.

4.4 Zonneschijnduur gemiddeld per maand en per jaar

Hoewel dit boek is gewijd aan de energie van de Zon en daarom de resultaten van de straling in energie-eenheden uitgebreid worden besproken, willen we in deze paragraaf ook nog ingaan op enkele uitkomsten van metingen van de zonneschijnduur. De duur van de zonneschijn is nog steeds een grootheid die in klimaatbeschrijvingen veel voorkomt en bovendien verschijnt de relatieve zonneschijnduur als parameter in de formules voor de berekening van de straling op horizontale en schuine vlakken (zie hoofdstuk 5).

Tabel 4.17 *Maandsommen van de zonneschijnduur in uren volgens waarnemingen in het tijdvak 1951-1980*

	JAN	FEB	MRT	APR	MEI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEC
LELYSTAD	45,7	65,3	113,2	166,6	208,9	215,3	196,6	188,0	143,7	98,6	53,5	37,7
GEMERT	41,4	65,4	105,2	153,7	195,2	192,6	177,3	175,2	136,9	103,0	49,8	36,1
NUMANSDORP	46,3	63,2	111,2	160,7	206,7	212,3	191,3	184,7	141,3	102,3	53,1	40,3
KORNWERDERZAND	43,8	67,4	119,1	172,1	220,7	223,5	202,7	192,8	145,7	99,0	53,9	37,5
STAVOREN	45,4	66,0	115,2	169,5	217,7	221,3	199,5	190,9	143,1	97,1	54,2	38,8
SCHIERMONNIKOOG	39,9	65,0	114,2	165,7	212,8	216,2	194,0	187,0	136,5	92,6	48,4	36,6
VALKENBURG ZH	44,7	66,0	114,6	168,1	218,4	226,5	204,7	195,8	142,2	100,5	51,2	37,7
DE KOOY	45,9	69,0	120,0	172,5	223,9	227,9	204,5	198,8	144,5	99,5	52,2	38,7
SCHIPHOL	46,7	66,4	115,5	165,8	212,8	218,3	197,4	188,9	142,2	102,3	52,6	40,3
TERSCHELLING	43,2	65,9	118,0	172,1	221,6	223,4	200,2	191,0	139,6	93,4	50,5	38,1
DE BILT	48,9	65,5	111,3	160,8	202,3	209,0	185,0	182,4	140,5	102,5	52,6	43,8
LEEWARDEN	39,9	64,1	110,3	162,0	209,3	214,5	190,3	183,2	135,8	93,4	50,1	34,8
DEELEN	40,3	62,0	102,9	150,8	190,4	191,3	169,0	170,2	134,4	98,3	46,7	35,5
EELDE	41,1	61,0	106,1	156,7	198,4	205,9	181,9	179,6	135,0	93,3	51,8	35,0
TWENTHE	37,4	59,4	102,4	147,4	188,8	188,0	168,7	168,8	133,4	96,1	46,0	32,6
VLISSINGEN	50,2	67,2	117,6	165,0	210,3	216,8	200,7	191,3	150,8	107,2	55,9	42,1
ZIERIKZEE	50,2	67,6	117,5	167,0	210,5	220,4	201,0	191,6	147,5	107,2	55,4	41,8
ROTTERDAM	46,3	66,7	114,0	163,9	210,5	215,6	195,2	188,1	141,4	100,9	52,4	40,0
GILZE-RYEN	43,0	63,2	105,4	155,3	196,8	197,5	176,7	176,0	138,2	102,4	50,2	36,5
EINDHOVEN	42,3	65,8	106,8	153,2	194,1	193,1	175,8	174,9	137,0	103,5	51,2	35,9
ZUID-LIMBURG	43,4	64,9	103,1	147,0	192,0	191,5	178,1	175,0	141,1	108,4	54,4	40,1
AMSTERDAM	46,1	65,3	113,1	165,4	211,5	214,8	194,2	189,9	143,4	102,4	52,3	39,9
BERN	43,7	62,6	106,0	156,2	197,9	200,4	180,9	178,6	139,6	102,8	50,2	35,8
STELLEN DAM	49,3	68,4	117,0	167,2	212,2	219,9	200,3	191,8	144,6	104,7	54,4	40,7
HARDERWIJK	46,0	65,3	110,8	162,7	201,8	206,4	184,5	184,0	141,9	101,7	52,5	38,8

	JAN	FEB	MRT	APR	MEI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEC
KOOTWIJK	39,7	60,6	103,7	151,3	191,8	189,6	169,4	170,6	134,9	98,2	46,9	34,4
IJMUIDEN	42,6	65,8	116,1	167,3	215,6	219,3	201,0	192,6	139,7	99,5	49,0	35,5
HEEL	40,0	61,4	104,1	148,9	190,2	187,0	175,8	172,0	134,8	104,6	50,4	35,3
OUDDORP	48,9	65,8	114,8	166,1	211,4	218,7	200,8	190,9	141,6	101,7	52,6	40,0
SCHEVENINGEN	45,7	67,3	114,7	164,7	213,0	221,1	200,7	192,2	140,1	100,0	50,7	37,6
URK	44,0	64,0	109,8	164,0	208,1	210,6	191,1	185,8	140,0	96,4	51,6	37,5
DEDEMSVAART	38,4	59,6	103,7	152,1	193,8	197,9	175,8	175,0	136,8	94,5	49,4	33,5
WINTERSWIJK	39,0	59,2	100,5	146,0	188,9	182,1	165,6	165,3	132,7	96,1	47,2	34,2
WIERINGERWERF	46,1	65,9	116,6	165,1	216,4	221,8	197,4	189,8	141,7	98,5	52,7	39,5
BERGEN OP ZOOM	47,7	66,8	111,5	159,7	203,9	208,6	189,2	182,9	143,8	104,0	53,0	39,5
LANDGEM 5 HSTAT	45,9	65,5	111,6	160,4	205,4	210,2	190,0	185,4	142,4	102,2	53,4	39,9
LANDGEM ALLE STAT	44,1	64,7	111,0	160,9	205,7	209,1	189,1	183,9	140,2	100,2	51,4	37,8

	WINTER	LENTE	ZOMER	HERFST	JAAR
LELYSTAD	148,7	488,7	599,9	295,8	1533,1
GEMERT	142,9	454,1	545,1	289,7	1431,8
NUMANSDORP	149,8	478,6	588,3	296,7	1513,4
KORNWERDERZAND	148,7	511,9	619,0	298,6	1578,2
STAVOREN	150,2	502,4	611,7	294,4	1558,7
SCHIERMONNIKOOG	141,5	492,7	597,2	277,5	1508,9
VALKENBURG ZH	148,4	501,1	627,0	293,9	1570,4
DE KOOY	153,6	516,4	631,2	296,2	1597,4
SCHIPHOL	153,4	494,1	604,6	297,1	1549,2
TERSCHELLING	147,2	511,7	614,6	283,5	1557,0
DE BILT	158,2	474,4	576,4	295,6	1504,6
LEEUWARDEN	138,8	481,6	588,0	279,3	1487,7
DEELEN	137,8	444,1	530,5	279,4	1391,8
EELDE	137,1	461,2	567,4	280,1	1445,8
TWENTHE	129,4	438,6	525,5	275,5	1369,0
VLISSINGEN	159,5	492,9	608,8	313,9	1575,1
ZIERIKZEE	159,6	495,0	613,0	310,1	1577,7
ROTTERDAM	153,0	488,4	598,9	294,7	1535,0
GILZE-RIJEN	142,7	457,5	550,2	290,8	1441,2
EINDHOVEN	144,0	454,1	543,8	291,7	1433,6
ZUID-LIMBURG	148,4	442,1	544,6	303,9	1439,0
AMSTERDAM	151,3	490,0	598,9	298,1	1538,3
BERN	142,1	460,1	559,9	292,6	1454,7
STELLEN DAM	158,4	496,4	612,0	303,7	1570,5
HARDERWIJK	150,1	475,3	574,9	296,1	1496,4

	WINTER	LENTE	ZOMER	HERFST	JAAR
KOOTWIJK	134,7	446,8	529,6	280,0	1391,1
IJMUIDEN	143,9	499,0	612,9	288,2	1544,0
HEEL	136,7	443,2	534,8	289,8	1404,5
OUDDORP	154,7	492,3	610,4	295,9	1553,3
SCHEVENINGEN	150,6	492,4	614,0	290,8	1547,8
URK	145,5	481,9	587,5	288,0	1502,9
DEDEMSVAART	131,5	449,6	548,7	280,7	1410,5
WINTERSWIJK	132,4	435,4	513,0	276,0	1356,8
WIERINGERWERF	151,5	498,1	609,0	292,9	1551,5
BERGEN OP ZOOM	154,0	475,1	580,7	300,8	1510,6
LANDGEM 5 HSTAT	151,4	477,4	585,7	297,9	1512,4
LANDGEM ALLE STAT	146,6	477,6	582,1	291,8	1498,0

In tabel 4.17 is de gemiddelde totale duur van de zonneshijn per maand (maandsom), per seizoen en per jaar gegeven van 35 meetstations, zoals die met de Campbell-Stokes is gemeten. Hierbij omvat de winter de maanden december, januari en februari; de lente maart, april en mei; de zomer juni, juli en augustus; de herfst september, oktober en november. We zien dat de kleinste jaarsom (1357 uur) wordt gemeten in Winterswijk en de grootste (1597 uur) in De Kooy. Ook het kuststation Zierikzee heeft met 1578 uur duidelijk meer zon dan het in Limburg gelegen Heel met 1404 uur. Tabel 4.17 bevestigt daarmee de conclusie die al in hoofdstuk 1, figuur 1.3, was getrokken, dat de isolijnen van het aantal uren zonneshijn in Nederland vrijwel noord-zuid lopen, waarbij het westen van het land meer zon ontvangt dan het oosten.

De onderste twee rijen in de tabellen 4.17 en 4.18 geven het gemiddelde over het hele land, eerst gebaseerd op de vijf hoofdstations De Bilt, De Kooy, Eelde, Vlissingen, Zuid-Limburg, en op de onderste regel gebaseerd op alle 35 stations.

Tabel 4.18 Maand-, seizoen- en jaargemiddelden van de relatieve zonneshijnduur in procenten, volgens waarnemingen in het tijdvak 1951-1980

	JAN	FEB	MRT	APR	MEI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEC	W	L	Z	H	JAAR
LELYSTAD	18	24	31	40	43	43	39	41	38	30	20	16	19	38	41	30	34
GEMERT	16	24	29	37	40	39	35	39	36	31	19	15	18	36	38	30	32
NUMANSDORP	18	23	30	39	43	43	38	41	37	31	20	16	19	38	41	30	34
KORNWERDERZAND	17	25	32	41	45	44	40	42	38	30	21	16	19	40	42	31	35
STAVOREN	18	24	31	40	44	44	39	42	38	29	21	16	20	39	42	30	35
SCHIERMONNIKOOG	16	24	31	39	43	43	38	41	36	28	19	16	19	38	40	29	34
VALKENBURG ZH	17	24	31	40	45	45	41	43	37	30	19	16	19	39	43	30	35
DE KOOY	18	25	33	41	46	45	40	44	38	30	20	16	20	40	43	31	36
SCHIPHOL	18	24	31	40	44	44	39	42	37	31	20	17	20	39	41	30	35
TERSCHELLING	17	24	32	41	45	44	39	42	37	28	19	16	19	40	42	29	35
DE BILT	19	24	30	39	42	42	37	40	37	31	20	18	20	37	40	30	34
LEEWARDEN	16	23	30	39	43	42	37	40	36	28	19	15	18	38	40	29	33
DEELEN	16	22	28	36	39	38	34	38	35	30	18	15	18	35	36	29	31
EELDE	16	22	29	37	40	41	36	39	35	28	20	15	18	36	39	29	32
TWENTHE	15	22	28	35	39	37	34	37	35	29	17	13	17	34	36	28	31
VLISSINGEN	19	24	32	40	43	44	40	42	40	32	21	17	20	39	42	32	35
ZIERIKZEE	19	24	32	40	43	44	40	42	39	32	21	17	20	39	42	32	35
ROTTERDAM	18	24	31	39	43	43	39	41	37	31	20	17	20	38	41	30	34
GILZE-RIJEN	17	23	29	37	41	40	35	39	36	31	19	15	18	36	38	30	32
EINDHOVEN	16	24	29	37	40	39	35	39	36	31	19	15	18	36	38	30	32

	JAN	FEB	MRT	APR	MEI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEC	W	L	Z	H JAAR	
ZUID-LIMBURG	17	23	28	35	40	39	36	39	37	33	20	16	19	35	38	31	32
AMSTERDAM	18	24	31	40	43	43	39	42	38	31	20	17	20	38	41	31	34
BERN	17	23	29	37	41	40	36	39	37	31	19	15	18	36	39	30	32
STELLENDAM	19	25	32	40	44	44	40	42	38	32	20	17	20	39	42	31	35
HARDERWIJK	18	24	30	39	41	41	37	40	37	31	20	16	19	37	39	30	33
KOOTWIJK	15	22	28	36	39	38	34	38	35	30	18	14	17	35	36	29	31
JMUIDEN	17	24	32	40	44	44	40	42	37	30	19	15	19	39	42	30	34
HEEL	15	22	28	36	39	38	35	38	35	32	19	14	17	35	37	30	31
OUDDORP	19	24	31	40	44	44	40	42	37	31	20	16	20	39	42	30	35
SCHEVENINGEN	18	24	31	40	44	44	40	42	37	30	19	16	19	39	42	30	35
URK	17	23	30	39	42	42	38	41	37	29	20	16	19	38	40	30	34
DEDEMSVAART	15	22	28	36	40	39	35	38	36	29	19	14	17	35	37	29	31
WINTERSWIJK	15	21	27	35	39	36	33	36	35	29	18	14	17	34	35	28	30
WIERINGERWERF	18	24	32	39	44	44	39	42	37	30	20	17	20	39	42	30	35
BERGEN OP ZOOM	18	24	30	38	42	42	38	41	38	31	20	16	20	37	40	31	34
LANDGEM 5 HSTAT	18	24	30	38	42	42	38	41	37	31	20	16	20	38	40	31	34
LANDGEM	17	23	30	39	42	42	38	41	37	30	19	16	19	38	40	30	33
ALLE STAT																	

Tabel 4.18 toont de relatieve zonneshijnduur in procenten gemiddeld per maand, seizoen en jaar. Dat is het aantal uren dat de Zon werkelijk heeft geschieden gedeeld door het aantal uren dat de Zon had kunnen schijnen (de daglengte). Ook hier heeft De Kooy, over het hele jaar gezien, de hoogste waarde (36%) en Winterswijk de laagste (30%).

Tabel 4.17 en 4.18 zijn overgenomen uit KNMI (1982). In deze publikatie zijn verder gegevens opgenomen van de zonneshijnduur per decade en van het aantal zonloze dagen. Frequentietabellen van uursommen van de zonneshijnduur staan in KNMI (1986a). Runlengten van aaneengesloten reeksen van zonloze dagen, van dagen met $\leq 20\%$ zon, van dagen met $\geq 50\%$ zon en van dagen met $\geq 80\%$ zon zijn te vinden in KNMI (1984).

Tenslotte wijzen we nog op een publikatie waarin uursommen van de globale straling zijn uitgesplitst in windsnelheids- en temperatuurklassen. Deze uitgave (KNMI, 1986b) is van belang voor degenen die bij het ontwerpen van een gebouw naast de instraling ook rekening houden met afkoeling door wind en door temperatuurverschillen.

Alle genoemde KNMI-publikaties zijn te bestellen bij de Klimatologische Dienst van het KNMI.

4.5 Ruimtelijke verdeling van de globale straling op kleine schaal

In hoofdstuk 1 en in paragraaf 4.4 hebben we gezien hoe de zonneshijnduur over Nederland verdeeld is. Met behulp van 35 meetstations was het mogelijk om isolijnen van het aantal uren zon te tekenen. Voor het globale-stralingsmeetnet, waarvan voor slechts zeven stations lange meetreeksen bestaan, was het alleen mogelijk de procentuele afwijkingen ten opzichte van De Bilt in het midden van het land te geven.

De vraag dringt zich op, hoe het staat met de ruimtelijke verdeling op kleine schaal. Zijn er ook duidelijke verschillen te vinden binnen bijvoorbeeld 10 km afstand? Daarbij denken we aan de gebieden waar we grote gradiënten verwachten, zoals tussen een stad met haar luchtverontreiniging en het landelijk gebied daaromheen, of vlak bij de kust.

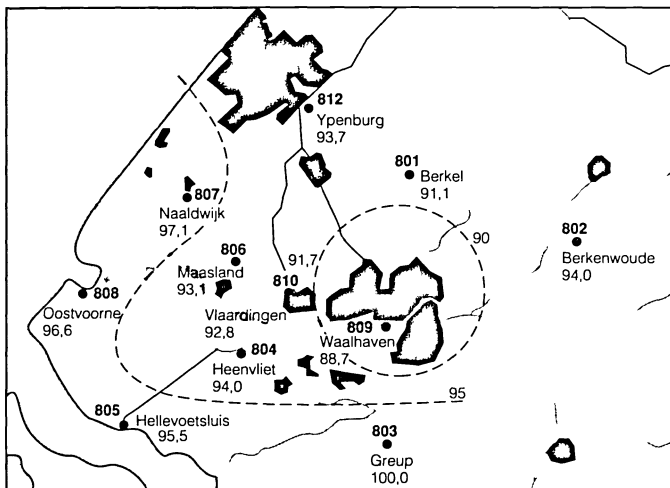
In het verleden is door het KNMI en door anderen onderzoek verricht aan deze ruimtelijke verdeling op kleine schaal. De resultaten daarvan komen in de volgende paragrafen aan de orde.

4.5.1 Invloed van de stad en van luchtverontreiniging op de invallende globale straling

Het is al vele jaren bekend dat een stad haar eigen klimaat schept, dat enigszins afwijkt van dat van de landelijke omgeving (Landsberg, 1981). Dit stadsklimaat beïnvloedt vrijwel alle meteorologische grootheden als wind, temperatuur, vochtigheid, straling. De invallende globale straling wordt in een stad door de hogere graad van luchtverontreiniging meer verstrooid en geabsorbeerd dan in de landelijke omgeving. Landsberg (1981) geeft een aantal voorbeelden van grote steden waar minder globale straling is gemeten dan in de directe omgeving, zoals Boston 18%, Montreal 9%, Tokio 12-30% minder.

In Nederland is al in 1959 een onderzoek begonnen naar de invloed van de luchtverontreiniging in het gebied van de Nieuwe Waterweg op de globale straling (Berlage, 1962; De Boer, 1966). Berlage en De Boer noteerden in een aantal gevallen significante verschillen tussen de zes meetplaatsen in het Rijnmondgebied, afhankelijk van de windrichting en de ligging van het meetstation. De Boer (1966) vond, dat de globale straling bij onbewolkte hemel en gemiddeld over alle windrichtingen op het platteland 13 tot 17% groter was dan in het centrum van het stedelijke en industriegebied van Rotterdam. Hij schreef deze grote verschillen in globale straling toe aan de verschillen in mate van luchtverontreiniging.

Frantzen en Raaff (1978) hebben van november 1970 t/m januari 1974 opnieuw metingen van de globale straling in het Rijnmondgebied verricht, nu op 12 meetplaatsen. De ligging van de meetpunten is in figuur 4.2 weergegeven. De uursommen op de stations bij onbewolkt



Figuur 4.2 Ligging van de meetpunten, met stationsnummer, in het "Rijnmond"-meetnet en percentages van de gemiddeld per jaar gemeten globale straling ten opzichte van het meetpunt Greup

weer zijn vergeleken met die te Greup in de Hoekse Waard, dat het station met de hoogste waarden van de globale straling bleek te zijn. De uursommen zijn ingedeeld naar windrichting en afzonderlijk bewerkt voor zomer- en winterhalfjaar.

In het zomerhalfjaar is een maximaal verschil van 11% in de globale straling over het gebied gemeten; het meetpunt Rotterdam Waalhaven registreerde bij westenwind gemiddeld slechts 89% van de globale straling in Greup. De laagste waarden van de globale straling werden in het zomerhalfjaar gemeten in het gebied Berkel-Vlaardingen-Rotterdam.

In het winterhalfjaar is een maximaal verschil van 19% in de globale straling over het gebied gemeten; het meetpunt Berkel registreerde, eveneens bij westenwind, gemiddeld slechts 81% van de globale straling in Greup. Lage waarden van de globale straling werden in het winterhalfjaar in het gebied Berkel-Rotterdam-Heenvliet aangetroffen.

Gemiddeld over het hele jaar heeft Rotterdam Waalhaven de minste globale straling, zoals in figuur 4.2 is te zien.

Daar de foutenmarge in de meetuitkomsten niet meer dan $\pm 5\%$ bedraagt, moeten verschillen van 11% en 19% worden toegeschreven aan andere oorzaken, in dit geval aan een verhoogde turbiditeit veroorzaakt door luchtverontreiniging. Omdat de Zon in de winter lager staat dan in de zomer is de weglengte door de atmosfeer in de winter langer. Daarom is te verwachten dat de verschillen in globale straling tussen een verontreinigde atmosfeer en een relatief schone atmosfeer in de winter groter zullen zijn dan in de zomer.

Verder zijn in Nederland in de IJmond door de Dienst Milieuhygiëne Zaanstad (1977) metingen verricht in de omgeving van het Hoogoverterrein. Men kwam tot de conclusie dat alleen op korte afstand van het Hoogoverterrein (Beverwijk-west op minder dan 5 km) bij zuidwestenwind gedurende enkele uren van de dag een significant verminderde irradiantie is opgetreden. Deze vermindering bedroeg ongeveer 16% op dagen met een relatieve zonneschijnduur van meer dan 50%. Op dagen met minder dan 50% zonneschijn of bij de overige windrichtingen zijn geen of geringe verschillen in de irradiantie aangetoond, evenmin als voor verderweg gelegen meetpunten of gedurende de maanden november t/m februari.

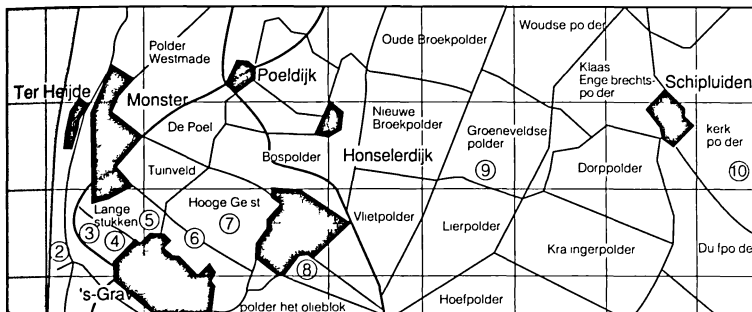
4.5.2 Verschillen in globale straling in de kuststrook (Westland)

In verband met het onderzoek naar de mogelijkheid van kustuitbreiding tussen Hoek van Holland en Scheveningen is in het tijdvak oktober 1986 t/m september 1988 in een dicht meetnet in een raai van 10-12 km loodrecht op de kust van het Westland de globale straling gemeten (Slob, 1989). Naast de bestaande KNMI-stations Naaldwijk, Zestienhoven, Valkenburg en De Bilt werden acht tijdelijke stations ingericht.

Tabel 4.19 Overzicht van de meetstations en afstand tot de kust in het Westlandmeetnet

KNMI station no.	Speciaal station no.	Naam	Afstand tot de kust in km
	2	Arendsduin	0,0
	3	Van Geest	0,7
	4	Overkleeft	1,3
	5	Solleveld	1,7
	6	Barendse	2,5
	7	Grootscholten	3,4
038	8	Proefstation	5,2
	9	Vermeer	8,5
	10	De Bruin	13,0
344	(11)	Zestienhoven	20,0
260	(12)	De Bilt	54,0
210	(13)	Valkenburg	5,0

Tabel 4.19 geeft een overzicht van de verschillende meetstations en de afstand tot de kust. In figuur 4.3 zijn de meetstations in een kaartje van het Westland weergegeven.



Figuur 4.3 Overzicht van de meetlocaties in het Westlandmeetnet (zie verder tabel 4.19)

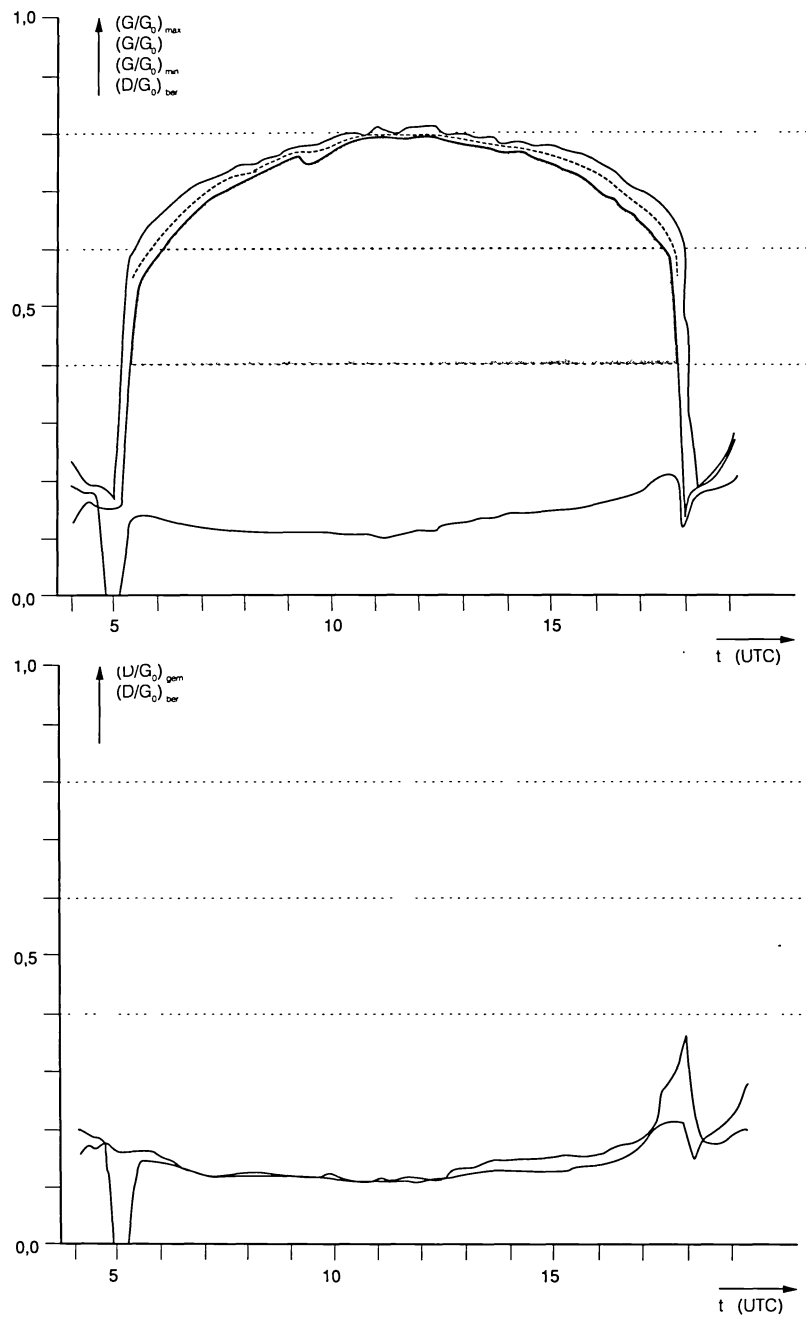
Slob heeft de meetgegevens gecorreleerd met de klimatologische gemiddelden van De Bilt en de andere KNMI-stralingsstations om een eventuele afwijking van het tijdvak oktober 1986 t/m september 1988 ten opzichte van het klimatologisch gemiddelde te elimineren. Dan blijkt het station Arendsduin aan de kust ruim 10% meer globale straling te krijgen dan De Bilt; op station 10 op 13 km afstand van de kust is het verschil met De Bilt nog maar 7% en in Zestienhoven op 20 km van de kust 5%. Loodrecht op de kust neemt de globale straling dus ca. 3% af over een zone van 10 km breed. Het grootste verloop wordt in het voorjaar en de zomer gemeten.

4.6 Bespreking van enkele kenmerkende dagen

De meeste besproken meetresultaten van de globale en directe straling zijn gebaseerd op uursommen. Moderne inzameltechnieken maken echter registratie met een hogere tijdplossing mogelijk. Met behulp hiervan is dan ook meer informatie uit de metingen te halen. Dat kan b.v. van belang zijn voor zonneënergie-installaties, die gevoelig zijn voor kortdurende fluctuaties in de irradiantie en voor automatisch werkende zonneschermen.

Sinds mei 1986 wordt op het KNMI-terrein in De Bilt de globale straling (G), ca. 25 maal per 10 minuten gemeten. Met behulp van een PC worden vervolgens 10-minuutgemiddelden bepaald en de in hetzelfde 10-minuutvak opgetreden maximum- en minimumwaarden opgeslagen (Slob en Monna, 1991). Tegelijkertijd worden de directe (B) en diffuse (D) straling gemeten. Het tegelijk meten van G , B en D maakt controle op de juistheid van de meetgegevens eenvoudig, omdat immers moet gelden: $G = B + D$. Met de 10-minuutwaarden is het weersverloop goed te volgen.

Uit deze vrij complete en gedetailleerde set stralingsgegevens worden vijf karakteristieke dagen besproken om een idee te geven van de invloed van het weer, in het bijzonder van de bewolking, op de gemeten globale, diffuse en directe straling. Hierbij zijn de gemeten waarden genormeerd met G_0 , de straling op het horizontale vlak bij afwezigheid van de atmosfeer. In de figuren zijn dus G/G_0 en D/G_0 uitgezet.

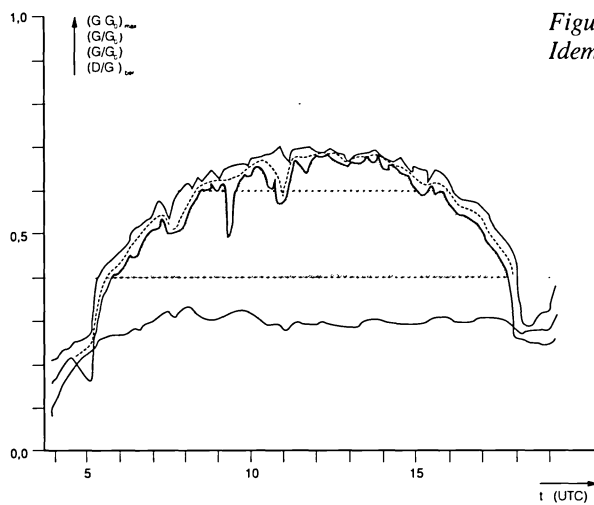


Figuur 4.4 Verloop van de maximale verhouding $(G/G_0)_{max}$, de minimale verhouding $(G/G_0)_{min}$ en het gemiddelde G/G_0 (punten) per 10-minuutijdvak. De onderste curve geeft het verloop van de berekende (zie tekst) verhouding D/G_0 . In de onderste grafiek staan het verloop van de gemeten $(D/G_0)_{gem}$ en berekende verhouding $(D/G_0)_{ber}$ van D/G_0 uitgezet voor 23 mei 1989

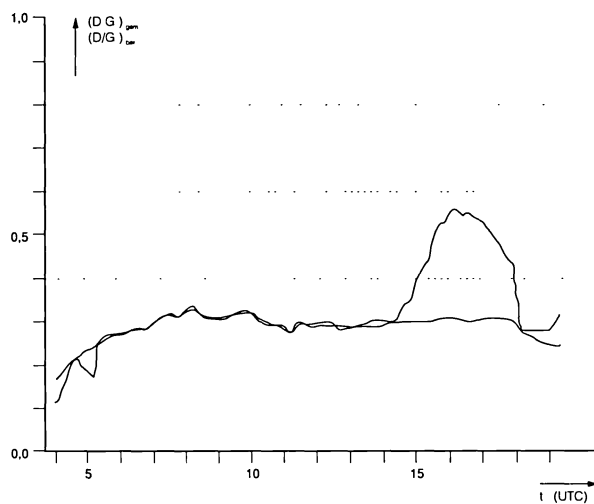
a. 23 mei 1989

Dit was een onbewolkte dag, waarvan de registratie is gegeven in figuur 4.4. Op de horizontale as staat de tijd uit in UT. In de bovenste grafiek zijn van boven naar beneden uitgezet: de maximale verhouding in het 10-minuutvak $(G/G_0)_{max}$, G/G_0 als 10-minuutwaarde (punten) en de minimale verhouding in het 10-minuutvak $(G/G_0)_{min}$. Verder is ook D/G_0 weergegeven, berekend met $D/G_0 = G/G_0 - B/G_0$. In de onderste grafiek is voor de duidelijkheid deze berekende D/G_0 nogmaals uitgezet, nu samen met de door de diffusometer (pyranometer met schaduwscijf) gemeten waarde.

G/G_0 loopt op tot 0,8 in de middag, er is weinig verschil tussen $(G/G_0)_{max}$ en $(G/G_0)_{min}$. De oorzaak van het snelle oplopen van G/G_0 aan het begin van de dag en het snelle dalen aan het einde van de dag zijn obstakels in de weg van de straling. D/G_0 ligt om en nabij de 0,1. Berekening en meting van D/G_0 komen goed met elkaar overeen.



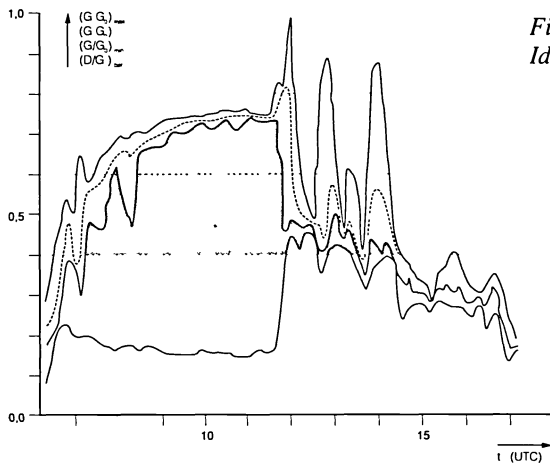
Figuur 4.5
Idem figuur 4.4, maar voor 20 mei 1989



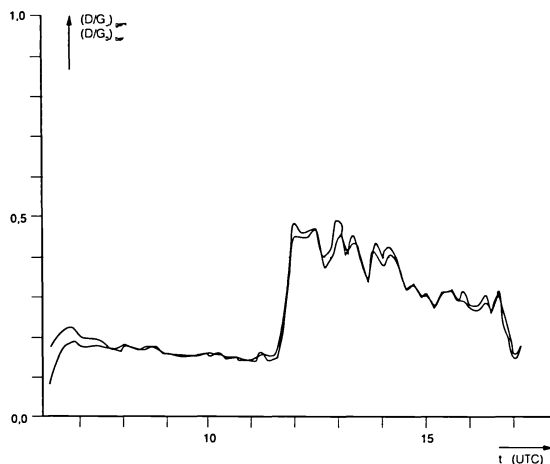
b. 20 mei 1989

Ook dit was een onbewolkte dag. De registratie daarvan (figuur 4.5) toont echter een aantal verschillen met die van 23 mei 1989. De G/G_0 loopt slechts op tot 0,7, een verschil in globale straling van 12% met 23 mei 1989. Verder zien we duidelijk enkele dalen in G/G_0 en $(G/G_0)_{\min}$ om 9.15 en 11.00 UT. In tegenstelling met G/G_0 is D/G_0 met een waarde van bijna 0,3 ongeveer een factor 3 groter dan op 23 mei 1989. Het verschil wordt veroorzaakt door een grotere verstrooiing in de atmosfeer op 20 mei. De turbiditeitsfactor T_L van Linke was op 23 mei ca. 3,5, terwijl op 20 mei de T_L -waarden rond de 8 à 9 schommelden. De directe straling B is dan ook op 20 mei meer verzwakt dan op 23 mei. Uit het verschil van G/G_0 en D/G_0 vinden we voor B/G_0 op 23 mei 0,7 en op 20 mei 0,4.

In de onderste grafiek van figuur 4.5 zien we een verschil tussen de gemeten en de berekende waarde van D/G_0 aan het eind van de middag. Het bleek dat de schaduwscijf niet goed was ingesteld. Dit illustreert de controlemogelijkheid die de registratie van alle drie componenten B , D en G tegelijk oplevert. Uit het vrijwel gelijklopen van berekende en gemeten D/G_0 tot ca. 14.00 uur blijkt de goede kwaliteit van de meting op andere uren.



Figuur 4.6
Idem figuur 4.4, maar voor 10 maart 1989

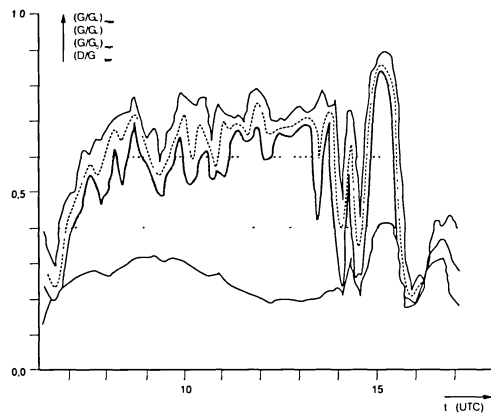


c. 10 maart 1989

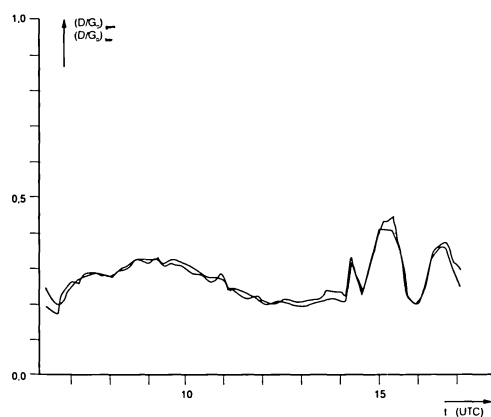
Figuur 4.6 van de registratie op 10 maart 1989 toont een dag die redelijk zonnig begon, daarna een wisselend bewolkt karakter kreeg, dat aan het eind van de dag overging in totaal bewolkt. De overgang tussen wisselend bewolkt en totaal bewolkte hemel om ongeveer 14.30 UT ligt bij de verhouding $(G/G_o)_{max} = 0,4$. Slob en Monna (1991) gebruiken bij hun studie over de bepaling van de zonneshijnduur uit 10-minuutwaarden van de globale straling, als criterium voor geheel bewolkt weer $(G/G_o)_{max} < 0,4$.

Tot ca. 11.30 UT is het nog zonnig, de registratie komt ongeveer overeen met die van 20 mei 1989. We zien het binnentrekken van de bewolking zowel in de bovenste als in de onderste grafiek. Eén wolk in een verder wolkeloze hemel geeft in het algemeen (door reflectie) meer straling dan het stukje blauwe lucht dat hij afschermt. De diffuse straling neemt toe van 0,15 tot 0,4 (zie onderste grafiek) en ook de maximale straling die gemeten kan worden, $(G/G_o)_{max}$, neemt toe als de Zon maar niet achter een wolk schuilgaat. We zien in de bovenste grafiek dat $(G/G_o)_{max}$ pieken heeft die groter zijn dan 0,8 en 0,9. De bijdrage van de directe straling blijft gelijk of neemt zelfs iets af vergeleken met de onbewolkte toestand.

Als er een wolk voor de Zon schuift krijgen we een minimum in de globale straling. Op die momenten geldt dan $D = G$; de directe straling is immers door de wolk afgeschermd. In de bovenste grafiek zien we op een aantal tijdstippen de D/G_o - en $(G/G_o)_{min}$ -kromme elkaar raken.



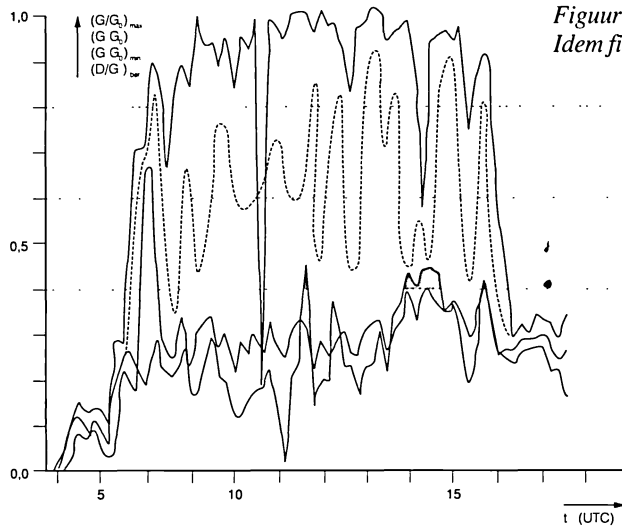
Figuur 4.7
Idem figuur 4.4, maar voor 6 maart 1989



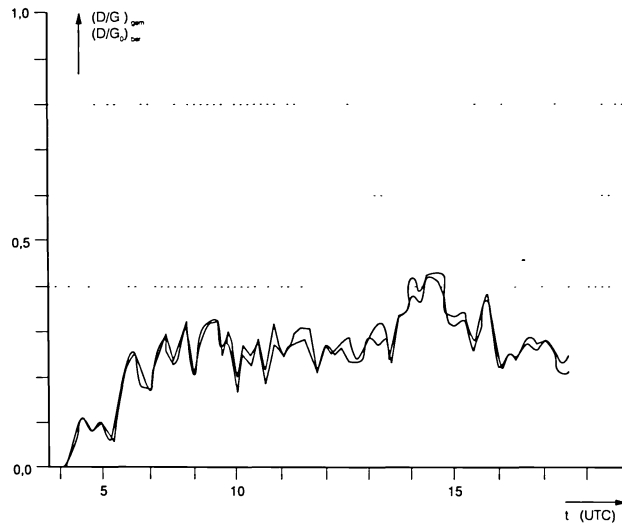
d. 6 maart 1989

Dit was een zonnige dag met wat lichte hoge bewolking of vliegtuigwolken. De $(G/G_0)_{\max}$ - kromme bereikt de waarde 0,8 nauwelijks, maar $(G/G_0)_{\min}$ blijft wel boven de 0,4, zoals figuur 4.7 van 6 maart 1989 laat zien. De contrails (strepen veroorzaakt door vliegtuigen) of cirrus-bewolking (hoge wolken in de vorm van witte plukken of smalle banden met een vezelachtig uiterlijk) kunnen dalen in de $(G/G_0)_{\min}$ geven.

Als de wolkenbanden zo breed zijn dat ze de Zon meer dan 10 minuten afschermen zien we in de bovenste grafiek $(G/G_0)_{\max}$ ook dalen vertonen. In de tweede helft van de middag komt ook lagere bewolking binnendrijven en wordt de registratie vergelijkbaar met die op 10 maart (figuur 4.6).



Figuur 4.8
Idem figuur 4.4, maar voor 21 maart 1989



e. 21 maart 1989

Figuur 4.8 is de registratie van deze wisselend bewolkte dag. We hebben een situatie waarbij in vrijwel elke 10-minuutperiode de Zon wel eens achter een wolk verdween. Dat geeft lage waarden van $(G/G_o)_{\min}$. Daar de Zon ook in ieder 10-minuutijdvak achter een wolk vandaan kwam, zijn de $(G/G_o)_{\max}$ -waarden hoog, tot bijna 1,0. De bovenste grafiek van figuur 4.8 laat duidelijk het grote verschil tussen $(G/G_o)_{\max}$ en $(G/G_o)_{\min}$ zien en toont hoe groot de fluctuaties van G/G_o binnen 10 minuten kunnen zijn.

Uit de besproken vijf voorbeelden kunnen we concluderen, dat metingen met een hoge tijdsresolutie de samenhang tussen bewolking en straling beter laten zien dan uursommen en daarmee het inzicht vergroten. Onderzoek (Slob en Monna, 1991) kan bruikbare algoritmen leveren om diverse weersituaties te onderscheiden, zoals onbewolkt en zonnig, bewolkt en zonnig, totaal bewolkt. Verder blijkt dat voor een zo snel wisselend element als de straling het registreren van de extremen een goed middel is. De extremen geven een beeld van de stralingstoestand op één moment; samen met het tijdsgemiddelde geven ze inzicht omtrent wat in het tijdvak is opgetreden. In dit verband zijn extremen waardevoller dan b.v. de standaarddeviatie.

5 MODELLEN, SCHUINE VLAKKEN EN SPECTRA

In dit hoofdstuk komen de wiskundige modellen aan de orde voor de berekening van zonne-straling op het horizontale vlak (5.1) en op schuine vlakken (5.2). In 5.3 worden resultaten gegeven van stralingsmetingen op schuine vlakken. Het hoofdstuk wordt afgesloten met meetresultaten van de spectrale verdeling van de globale straling (5.4) en een beschouwing over een bijzonder spectraalgebied: het zichtbare licht of daglicht (5.5).

5.1 Modellen voor de berekening van zonnestraling op het horizontale vlak

5.1.1 Inleiding

Indien er geen meetresultaten van de straling op het horizontale vlak beschikbaar zijn, kan de irradiantie ook berekend worden.

Het zal duidelijk zijn dat een precieze berekening met behulp van de transmissiefactoren uit 2.4.1 niet alleen veel rekenwerk vereist, maar het is ook de vraag of de kennis van de verdeling van de gassen en andere bijmengselen in de atmosfeer groot genoeg is om deze aanpak te rechtvaardigen. Daarom is men gedwongen zijn toevlucht te nemen tot eenvoudiger methoden.

In 5.1.2 zal eerst de straling aan de bovenkant van de atmosfeer worden berekend. Deze is slechts afhankelijk van de tijd en van de plaats op Aarde. Daar ze in bekende astronomische formules is uit te drukken (zie ook 6.1), is ze gemakkelijk met behulp van een computer uit te rekenen.

De straling aan de rand van de atmosfeer is ten eerste van belang, omdat deze als parameter gebruikt wordt in verschillende empirische formules voor de berekening van de straling aan het aardoppervlak. In de tweede plaats geeft ze ook de bovengrens aan van de straling aan het aardoppervlak en kan daarom gebruikt worden om verdacht hoge meetwaarden te detecteren.

In 5.1.3 komen de modellen voor de berekening van de straling op het horizontale vlak aan de orde. Er zal daarbij onderscheid worden gemaakt tussen modellen die uursommen geven en modellen die dagsommen leveren.

We moeten hierbij bedenken, dat het nog steeds om modellen gaat, waarbij voor de samenstelling van de atmosfeer van vereenvoudigende veronderstellingen is uitgegaan. De te bespreken modellen kunnen de gemeten straling nooit helemaal benaderen, zeker niet wat betreft frequentieverdelingen.

5.1.2 Berekening van de straling aan de rand van de atmosfeer

De baan van de Aarde om de Zon is ellipsvormig, waarbij de Zon in één van de brandpunten staat (zie ook 6.1). De afstand Aarde-Zon is dus niet constant in de loop van een jaar. We zullen deze variabele afstand dan ook in de af te leiden formule voor de berekening van de

straling tegenkomen. Overigens gaat het daarbij maar om een variatie van minder dan 2%.

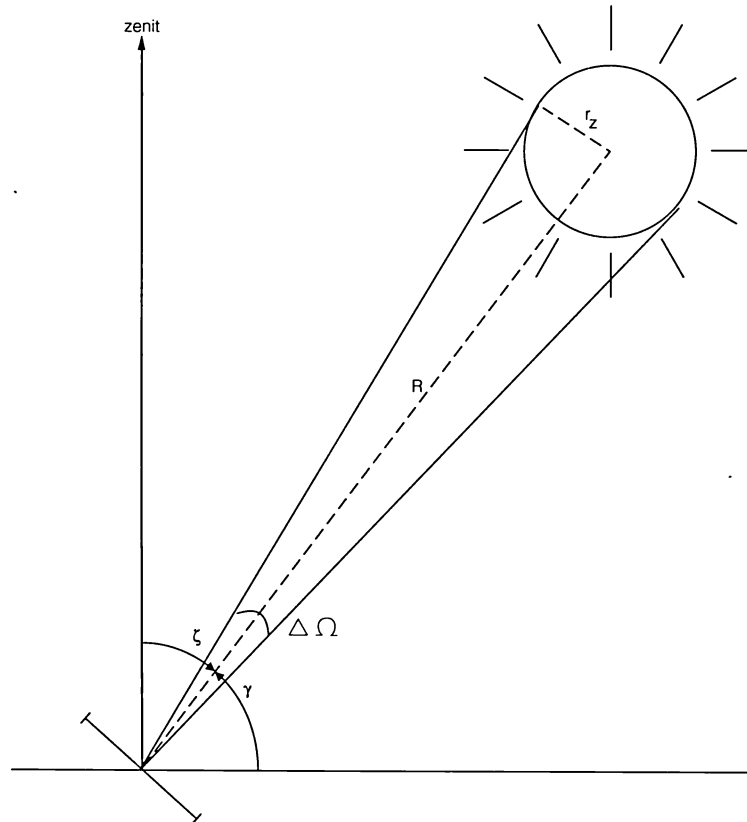
Als we de atmosfeer afwezig denken, kunnen we de instraling aan de rand van de atmosfeer gelijkstellen aan die op het aardoppervlak, omdat er geen extinctie is. Het gaat er dan om de straling te berekenen per eenheid van oppervlak [m²] op het horizontale vlak. Hierbij speelt de zonshoogte een grote rol.

De ruimtehoek (zie 6.3.2), waaronder de Zon vanaf het aardoppervlak wordt gezien, is

$$\Delta\Omega = \frac{\pi r_z^2}{R^2} \quad [\text{sr}]$$

waarin r_z de straal van de Zon, 696000 km
 R de variabele afstand Aarde-Zon.

De totale irradiantie E_e van de Zon op een vlakje loodrecht op de richting van de zonnestralen is dan aan het aardoppervlak (figuur 5.1)



Figuur 5.1 Ruimtehoek $\Delta\Omega$ waaronder de Zon vanaf de Aarde wordt gezien

$$E_e = E_\Omega \Delta\Omega = \frac{E_\Omega \pi r_z^2}{R^2} \quad (5.1)$$

waarin E_Ω de angulaire irradiantie, de ontvangen stralingsflux uit de eenheid van ruimtehoek Ω .

Als R gelijk is aan de gemiddelde afstand Aarde-Zon, \bar{R} , dan is E_e per definitie gelijk aan de zonneconstante I_0' van 1367 Wm^{-2} .

$$I_0' = \frac{E_\Omega \pi r_z^2}{R^2} \quad (5.2)$$

Door (5.1) met (5.2) te vergelijken vinden we

$$E_e = I_0' \frac{\bar{R}^2}{R^2} \quad (5.3)$$

Uit figuur 5.1 is dan eenvoudig in te zien dat de irradiantie op het horizontale vlak wordt:

$$E_e = I_0' \frac{\bar{R}^2}{R^2} \cos \zeta \quad \text{of} \quad E_e = I_0' \frac{\bar{R}^2}{R^2} \sin \gamma \quad (5.4)$$

waarin ζ de zenithoek van de Zon
 γ de zonshoogte.

De factor $(\bar{R}/R)^2$ kan opgezocht worden in The Astronomical Ephemeris of worden berekend met de benadering die Spencer (1971) heeft afgeleid:

$$\left(\frac{\bar{R}}{R}\right)^2 = 1,000110 + 0,034221 \cos \eta d + 0,000719 \cos 2 \eta d + 0,001280 \sin \eta d + 0,000077 \sin 2 \eta d \quad (5.5)$$

waarin $\eta = 2 \pi/365$ [rad]

d het nummer van de dag, waarbij 1 januari = 0.

De maximale fout die men met deze formule maakt is 0,0001.

Een eenvoudiger formule, zoals van Duffie en Beckman (1980)

$$\left(\frac{\bar{R}}{R}\right)^2 = 1 + 0,033 \cos \eta d \quad (5.6)$$

waarin d = het nummer van de dag, waarbij 1 januari = 1, geeft ook goede resultaten. De maximale fout is dan 1,7%.

We zien eenvoudig met (5.5) dat voor 1 januari geldt:

$$\left(\frac{\bar{R}}{R}\right)^2 = 1,000110 + 0,034221 + 0,000719 = 1,035.$$

De factor is groter dan één, hetgeen klopt met het feit dat de Aarde zich in januari het dichtst bij de Zon bevindt (zie 6.1). De onverzwakte irradiantie op een vlak loodrecht op de richting van de zonnestrallen is dan $1,035 \times 1367 \text{ Wm}^{-2} = 1415 \text{ Wm}^{-2}$.

Dogniaux (1977) heeft een veelterm afgeleid voor de directe berekening van E_e , die hier is aangepast voor de actuele waarde 1367 Wm^{-2} van de zonneconstante:

$$E_e = 1367 + 45,795 \cos \eta d + 0,88929 \cos 2 \eta d - 0,00466 \cos 3 \eta d \\ + 1,8224 \sin \eta d + 0,09847 \sin 2 \eta d + 0,18603 \sin 3 \eta d \quad (5.7)$$

waarin $\eta = 2\pi/366$ [rad]
 d het nummer van de dag, waarbij 1 januari = 1.

Met formule (5.4) kunnen we, als de zonshoogte bekend is, de straling aan het aardoppervlak op een zeker tijdstip uitrekenen. De atmosfeer wordt hierbij afwezig gedacht. Substitutie van (6.1.3) in (5.4) geeft:

$$E_e = I_0' \frac{R^2}{R^2} (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \quad (5.8)$$

Deze vergelijking geeft de irradiantie als functie van de plaats op Aarde (breedtegraad ϕ), het seizoen (bepaald door de declinatie van de Zon, δ) en de tijd van de dag (uurhoek ω).

We zien uit (5.8) dat de maximale irradiantie wordt gevonden op plaatsen, waar $\cos \omega = 1$ en $\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi = \cos(\phi - \delta) = 1$, dus bij $\omega = 0$, dat is op de ware middag, 12 uur zonnentijd op breedtegraad $\phi = \delta$. De minimale irradiantie treedt vanzelfsprekend op, wanneer de Zon aan de horizon staat: $\gamma = 0^\circ$, dus $\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = 0$ oftewel $\cos \omega = -\text{tg } \delta \text{ tg } \phi$.

De over een etmaal gemiddelde irradiantie kan worden verkregen door (5.8) over 24 uur te integreren en rekening te houden met het feit dat $E_e = 0$ als de Zon onder de horizon staat. Daar de declinatie δ over een dag maar weinig verandert kunnen $\sin \delta$ en $\cos \delta$ per dag constant worden genomen. Het resultaat is:

$$E_{24} = \frac{I_0'}{\pi} \frac{R^2}{R^2} (\omega_0 \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \sin \omega_0) \quad [\text{Wm}^{-2}] \quad (5.9)$$

waarin ω_0 is berekend uit $\cos \omega_0 = -\text{tg } \delta \text{ tg } \phi$.

Wil men de totale hoeveelheid inkomende straling op een bepaalde dag weten, de dagsom in Jm^{-2} , dan moet E_{24} van die dag worden vermenigvuldigd met 86400, zijnde het aantal seconden in 24 uur:

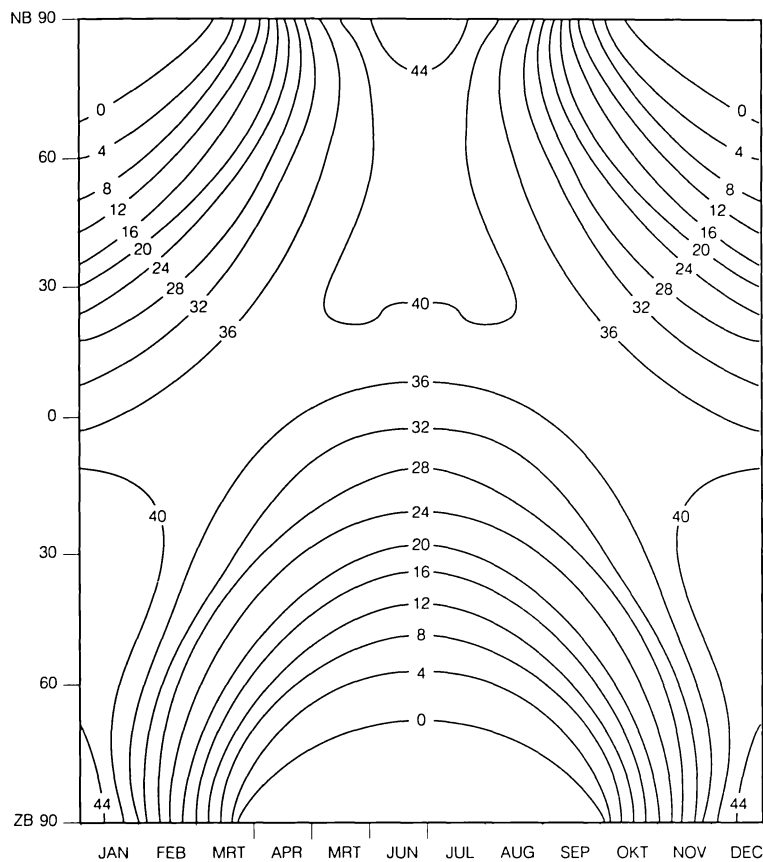
$$H_{24} = \frac{86400 I_0'}{\pi} \left(\frac{R}{R} \right)^2 \sin \phi \sin \delta (\omega_0 - \text{tg } \omega_0) \quad [\text{Jm}^{-2}] \quad (5.10)$$

Met behulp van (5.10) is figuur 5.2 geconstrueerd, waarin de ruimte-tijd variabiliteit van de dagelijkse irradiantie staat uitgezet als functie van de breedtegraad en de maand.

De breedtegraadafhankelijkheid van de dagsommen verandert in de loop van het jaar. In het winterhalfjaar ontvangen de poolstreken geen straling, terwijl in de zomer de dagsommen aan de pool groter zijn dan aan de evenaar. Dit komt doordat de daglengte daar dan zo groot is, waardoor het effect van de lage zonshoogte wordt gecompenseerd.

Het maximum op het zuidelijk halfrond (44 MJ m^{-2}) is groter dan op het noordelijk halfrond omdat dan de Aarde het dichtst bij de Zon staat. De totale jaarlijkse instraling zonder atmosfeer is echter voor beide halfronden gelijk.

Aan de evenaar is de jaarlijkse variatie in de dagelijkse instraling gering, omdat de zenit-hoek van de Zon op de ware middag nooit groter is dan $23,5^\circ$ en de daglengte altijd 12 uur is.



Figuur 5.2 Irradiantie op een horizontaal vlak aan de rand van de atmosfeer in $\text{MJm}^{-2} \text{dag}^{-1}$ als functie van de maand en de breedtegraad

5.1.3 Berekening van de straling op het horizontale vlak

De totale irradiantie op het horizontale vlak kan geschreven worden als

$$G = I \sin \gamma + D = B + D$$

hierbij is

- G de globale straling [Jm^{-2} of Wm^{-2}]
- I de directe straling loodrecht op de richting van de zonnestrallen
- D de diffuse straling
- B de directe straling op het horizontale vlak
- γ de zonshoogte.

Met de hierna te bespreken modellen worden G, I of D voor het hele spectrum van de Zon berekend; het zijn dus niet-spectrale modellen waarin de atmosfeer als een niet-gekromde ruimte wordt behandeld.

Hierbij wordt de splitsing van de globale straling in een directe en diffuse component

aangehouden, omdat voor de berekening van de straling op schuine vlakken I en D als aparte componenten nodig zijn (zie 5.2).

Davies et al. (1984, 1988, 1989) hebben in het kader van Task IX van het International Energy Agency's Solar Heating and Cooling Programme een project uitgevoerd, waarbij 12 verschillende modellen zijn getoetst aan meetseries van 15 stralingsstations verspreid over de Aarde (Australië 4, Canada 3, Europa 4, Verenigde Staten 4).

Uit dit project is gebleken, dat de z.g. *wolkenlaagmodellen* de beste resultaten geven voor de berekening van de globale straling. Voorbeelden zijn het model dat op de Mc Master Universiteit in Canada is ontwikkeld (Davies et al., 1975; Davies en Hay, 1980; Davies en Mc Kay, 1982) en het model van Josefsson (1986). Een bezwaar van deze modellen is hun ingewikkeldheid; ze gaan in wezen uit van de transmissievergelijking (zie 2.4.1) en vereisen een bepaling van alle voorkomende wolkengeslachten in verband met de daar bijbehorende verschillende transmissiefactoren.

Een stap eenvoudiger zijn de *modellen* die geen verschil maken tussen de wolkengeslachten en alleen de *totale hoeveelheid bewolking* vereisen. Een voorbeeld is het model van Kasten (Kasten en Czeplak, 1980; Kasten, 1983). Volgens Kasten is:

$$\frac{G}{G_{\text{onb}}} = 1 - 0,72 \left(\frac{N}{8} \right)^{3,2} \quad (5.11)$$

waarin G_{onb} , de globale straling bij onbewolkte hemel gelijk is aan:

$$G_{\text{onb}} = 0,84 G_o \exp(-0,027 T_L / \sin \gamma) \quad (5.12)$$

met N : de totale bedekkingsgraad (onbewolkt $N = 0$, totaal bewolkt $N = 8$)
 G_o : de totale straling op het horizontale vlak zonder atmosfeer $G_o \equiv E_c$ uit (5.4)
 T_L : de turbiditeitsfactor van Linke
 γ : de zonshoogte.

De derde categorie modellen zijn *regressieformules* die de globale straling koppelen aan de bewolking. Voor de invloed van de bewolking zijn in het algemeen twee parameters beschikbaar, nl. de totale bedekkingsgraad N en de relatieve zonschijnduur S/S_o . De bedekkingsgraad geeft de fractie van de hemelkoepel die bedekt is met wolken in achtste delen. De relatieve zonschijnduur geeft de verhouding van de tijd, dat de zon werkelijk heeft geschinen, S , tot de tijd dat de zon had kunnen schijnen, S_o , indien er geen bewolking was geweest. S_o is in feite de tijd tussen zonsopkomst en zonsondergang.

Het tijdvak waarop beide parameters betrekking hebben, kan een uur, een dag, een decade of een maand zijn - voor de bedekkingsgraad is het dan een gemiddelde. De globale straling heeft dan ook betrekking op hetzelfde tijdvak, dus een uursom, dagsom, decadesom of maandsom.

Volgens Hinzpeter (1959) is de correlatie tussen de dagsommen van de globale straling en de zonschijnduur beter dan die tussen de globale straling en de bewolgingsgraad.

De formules zijn van het type: $G = G_{\text{onb}} f(N)$; $G = G_{\text{onb}} f(S/S_o)$; $G = G_{\text{onb}} f(N, S/S_o)$; $G = G_{\text{onb}} f(\gamma, N)$.

De dagsom en maandsom van de globale straling G op een bewolkte dag kunnen worden geschat met behulp van de volgende door Ångström (1924) opgestelde relatie

$$G = G_{\text{onb}} \left\{ \alpha + (1 - \alpha) S/S_o \right\} \quad (5.13)$$

Hier is α een constante, die verband houdt met de gemiddelde doorlating (transmissie) van een wolkendek voor globale straling. Ångström gaf op grond van een jaar metingen in Stockholm α de waarde 0,25. Later verklaarde Ångström (1925) dat deze waarde betrekking heeft op het gemiddelde geval en dat de waarschijnlijke fout $\pm 0,02$ bedraagt op grond van gegevens uit het tijdvak 1922-1924. Volgens Ångström (1956) vertoont α een variatie met de tijd van het jaar en ook van jaar tot jaar. In het algemeen was α in de zomer kleiner dan 0,25 en in de winter 0,26 à 0,28.

Onderzoek naar een relatie tussen de dagsom van G en S/S_0 is in Nederland verricht door Reesinck (1940) en De Vries (1955) voor Wageningen, door De Boer (1961) voor De Bilt en door Frantzen en Raaff (1982) voor Eelde, De Kooy, De Bilt, Vlissingen en Zuid-Limburg. Resultaten zijn te vinden in Frantzen en Raaff (1982).

Daar de grootheid G_{onb} echter afhankelijk is van de transmissie door de atmosfeer en bovendien niet gemakkelijk is te bepalen, is ten behoeve van de nondimensionalisering door Prescott (1940) gebruikgemaakt van de aan de rand van de atmosfeer invallende straling op een horizontaal vlak G_0 (de z.g. Angot-waarde of straling bij transparante atmosfeer). G_0 kan direct met formule (5.4) worden berekend.

Page (1964), Prescott (1940) en Coulson (1975) gebruiken relaties van de vorm

$$G = G_0 (a + b S/S_0) \quad (5.14)$$

waarbij G_0 volgens (5.4) is te berekenen en $a = 0,25$ en $b = 0,50$. De Jong (1973) heeft veel informatie verzameld over deze regressieformule, ook voor andere landen. Penman (1948) geeft voor Engeland $a = 0,18$ en $b = 0,55$. Volgens Frantzen en Raaff (1982) kan voor maand-
sommen in Nederland worden gebruikt $a = 0,20$ en $b = 0,61$.

Rietveld (1978) heeft verschillende gepubliceerde waarden van a en b bestudeerd en opgemerkt dat a lineair en b hyperbolisch gerelateerd is aan een geschikte gemiddelde waarde van S/S_0 , zodat $a = 0,1 + 0,24 S/S_0$ en $b = 0,38 + 0,08 S/S_0$. Dat levert

$$G = G_0 (0,18 + 0,62 S/S_0) \quad (5.15)$$

Deze formule zou over de hele wereld kunnen gelden en geeft goede waarden voor bewolkte omstandigheden: $S/S_0 < 0,4$.

Glover en Mc Culloch (1958) voeren breedtegraadeffecten in en geven de volgende correlatie

$$G = G_0 (0,29 \cos \phi + 0,52 S/S_0) \quad (5.16)$$

waarbij ϕ de breedtegraad en $\phi < 60^\circ$.

Er is ook wel geopperd dat een niet-lineaire relatie betere schattingen voor dagsommen van G zou kunnen opleveren dan een lineaire, zoals bijvoorbeeld door

Matzke (1933):
$$G = G_{\text{onb}} \left(a + b \sqrt{S/S_0} \right) \text{ en door}$$

Perrin de Brichambaut (1976):
$$G = G_0 \left\{ \sqrt{2 S/S_0 + 1} - 0,72 \right\}$$

In plaats van een niet-lineaire relatie wordt ook wel een discontinuïteit aangebracht in de lineaire relatie, zodat voor $S/S_0 > 0$ de globale straling geschat wordt met een lineaire relatie, terwijl voor $S/S_0 = 0$ de globale straling wordt geschat als de gemiddelde straling op een

zonloze dag. Deze methode wordt door Frantzen en Raaff (1982) toegepast. Hun resultaten voor Nederland zijn voor daggemiddelden

$$G = a_0 + a_1 S/S_0, \quad \text{indien } S/S_0 > 0$$

$$G = G_c, \quad \text{indien } S = 0 \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} \text{waarin } a_0 &= 70,2 + 51,4 \sin(10t - 84,95^\circ) && \text{Wm}^{-2} \\ a_1 &= 141,4 + 105,9 \sin(10t - 83,10^\circ) && \text{Wm}^{-2} \\ G_c &= 45,2 + 33,9 \sin(10t - 84,12^\circ) && \text{Wm}^{-2} \\ t &= \text{decadenummer} && 1-10 \text{ jan.: } 1 \quad 21 \text{ dec.} - 31 \text{ dec.: } 36 \end{aligned}$$

De standaardfout in deze relatie ligt tussen 6 Wm⁻² in de winter en 21 Wm⁻² in de zomer.

Een bijzondere klasse vormen de modellen die de globale straling bij een wolkeloze lucht G_{onb} koppelen aan de zonshoogte γ. De algemene vergelijking is:

$$G_{\text{onb}} = I_0' \sin \gamma (a + b \sin \gamma) \quad [\text{Wm}^{-2}],$$

waarin I₀' = de zonneconstante
a, b = empirische constanten.

De term tussen haakjes geeft de fractie van de directe straling, die door de atmosfeer wordt doorgelaten (Collier en Lockwood, 1974). Lumb (1964) geeft als resultaat van metingen op weerschepen op de Atlantische Oceaan a de waarde 0,597 en b 0,196, gebaseerd op een zonneconstante I₀' = 1380 Wm⁻². Collier en Lockwood (1974) vonden voor Groot Brittannië a = 0,364 en b = 0,277.

Tenslotte geven we nog een formule van Dogniaux en Lemoine (1978), waarin naast de relatieve zonschijnduur ook de dag van het jaar d voorkomt:

$$\begin{aligned} \frac{G}{G_{\text{onb}}} &= 1,10000 \frac{S}{S_0} - 0,35900 \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 + 0,25900 \\ &- \left(0,03530 \frac{S}{S_0} - 0,00997 \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 - 0,02119 \right) \cos \eta d \quad (5.18) \end{aligned}$$

waarin η = 2π/366 en d = het nummer van de dag, waarbij 1 januari = 1.

De vierde en laatste categorie modellen zijn de *Liu-Jordan-modellen* die de gemeten globale straling G splitsen in een diffuse en directe component.

Wanneer alleen de globale straling G is gemeten, is het nodig om correlatievergelijkingen te gebruiken om de diffuse component, D, en daarmee ook de directe straling, B = G-D, uit de globale straling te bepalen. Deze correlatievergelijkingen kunnen als parameter hebben: de relatieve zonschijnduur S/S₀, de bewolkingsgraad N, een turbiditeitscoëfficiënt, de straling aan de rand van de atmosfeer G_o of de globale straling bij onbewolkte lucht G_{onb}.

Liu en Jordan (1960) waren de eersten die met waarnemingen van dagelijkse diffuse en globale straling in Blue Hill (Mass., Ver. Staten) een eenvoudige statistische relatie vonden tussen de diffuse fractie van de totale straling, D/G, en de fractie van de extraterrestrische straling die de grond bereikt, G/G_o. Daar Liu en Jordan hun relatie alleen in grafische vorm presenteren heeft Klein een veelterm door hun gegevens aangepast. Deze functie wordt, met de onderste limiet van Liu en Jordan, gegeven voor dagsommen als:

$$\begin{aligned}
D/G &= 1,0045 + 0,04349 G/G_0 - 3,5227 (G/G_0)^2 + 2,6313 (G/G_0)^3 & G/G_0 &\leq 0,75 \\
D/G &= 0,165 & G/G_0 &> 0,75 \\
& & &(5.19)
\end{aligned}$$

Er zijn door veel onderzoekers een groot aantal van dergelijke vergelijkingen afgeleid. We beperken ons hier tot de volgende twee voor dagsommen.

Erbs et al. (1982) beschouwden de seizoensafhankelijkheid van de relatie en leidden op basis van gegevens van 4 meetstations in de Verenigde Staten de volgende relatie af:

$$\begin{aligned}
&\text{voor daglengten kleiner dan } 10^h 51', \text{ dat is in Nederland van 13 okt. t/m 27 febr.:} \\
D/G &= 1,0 - 0,2727 G/G_0 + 2,4495 (G/G_0)^2 - 11,9514 (G/G_0)^3 + 9,3879 (G/G_0)^4 & G/G_0 &< 0,715 \\
D/G &= 0,143 & G/G_0 &\geq 0,715
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\text{voor daglengten groter dan } 10^h 51', \text{ dat is in Nederland van 28 febr. t/m 12 okt.:} \\
D/G &= 1,0 + 0,2832 G/G_0 - 2,5557 (G/G_0)^2 + 0,8448 (G/G_0)^3 & G/G_0 &< 0,722 \\
D/G &= 0,175 & G/G_0 &\geq 0,722 \\
& & &(5.20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\text{De Jong (1980) heeft op basis van dagsommen voor De Bilt afgeleid:} \\
D/G &= 1 & G/G_0 &< 0,07 \\
D/G &= 1 - 2,3 (G/G_0 - 0,07)^2 & 0,07 &\leq G/G_0 < 0,35 \\
D/G &= 1,33 - 1,46 G/G_0 & 0,35 &\leq G/G_0 < 0,75 \\
D/G &= 0,23 & 0,75 &\leq G/G_0 \\
& & &(5.21)
\end{aligned}$$

Hoewel de relatie van Liu en Jordan is afgeleid uit dagsommen van diffuse en globale straling, is deze ook veel gebruikt voor de splitsing van uursommen van de globale straling in haar directe en diffuse component. Erbs (1980) vond dat de relatie van Liu en Jordan de diffuse fractie van de globale straling onderschat, waarschijnlijk door een onjuiste correctie van de hoeveelheid diffuse straling die door de schaduwband van de diffusometer wordt tegengehouden. Verder is de toepassing in andere gebieden dan de Verenigde Staten twijfelachtig, omdat de relatie van Liu en Jordan slechts gebaseerd is op waarnemingen van één enkel station (Klein en Duffie, 1978).

Om een relatie voor uursommen te vinden gebruikte Erbs (1980) 19.000 waarnemingen van de uurlijkse diffuse en globale straling op vier meetpunten in de Verenigde Staten. Daarmee heeft hij de volgende relatie afgeleid:

$$\begin{aligned}
D/G &= 1,0 - 0,09 G/G_0 & G/G_0 &\leq 0,22 \\
D/G &= 0,9511 - 0,1604 G/G_0 + 4,388 (G/G_0)^2 - 16,638 (G/G_0)^3 & 0,22 &< G/G_0 \leq 0,80 \\
&\quad + 12,336 (G/G_0)^4 & G/G_0 &> 0,80 \\
D/G &= 0,165 & & \\
& & &(5.22)
\end{aligned}$$

Orgill en Hollands (1977) hebben op basis van gemeten uurlijkse radianties in Toronto de volgende vergelijking gevonden:

$$\begin{aligned}
D/G &= 1,0 - 0,249 G/G_0 & G/G_0 &< 0,35 \\
D/G &= 1,557 - 1,84 G/G_0 & 0,35 &\leq G/G_0 \leq 0,75 \\
D/G &= 0,177 & G/G_0 &> 0,75 \\
& & &(5.23)
\end{aligned}$$

De Jong (1980) heeft op basis van uursommen van De Bilt afgeleid:

$$\begin{array}{ll}
 D/G = 1 & G/G_0 \leq 0,22 \\
 D/G = 1 - 6,4 (G/G_0 - 0,22)^2 & 0,22 < G/G_0 \leq 0,35 \\
 D/G = 1,47 - 1,66 G/G_0 & 0,35 < G/G_0 \leq (1,47-R)/1,66 \\
 D/G = R & G/G_0 > (1,47-R)/1,66
 \end{array}
 \tag{5.24}$$

waarin $R = 0,847 - 1,61 \sin \gamma + 1,04 \sin^2 \gamma$

Als we nu de verschillende relaties voor dagsommen en uursommen beschouwen, zien we zowel overeenkomsten als verschillen. Alle relaties naderen tot $D/G = 1$ als G/G_0 klein wordt, dus in gevallen met lage waarden van G ; het is dan totaal bewolkt en de globale straling bestaat alleen uit de diffuse component. Voor grote waarden van G/G_0 , bijvoorbeeld $G/G_0 = 1$, blijkt er nog steeds een hoeveelheid diffuse straling te zijn, al is die in alle formules niet gelijk: variërend van 0,143 tot 0,23.

In De Bilt is ook gevonden dat de maximale globale straling niet gemeten wordt bij onbewolkte hemel, maar bij gedeeltelijk bewolkte lucht, omdat dan naast de directe straling nog een grote hoeveelheid diffuse straling via verstrooiing aan de wolken de sensor van de pyranometer kan bereiken. Voor korte tijdvakken kan dan G zelfs groter dan G_0 zijn!

Het in het begin van dit subhoofdstuk genoemde modelvergelijkingsproject van de IEA heeft aangetoond, wat de "Liu- Jordan"-modellen betreft, dat voor de berekening van uursommen het model van Orgill en Hollands (1977) de voorkeur verdient en voor de berekening van dagsommen van de diffuse straling het model van Erbs et al. (1982).

5.2 Modellen voor de berekening van zonnestraling op schuine vlakken

Meetresultaten van de straling op schuine vlakken zijn slechts in beperkte mate beschikbaar. Eén reden hiervoor is, dat deze gegevens bij de toepassing van zonnecollectoren en passief gebruikte zonneënergie beschikbaar zouden moeten zijn voor een zeer groot aantal verschillende oriëntaties (hellingshoek en azimut). Het is niet praktisch om voor al die oriëntaties lange meetreeksen te verzorgen. Een tweede reden is dat in de meteorologie de straling volgens internationale standaard op een horizontaal vlak wordt gemeten. Daarbij moet de horizon zo goed mogelijk obstakelvrij zijn, opdat de meetgegevens van verschillende stations met elkaar vergeleken kunnen worden en interpolatie tussen de stations wordt vergemakkelijkt. Tenslotte zijn pyranometers in eerste instantie gecalibreerd voor het gebruik in horizontale stand. Zie voor de invloed van een schuin opgestelde pyranometer op de calibratiefactor b.v. Van den Brink et al. (1985).

In dit hoofdstuk komen methoden aan de orde die gebruikt worden om de straling op schuine vlakken te berekenen. Deze berekening gaat uit van de volgende drie componenten: een geometrische transformatie van de directe straling, een integratie van de diffuse radiantie over de hemelkoepel en de van het aardoppervlak gereflecteerde straling binnen het "gezichtsveld" van het beschouwde schuine vlak. We moeten daarbij nog verschil maken tussen modellen die uursommen van de straling berekenen en modellen die dagsommen berekenen.

Op basis van een uur of minder kan de berekening tamelijk exact zijn, maar voor langere tijden leidt de integratie tot niet-lineairiteiten en toenemende fouten (Hay en Davies, 1980). De bepaling van de diffuse en gereflecteerde straling op een schuin vlak vereist dat er veronderstellingen worden gemaakt over de verdeling van de radiantie over de hemelkoepel en het aardoppervlak.

Het is praktisch om de irradiantie van een willekeurig georiënteerd vlak uit te drukken in de irradiaties op het horizontale vlak en een splitsing aan te brengen in de directe straling $B = G$

- D , de diffuse straling D en de globale straling G , dus

$$G_s = B_s + D_s = f_I (G-D) + f_D D + f_g \rho G \quad (5.25)$$

waarbij

de onderindex s aangeeft dat het om het schuine vlak gaat,

f_I de omrekeningsfactor voor de directe straling,

f_D de omrekeningsfactor voor de diffuse straling,

f_g een factor voor de bijdrage van de reflectie aan het aardoppervlak en omliggende gebouwen,

ρ het albedo van het aardoppervlak en omliggende gebouwen (zie tabel 2.3).

We gaan nu achtereenvolgens de directe straling (5.2.1), de diffuse straling (5.2.2), de globale straling (5.2.3) en de totale straling (5.2.4) op schuine vlakken beschouwen, zowel voor uursommen als voor langere integratietijden.

5.2.1 De directe straling op een schuin vlak

Voor korte tijdsintervallen, zoals een uur of minder, is de berekening van de directe straling op een schuin vlak slechts een kwestie van geometrie.

De directe straling op een schuin vlak is:

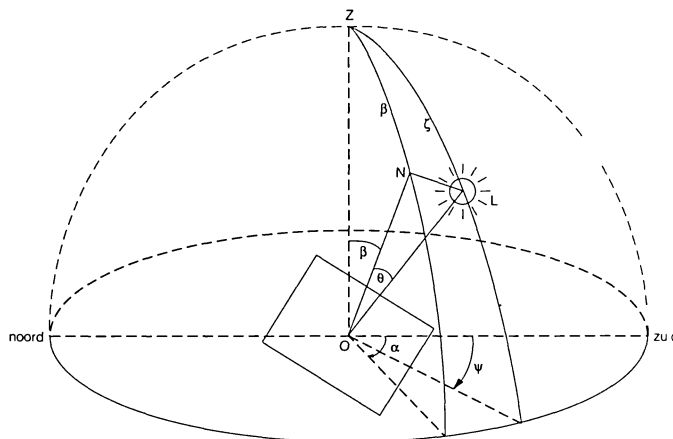
$$B_s = I \cos \theta \quad (5.26)$$

waarbij

I de directe straling uit de richting van de Zon,

θ de invalshoek, dus de hoek tussen de normaal (loodlijn) op het schuine vlak en de richting van de Zon.

Het gaat er nu om θ uit te drukken in bekende grootheden. Daartoe beschouwen we figuur 5.3. Hierin is β de helling van het vlak en dus ook de hoek tussen de normaal op het vlak en de verticale. ψ is het azimut van de Zon en ζ de zenithoek van de Zon, α is het azimut van de projectie van de normaal op het aardoppervlak.



Figuur 5.3 Positie van de Zon (L) ten opzichte van een schuin vlak met hellingshoek β . Zie voor verdere verklaring de tekst

Toepassing van de cosinusregel uit de boldriehoeksmetkunde op de boldriehoek ZLN geeft: $\cos \theta = \cos \beta \cos \zeta + \sin \beta \sin \zeta \cos \text{NZL}$. Hoek NZL = $\alpha - \psi$ en $\zeta = 90^\circ - \gamma$, dus

$$\cos \theta = \cos \beta \sin \gamma + \sin \beta \cos \gamma \cos (\alpha - \psi) \quad (5.27)$$

Hiermee is de hoek van inval uitgedrukt in de bekende grootheden azimut en helling van het vlak, azimut en hoogte van de Zon. Desgewenst kan met formule (6.1.3) de zonshoogte nog worden vervangen door declinatie, breedtegraad en uurhoek.

Uit (5.27) volgt voor het horizontale vlak, $\beta = 0$, $B = I \cos \theta = I \sin \gamma$, dus onafhankelijk van het zonsazimut ψ . Voor een verticaal vlak, $\beta = 90^\circ$, vinden we met (5.27) $B_v = I \cos \theta = I \cos \gamma \cos (\alpha - \psi)$. De onderindex v geeft aan dat het om een verticaal vlak gaat.

Voor een hellend vlak is de irradiantie van de directe straling ook te schrijven als een combinatie van de irradiaties op het horizontale vlak en het verticale vlak (met gelijke oriëntatie als het hellende vlak), volgens

$$B_s = B \cos \beta + B_v \sin \beta .$$

Modellen voor tijden van een dag of langer.

Voor deze categorie modellen moeten we de geometrische relatie (5.27) tussen de richting van de Zon en de normaal op het schuine vlak zodanig integreren, dat het model voor langere tijdsduren geldig is. Daarbij gaan dan de dagelijkse gang in de zonshoogte en in de doorlaatbaarheid van de atmosfeer een rol spelen. Verder moet rekening worden gehouden met de tijd van “zonsopkomst” en “zonsondergang” op het schuine vlak, welke verschilt van die voor het horizontale vlak.

Verschillende auteurs hebben algoritmen ontwikkeld, waarin één of meer van bovengenoemde factoren zijn meegenomen. Het gaat hierbij om de bepaling van de factor f_1 uit formule (5.25)

$$f_1 = \frac{\overline{B_s}}{\overline{B}} = \frac{\int_{\omega_r}^{\omega_s} I \cos \theta dt}{\int_{-\omega}^{\omega} I \cos \zeta dt} \quad (5.28)$$

waarbij

de horizontale strepen gemiddelden over een dag betekenen,
 $-\omega$ en ω de uurhoek van resp. zonsopkomst en zonsondergang,
 ω_r de uurhoek van “zonsopkomst” voor het schuine vlak,
 ω_s de uurhoek van “zonsondergang” voor het schuine vlak.

Liu en Jordan (1960, 1963) hebben de integralen in (5.28) vereenvoudigd door te veronderstellen dat de verhouding tussen de directe straling op het schuine vlak $\overline{B_s}$ en op het horizontale vlak \overline{B} aan het aardoppervlak hetzelfde is als aan de rand van de atmosfeer, dat wil zeggen

$$\frac{\overline{B_s}}{\overline{B}} = \frac{\overline{\cos \theta}}{\overline{\cos \zeta}}$$

Voor schuine vlakken die naar de evenaar zijn gericht, dus op het noordelijk halfrond naar het zuiden, wordt (5.28) dan

$$\frac{\overline{B}_s}{\overline{B}} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \omega'_s \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad (5.29)$$

waarbij

ϕ de breedtegraad,

β de hellingshoek,

δ de declinatie van de Zon,

ω_s de uurhoek van zonsondergang voor een schuin vlak precies op het zuiden $\omega_s = 1/15 \text{ bg}$
 $\cos(-\text{tg } \phi \text{ tg } \delta)$,

ω'_s de uurhoek van zonsondergang voor het schuine vlak. ω'_s is het minimum van ω_s en bg
 $\cos[-\text{tg}(\phi - \beta) \text{tg } \delta]$.

Revfeim (1978) en Jones (1980) breidden het werk van Liu en Jordan (1963) uit tot een formule die voor alle oriëntaties van het schuine vlak bruikbaar is. Later bracht Revfeim (1982) nog een dagelijkse gang in de atmosferische transmissiefactor in rekening door gebruik te maken van een gewichtsfactor $\cos(\pi\omega / 2H)$.

Page (1961) bracht de effecten van atmosferische extinctie in rekening door een representatieve standaard directe-stralingskromme te maken. Hij berekende dagsommen voor iedere maand voor een groot aantal breedtegraden en vijf hellingshoeken. Om veel rekenwerk te voorkomen gaf Page zijn kromme in de vorm van een tweede-graadsveelterm in $\cos \zeta$. Deze veelterm geeft de originele gegevens met een maximale afwijking van 2%.

Uit het IEA modellenvergelijkingsexperiment (Hay en Mc Kay, 1988) is gebleken dat Page's model gemiddeld het beste is, gevolgd door Revfeim. Het model van Page is in staat om nauwkeurige bepalingen van de dagelijkse directe irradiantie op naar het zuiden gerichte vlakken te leveren. De nauwkeurigheid van de bepaling is aanzienlijk lager voor andere oriëntaties. Toch beveelt het eindrapport van de IEA het gebruik van het directe-stralingsalgoritme van Page aan. Vanwege de ruimte moeten we de lezer voor de juiste formules verwijzen naar de originele literatuur: Page (1961), Revfeim (1978).

5.2.2 De diffuse straling op een schuin vlak

De berekening van de diffuse component is het grootste probleem bij de bepaling van de irradiantie op een schuin vlak. Het gaat om de bijdrage van de hele hemelkoepel uitgezonderd de ruimtehoek waarin het schuine vlak "de Zon ziet". De radiantie van de hemelkoepel is zeer variabel, zowel in termen van tijd als met betrekking tot de verdeling over de hemelkoepel. Een heldere hemel heeft een maximale radiantie rondom de zonnenschijf (de circumsolaire diffuse straling), een minimum ongeveer 90° van de Zon af op de zonnemeridiaan en een toeneming in radiantie bij de horizon (CIE, 1973).

Onder een gedeeltelijk bewolkte hemel is de verdeling van de diffuse hemelstraling nog complexer tengevolge van het verstrooiingseffect van wolkendruppeltjes.

Men neemt daarom ook hier weer zijn toevlucht tot vereenvoudigende veronderstellingen om de diffuse radiantie over de hemelkoepel te kunnen integreren.

De meest grove benadering is om de radiantie over de hele hemelkoepel uniform te veronderstellen. Dat is het zogenoemde "isotrope model". Integratie van de radiantie van alle hemelkoepелеlementjes, met hun bijbehorende hoek van inval θ ten opzichte van het schuine vlak, levert dan:

$$f_D = \frac{D_s}{D} = 0,5 (1 + \cos \beta) = (\cos \beta/2)^2 \quad (5.30)$$

waarin

- D_s de diffuse straling op het schuine vlak,
- D de diffuse straling op het horizontale vlak,
- β de hellingshoek van het schuine vlak.

De isotropeveronderstelling kan echter tot grote fouten leiden (Dave, 1977), daar volledige isotropie alleen onder zwaar of totaal bewolkte omstandigheden wordt gevonden. Bij onbewolkte of gedeeltelijk bewolkte hemel, of bij dunne sluierbewolking, is de verdeling zeer anisotroop.

Er zijn veel modellen in de literatuur te vinden die een methode geven voor de berekening van de uurlijkse diffuse straling op een schuin vlak. In het vergelijkingsonderzoek van de IEA (Hay en Mc Kay, 1988) worden er twintig genoemd en met elkaar vergeleken. Hier zullen we ons beperken tot de vier die als beste uit de bus kwamen.

Hay (1979) veronderstelde dat alle anisotrope diffuse straling circumsolair is. Hij definiëerde een "anisotropie index", die de hoeveelheid diffuse straling bepaalt welke als anisotroop kan worden beschouwd. De anisotropie index is de verhouding I/I_0 van de normaal invallende directe straling I tot de normaal invallende directe straling zonder atmosfeer I_0 . Omdat I afhangt van turbiditeit en bewolking is ook de anisotropie index een functie van turbiditeit en bewolking. Het resultaat van Hay is:

$$f_D = \frac{D_s}{D} = \left[\frac{I \cos \theta}{I \cos \zeta} + \left(1 - \frac{I}{I_0} \right) \frac{1 + \cos \beta}{2} \right] \quad (5.31)$$

Hierin is de eerste term tussen rechte haken het anisotrope circumsolaire deel en de tweede term tussen rechte haken het isotrope deel.

Bij totaal bewolkte hemel is $I = 0$; formule (5.31) geeft dan aan dat alle straling isotrope straling is, hij wordt dan identiek aan (5.30). Met afnemende turbiditeit en bewolking, dus toenemende I , wordt de circumsolaire, anisotrope component groter.

Gueymard (1987) heeft een functie ontwikkeld waarin de f_D is uitgedrukt in de zonshoogte γ , de hoek van inval θ , de hellingshoek van het schuine vlak β en de doorschijnendheid ("opacity") van de wolken N_{pt} .

Hij leidde een uitdrukking af voor onbewolkte hemel en voor totaal bewolkte hemel. De f_D voor gedeeltelijk bewolkte hemel wordt dan een gewogen som van de radianties bij heldere en totaal bewolkte hemel volgens:

$$f_D = (1 - N_{pt}) f_{D0} + N_{pt} f_{D1}$$

waarin

- N_{pt} de doorschijnendheid van de bewolking,
- f_{D0} de D_s/D bij onbewolkte hemel,
- f_{D1} de D_s/D bij totaal bewolkte hemel

$$f_{D0} = \exp \left(a_0 + a_1 \cos \theta + a_2 \cos^2 \theta + a_3 \cos^3 \theta \right) + F(\beta) G(\gamma) \quad (5.32)$$

$$a_0 = -0,897 - 3,364 \gamma + 3,960 \gamma^2 - 1,909 \gamma^3$$

$$a_1 = 4,448 - 12,962 \gamma + 34,601 \gamma^2 - 48,784 \gamma^3 + 27,511 \gamma^4$$

$$a_2 = 2,770 + 9,164 \gamma - 18,876 \gamma^2 + 23,776 \gamma^3 - 13,014 \gamma^4$$

$$a_3 = 0,312 - 0,217 \gamma - 0,805 \gamma^2 + 0,318 \gamma^3$$

waarin $\gamma' = 0,01 \cdot \gamma$ (in graden)

$$F(\beta) = (1 - 0,2249 \sin^2 \beta + 0,1231 \sin 2\beta + 0,0342 \sin 4\beta) / 0,7751$$

$$G(\gamma) = 0,408 - 0,323 \gamma' + 0,384 \gamma'^2 - 0,170 \gamma'^3$$

$$f_{D1} = 0,5 (1 + \cos \beta) - \frac{\left\{ \pi^{-1} (\beta \cos \beta - \sin \beta) + 0,5 (1 - \cos \beta) \right\}}{1 + \frac{3}{2b}} \quad (5.33)$$

waarin $b = 0,5 + N_{pt}$.

Een moeilijkheid blijft de invoer van de parameter N_{pt} . Gueymard heeft op basis van metingen in Montreal een verband afgeleid tussen N_{pt} en de hoeveelheid hoge bewolking. Aangezien de laatste grootheid meestal niet bekend is, relateert Gueymard N_{pt} ook aan de relatieve zonneshijnduur S/S_0 : $N_{pt} = 1 - S/S_0$.

Als ook S/S_0 niet bekend is, kan N_{pt} bepaald worden uit D/G

$$N_{pt} = \max \left\{ \min (Y, 1), 0 \right\}$$

$$\begin{array}{ll} \text{met} & Y = 6,6667 D/G - 1,4167 \quad \text{als } D/G \leq 0,227 \\ \text{en} & Y = 1,2121 D/G - 0,1758 \quad \text{als } D/G > 0,227 \end{array}$$

Een voorbeeld:

Stel $D/G = 0,143$ (uit formule 5.20). Dit is kleiner dan 0,227, dus $Y = 6,6667 \cdot 0,143 - 1,4167 = -0,46$. Het minimum van Y en 1 is -0,46; het maximum van -0,46 en 0 is 0 dus $N_{pt} = 0$.

Stel $D/G = 0,5$. Dat is groter dan 0,227, dus $Y = 1,2121 \cdot 0,5 - 0,1758 = 0,43$. Het minimum van Y en 1 is 0,43; het maximum van 0,43 en 0 is 0,43, dus $N_{pt} = 0,43$.

Stel $D/G = 1$. Dat is groter dan 0,227, dus $Y = 1,2121 - 0,1758 = 1,04$. Het minimum van Y en 1 is 1; het maximum van 1 en 0 is 1, dus $N_{pt} = 1$. N_{pt} loopt van 0 bij lage waarden van D/G tot 1 bij hoge waarden van D/G , dus bij veel bewolking.

Perez (1983, 1986) bracht de circumsolaire straling en de grotere helderheid aan de horizon in rekening door beide te superponeren op de isotrope hemelstraling. Wanneer de radiantie van de isotrope hemel L wordt genoemd, is de circumsolaire straling $F_1 L$ en de radiantie van de band langs de horizon $F_2 L$. De zogenoemde helderheidscoëfficiënten F_1 en F_2 zijn uit een groot aantal metingen bepaald als functie van de zenithoek van de Zon ζ , van de diffuse straling op het horizontale vlak D en van $\varepsilon = (D+I)/D$. In deze eerste versie heeft het Perez-model 420 empirische coëfficiënten nodig om de diffuse straling op een schuin vlak te berekenen.

In een tweede versie bracht Perez (1987) het aantal empirische coëfficiënten terug tot 48 en introduceerde hij gereduceerde helderheidscoëfficiënten F_1' en F_2' om de berekeningen geschikt te maken voor een personal computer, zonder aan de nauwkeurigheid van het model afbreuk te doen.

Volgens Perez (1987) is dan:

$$f_D = \frac{D_s}{D} = 0,5 (1 + \cos \beta) (1 - F_1') + F_1' \frac{a}{c} + F_2' \sin \beta \quad (5.34)$$

waarbij:

$$F_1' = F_{11}' + \Delta F_{12}' + \zeta F_{13}'$$

$$F_2' = F_{21}' + \Delta F_{22}' + \zeta F_{23}' \quad (5.35)$$

Tabel 5.1 Gereduceerde helderheidscoëfficiënten F_{1x}' en F_{2x}' behorend bij (5.35) als functie van $\varepsilon = (D+I) / D$

ε klasse	ε boven limiet	F_{11}'	F_{12}'	F_{13}'	F_{21}'	F_{22}'	F_{23}'
1	1,056	-0,011	0,748	-0,080	-0,048	0,073	-0,024
2	1,253	-0,038	1,115	-0,109	-0,023	0,106	-0,037
3	1,586	0,166	0,909	-0,179	0,062	-0,021	-0,050
4	2,134	0,419	0,646	-0,262	0,140	-0,167	-0,042
5	3,230	0,710	0,025	-0,290	0,243	-0,511	-0,004
6	5,980	0,857	-0,370	-0,279	0,267	-0,792	0,076
7	10,080	0,734	-0,073	-0,228	0,231	-1,180	0,199
8	--	0,421	-0,661	0,097	0,119	-2,125	0,446

De waarden van F_{11}' , F_{12}' , F_{13}' , F_{21}' , F_{22}' en F_{23}' staan als functie van ε in tabel 5.1 gegeven. $\varepsilon = (D+I)/D$, waarbij D de diffuse straling op het horizontale vlak en I de directe straling loodrecht op de richting naar de Zon. Voor totaal bewolkt weer is $I = 0$ en $\varepsilon = 1$. ε valt dan in klasse 1 van tabel 5.1. Bij heldere hemel is D klein en kan ε groter dan 10 worden, waardoor hij in klasse 8 terechtkomt.

$$\Delta = mD/I_0$$

waarbij m de relatieve optische massa volgens formule (2.20)

$$I_0 \text{ de straling aan de rand van de atmosfeer, verg. (5.8)}$$

Tenslotte a en c , die samenhangen met de ruimtehoek waaronder het schuine vlak en het horizontale vlak de circumsolaire straling "zien". Perez neemt voor de straal van de circumsolaire schijf 25° aan.

$$a = 0,187 \chi_h \cos \theta \quad \theta < 65^\circ$$

$$a = 0,00374 \chi_h (115 - \theta) \sin \left(\frac{115 - \theta}{2} \right) \quad 65^\circ \leq \theta \leq 115^\circ$$

$$a = 0 \quad \theta > 115^\circ$$

waarbij

$$\chi_h = \frac{115 - \zeta}{50} \quad \text{als } \zeta \geq 65^\circ \quad \chi_h = 1 \quad \text{als } \zeta < 65^\circ$$

$$c = 0,187 \cos \zeta \quad \zeta < 65^\circ$$

$$c = 0,00374 (115 - \zeta) \sin \left(\frac{115 - \zeta}{2} \right) \quad \zeta \geq 65^\circ$$

Hay en McKay (1988) concluderen in het eindrapport van het IEA-modellenvergelijkingsproject, dat het Perezmodel kan worden aanbevolen om gebruikt te worden voor de berekening van uurwaarden van de straling op schuine vlakken. Ondanks het gebruik van empirische coëfficiënten is het model algemeen toepasbaar en behoudt het zijn superioriteit bij een groot aantal vlakoriëntaties en klimaatcondities.

Naast deze internationale vergelijking heeft Van den Brink (1987) dertien modellen getoetst - waaronder de modellen van Hay en Perez en enkele van Nederlandse origine - aan meetgegevens van verschillend georiënteerde vlakken in Cabauw (zie 5.3). Verder heeft hij met deze modellen berekeningen uitgevoerd aan actieve en passieve zonneënergiesystemen. De hoogste nauwkeurigheid werd in deze studie vertoond door het model van Perez (1987). Dit nieuwe vereenvoudigde Perezmodel wordt daarom aanbevolen voor gebruik in Nederland.

Modellen voor tijden van een dag of langer.

Er kunnen drie methoden worden gevolgd om dag- of langere tijdsgemiddelden van de diffuse straling op een schuin vlak te bepalen.

Eén berekening per dag: Deze modellen sluiten de afhankelijkheid van de positie van de Zon uit, zoals bijvoorbeeld het isotrope model (5.30) dat alleen afhankelijk is van de hellingshoek.

Uurlijkse berekeningen: Hierbij wordt één van de uurlijkse diffuse-stralingsmodellen gebruikt om de uurlijkse irradianties te berekenen en dan te sommeren om dagsommen voor het schuine vlak te krijgen. In het IEA-vergelijkingsproject is hiervoor het model van Gueymard (1987) gebruikt.

Twee berekeningen voor dagdelen: Deze methode houdt de veronderstelling in dat D_s/D kan worden bepaald uit een lineaire interpolatie tussen de corresponderende waarden van het dagdeel, waarbinnen er alleen diffuse straling op het schuine vlak kan vallen en het dagdeel, waarbinnen naast de diffuse straling ook de directe straling het schuine vlak kan bereiken. Daarbij moeten de zenithhoek van de Zon en de hoek van inval van de directe straling voor beide dagdelen bepaald worden.

5.2.3 De globale straling op een schuin vlak

De ursommen van de globale straling op een schuin vlak zijn te bepalen door sommatie van de directe en diffuse bijdragen. Voor de eerste kan de exacte formule (5.26) gebruikt worden. Voor de diffuse straling het aanbevolen model van Perez (5.34) of dat van Gueymard (5.32 en 5.33).

Voor gehele dagen of langere tijdschalen gaat het bij de berekening van de globale straling op een schuin vlak om de combinatie van een van de directe-stralingsmodellen met een van de diffuse-stralingsmodellen, beide voor een dag of langer.

Er kan ook een speciaal model voor de globale straling ontwikkeld worden, zoals is gedaan bij de berekening van de straling op schuine vlakken voor de European Solar Radiation Atlas (Palz, 1984). In dit grotendeels door Page en Krochmann ontwikkelde model wordt onderscheid gemaakt tussen tijdvakken met heldere hemel en bewolkte hemel. Voor een beschrijving van dat model wordt verwezen naar Page (1986).

5.2.4 De totale straling op een schuin vlak

Berekening van de totale straling op schuine vlakken omvat niet alleen de stralingsfluxen van de hemel, maar ook die door reflectie aan het aardoppervlak en aan andere oppervlakken die "gezien" worden door het schuine vlak.

Dit is een zeer complexe zaak, omdat de reflectie aan omliggende obstakels van plaats tot

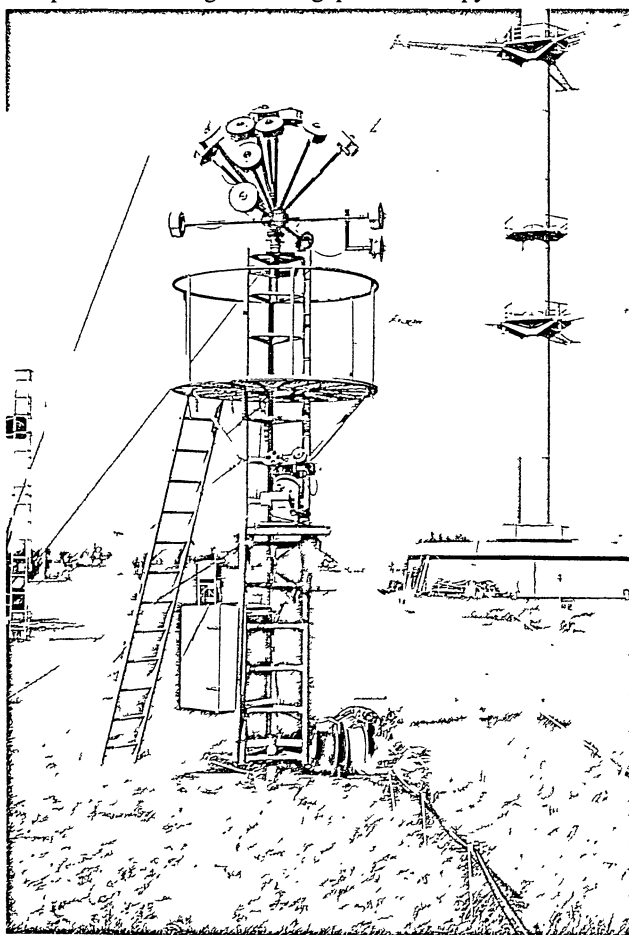
plaats verschillend is. Meestal wordt daarom alleen maar de reflectie aan het aardoppervlak in de berekening betrokken, waarbij dan nog vaak wordt uitgegaan van isotrope diffuse terugkaatsing. De bijdrage van een isotroop reflecterend aardoppervlak is:

$$D_{rs} = \rho G \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} = \rho G (\sin \beta/2)^2 \quad (5.36)$$

waarin ρ het albedo van het aardoppervlak (zie tabel 2.3).

5.3 Resultaten van metingen en berekeningen op schuine vlakken

In Cabauw (gemeente Lopik) zijn van maart 1979 tot oktober 1981 metingen verricht van de globale straling op elf verschillend georiënteerde schuine vlakken. Daarnaast werd de globale straling op het horizontale vlak gemeten en de directe straling met behulp van twee pyrhelimeters die op een zonnevolger waren geplaatst. Een pyranometer die ondersteboven



Figuur 5.4 Overzicht van de opstelling voor de meting van de globale straling op schuine vlakken in Cabauw

was gemonteerd gaf de resultaten van de door het aardoppervlak - gras - gereflecteerde straling. Tenslotte werd met een Campbell-Stokes zonneshijnmeter de duur van de zonneshijn gemeten. Figuur 5.4 geeft een indruk van de meetopstelling.

De meetapparatuur stond opgesteld op een open en vlak grasland bij de 200 m hoge meteorologische meetmast van het KNMI (51,96° NB, 4,93° OL). De gegevens werden als zesminutengemiddelden opgeslagen op magneetband. Uit deze zesminuutwaarden werden uursommen berekend. De meetresultaten zijn uitgebreid gecontroleerd en waar nodig verbeterd en aangevuld. Door uitval van instrumenten bleven er ongeveer twee complete jaren meetgegevens over.

Twaalf pyranometers waren op een 4 m hoge mast geplaatst in de volgende oriëntaties (richting en hellingshoek β): noord, 90; oost, 90; zuid, 90; west, 90; oost, 45; zuidoost, 45; zuid, 45; zuidwest, 45; west, 45; zuid, 67,5; zuid, 22,5 en horizontaal.

Tabel 5.2 *Gemiddelde dagsommen van de globale (GLO), directe (DIR), diffuse (DIF) en door de bodem gereflecteerde (REF) straling op een horizontaal vlak en op 11 schuine vlakken met verschillende oriëntaties in MJm²*

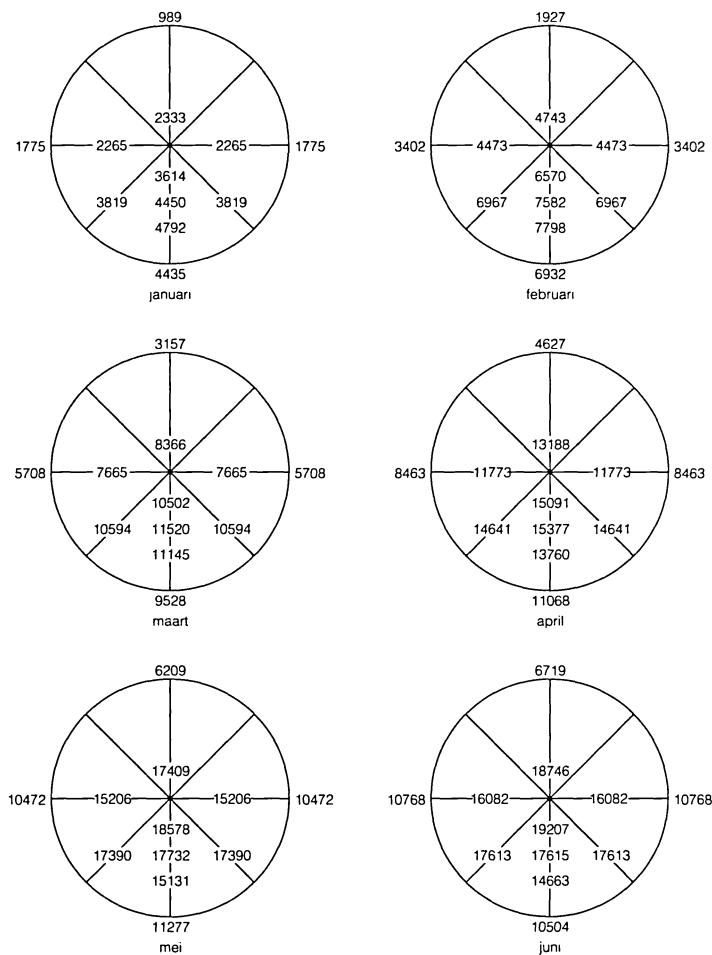
VLAK	HORIZONTAAL			ZUID 22,5°				ZUID 45°			
DAG	GLO	DIR	DIF	GLO	DIR	DIF	REF	GLO	DIR	DIF	REF
15-1	2,33	0,62	1,71	3,61	1,52	2,08	0,02	4,45	2,19	2,19	0,07
30-1	3,35	0,95	2,40	4,91	2,02	2,86	0,03	5,85	2,79	2,97	0,10
15-2	4,74	1,40	3,34	6,57	2,59	3,94	0,04	7,58	3,38	4,06	0,14
28-2	6,40	2,02	4,38	8,34	3,29	5,00	0,05	9,33	4,06	5,09	0,19
15-3	8,37	2,95	5,42	10,50	4,34	6,10	0,06	11,52	5,07	6,20	0,25
30-3	10,70	4,15	6,55	12,78	5,57	7,13	0,08	13,54	6,14	7,09	0,31
15-4	13,19	5,30	7,89	15,09	6,53	8,46	0,10	15,38	6,77	8,22	0,39
30-4	15,51	6,24	9,27	17,03	7,20	9,71	0,12	16,70	7,08	9,17	0,46
15-5	17,41	7,15	10,26	18,58	7,89	10,55	0,13	17,73	7,47	9,76	0,51
30-5	18,57	7,93	10,64	19,34	8,48	10,72	0,14	18,04	7,80	9,69	0,54
15-6	18,75	8,10	10,65	19,21	8,48	10,59	0,14	17,62	7,64	9,43	0,55
30-6	18,04	7,51	10,53	18,48	7,85	10,49	0,14	16,91	7,04	9,34	0,53
15-7	16,99	6,76	10,23	17,70	7,22	10,35	0,13	16,40	6,61	9,29	0,50
30-7	15,96	6,34	9,62	17,12	7,05	9,95	0,12	16,26	6,68	9,11	0,47
15-8	14,77	6,02	8,75	16,38	7,01	9,26	0,11	16,12	6,93	8,75	0,43
30-8	13,04	5,27	7,77	15,05	6,52	8,43	0,10	15,41	6,78	8,24	0,38
15-9	10,80	4,17	6,63	13,06	5,59	7,38	0,08	13,83	6,17	7,34	0,32
30-9	8,41	3,12	5,29	10,79	4,61	6,12	0,06	11,80	5,40	6,15	0,25
15-10	6,17	2,25	3,92	8,36	3,70	4,61	0,05	9,47	4,59	4,70	0,18
30-10	4,27	1,43	2,84	6,15	2,67	3,45	0,03	7,29	3,50	3,67	0,12
15-11	2,88	0,76	2,12	4,13	1,65	2,46	0,02	4,97	2,28	2,61	0,08
30-11	2,09	0,45	1,64	3,05	1,10	1,94	0,02	3,72	1,59	2,07	0,06
15-12	1,78	0,41	1,37	2,70	1,09	1,60	0,01	3,34	1,61	1,68	0,05
30-12	1,83	0,46	1,37	2,85	1,24	1,60	0,01	3,54	1,82	1,66	0,05

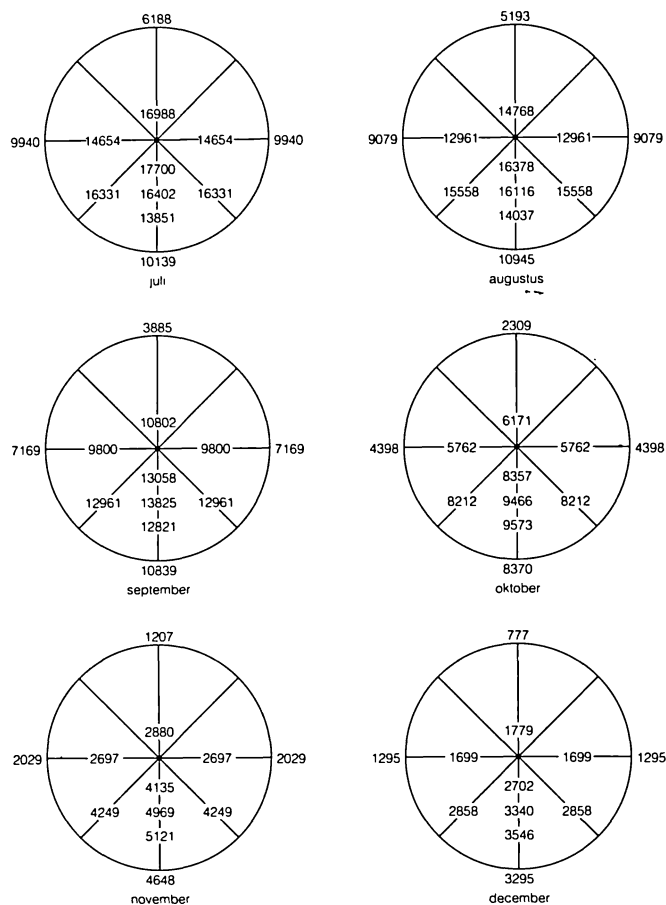
VLAK	ZUID 67,5°				ZUID 90°				ZUIDOOST EN ZUIDWEST 45°			
DAG	GLO	DIR	DIF	REF	GLO	DIR	DIF	REF	GLO	DIR	DIF	REF
15-1	4,79	2,52	2,13	0,14	4,43	2,47	1,73	0,23	3,82	1,68	2,07	0,07
30-1	6,17	3,13	2,84	0,21	5,61	2,99	2,29	0,33	5,19	2,18	2,98	0,10
15-2	7,80	3,66	3,85	0,29	6,93	3,38	3,08	0,47	6,97	2,70	4,13	0,14
28-2	9,29	4,21	4,69	0,39	8,08	3,72	3,72	0,64	8,64	3,33	5,13	0,19
15-3	11,15	5,04	5,59	0,52	9,53	4,23	4,46	0,84	10,59	4,27	6,07	0,25
30-3	12,59	5,78	6,15	0,66	10,48	4,54	4,87	1,07	12,54	5,34	6,89	0,31
15-4	13,76	5,99	6,96	0,81	11,07	4,30	5,45	1,32	14,64	6,09	8,16	0,39
30-4	14,48	5,90	7,62	0,96	11,18	3,86	5,77	1,55	16,27	6,56	9,26	0,45
15-5	15,13	5,95	8,11	1,07	11,28	3,60	5,94	1,74	17,39	7,06	9,82	0,51
30-5	15,19	6,01	8,04	1,15	11,02	3,42	5,75	1,86	17,79	7,50	9,75	0,54
15-6	14,66	5,73	7,77	1,16	10,50	3,10	5,53	1,87	17,61	7,43	9,63	0,55
30-6	14,08	5,28	7,69	1,11	10,14	2,83	5,51	1,80	17,04	6,86	9,65	0,53
15-7	13,85	5,09	7,71	1,05	10,14	2,88	5,56	1,70	16,33	6,36	9,48	0,50
30-7	13,97	5,37	7,62	0,98	10,48	3,28	5,60	1,60	15,90	6,29	9,14	0,47
15-8	14,04	5,82	7,30	0,91	10,95	3,86	5,61	1,48	15,56	6,36	8,76	0,43
30-8	13,72	6,01	6,91	0,80	11,21	4,34	5,57	1,30	14,73	6,06	8,29	0,38
15-9	12,82	5,80	6,35	0,67	10,84	4,55	5,21	1,08	12,96	5,35	7,29	0,32
30-9	11,52	5,37	5,63	0,52	9,93	4,52	4,57	0,84	10,66	4,55	5,86	0,25
15-10	9,57	4,77	4,42	0,38	8,37	4,24	3,51	0,62	8,21	3,76	4,27	0,18
30-10	7,54	3,80	3,48	0,26	6,74	3,52	2,79	0,43	6,18	2,79	3,26	0,13
15-11	5,12	2,56	2,38	0,18	4,65	2,46	1,90	0,29	4,25	1,78	2,39	0,08
30-11	3,86	1,83	1,90	0,13	3,54	1,79	1,54	0,21	3,21	1,21	1,94	0,06
15-12	3,55	1,88	1,56	0,11	3,30	1,86	1,26	0,18	2,86	1,22	1,59	0,05
30-12	3,80	2,13	1,56	0,11	3,55	2,11	1,25	0,18	3,00	1,39	1,56	0,05

VLAK	OOST EN WEST 45°				OOST EN WEST 90°				NOORD 90°			
DAG	GLO	DIR	DIF	REF	GLO	DIR	DIF	REF	GLO	DIR	DIF	REF
15-1	2,27	0,65	1,55	0,07	1,77	0,53	1,01	0,23	0,99	0	0,76	0,23
30-1	3,20	0,94	2,16	0,10	2,46	0,73	1,39	0,33	1,38	0	1,05	0,33
15-2	4,47	1,32	3,02	0,14	3,40	0,96	1,97	0,47	1,93	0	1,45	0,47
28-2	5,92	1,81	3,92	0,19	4,42	1,23	2,55	0,64	2,53	0	1,89	0,64
15-3	7,67	2,56	4,86	0,25	5,71	1,66	3,21	0,84	3,16	0	2,32	0,84
30-3	9,63	3,51	5,81	0,31	7,02	2,18	3,77	1,07	3,83	0	2,76	1,07
15-4	11,77	4,39	7,00	0,39	8,46	2,61	4,53	1,32	4,63	0,01	3,30	1,32
30-4	13,68	5,07	8,15	0,46	9,59	2,89	5,15	1,55	5,48	0,10	3,83	1,55
15-5	15,21	5,73	8,96	0,51	10,47	3,17	5,56	1,74	6,21	0,27	4,20	1,74
30-5	16,04	6,32	9,18	0,54	10,85	3,43	5,56	1,86	6,64	0,46	4,32	1,86
15-6	16,08	6,42	9,12	0,55	10,77	3,45	5,45	1,87	6,72	0,54	4,30	1,87
30-6	15,49	5,93	9,03	0,53	10,40	3,15	5,45	1,80	6,53	0,47	4,26	1,80
15-7	14,65	5,34	8,82	0,50	9,94	2,84	5,40	1,70	6,19	0,33	4,16	1,70
30-7	13,88	5,05	8,36	0,47	9,57	2,73	5,24	1,60	5,74	0,20	3,94	1,60
15-8	12,96	4,84	7,69	0,43	9,08	2,70	4,90	1,48	5,19	0,10	3,62	1,48

30-8	11,62	4,32	6,92	0,38	8,30	2,51	4,48	1,30	4,58	0,03	3,25	1,30
15-9	9,80	3,51	5,97	0,32	7,17	2,17	3,93	1,08	3,88	0	2,80	1,08
30-9	7,79	2,73	4,81	0,25	5,88	1,80	3,24	0,84	3,10	0	2,26	0,84
15-10	5,76	2,04	3,54	0,18	4,40	1,42	2,36	0,62	2,31	0	1,69	0,62
30-10	4,04	1,34	2,58	0,12	3,13	0,97	1,73	0,43	1,67	0	1,24	0,43
15-11	2,70	0,74	1,87	0,09	2,03	0,56	1,18	0,29	1,21	0	0,92	0,29
30-11	1,98	0,45	1,47	0,06	1,50	0,36	0,93	0,21	0,93	0	0,72	0,21
15-12	1,70	0,43	1,22	0,05	1,30	0,36	0,76	0,18	0,78	0	0,60	0,18
30-12	1,76	0,50	1,21	0,05	1,36	0,42	0,76	0,18	0,78	0	0,60	0,18

De resultaten van de metingen zijn gegeven in tabel 5.2 en figuur 5.5. Tabel 5.2 geeft de resultaten in MJm⁻² per dag voor het horizontale vlak en de elf schuine vlakken voor twee data per maand, zowel voor de globale straling, de directe straling, de diffuse straling, als van de door de grond gereflecteerde straling. Voor de laatste is een albedo van 0,20 aangehouden, dat representatief is voor het grasoppervlak in Cabauw (Slob et al., 1980).





Figuur 5.5 Resultaten van de metingen van de globale straling, in $\text{kJ m}^{-2} \text{dag}^{-1}$ op het horizontale vlak en 11 schuine vlakken in Cabauw voor de 12 maanden in het jaar. De waarden in het middelpunt geven de resultaten op het horizontale vlak weer en op de randen van de cirkels de resultaten op de verticale vlakken in de diverse windrichtingen

In figuur 5.5 zien we, zoals te verwachten was, dat de op het zuiden georiënteerde vlakken de meeste globale straling ontvangen. De grootte van het maximum hangt af van de hellingshoek en het seizoen. In de maanden oktober t/m februari krijgt een vlak met een hellingshoek $\beta = 67,5^\circ$ de meeste straling, in de maanden maart, april en september een zuidvlak met $\beta = 45^\circ$. In de overige maanden (mei t/m augustus) is door de hoge zonnestand de meeste straling op een vlak met een hellingshoek van $22,5^\circ$ te verwachten.

Hoeveel zonneënergie verliezen we, als het vlak niet op het zuiden is georiënteerd, maar bijvoorbeeld op het zuidwesten of zuidoosten? Omdat in die richtingen alleen bij $\beta = 45^\circ$ is gemeten vergelijken we zuid 45° met zuidoost 45° en zuidwest 45° . We vinden dan in oktober t/m januari een verschil van 13 à 14%. Dit verschil loopt terug via 5 à 8% in februari, maart, april en september tot nul in juni en juli. In deze beide zomermaanden maakt het voor de te ontvangen zonneënergie dus niet zoveel uit of een collector precies op het zuiden is georiënteerd (zie ook Oke, 1987).

Om een indruk te krijgen van de variabiliteit in Nederland van de straling op verschillende hellende vlakken beschouwen we een rapport van Van den Brink en Schoonewille (1987), die met het Perezmodel (zie 5.2.2) berekeningen hebben uitgevoerd voor De Bilt, Eelde en

Vlissingen. Ze zijn daarbij uitgegaan van de gegevens voor het Test Reference Year (TRY) van de Europese Gemeenschap (Lund, 1985), voor het tijdvak 1961-1980. In tabel 5.3 zijn de jaarsommen in kWh m⁻² van de globale straling op het horizontale vlak (G) en de totale straling op zeven verschillende vlakken (G_s) voor De Bilt, Vlissingen en Eelde overgenomen.

Tabel 5.3 Jaarsommen in kWhm⁻² van de globale straling op het horizontale vlak (gemeten) en de totale straling op zeven verschillende vlakken (berekend) voor De Bilt, Vlissingen en Eelde, volgens Van den Brink en Schoonewille (1987) en Palz (1984)

plaats	tijdvak	richting en hellingshoek van het vlak							
		hor	Z 90	W 90	N 90	O 90	Z 67,5	Z 45	Z 22,5
De Bilt ¹⁾	1961-'80	985	795	622	355	601	1005	1115	1106
De Bilt ²⁾	1966-'75	991	777	613	369	613			
Vlissingen ¹⁾	1961-'80	1009	822	614	356	594	1037	1149	1137
Vlissingen ²⁾	1966-'75	1050	814	650	391	650			
Eelde ¹⁾	1961-'80	980	799	633	355	598	1006	1113	1102
Eelde ²⁾	1966-'75	1014	792	635	383	635			
verhoudingen ten opzichte van de straling op het horizontale vlak									
De Bilt ¹⁾	1961-'80	1,00	0,807	0,631	0,360	0,610	1,020	1,132	1,123
De Bilt ²⁾	1966-'75	1,00	0,784	0,619	0,372	0,619			
Vlissingen ¹⁾	1961-'80	1,00	0,815	0,609	0,353	0,589	1,028	1,139	1,127
Vlissingen ²⁾	1966-'75	1,00	0,775	0,619	0,372	0,619			
Eelde ¹⁾	1961-'80	1,00	0,815	0,646	0,362	0,610	1,027	1,136	1,124
Eelde ²⁾	1966-'75	1,00	0,781	0,626	0,378	0,626			

¹⁾ Van den Brink en Schoonewille (1987) ²⁾ Palz (1984)

Verder zijn ook de resultaten vermeld, die in het kader van de European Solar Radiation Atlas (Palz, 1984) zijn berekend met het model van Page (1986), gebaseerd op het tijdvak 1966-1975.

Omdat we hier te maken hebben met twee verschillende tijdvakken, zijn de berekende waarden voor de verschillende vlakken "genormaliseerd" door ze te delen door de globale straling op het horizontale vlak: G_s/G. Deze verhoudingen zijn ook in tabel 5.3 opgenomen.

Wat de variabiliteit over Nederland betreft zien we dat de verhoudingen G_s/G voor Eelde en Vlissingen hoogstens 2% afwijken van die voor De Bilt, zowel voor de berekeningen van Van den Brink als voor die van Palz. Vergelijken we de rekenresultaten van Van den Brink en Palz voor G_s/G met elkaar, dan vinden we afwijkingen tot 5% (positief en negatief). Deze verschillen ontstaan door het gebruik van twee verschillende rekenmodellen: Perez et al. (1987) en Page (1986).

De conclusie luidt dan ook, dat bij het gebruik van één model de variabiliteit over Nederland in de berekende straling op verschillend georiënteerde vlakken is te verwaarlozen. Het gebruik van verschillende rekenmodellen kan aanleiding geven tot afwijkingen van 5%.

Voor resultaten van de globale en diffuse straling op schuine vlakken in andere landen van Europa wordt verwezen naar Palz (1984). In deze European Solar Radiation Atlas zijn voor iedere maand van het jaar kaarten van Europa gepubliceerd met isolijnen van de gemiddelde dagelijkse globale straling (kWhm⁻²) voor acht verschillende vlakken. In tabellen zijn voor

102 plaatsen in Europa de gemiddelde dagelijkse globale en diffuse straling (kWh m^{-2}) per maand voor twaalf vlakken gegeven. Verder zijn er rekenresultaten vermeld van de gemiddelde dagelijkse zonnestraling per maand, die door enkele en dubbele beglazing valt in 16 verschillend georiënteerde wanden.

5.4 Spectrale verdeling van de globale straling

In sommige kringen bestaat behoefte aan informatie over de spectrale verdeling van de globale straling. Deze interesse houdt soms verband met de veranderingen die materialen ondergaan als ze worden blootgesteld aan de buitenlucht. Voor deze veranderingen is het ultraviolette deel van de globale straling ($\lambda < 0,4 \mu\text{m}$) hoofdzakelijk verantwoordelijk vanwege de oxidantenvorming. In het algemeen is de laatste tijd vanwege veranderingen in de hoeveelheid stratosferisch ozon de belangstelling voor het voor de mens gevaarlijke UV-B (0,28-0,32 μm) enorm toegenomen. De fotosynthese bij planten wordt bepaald door het zichtbare deel van de globale straling.

De spectrale verdeling wordt gemeten door één van de halve bollen van de pyranometer (zie 3.1.2) te vervangen door een materiaal dat slechts een gedeelte van het zonnenspectrum doorlaat: een filter. Een pyranometer met een RG-8 filter - doorlaatbaarheidsgrenzen van 0,7-3,0 μm - meet dus alleen het infrarode deel van het spectrum. Verder is op het KNMI gemeten met een filter dat slechts het spectrum 0,3-0,38 μm (het ultraviolet) doorlaat. De derde component, het zichtbare gebied (0,38-0,70 μm) wordt gevonden door de totale globale straling te verminderen met de infrarode en ultraviolette straling.

Met zo'n opstelling zijn door het KNMI in het tijdvak augustus 1971-juli 1974 de fracties gemeten van de totale globale straling in de drie spectrale gebieden ultraviolet, zichtbaar licht en infrarood.

Tabel 5.4 *Gemeten percentages van ultraviolet, zichtbaar licht en infrarood in de globale straling te De Bilt*

kwartaal	ultraviolet 0,3 - 0,38 μm	zichtbaar 0,38 - 0,70 μm	infrarood 0,7 - 3,0 μm
winter, helder	3,4%	40,9%	55,7%
winter, bewolkt	4,7%	53,5%	41,8%
zomer, helder	4,0%	45,7%	50,3%
zomer, bewolkt	5,4%	46,4%	48,2%

In tabel 5.4 zijn de resultaten gegeven voor de drie winter- en de drie zomermaanden, verdeeld in heldere ($S/S_0 \geq 80\%$) en bewolkte ($S/S_0 \leq 20\%$) dagen. Uit deze tabel blijkt, dat op een heldere dag in de winter de fractie van het infrarood ca. 5% hoger is dan op een heldere dag in de zomer. Deze verschuiving gaat ten koste van de straling in het zichtbare gebied. Heldere dagen in de winter komen meestal voor bij oostenwind. In deze lucht, welke weinig waterdamp bezit, wordt minder infrarode straling geabsorbeerd. Op een bewolkte dag in de winter zal meer infrarode straling worden geabsorbeerd vanwege de lage zonnestand en het over het algemeen grotere waterdampgehalte van de lucht. Verder blijkt de bijdrage van het ultraviolet aan de globale straling op een bewolkte dag, zowel in de zomer als in de winter, ca. 1% hoger te zijn dan op een heldere dag. Op zonnige dagen heeft de directe straling nl. een relatief groot aandeel in de globale straling. De kortgolelige directe straling wordt

in de atmosfeer beter verstrooid dan de langgolvlige straling. Het aandeel van het ultraviolet in de directe straling is dan ook aanmerkelijk kleiner dan de percentages gegeven in tabel 5.4. Weliswaar bereikt een deel van het verstrooide ultraviolet uit de directe straling het aardoppervlak toch als diffuse UV-straling, maar de rest wordt weer de ruimte in gestrooid. Hierdoor is de procentuele bijdrage van het ultraviolet aan de globale straling op zonnige dagen lager dan op bewolkte dagen.

Veel gebruikers wensen echter een verdere uitsplitsing in kleinere spectraalbanden. Daar dat vanwege het grote aantal verschillende filters een arbeidsintensief werk is, heeft Slob (1985) een methode ontwikkeld om de metingen die in Ukkel (België) zijn gedaan om te rekenen naar Nederlandse omstandigheden. Het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België heeft gedurende één jaar (1980) metingen verricht van de spectrale verdeling in een zevental banden, elk met een breedte van 0,1 μm en lopende van 0,3 tot 1 μm . De methode van Slob komt erop neer, dat de straling in de zeven banden is gemodelleerd m.b.v. G/G_0 en $\sin \gamma$ voor Belgische omstandigheden. Door deze modellering ook in Nederland toe te passen is Slob erin geslaagd een spectrale verdeling van de globale straling voor De Bilt, De Kooy, Eelde, Vlissingen en Zuid-Limburg te maken.

Tabel 5.5 Gemiddelde dagsommen in MJ m^{-2} van de globale straling in de aangegeven spectrale band per decade (berekend met de gegevens van 1971 t/m 1982)

decade	0,3-0,4 μm	0,4-0,5 μm	0,5-0,6 μm	0,6-0,7 μm	0,7-0,8 μm	0,8-0,9 μm	0,9-1 μm	0,3-1 μm	glob.str.
JAN I	0,10	0,26	0,24	0,21	0,18	0,13	0,09	1,21	1,76
II	0,13	0,34	0,33	0,29	0,24	0,18	0,12	1,65	2,39
III	0,14	0,37	0,37	0,33	0,26	0,20	0,13	1,80	2,46
FEB I	0,20	0,52	0,52	0,47	0,37	0,29	0,19	2,56	3,50
II	0,25	0,66	0,67	0,60	0,48	0,37	0,25	3,28	4,38
III	0,34	0,89	0,92	0,82	0,65	0,50	0,35	4,48	5,98
MRT I	0,39	1,04	1,08	0,95	0,76	0,58	0,40	5,21	6,82
II	0,42	1,11	1,13	0,99	0,78	0,60	0,41	5,45	6,95
III	0,58	1,51	1,57	1,38	1,09	0,84	0,58	7,55	9,64
APR I	0,67	1,76	1,82	1,59	1,25	0,97	0,67	8,72	11,02
II	0,84	2,19	2,29	2,00	1,58	1,22	0,87	11,00	13,93
III	0,86	2,23	2,31	2,02	1,58	1,23	0,87	11,09	13,91
MEI I	0,93	2,43	2,51	2,19	1,71	1,33	0,94	12,04	15,03
II	1,12	2,92	3,06	2,66	2,09	1,63	1,18	14,66	18,38
III	1,09	2,83	2,94	2,55	2,00	1,55	1,11	14,06	17,51
JUN I	1,13	2,95	3,05	2,65	2,08	1,61	1,14	14,61	18,17
II	1,09	2,83	2,93	2,54	1,99	1,54	1,09	14,02	17,41
III	1,07	2,76	2,84	2,46	1,93	1,49	1,05	13,60	16,85
JUL I	1,13	2,93	3,05	2,64	2,07	1,61	1,16	14,59	18,17
II	1,04	2,68	2,75	2,39	1,87	1,44	1,01	13,17	16,32
III	0,96	2,49	2,56	2,22	1,74	1,34	0,94	12,25	15,19
AUG I	0,96	2,49	2,57	2,23	1,75	1,35	0,95	12,30	15,34
II	0,93	2,42	2,51	2,19	1,72	1,33	0,94	12,03	15,09
III	0,87	2,27	2,36	2,07	1,62	1,26	0,89	11,34	14,30
SEP I	0,76	1,98	2,06	1,81	1,42	1,10	0,77	9,89	12,55
II	0,63	1,65	1,70	1,50	1,18	0,91	0,63	8,19	10,42
III	0,52	1,35	1,39	1,23	0,97	0,75	0,51	6,72	8,60

OKTI	0,44	1,17	1,21	1,08	0,85	0,66	0,45	5,87	7,64
II	0,35	0,92	0,95	0,84	0,67	0,51	0,35	4,59	6,03
III	0,27	0,72	0,74	0,66	0,52	0,40	0,27	3,58	4,79
NOVI	0,20	0,53	0,53	0,47	0,38	0,29	0,20	2,59	3,52
II	0,15	0,40	0,40	0,35	0,28	0,22	0,15	1,94	2,67
III	0,12	0,32	0,31	0,28	0,22	0,17	0,11	1,53	2,15
DECI	0,11	0,28	0,27	0,24	0,20	0,15	0,10	1,35	1,97
II	0,10	0,25	0,23	0,21	0,17	0,13	0,09	1,17	1,74
III	0,09	0,23	0,22	0,19	0,16	0,12	0,08	1,10	1,61

In tabel 5.5 zijn de dagsommen van de globale straling voor De Bilt in de aangegeven spectrale banden vermeld in MJm^{-2} voor de 36 decaden van het jaar. De gegevens van de andere stations zijn te vinden in Slob (1985).

5.5 Daglicht

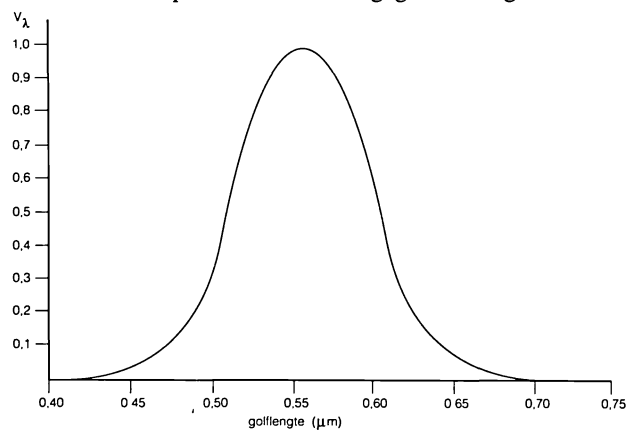
Straling kan op velerlei wijzen worden waargenomen. In het voorgaande is het steeds gegaan over instrumentele waarnemingen. Daarnaast hebben we de waarneming van straling door middel van het oog. Deze is natuurlijk slechts toepasbaar op dat deel van het spectrum waarvoor het oog gevoelig is, nl. het zichtbare deel van $0,38\text{-}0,76 \mu\text{m}$.

De gevoeligheid van ons oog is golflengteafhankelijk. De maximale gevoeligheid treedt gemiddeld op bij $0,555 \mu\text{m}$.

We richten nu een zekere hoeveelheid straling met een bekend vermogen Φ op het oog. Wanneer wij zo'n lichtbundel bij verschillende golflengten op iemands oog laten vallen zal hij verschillende lichtindrukken krijgen. We gaan nu het vermogen als functie van λ na, zodat de proefpersoon steeds dezelfde lichtindruk ontvangt. Het vermogen dat nodig is om bij de golflengte λ dezelfde lichtindruk (helderheid) te krijgen als bij $\lambda = 0,555 \mu\text{m}$ stellen we Φ_λ . Dan is de *relatieve ooggevoeligheid* bij golflengte λ :

$$V_\lambda = \frac{\Phi_{0,555}}{\Phi_\lambda} \quad (5.37)$$

Uit zeer veel metingen is zo internationaal de relatieve ooggevoeligheidskromme V_λ als functie van λ bepaald. Deze is weergegeven in figuur 5.6.



Figuur 5.6
Relatieve ooggevoeligheid V_λ als functie van de golflengte

Twee monochromatische lichtbronnen met gelijke radiantie doch met verschillende golflengten geven dus verschillende indrukken op het oog. Beschouw bijvoorbeeld de golflengten 0,65 en 0,67 μm die corresponderen met bijna niet te onderscheiden kleuren rood. In figuur 5.6 zien we dat de ooggevoeligheid voor de 0,65 μm -bron (0,107) een driemaal zo grote ooggevoeligheid heeft als de 0,67 μm -bron (0,032). Voor het oog lijkt de 0,65 μm -bron driemaal zo helder, hoewel de radianties van beide bronnen gelijk zijn.

Het oog is daarom geen goede detector voor radiantie, maar wel voor helderheid en luminantie, waarmee we in de definities van de fotometrie komen (zie 6.3.2 en figuur 6.5).

In figuur 6.5 valt een zekere analogie te zien tussen de stralings- en fotometrische grootheden. Dat leidt ons tot de vraag: "Zijn de eenheden van straling en licht in elkaar om te rekenen?"

Uit het radiantiespectrum van een stralingsbron (de Zon, de hemelkoepel, een lamp) kunnen we de bijbehorende luminantie bepalen. Het is de som van de radianties in ieder klein golflengteinterval (monochromatische radiantie) vermenigvuldigd met de corresponderende relatieve ooggevoeligheid V_λ , waarbij nog een factor komt om radiantieëenheden in luminantieëenheden om te rekenen.

We gaan daartoe uit van figuur 5.6, waarin V_λ staat uitgezet als functie van λ en we zetten nu op identieke wijze het energiespectrum uit van de lichtbron, bijvoorbeeld de Zon met λ op de horizontale as en het spectrale vermogen $d\Phi_e/d\lambda$ op de verticale as. De onderindex e geeft aan dat we te maken hebben met elektromagnetische straling, de onderindex v dat het gaat om zichtbaar licht. Vermenigvuldigen we beide grafieken (de verticale coördinaten) met elkaar, dan krijgen we een grafiek van $V_\lambda d\Phi_e/d\lambda$ als functie van λ . Het oppervlak onder deze kromme vermenigvuldigd met 636 lm W^{-1} geeft de lichtstroom Φ_v in lumen (lm). In formule is de lichtstroom

$$\Phi_v = 636 \int_{0,38 \mu\text{m}}^{0,76 \mu\text{m}} V_\lambda \frac{d\Phi_e}{d\lambda} d\lambda \quad [\text{lm}] .$$

De omrekeningsfactor 636 lm W^{-1} wordt het *gemiddelde fotometrische stralingsequivalent* f genoemd of de gemiddelde zichtbaarheidscoëfficiënt over het interval 0,38-0,76 μm . f is maximaal voor $\lambda = 0,555 \mu\text{m}$; zie tabel 5.6, waarin f is gegeven als functie van λ voor buitenatmosferische straling.

Tabel 5.6 *Het fotometrische stralingsequivalent f als functie van de golflengte*

λ	f	λ	f	λ	f	λ	f	λ	f	λ	f
0,40	0,272	0,46	40,79	0,52	482,73	0,58	591,46	0,64	119,0	0,70	2,79
0,41	0,816	0,47	61,88	0,53	586,02	0,59	514,62	0,65	72,76	0,71	1,43
0,42	2,72	0,48	94,52	0,54	648,58	0,60	429,01	0,66	41,48	0,72	0,714
0,43	7,89	0,49	141,44	0,55	676,46	0,61	341,97	0,67	21,76	0,73	0,354
0,44	15,64	0,50	219,57	0,56	676,46	0,62	259,01	0,68	11,56	0,74	0,170
0,45	25,83	0,51	341,97	0,57	647,22	0,63	180,13	0,69	5,59	0,75	0,082
										0,76	0,041

De reciproke waarde van f wordt het *mechanisch lichtequivalent* genoemd en is dus minimaal voor $\lambda = 0,555 \mu\text{m}$, met een waarde van $0,00147 \text{ W lm}^{-1}$ voor buitenatmosferische straling.

Net als de totale straling, wordt het zichtbare licht op zijn weg door de atmosfeer verzwakt door absorptie en verstrooiing (zie 2.2). Aan het aardoppervlak is het gemiddelde stralingsequivalent f dan ook lager dan voor buitenatmosferische straling. Volgens Drummond (1958) is het gemiddelde fotometrische stralingsequivalent in Pretoria 104 lm W^{-1} voor globale straling en 132 lm W^{-1} voor diffuse hemelstraling. Voor Londen zou volgens hem 117 lm W^{-1} bij wolkeloze hemel gelden, voor Washington 105 lm W^{-1} en voor Wenen 121 lm W^{-1} bij gemiddelde bewolgingscondities.

Petersen (1982) heeft een uitgebreid onderzoek gedaan naar de waarde van het gemiddelde fotometrische stralingsequivalent in Denemarken. Hij vond daarbij de volgende waarden voor f : bij heldere hemel voor de globale straling (113 ± 7) lm W^{-1} , voor de directe straling (103 ± 13) lm W^{-1} en voor de diffuse straling (146 ± 14) lm W^{-1} . Bij bewolkte hemel was f voor de globale straling (121 ± 7) lm W^{-1} .

In Nederland werkt de Werkgroep Fysische Aspecten van de Gebouwde Omgeving, FAGO-TNO in de Technische Universiteit Eindhoven, met (103 ± 13) lm W^{-1} voor zonshoogten groter dan 20° . Bij een lagere zonnestand is er relatief meer infrarode straling, d.w.z. minder daglicht en is het fotometrische stralingsequivalent niet constant meer.

Uit bovenstaande beschouwing zou men geneigd zijn de lichtstroom in lumen als basis te nemen voor de fotometrische grootheden. In werkelijkheid is echter de candela als eenheid van lichtsterkte in de grondeenheden van het Internationale Stelsel van Eenheden (SI) opgenomen. Dit is de lichtsterkte, in loodrechte richting, van een oppervlak van $(600.000)^{-1} \text{ m}^2$ van een zwart lichaam bij de stollingstemperatuur van platina onder een druk van 101325 Nm^{-2} .

In analogie met de energetische irradiantie E_c in Wm^{-2} kunnen we de verlichtingssterkte E_v definiëren (zie 6.3.2) als de lichtstroom, die van een willekeurige bron door een oppervlakteëlement dA wordt opgevangen. De eenheid is lm m^{-2} , waaraan de naam lux is gegeven met het symbool lx. Volgens Dogniaux en Lemoine (1976) is de verlichtingssterkte van de Zon E_v° buiten de atmosfeer $126,82 \text{ klx}$ en is de jaarlijkse gang daarvan te schrijven als:

$$E_v^\circ(d) = 126,82 + 4,248 \cos \eta d + 0,08250 \cos 2\eta d - 0,00043 \cos 3\eta d$$

$$+ 0,1691 \sin \eta d + 0,00914 \sin 2\eta d + 0,01726 \sin 3\eta d$$

waarin $\eta = 2\pi/366$

d = het dagnummer met 1 januari: $d = 1$.

Door de extinctie van daglicht in de atmosfeer zal de verlichtingssterkte aan het aardoppervlak kleiner zijn. Dogniaux en Lemoine (1976) geven formules om de verlichtingssterkte E_v te berekenen als functie van de turbiditeit, de relatieve optische massa, de hoeveelheid condenseerbaar water in de atmosfeer en de invalshoek voor directe en diffuse straling op het beschouwde vlak.

Bij zonnig weer kan de verlichtingssterkte in het vrije veld oplopen tot 40 klx . Kennis van het verlichtingsniveau in het vrije veld is nodig voor het berekenen van het daglichtpercentage binnen, dat via de ramen de werkplek bereikt.

Aangezien we hier het terrein van de bouwfysica betreden, wordt voor verdere details verwezen naar de Werkgroep FAGO-TNO-TUE die sinds 1982 in Eindhoven metingen verricht van de hoeveelheid daglicht en zonnestraling.

6 APPENDICES

6.1 Berekening van de positie van de Zon

Bij veel berekeningen op het gebied van de zonneënergie moeten we de positie van de Zon aan de hemelkoepel kennen. Voor een waarnemer op Aarde is het alsof de Zon zich langs een baan op de hemelkoepel beweegt. De hemelkoepel is dan op te vatten als een grote bol die de Aarde omgeeft.

We moeten daarom bolcoördinaten gebruiken om de positie van de Zon aan te geven. Bolcoördinaten gaan uit van een bepaald grondvlak en twee coördinaten die de plaats ten opzichte van dat grondvlak bepalen. De laatste worden als hoekmaten gegeven in booggraden of radialen. Eerst worden een aantal coördinatensystemen besproken.

Azimut en hoogte

Een systeem, dat veel wordt gebruikt, omdat het van de waarnemer uitgaat, is het azimutale¹⁾ systeem. Het grondvlak is hierin het horizontale vlak van de waarnemer (A in de figuren 6.1 en 6.3). De hemelkoepel snijdt dat vlak volgens een cirkel die onze horizon²⁾ is. Langs de horizon wordt de ene coördinaat, het *azimut*, gemeten. In dit boek wordt daarbij het zuiden als nulrichting aangehouden - zie figuur 6.3. Het azimut ψ noteren wij van -180° tot $+180^\circ$, waarbij zuid $\psi = 0^\circ$, oost $\psi = -90^\circ$, west $\psi = 90^\circ$ en noord $\psi = 180^\circ$. In de weerdienst en bij het windklimaat daarentegen wordt noord als nulrichting gebruikt, waarbij ψ dan loopt van 0° tot 360° met oost $\psi = 90^\circ$, zuid $\psi = 180^\circ$ en west $\psi = 270^\circ$.

De andere coördinaat in het azimutale systeem is de *hoogte* γ van de Zon (figuur 6.1 en 6.3), ook wel *elevatie* genoemd, ten opzichte van de horizon. De zonshoogte wordt gemeten van -90° tot $+90^\circ$. De positieve getallen gelden voor het geval de Zon boven de horizon staat, de negatieve getallen zijn voor ons niet interessant omdat de Zon zich dan onder de horizon bevindt. Een hoogte $\gamma = 90^\circ$ betekent dat de Zon recht boven ons staat, in het zenit³⁾, zie figuur 6.1 en 6.3.

Het zenit wordt ook wel gebruikt als oorsprong voor de tweede coördinaat. Men spreekt dan van de *zenithoek* ζ . Hierbij geldt

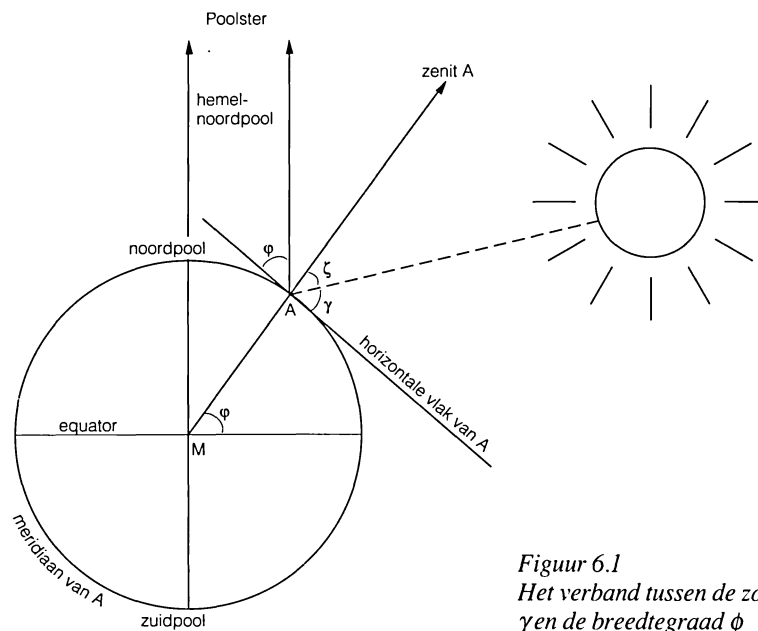
$$\zeta = 90^\circ - \gamma \quad (6.1.1)$$

De Zon in het zenit, met $\gamma = 90^\circ$ en $\zeta = 0^\circ$, komt bij ons op gematigde breedte niet voor. Wat is dan de maximale hoogte die de Zon in Nederland kan bereiken en hoe groot is het verschil daarin voor het noorden en zuiden van ons land? Om die vragen te kunnen beantwoorden moeten we eerst wat dieper ingaan op de baan van de Aarde rond de Zon en

1) van het Arabische "as-summut" = de wegen of de paden

2) van het Griekse "horizon" = de begrensende

3) van het Arabische "semt-ar-ras" = de weg van het hoofd

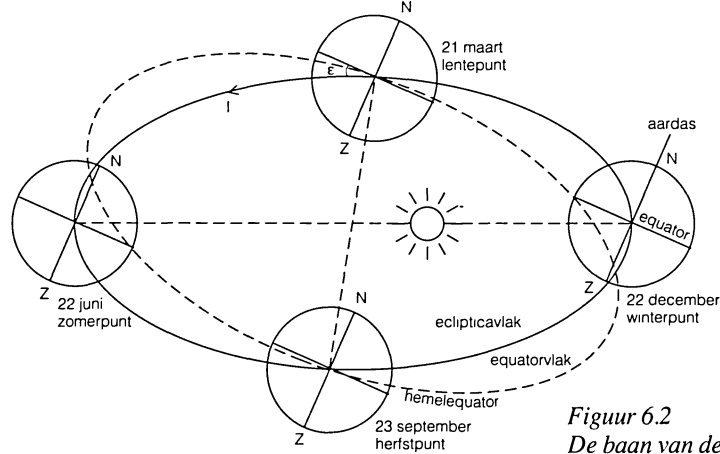


Figuur 6.1
Het verband tussen de zonshoogte γ en de breedtegraad ϕ

nog andere bolcoördinatenstelsels ten tonele voeren.

Lengte en breedte

De baan van de Aarde rond de Zon is een ellips, die echter maar heel weinig van een cirkel afwijkt. De Zon staat in een van de brandpunten van de ellips (figuur 6.2). Dat betekent dat de afstand van de Aarde tot de Zon niet het hele jaar door gelijk is. Begin januari bevindt de Aarde zich het dichtst bij de Zon op een afstand van $147,1 \cdot 10^6$ km. Dat punt wordt het *perihelium*⁴⁾ genoemd. Begin juli is de Aarde het verst van de Zon verwijderd, in het *aphelium*⁵⁾ op een afstand van $152,1 \cdot 10^6$ km van de Zon. Het verschil ten opzichte van de



Figuur 6.2
De baan van de Aarde rond de Zon. De helling van de ecliptica is ϵ , de astronomische lengte is l

4) van het Griekse "peri helios" = rond de zon
5) van het Griekse "apo helios" = weg van de zon

gemiddelde afstand Zon-Aarde die $149,6 \cdot 10^6$ km bedraagt, is dus 1,7%. Voor zeer nauwkeurige berekeningen van de zonneenergie wordt met dit verschil rekening gehouden (zie 5.1.2). Bij vereenvoudigingen mag men van een vaste afstand $150 \cdot 10^6$ km uitgaan.

Het vlak waarin de Aarde haar baan rond de Zon beschrijft, wordt het *eclipticavlak*⁶⁾ genoemd. De aardas, dat is de verbindingslijn tussen de noordpool en zuidpool dwars door de Aarde, staat niet loodrecht op het eclipticavlak maar maakt er een hoek van $66^{\circ}33'30''$ mee, afgerond $66\frac{1}{2}^{\circ}$. Het equatorvlak van de Aarde is het vlak door de equator of evenaar, dwars door de Aarde. Dat staat loodrecht op de aardas. Het gevolg is dat het equatorvlak van de Aarde en het eclipticavlak een hoek maken van $90^{\circ} - 66^{\circ}33'30'' = 23^{\circ}26'30''$ (figuur 6.2). Dit wordt de helling van de *ecliptica* ϵ genoemd.

$$\epsilon \approx 23^{\circ}26'30''$$

(6.1.2)

Deze helling is er de oorzaak van, dat de zonshoogte om 12 uur 's middags door het jaar heen varieert en waardoor de berekening van de plaats van de Zon gecompliceerd wordt.

Het eclipticavlak is het grondvlak van het eclipticale bolcoördinatensysteem. De nulrichting is het *lentepunt*. Dat is in figuur 6.2 de plaats waar de Aarde zich bevindt bij het begin van de lente, omstreeks 21 maart. Figuur 6.2 is voor de mens op Aarde niet erg bruikbaar, omdat wij de Aarde niet zien bewegen. Wij denken ons de Aarde vast en zien de Zon banen langs de hemelkoepel beschrijven. Daarbij doet zich de moeilijkheid voor dat we de positie van de Zon ten opzichte van de vaste sterren niet kunnen zien. Het felle zonlicht overstraalt overdag het licht van de sterren. Alleen bij een totale zonsverduistering, ook wel zoneclips genoemd, kunnen we de Zon tussen de sterren zien staan. Hiervan is het woord *ecliptica* afgeleid.

Langs de ecliptica wordt de ene coördinaat gemeten, nl. de *astronomische lengte* l . Deze wordt uitgedrukt in graden en wel van 0° tot 360° . De nulrichting is de richting waarin we de Zon bij het begin van de lente zien staan, het lentepunt. De astronomische lengte l wordt gemeten in oostelijke richting, voor het noordelijk halfrond tegen de wijzers van de klok in (figuur 6.2). De andere coördinaat in het eclipticale systeem is de *breedte* b . Deze wordt gemeten van -90° tot $+90^{\circ}$, waarbij een hemellichaam ten noorden van het eclipticavlak een positieve b heeft. Omdat de Zon langs de ecliptica beweegt, geldt voor de Zon altijd $b = 0$.

Uurhoek en declinatie

Tenslotte bespreken we het coördinatensysteem dat het equatorvlak als grondvlak heeft. De grondcirkel is de hemelequator. De hemelequator moeten we zien als de projectie van de equator van de Aarde op de hemelkoepel; anders gezegd, als we de aardbol zover zouden laten uitdijen tot hij samenvalt met de hemelbol, dan valt de aardequator met de hemelequator samen.

Net als de Aarde heeft de hemelbol ook twee polen. De noordelijke hemelpool bevindt zich nabij de Poolster. De Poolster wordt daarom vaak gebruikt om 's nachts het noorden te vinden.

Op Aarde hebben we lijnen van de noordpool naar de zuidpool, halve cirkels, *meridianen*⁷⁾ genoemd. Deze snijden de evenaar loodrecht. Op de meridianen wordt de breedtegraad ϕ uitgezet (figuur 6.1), op het noordelijk halfrond van 0° (evenaar) tot 90° NB (noordpool), op het zuidelijk halfrond van 0° (evenaar) tot 90° ZB (zuidpool). Verder kunnen we op de Aarde cirkels tekenen die evenwijdig lopen aan de evenaar, de z.g. *parallelcirkels*. Deze worden naar de polen toe steeds kleiner. Op de parallelcirkels wordt de lengtegraad λ uitgezet. De nulpunten zijn de snijpunten van de parallelcirkels met de nulmeridiaan, dat is de meridiaan

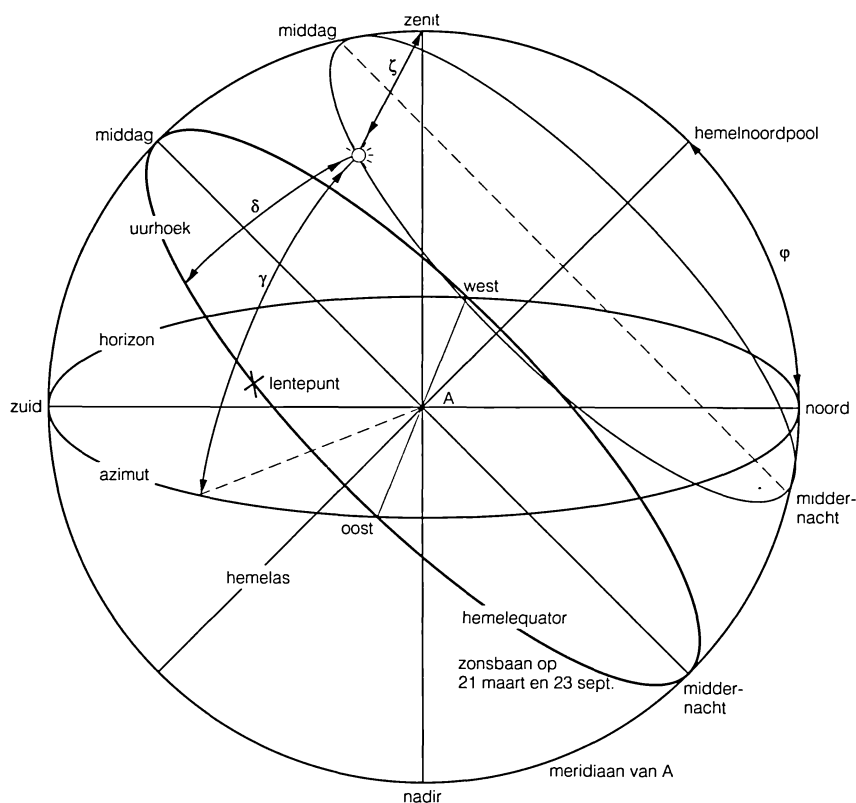
6) van het Griekse "ekleipein" = weglaten, overslaan

7) van het Latijnse "meridies" = midden op de dag

die door het in Engeland gelegen Greenwich loopt. Punten ten oosten van de nulmeridiaan, zoals b.v. in Nederland, hebben coördinaten λ van $0^\circ - 180^\circ$ OL, punten ten westen van Greenwich hebben coördinaten λ van $0^\circ - 180^\circ$ WL.

Projecteren we nu de meridianen en parallelcirkels vanuit het middelpunt der Aarde op de hemelbol, dan krijgen we daar een zelfde stelsel van meridianen en parallelcirkels, waarbij de eerste loodrecht op de hemelequator staan en de laatste evenwijdig aan de hemelequator lopen.

De hemelequator wordt gebruikt om de ene coördinaat, de *uurhoek*, vast te leggen. Loodrecht hierop (dus te vergelijken met NB en ZB ten opzichte van de aardse equator) wordt de andere coördinaat gemeten, de z.g. *declinatie* δ (figuur 6.3). De declinatie⁸⁾ rekt men gewoonlijk van -90° tot $+90^\circ$. Ze is positief op het noordelijk halfrond van de hemelbol en negatief op het zuidelijk halfrond. Als de Zon op de hemelequator staat is $\delta = 0^\circ$. Voor de andere coördinaat wordt als nulpunt de plaatselijke meridiaan genomen: dat is de hemelmeridiaan, die voor de waarnemer door het zenit en het zuiden gaat (figuur 6.3). In de sterrenkunde zegt men wel dat een hemellichaam, en dus ook de Zon, *culmineert*⁹⁾ als hij door de plaatselijke meridiaan gaat. De Zon bereikt dan zijn grootste hoogte γ boven de horizon. Dat



Figuur 6.3 Het verband tussen het azimuthale coördinatensysteem en het equatoriale coördinatensysteem. A is de plaats van de waarnemer

8) van het Latijnse "declinare" = opzij buigen of draaien

9) van het Latijnse "culmen" = top(punt)

gebeurt midden op de dag, waarvoor de Latijnse naam “meridies” is.

Vanaf de plaatselijke meridiaan, dus het zuiden, wordt de uurhoek ω gemeten. Het is de tijd die verlopen is sinds de Zon door het zuiden is gegaan. De uurhoek wordt gemeten in uren, minuten en seconden, of in booggraden (figuur 6.3). Beide positief in westelijke richting tot + 12 uur of tot + 180° en negatief in oostelijke richting tot - 12 uur of tot - 180°. De Zon komt immers ten oosten van het zuiden op en gaat in het westen onder. Voor de omrekening van uren naar booggraden geldt: 12 uur = 180°; 1 uur = 15°. Tabel 6.1 geeft de omrekening van graden naar uren en minuten. De uurhoek is dus een lokale grootte, de declinatie daarentegen is onafhankelijk van de plaats van waarneming.

Tabel 6.1 Omrekening van booggraden naar tijd

0°-59°			60°-119°			120°-179°			180°-239°			240°-299°			300°-359°		
°	h	m	°	h	m	°	h	m	°	h	m	°	h	m	°	h	m
0	0	00	60	4	00	120	8	00	180	12	00	240	16	00	300	20	00
1	0	04	61	4	04	121	8	04	181	12	04	241	16	04	301	20	04
2	0	08	62	4	08	122	8	08	182	12	08	242	16	08	302	20	08
3	0	12	63	4	12	123	8	12	183	12	12	243	16	12	303	20	12
4	0	16	64	4	16	124	8	16	184	12	16	244	16	16	304	20	16
5	0	20	65	4	20	125	8	20	185	12	20	245	16	20	305	20	20
6	0	24	66	4	24	126	8	24	186	12	24	246	16	24	306	20	24
7	0	28	67	4	28	127	8	28	187	12	28	247	16	28	307	20	28
8	0	32	68	4	32	128	8	32	188	12	32	248	16	32	308	20	32
9	0	36	69	4	36	129	8	36	189	12	36	249	16	36	309	20	36
10	0	40	70	4	40	130	8	40	190	12	40	250	16	40	310	20	40
11	0	44	71	4	44	131	8	44	191	12	44	251	16	44	311	20	44
12	0	48	72	4	48	132	8	48	192	12	48	252	16	48	312	20	48
13	0	52	73	4	52	133	8	52	193	12	52	253	16	52	313	20	52
14	0	56	74	4	56	134	8	56	194	12	56	254	16	56	314	20	56
15	1	00	75	5	00	135	9	00	195	13	00	255	17	00	315	21	00
16	1	04	76	5	04	136	9	04	196	13	04	256	17	04	316	21	04
17	1	08	77	5	08	137	9	08	197	13	08	257	17	08	317	21	08
18	1	12	78	5	12	138	9	12	198	13	12	258	17	12	318	21	12
19	1	16	79	5	16	139	9	16	199	13	16	259	17	16	319	21	16
20	1	20	80	5	20	140	9	20	200	13	20	260	17	20	320	21	20
21	1	24	81	5	24	141	9	24	201	13	24	261	17	24	321	21	24
22	1	28	82	5	28	142	9	28	202	13	28	262	17	28	322	21	28
23	1	32	83	5	32	143	9	32	203	13	32	263	17	32	323	21	32
24	1	36	84	5	36	144	9	36	204	13	36	264	17	36	324	21	36

25	1	40	85	5	40	145	9	40	205	13	40	265	17	40	325	21	40
26	1	44	86	5	44	146	9	44	206	13	44	266	17	44	326	21	44
27	1	48	87	5	48	147	9	48	207	13	48	267	17	48	327	21	48
28	1	52	88	5	52	148	9	52	208	13	52	268	17	52	328	21	52
29	1	56	89	5	56	149	9	56	209	13	56	269	17	56	329	21	56
30	2	00	90	6	00	150	10	00	210	14	00	270	18	00	330	22	00
31	2	04	91	6	04	151	10	04	211	14	04	271	18	04	331	22	04
32	2	08	92	6	08	152	10	08	212	14	08	272	18	08	332	22	08
33	2	12	93	6	12	153	10	12	213	14	12	273	18	12	333	22	12
34	2	16	94	6	16	154	10	16	214	14	16	274	18	16	334	22	16
35	2	20	95	6	20	155	10	20	215	14	20	275	18	20	335	22	20
36	2	24	96	6	24	156	10	24	216	14	24	276	18	24	336	22	24
37	2	28	97	6	28	157	10	28	217	14	28	277	18	28	337	22	28
38	2	32	98	6	32	158	10	32	218	14	32	278	18	32	338	22	32
39	2	36	99	6	36	159	10	36	219	14	36	279	18	36	339	22	36
40	2	40	100	6	40	160	10	40	220	14	40	280	18	40	340	22	40
41	2	44	101	6	44	161	10	44	221	14	44	281	18	44	341	22	44
42	2	48	102	6	48	162	10	48	222	14	48	282	18	48	342	22	48
43	2	52	103	6	52	163	10	52	223	14	52	283	18	52	343	22	52
44	2	56	104	6	56	164	10	56	224	14	56	284	18	56	344	22	56
45	3	00	105	7	00	165	11	00	225	15	00	285	19	00	345	23	00
46	3	04	106	7	04	166	11	04	226	15	04	286	19	04	346	23	04
47	3	08	107	7	08	167	11	08	227	15	08	287	19	08	347	23	08
48	3	12	108	7	12	168	11	12	228	15	12	288	19	12	348	23	12
49	3	16	109	7	16	169	11	16	229	15	16	289	19	16	349	23	16
50	3	20	110	7	20	170	11	20	230	15	20	290	19	20	350	23	20
51	3	24	111	7	24	171	11	24	231	15	24	291	19	24	351	23	24
52	3	28	112	7	28	172	11	28	232	15	28	292	19	28	352	23	28
53	3	32	113	7	32	173	11	32	233	15	32	293	19	32	353	23	32
54	3	36	114	7	36	174	11	36	234	15	36	294	19	36	354	23	36
55	3	40	115	7	40	175	11	40	235	15	40	295	19	40	355	23	40
56	3	44	116	7	44	176	11	44	236	15	44	296	19	44	356	23	44
57	3	48	117	7	48	177	11	48	237	15	48	297	19	48	357	23	48
58	3	52	118	7	52	178	11	52	238	15	52	298	19	52	358	23	52
59	3	56	119	7	56	179	11	56	239	15	56	299	19	56	359	23	56

Rechte klimming en declinatie

Men kan beide coördinaten in het equatoriaal systeem onafhankelijk van de waarnemer maken door het nulpunt niet op de plaatselijke meridiaan te leggen, maar op een vast punt. Hiervoor wordt het lentepunt genomen, waar de hemelequator en het eclipticavlak elkaar snijden (figuur 6.2 en 6.3). De coördinaat die vanaf het lentepunt langs de hemelequator wordt gemeten heet de *rechte klimming* K en wordt in uren uitgedrukt, voor het noordelijk halfmond tegen de wijzers van de klok in, dus van west, via zuid, naar oost. Deze coördinaat

wordt echter niet bij zonneënergieberekeningen gebruikt.

Om het astronomisch inzicht nog wat te vergroten zullen we aan de hand van de figuren 6.2 en 6.3 nog eens nagaan, wat er in de loop van een jaar gebeurt.

In figuur 6.2 is de Zon op een vaste plaats genomen en kijken we naar de draaiing van de Aarde en de baan van de Aarde rond de Zon. In tegenstelling daarmee plaatsen we in figuur 6.3 de waarnemer A vast in het middelpunt van de ruimte. Omdat we daar vandaan naar de baan van de Zon langs de hemelkoepel kijken, gaat het om afstanden van 150 miljoen km. De diameter van de Aarde van nog geen 13.000 km valt daarbij in het niet. Het punt A in figuur 6.3 kan daarom ook beschouwd worden als het middelpunt van de Aarde M uit figuur 6.2.

In figuur 6.3 is verticaal de cirkel aangegeven, met A als middelpunt, volgens welke de meridiaan van A de hemelkoepel snijdt. De horizontale cirkel met middelpunt A, is de horizon van A, dus het grondvlak van het azimuthale coördinatenstelsel. Hierop wordt het azimut gemeten met loodrecht daarop de hoogte γ .

Daar de hemelnoordpool zich op een hoogte ϕ (de breedtegraad van de waarnemersplaats) boven de noordelijke horizon bevindt (vergelijk figuur 6.1) stelt in figuur 6.3 de lijn van A naar de hemelnoordpool, onder een hoek ϕ met het horizontale vlak, de hemelas voor waaromheen het hemelgewelf in de richting van de wijzers van de klok in 24 uur schijnt rond te draaien. Het vlak van de hemelequator staat in A loodrecht op de hemelas en snijdt de horizon in de punten oost en west. Dit vlak is het grondvlak van het equatoriale coördinatenstelsel. Op de hemelequator zien we de uurhoek ω van de Zon uitgezet. In figuur 6.3 is ω negatief, want de Zon staat nog ten oosten van het zuiden. Ook de declinatie δ van de Zon is aangegeven.

We beginnen onze reis door het jaar in het lentepunt, als nulrichting van het eclipticaal systeem van groot belang. We zien dan in figuur 6.2 de Aarde in een van de snijpunten van de hemelequator met het eclipticavlak. Voor een waarnemer op Aarde staat de Zon in het andere snijpunt en beschrijft tengevolge van de draaiing der Aarde de hemelequator. In figuur 6.3 is te zien dat de hemelequator de horizon snijdt in de punten oost en west. Op 21 maart komt de Zon op in het oosten, gaat door het zuiden en gaat in het westen onder. Dag en nacht zijn overal op Aarde even lang (12 uur). Deze dag wordt daarom ook wel “*dag-en-nachtevening*” genoemd of lente-equinox¹⁰⁾. Op de evenaar is dan de maximale zonshoogte 90° , de Zon staat daar dan 's middags in het zenit. Op die dag geldt voor de Zon: $\delta = b = l = 0$. Op die dag beweegt de Zon zich van het zuidelijk halfrond naar het noordelijk halfrond van de hemelbol, meer naar rechtsboven in figuur 6.3.

Na 21 maart lijkt de Zon voor ons kleine cirkels evenwijdig aan de hemelequator te beschrijven, waarbij de declinatie δ steeds toeneemt. Een van deze cirkels is in figuur 6.3 getekend. De Zon komt op in een punt ten noorden van oost gelegen en gaat onder in een punt ten noorden van west. De dag is langer dan de nacht op het noordelijk halfrond. De declinatie neemt toe tot de langste dag is bereikt. De Zon beschrijft dan een baan langs de kleine cirkel op $23^\circ 26' 30''$ ten noorden van de hemelequator. Dat gebeurt omstreeks 22 juni, het zomerpunt of *zomersolstitium*¹¹⁾. In figuur 6.2 zien we dat de Aarde zich dan nagenoeg in het aphelium van haar baan bevindt. De projectie van het noordelijk deel van de aardas op het eclipticavlak wijst dan naar de Zon. Op het noordelijk halfrond begint de zomer. Op die dag wordt tussen plaatsen met een breedte $\phi = 90^\circ$ (noordpool) en $\phi = 66^\circ 33' 30''$ (poolcirkel) de Aarde gedurende het hele etmaal verlicht, de “middernachtzon”. De Zon bereikt voor de noordpool haar maximale hoogte van $23^\circ 26' 30''$. De declinatie van de Zon is maximaal: $\delta = + 23^\circ 26' 30''$ en de astronomische lengte $l = 90^\circ$.

Na 22 juni gaat de Zon weer grotere cirkels langs de hemelkoepel beschrijven, die steeds

10) van het Latijnse “*aequus*” = gelijk en “*nox*” = nacht

11) van het Latijnse “*sol*” = zon en “*stare*” = staan

dichter bij de hemelequator zijn gelegen. De declinatie neemt weer af en wordt 0 op ongeveer 23 september. De Aarde staat dan in het andere snijpunt van de hemelequator met het eclipticavlak (figuur 6.2). Het herfstpunt of *herfstequinox* is bereikt. Dag en nacht zijn op de hele Aarde weer even lang. De astronomische lengte l is 180° .

De Zon gaat daarna banen beschrijven aan de zuidzijde van de hemelequator, komt op ten zuiden van oost en gaat onder ten zuiden van west. De declinatie van de Zon is negatief geworden en daalt tot $-23^\circ 26' 30''$ wanneer het winterpunt is bereikt.

In het winterpunt of wintersolstitium, omstreeks 22 december, is de zuidpool van de Aarde meer naar de Zon gekeerd, zoals in figuur 6.2 te zien is. Tussen noordpool en $66^\circ 33' 30''$ NB is het dan gedurende 24 uur nacht. De astronomische lengte l is op die dag 270° .

Na het winterpunt gaan de banen weer richting hemelequator. De dagen gaan op het NH lengen, waarbij na ongeveer 90 etmalen het lentepunt weer wordt bereikt. De astronomische lengte van de Zon neemt toe van 270° tot 360° en daarmee is onze beschouwing van het jaar rond.

In het voorgaande zijn drie coördinatensystemen besproken. Bij de praktische toepassing van stralingsgegevens zal het azimuthale systeem met het horizontale vlak, de zonshoogte en het azimut, dat direct met de windstreken samenhangt, de voorkeur verdienen. Het nadeel van het systeem is dat het lokaal bepaald is; waarnemers op verschillende plaatsen hebben verschillende horizonten en dus ook verschillende zonshoogten. Daarom moesten ook andere systemen aan de orde komen, die coördinaten hebben onafhankelijk van de waarnemer zoals astronomische lengte, breedte en declinatie. Deze grootheden zijn namelijk nodig om de zonshoogte te kunnen berekenen.

Figuur 6.3 geeft aan hoe het verband is tussen zonshoogte γ , declinatie δ en de breedtegraad ϕ van de waarnemer. Deze drie grootheden komen alle voor in de boldriehoek met hoekpunten Zon, zenit en hemelnoordpool. Met behulp van de bolmeetkunde kan nu een grootheid in de andere twee worden uitgedrukt. We gaan hier niet verder op in, maar geven alleen de omrekeningsformules voor de coördinatensystemen.

Van uurhoek ω en declinatie δ naar azimut ψ en hoogte γ

$$\sin \gamma = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (6.1.3)$$

$$\cos \psi = \frac{-\sin \delta \cos \phi + \cos \delta \sin \phi \cos \omega}{\cos \gamma} \quad (6.1.4)$$

$$\sin \psi = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \gamma} \quad (6.1.5)$$

ϕ is de geografische breedte van de waarnemer.

Let op: aangezien het azimut ψ waarden van -180° tot $+180^\circ$ kan hebben, zijn voor zowel de oplossing van $\cos \psi$ als voor die van $\sin \psi$ twee antwoorden mogelijk, nl. voor $\cos \psi$ de waarden ψ en $-\psi$ (daar $\cos \psi = \cos(-\psi)$), voor $\sin \psi$ de waarden ψ en $180^\circ - \psi$ (daar $\sin \psi = \sin(180^\circ - \psi)$). Het azimut moet daarom berekend worden zowel met behulp van $\cos \psi$ als van $\sin \psi$. Van de vier antwoorden komt er één tweemaal voor, dat is de gezochte oplossing.

Van azimut ψ en hoogte γ naar uurhoek ω en declinatie δ

$$\sin \delta = \sin \gamma \sin \phi - \cos \gamma \cos \phi \cos \psi \quad (6.1.6)$$

$$\cos \omega = \frac{\sin \gamma \cos \phi + \cos \gamma \sin \phi \cos \psi}{\cos \delta} \quad (6.1.7)$$

$$\sin \omega = \frac{\cos \gamma \sin \psi}{\cos \delta} \quad (6.1.8)$$

ϕ is de geografische breedte van de waarnemer.

Let op: ook hier geldt voor ω dezelfde waarschuwing als voor het azimut hierboven gegeven.

Verder geldt:

$$\sin \delta = \sin \epsilon \sin l \cos b + \cos \epsilon \sin b$$

Aangezien voor de Zon de astronomische breedte $b = 0$, vereenvoudigt dit tot

$$\sin \delta = \sin \epsilon \sin l$$

Met $\epsilon = 23^{\circ}26'30''$ wordt dit:

$$\sin \delta = 0,39782 \sin l \quad (6.1.9)$$

Op de ware middag wanneer de Zon in het zuiden staat is $\omega = 0$; dan volgt daaruit voor de zonshoogte

$$\sin \gamma = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi = \cos (\phi - \delta)$$

$$\text{dus } \gamma = 90^{\circ} + \delta - \phi$$

In het zomerpunt is de declinatie $\delta = 23,4^{\circ}$. Daarmee kunnen we de hoogste zonnestand voor Nederland berekenen:

Schiernmonnikoog	($\phi = 53,5^{\circ}$)	$\gamma_{\max} = 59,9^{\circ}$
Vaals	($\phi = 50,8^{\circ}$)	$\gamma_{\max} = 62,6^{\circ}$

dus een verschil van ruim $2\frac{1}{2}$ graad.

In onderstaande tabel zijn enige gegevens samengevat

	astron. lengte	astron. breedte	declinatie	hoogste zonnestand midden-Nederland
	l	b	δ	
lentepunt	0°	0°	0°	38°
zomerpunt	90°	0°	$23,44^{\circ}$	$61,5^{\circ}$
herfstpunt	180°	0°	0°	38°
winterpunt	270°	0°	$- 23,44^{\circ}$	$14,5^{\circ}$

Om de zonshoogte en het azimut te kunnen berekenen moeten de breedtegraad (dus de plaats van waarneming), de uurhoek (het tijdstip van de dag) en de declinatie (de dag in het jaar) bekend zijn. De laatste is uit tabel 6.2 af te lezen voor iedere dag van het jaar.

Tabel 6.2 Declinatie δ van de Zon in booggraden en-minuten

maand	JAN	FEB	MRT	APR	MEI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEC
dag	gr ' gr '	gr ' gr '	gr ' gr '	gr ' gr '	gr ' gr '	gr ' gr '	gr ' gr '	gr ' gr '	gr ' gr '	gr ' gr '	gr ' gr '	gr ' gr '
1	-23 3	-17 15	-7 25	4 43	15 13	22 7	23 5	17 54	8 7	-3 22	-14 35	-21 53
2	-22 58	-16 58	-7 2	5 6	15 31	22 15	23 0	17 39	7 45	-3 45	-14 54	-22 2
3	-22 53	-16 41	-6 39	5 29	15 49	22 22	22 56	17 23	7 23	-4 8	-15 12	-22 10
4	-22 47	-16 23	-6 16	5 52	16 6	22 29	22 50	17 7	7 1	-4 31	-15 31	-22 18
5	-22 40	-16 5	-5 52	6 15	16 23	22 36	22 45	16 51	6 39	-4 55	-15 49	-22 26
6	-22 34	-15 47	-5 29	6 38	16 40	22 42	22 39	16 34	6 16	-5 18	-16 7	-22 33
7	-22 27	-15 29	-5 6	7 0	16 57	22 48	22 32	16 18	5 54	-5 41	-16 25	-22 40
8	-22 19	-15 10	-4 42	7 23	17 13	22 53	22 25	16 1	5 31	-6 3	-16 42	-22 46
9	-22 11	-14 51	-4 19	7 45	17 29	22 58	22 18	15 43	5 9	-6 26	-17 0	-22 52
10	-22 2	-14 32	-3 55	8 7	17 45	23 3	22 11	15 26	4 46	-6 49	-17 16	-22 57
11	-21 53	-14 12	-3 32	8 29	18 0	23 7	22 3	15 8	4 23	-7 12	-17 33	-23 2
12	-21 44	-13 52	-3 08	8 51	18 15	23 11	21 54	14 49	4 0	-7 34	-17 49	-23 7
13	-21 34	-13 32	-2 43	9 13	18 30	23 14	21 46	14 32	3 37	-7 57	-18 5	-23 11
14	-21 24	-13 12	-2 21	9 34	18 44	23 17	21 37	14 13	3 14	-8 19	-18 21	-23 15
15	-21 13	-12 52	-1 57	9 56	18 58	23 20	21 27	13 55	2 51	-8 41	-18 36	-23 18
16	-21 2	-12 30	-1 34	10 17	19 13	23 22	21 17	13 36	2 28	-9 3	-18 51	-23 20
17	-20 51	-12 9	-1 10	10 38	19 26	23 24	21 7	13 16	2 5	-9 25	-19 6	-23 22
18	-20 39	-11 49	-0 46	10 59	19 39	23 25	20 57	12 57	1 41	-9 47	-19 20	-23 24
19	-20 27	-11 28	-0 22	11 20	19 52	23 26	20 46	12 37	1 18	-10 9	-19 34	-23 25
20	-20 14	-11 07	+0 1	11 41	20 5	23 27	20 35	12 18	0 55	-10 30	-19 48	-23 26
21	-20 1	-10 45	0 25	12 1	20 17	23 27	20 23	11 58	0 32	-10 52	-20 1	-23 27
22	-19 48	-10 23	0 49	12 21	20 29	23 26	20 11	11 38	+0 8	-11 13	-20 14	-23 26
23	-19 34	-10 2	1 12	12 41	20 40	23 25	19 59	11 17	-0 15	-11 34	-20 26	-23 26
24	-19 20	-9 40	1 36	13 1	20 51	23 24	19 46	10 57	-0 39	-11 55	-20 39	-23 25
25	-19 6	-9 17	2 0	13 21	21 2	23 23	19 33	10 36	-1 2	-12 15	-20 50	-23 23
26	-18 51	-8 55	2 23	13 40	21 13	23 21	19 20	10 15	-1 25	-12 36	-21 2	-23 21
27	-18 36	-8 33	2 47	13 59	21 23	23 18	19 07	9 54	-1 49	-12 56	-21 13	-23 19
28	-18 20	-8 10	3 10	14 18	21 32	23 16	18 53	9 33	-2 12	-13 16	-21 23	-23 16
29	-18 4	-7 47	3 34	14 37	21 42	23 12	18 39	9 12	-2 35	-13 36	-21 33	-23 12
30	-17 48		3 57	14 55	21 50	23 9	18 24	8 50	-2 58	-13 56	-21 43	-23 8
31	-17 32		4 20		21 59		18 9	8 29		-14 15		-23 4

Deze waarden kunnen ook worden gevonden met behulp van de reeksontwikkeling van Dogniaux (1977):

$$\delta = 0,33281 - 22,984 \cos \eta d - 0,34990 \cos 2 \eta d - 0,13980 \cos 3 \eta d + 3,7872 \sin \eta d + 0,03205 \sin 2 \eta d + 0,07187 \sin 3 \eta d \quad (6.1.10)$$

waarin $\eta = 2 \pi / 366$ in radialen
 d = het nummer van de dag waarbij 1 januari = 1
 δ = graden

Deze reeks heeft een maximale afwijking van $0,15^\circ$ ten opzichte van de waarden van de declinatie, zoals die in nautische jaarboeken voorkomen. Voor het berekenen van de declinatie wordt ook veel gebruik gemaakt van de reeksontwikkeling van Spencer (1971):

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cos \eta d - 0,006758 \cos 2 \eta d - 0,002697 \cos 3 \eta d + 0,070257 \sin \eta d + 0,000907 \sin 2 \eta d + 0,001480 \sin 3 \eta d \quad (6.1.11)$$

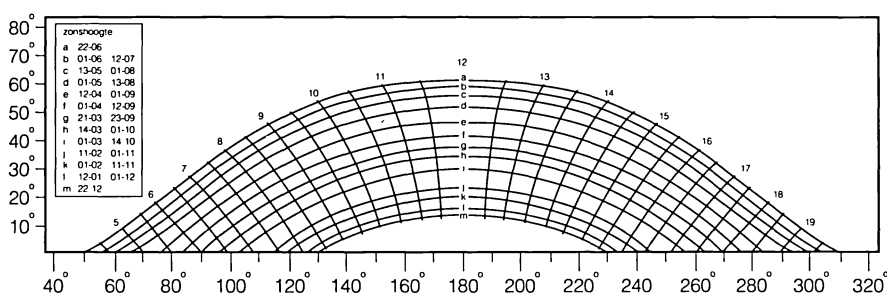
waarin δ in radialen
 $\eta = 2\pi/365$
 d = het nummer van de dag, waarbij 1 januari = 0

Volgens Spencer (1971) is de maximale afwijking ten opzichte van de waarden in de Nautical Almanac (1950) kleiner dan $0,05^\circ$. Ook een reeksontwikkeling met slechts één sinusterm geeft nog goede resultaten. Holtslag en Van Ulden (1983) gaan uit van formule (6.1.9) en gebruiken voor de astronomische lengte l :

$$l = 4,871 + \eta d + 0,033 \sin \eta d \quad (6.1.12)$$

waarin l in radialen
 $\eta = 2\pi/360$
 $d = 30 (M-1) + D$
 M = het nummer van de maand (1-12)
 D = het nummer van de dag in de maand (1-31).

De maximale fout bedraagt $0,7^\circ$, de gemiddelde afwijking ten opzichte van de waarden in het Nautisches Jahrbuch (1980) is $0,4^\circ$. Als we bedenken dat de declinatie omstreeks 22 maart per dag $0,4^\circ$ toeneemt en men bij de formules (6.1.10; 6.1.11; 6.1.12) slechts één δ -waarde per dag berekent, is een afwijking van $0,4^\circ$ van de ware δ goed genoeg.



Figuur 6.4 Zonnebanen voor 24 verschillende tijdstippen in het jaar voor 52° NB met tijden in plaatselijke ware tijd. Verticaal staat de zons hoogte uitgezet in graden, horizontaal het azimut met oost = 90° , zuid = 180° en west = 270°

De hoogte γ en het azimut ψ van de Zon kunnen ook worden afgelezen uit figuur 6.4. Hierin staan voor $\phi = 52^\circ$ NB de zonnebanen uitgezet voor 24 verschillende dagen in het jaar. De tijden zijn daarbij gegeven in plaatselijke ware tijd. Deze wijkt af van de in Nederland gebruikte klokke-tijd of MET. In de volgende appendix wordt daarom aandacht besteed aan de tijdrekening.

6.2 Tijdrekening

Bij stralingsberekeningen wil men de plaats van de Zon aan de hemel afhankelijk van de tijd weten. Helaas is het verband tussen die twee niet eenduidig. De Zon staat bijna nooit om 12 uur 's middags precies in het zuiden. Hoe dat komt wordt in dit aanhangsel uitgelegd.

De astronomische klok waarmee de tijd wordt gemeten is de Aarde. Door de draaiing van de Aarde om haar as wordt de daglengte bepaald. De lengte van het jaar wordt echter door de baan van de Aarde rond de Zon bepaald.

Willen we de tijdsduur van één omwenteling van de Aarde - de werkelijke rotatieduur - precies meten dan moeten we daarvoor een vast punt in het heelal nemen, bijvoorbeeld een ster. We bepalen de tijd waarop we die ster precies in het zuiden zien staan en de tijd waarop die ster, één nacht later, weer precies in het zuiden staat. Het verschil tussen beide tijden geeft de rotatieduur van de Aarde aan; er is dan één etmaal verstreken in sterretijd.

Wanneer we de tijd meten tussen twee opeenvolgende doorgangen van de Zon door de plaatselijke meridiaan (het zuiden), blijkt die ongeveer 4 minuten langer te zijn dan het etmaal gemeten in sterretijd. Dit komt doordat de Aarde na één omwenteling ongeveer 1° in haar baan om de Zon is opgeschoven. Dan moet zij ook 1° verder om haar as draaien alvorens de Zon weer in het zuiden staat. Het ware zonne-etmaal is daardoor $1/_{360} = 0,27\%$ of circa 4 minuten langer dan de werkelijke rotatieduur van de Aarde.

De ware zonnedag begint en eindigt op het moment van benedenculminatie van de Zon (de Zon in het noorden) wanneer de Zon in het onderste deel van de plaatselijke meridiaan staat. De ware zonnedag is verdeeld in 24 uur en de hierop gebaseerde tijd is de ware (zonne)tijd WT.

Helaas is de ware zonnetijd minder geschikt als tijdschaal, omdat de ware zonnedag in de loop van het jaar niet even lang is. Oorzaken daarvan zijn de hoek die het eclipticavlak maakt met het equatorvlak van de Aarde en de ellipsvorm van de aardbaan. Het laatste heeft tot gevolg dat de snelheid van de Aarde in haar baan maximaal is wanneer de afstand Zon-Aarde minimaal is, zoals in het perihelium begin januari en minimaal wanneer de afstand Zon-Aarde maximaal is, zoals in het aphelium begin juli.

Om die reden heeft men een denkbeeldige "gemiddelde" Zon ingevoerd, die zich met een eenparige (constante) snelheid langs de hemelequator beweegt. Het tijdsinterval tussen twee opeenvolgende passages van die "gemiddelde" Zon door de plaatselijke meridiaan heet de middelbare zonnedag. Op deze middelbare zonnedag is de middelbare zonnetijd of korter de middelbare tijd (MT) gebaseerd. Ook deze wordt verdeeld in 24 uur, 1440 minuten of 86400 seconden en komt overeen met de klokke-tijd.

Daar de middelbare Zon de meridianen op Aarde op verschillende tijden passeert geeft dit aanleiding tot verschillende middelbare plaatselijke tijden (MPT), die ieder gedefinieerd worden door de doorgang van de middelbare Zon door de plaatselijke meridiaan.

De meridiaan, die over de vroegere sterrenwacht van Greenwich (Engeland) loopt, is in oktober 1884 internationaal als hoofdmeridiaan, nulmeridiaan, aangenomen en de middelbare Greenwich tijd (Greenwich Mean Time, GMT) als standaard waaraan alle andere middelbare tijden zijn gerelateerd. In 1956 is voor GMT de term Universal Time (UT) ingevoerd.

Het verschil tussen GMT en een middelbare plaatselijke tijd in uren is gelijk aan de lengtegraad van die plaats (λ) gedeeld door 15. Immers één rotatie van de Aarde om haar as (360°)

duurt 24 uur, dus per graad $\frac{24}{360} = \frac{1}{15}$ uur. Daarbij wordt westerlengte (WL) positief genomen en oosterlengte (OL) negatief.

$$\text{MPT} = \text{GMT} - \lambda /_{15} \text{ (uur)} \quad (6.2.1)$$

Een plaats in Nederland die 5° oostelijk van de 0° -meridiaan ligt (5° OL), heeft dus een MPT = GMT + 20^m. De Middelbaar Plaatselijke Tijd is dan 20^m later dan die van Greenwich. Het zou onpraktisch zijn als iedere plaats op Aarde zijn eigen MPT zou hebben. Daarom heeft men in 1912 de aardbol verdeeld in een 24-tal tijdzones, elk 15 lengtegraden breed. Voor het gebied dat rond de nulmeridiaan ligt - in principe tussen $7\frac{1}{2}^\circ$ WL en $7\frac{1}{2}^\circ$ OL - geldt GMT. Voor het vasteland van West- en Midden-Europa van $7\frac{1}{2}^\circ$ OL tot $22\frac{1}{2}^\circ$ OL geldt de Midden Europese Tijd (MET), waarvoor:

$$\text{MET} = \text{GMT} + 1^{\text{h}}. \quad (6.2.2)$$

6.2.1 Tijdrekening in Nederland

Welke tijden zijn er in Nederland historisch gebruikt? Tot omstreeks 1846 werd verreweg het meest gebruikt de ware zonnetime, af te lezen van de bekende zonnewijzers! Van omstreeks 1846 tot 1 mei 1909 kwam meer en meer de MPT (zie hierboven) in zwang. Sommige gemeenten bleven evenwel vasthouden aan de ware zonnetime of gingen over tot de Middelbare Tijd van Amsterdam, ook wel Amsterdamse Tijd (AT) genoemd. Deze behoort bij de plaatselijke meridiaan lopende over de Westertoren te Amsterdam. Deze AT geeft 19^m 32^s later aan dan GMT. Hieruit blijkt dat Nederland niet onmiddellijk in 1884 de internationaal ingevoerde GMT ging volgen.

In de nacht van 30 april op 1 mei 1909 werd voor Nederland de Nederlandse Tijd (NT) ingevoerd, behorende bij de meridiaan van 5° OL, welke 20 minuten later dan GMT aangeeft. Enkele gemeenten bleven echter rekenen met de Amsterdamse Tijd. Op 1 juli 1937 werd, waar de NT nog niet in gebruik was, van de Amsterdamse Tijd op NT overgegaan door de klok 28^s vooruit te zetten.

Tot de Tweede Wereldoorlog had Nederland dus als standaard de Nederlandse Tijd, zijnde GMT + 20^m. Op last van de Duitse bezetter werd op 16 mei 1940 de in Duitsland geldende Midden Europese Tijd (MET) ingevoerd. Dat is tot op heden zo gebleven, hoewel geografisch gezien, Nederland, dat geheel ten westen van $7\frac{1}{2}^\circ$ OL ligt, eigenlijk GMT zou moeten gebruiken.

Bij de invoering van de zomertijd (gebruikt in de jaren 1916 t/m 1945 en sinds 1977) wordt de klok één uur vooruitgezet. Nederland heeft dan Midden Europese Zomertijd (MEZT) waarvoor geldt:

$$\text{MEZT} = \text{GMT} + 2^{\text{h}}. \quad (6.2.3)$$

6.2.2 En nu de praktijk

Stralingsberekeningen en de tijdstippen van zonsopkomst en zonsondergang zijn gebaseerd op de ware Zon. Om te bepalen wanneer de ware Zon een bepaalde plaatselijke meridiaan passeert (het nulpunt van de uurhoek ω) is het nodig de verschillen te kennen tussen de ware zonnetime WT en de middelbare tijd MT. Met behulp van de geografische coördinaten kan de MT weer omgerekend worden in GMT (formule 6.2.1) of desgewenst in MET (formule 6.2.2).

Het verschil tussen ware zonnentijd en middelbare zonnentijd heet tijdvereffening of equatie e

$$e = WT - MT \quad \text{of} \quad WT = MT + e \quad (6.2.4)$$

Tabel 6.3 *Tijdvereffening e in minuten en seconden*

maand	JAN	FEB	MRT	APR	MEI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEC
dag	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s
1	-3 17	-13 31	-12 19	-3 48	+2 57	+2 11	-3 52	-6 16	+0 07	+10 26	+16 25	+10 51
2	3 45	13 39	12 07	3 30	3 04	2 01	4 03	6 12	0 26	10 45	16 25	10 28
3	4 13	13 46	11 54	3 13	3 11	1 51	4 14	6 07	0 46	11 04	16 25	10 04
4	4 40	13 53	11 41	2 55	3 16	1 41	4 24	6 02	1 05	11 22	16 25	9 40
5	5 07	13 58	11 27	2 38	3 22	1 31	4 35	5 56	1 25	11 40	16 23	9 15
6	-5 34	-14 03	-11 13	-2 20	+3 26	+1 20	-4 45	-5 49	+1 46	+11 58	+16 20	+8 50
7	6 00	14 07	10 59	2 03	3 30	1 09	4 55	5 42	2 06	12 15	16 17	8 24
8	6 26	14 10	10 44	1 47	3 34	0 57	5 04	5 34	2 27	12 32	16 13	7 57
9	6 52	14 13	10 29	1 30	3 36	0 46	5 13	5 26	2 47	12 48	16 08	7 30
10	7 16	14 14	10 13	1 14	3 39	0 34	5 21	5 17	3 08	13 04	16 02	7 03
11	-7 41	-14 15	-9 58	-0 58	+3 40	+0 21	-5 30	-5 07	+3 29	+13 20	+15 55	+6 35
12	8 04	14 15	9 42	0 43	3 41	+0 09	5 37	4 57	3 50	13 35	15 47	6 07
13	8 28	14 15	9 25	0 28	3 42	-0 04	5 44	4 47	4 11	13 49	15 39	5 39
14	8 50	14 13	9 09	-0 13	3 42	0 16	5 51	4 36	4 33	14 03	15 30	5 10
15	9 12	14 11	8 52	+0 02	3 41	0 29	5 57	4 24	4 54	14 16	15 20	4 41
16	-9 33	-14 08	-8 35	+0 16	+3 40	-0 42	-6 03	-4 12	+5 15	+14 29	+15 09	+4 12
17	9 54	14 05	8 18	0 30	3 38	0 55	6 08	3 59	5 37	14 41	14 57	3 43
18	10 14	14 00	8 00	0 43	3 36	1 08	6 13	3 46	5 58	14 53	14 44	3 13
19	10 33	13 56	7 43	0 56	3 33	1 22	6 17	3 32	6 19	15 04	14 31	2 44
20	10 51	13 50	7 25	1 09	3 30	1 35	6 21	3 18	6 41	15 14	14 17	2 14
21	-11 09	-13 44	-7 07	+1 21	+3 26	-1 48	-6 24	-3 03	+7 02	+15 24	+14 02	+1 44
22	11 26	13 37	6 49	1 33	3 21	2 01	6 26	2 48	7 23	15 33	13 46	1 15
23	11 42	13 29	6 31	1 44	3 16	2 14	6 28	2 32	7 44	15 42	13 30	0 45
24	11 58	13 21	6 13	1 55	3 11	2 26	6 29	2 16	8 05	15 49	13 12	+0 15
25	12 12	13 12	5 55	2 05	3 05	2 39	6 29	1 59	8 26	15 56	12 54	-0 15
26	-12 26	-13 02	-5 37	+2 15	+2 58	-2 52	-6 29	-1 42	+8 46	+16 03	+12 36	-0 44
27	12 39	12 52	5 19	2 25	2 51	3 04	6 29	1 25	9 07	16 08	12 16	1 14
28	12 51	12 42	5 00	2 34	2 44	3 16	6 27	1 07	9 27	16 13	11 56	1 43
29	13 02	12 31	4 42	2 42	2 36	3 28	6 25	0 49	9 47	16 17	11 35	2 12
30	13 13		4 24	2 50	2 28	3 40	6 23	0 31	10 07	16 20	11 13	2 41
31	-13 22		-4 06		+2 20		-6 20	-0 12		+16 23		-3 10

De waarde van e verloopt in het jaar (zie tabel 6.3), maar is verder onafhankelijk van de plaats op Aarde. Deze waarden zijn ook te berekenen met behulp van een reeksontwikkeling van Dogniaux (1977).

$$e = 0,0072 \cos \eta d - 0,0528 \cos 2 \eta d - 0,0012 \cos 3 \eta d \\ - 0,1229 \sin \eta d - 0,1565 \sin 2 \eta d - 0,0041 \sin 3 \eta d \quad (\text{in uren}) \quad (6.2.5)$$

waarin $\eta = 2 \pi / 366$ in radialen
 $d =$ het nummer van de dag, waarbij 1 januari = 1.

Deze reeksontwikkeling heeft een maximale afwijking van $21''$ ten opzichte van de waarden van de tijdvereffening, zoals die in nautische jaarboeken voorkomen. Er wordt ook veel gebruikgemaakt van de reeksontwikkeling van Spencer (1971)

$$e = 0,000075 + 0,001868 \cos \eta d - 0,014615 \cos 2 \eta d \\ - 0,032077 \sin \eta d - 0,040849 \sin 2 \eta d \quad (6.2.6)$$

waarin e (in radialen)
 $\eta = 2\pi/365$
 $d =$ het nummer van de dag, waarbij 1 januari = 0.

Volgens Spencer (1971) is de maximale afwijking ten opzichte van de waarden in de Nautical Almanac (1950) $35''$.

We zien in tabel (6.3) enkele markante dagen:

12 februari	- 14 ^m 15 ^s	26 juli	- 6 ^m 29 ^s
15 april	0	1 september	0
13 mei	+ 3 ^m 42 ^s	3 november	+ 16 ^m 25 ^s
13 juni	0	24 december	0

Op 4 dagen in het jaar is $e = 0$, dus dan is de WT gelijk aan de MT. De Zon staat dan om 12^h MPT precies in het zuiden. Op alle andere dagen staat de Zon om 12^h plaatselijke tijd niet in het zuiden. Is e positief dan staat, als de ware Zon door het zuiden gaat, de middelbare er nog voor (dus ten oosten van het zuiden) en zal deze het zuiden later passeren. De maximale waarde van e is 16^m 25^s op 3 november, hetgeen tot gevolg heeft dat de ware Zon in Utrecht (5° OL) op die dag om 12^h minus 16^m 25^s = 11^h 43^m 35^s MPT = 12^h 23^m 35^s MET door het zuiden gaat. Bij de minimale waarde van $e = - 14^m 15^s$, omstreeks 12 februari is dit pas om 12^h 14^m 15^s MPT = 12^h 54^m 15^s MET het geval. We zien dus dat er een verschil van meer dan een half uur is in de klokketijd dat de Zon door het zuiden gaat.

Daglengte

Om de totale zonneënergie over één etmaal te bepalen moet de daglengte bekend zijn, m.a.w. de tijd dat de Zon boven de horizon staat.

Dit lijkt een eenvoudig probleem, als men stelt dat bij zonsopkomst en zonsondergang $\gamma = 0$. De formules (6.1.6) t/m (6.1.8) krijgen daardoor een eenvoudig aanzien.

Toch zijn er hierbij nog complicaties tengevolge van verschillen in de definitie van zonsopkomst en zonsondergang. Het is in de meteorologie en astronomie gebruikelijk zonsopkomst te definiëren als het tijdstip waarop de bovenrand van de Zon 's ochtends boven de horizon verschijnt en zonsondergang als het tijdstip waarop de bovenrand van de Zon onder de kim verdwijnt.

Bovendien wordt de Zon al gezien voordat deze in werkelijkheid boven de horizon staat, doordat de schuin invallende zonnestrallen door de atmosfeer dicht bij het aardoppervlak worden afgebogen (straalbreking). Dat effect wordt ook wel kimduiking genoemd en bedraagt 34'.

De hoek waaronder wij de middellijn van de Zon zien varieert enigszins in de loop van het jaar en is gemiddeld 32'. De hoek tussen het middelpunt van de Zon en haar bovenrand bedraagt dus 16'. Dit tezamen betekent dat het middelpunt van de Zon 34' + 16' = 50' onder het horizontale vlak ligt bij zonsopkomst en zonsondergang, de zonshoogte is dan $\gamma = -0^\circ 50'$.

Wat voor effect heeft dat nu op de daglengte? Met behulp van formule (6.1.3) kan worden uitgerekend, dat de daglengte volgens de meteorologische definitie 14 minuten langer is dan die gebaseerd op $\gamma = 0$. Vindt men dat de eerste 7 minuten na zonsopkomst verwaarloosd kunnen worden, omdat de Zon nog laag aan de hemel staat en de bijdrage aan de zonne-energie nog gering is - behalve op verticale vlakken in oostelijke richting -, dan kan men van $\gamma = 0$ uitgaan. In het andere geval moet $\gamma = -0^\circ 50'$ in rekening worden gebracht.

Uitgaande van formule (6.1.3) waarin o.a. de zonshoogte γ en de uurhoek ω voorkomen, kunnen we door oplossen naar ω de daglengte 2 H uitrekenen.

$$2 H [\text{uur}] = \frac{2}{15} \text{arc cos} \left[\frac{\sin(-50') - \sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} \right] \quad (6.2.7)$$

of zonder rekening te houden met kimduiking en de diameter van de Zon

$$2 H [\text{uur}] = \frac{2}{15} \text{arc cos} (-\text{tg } \phi \text{ tg } \delta) \quad (6.2.8)$$

De hoeken zijn in graden gegeven, de noemer 15 in de breuk rekt dit om naar een daglengte in uren.

De tijden van zonsopkomst en zonsondergang liggen H uren voor, respectievelijk H uren na 12^h ware zonnetijd. Ze liggen dus symmetrisch ten opzichte van 12^h WT, maar tengevolge van de tijdvereffening niet symmetrisch ten opzichte van 12^h MPT of 12^h MET.

$$\text{zonsopkomst } z_{\text{op}} (\text{MET}) = 12 + 1 - e + \lambda/15 - H \quad (\lambda < 0 \text{ voor OL!})$$

$$\text{zonsondergang } z_{\text{on}} (\text{MET}) = 12 + 1 - e + \lambda/15 + H \quad (\lambda < 0 \text{ voor OL!}) \quad (6.2.9)$$

Een eenvoudig rekenvoorbeeld

Op 20 maart en 22 september is $\delta = 0$ (zie tabel 6.2), dus dan is $\text{tg } \delta = 0$. Dat wil zeggen uitgaande van de eenvoudige formule (6.2.8) vinden we $\text{arc cos } 0 = 90^\circ$, oftewel $2 H = \frac{2}{15} \times 90 = 12$ uur.

Op 20 maart is $e = 7^m$, op 22 september is $e = 7^m$.

Voor een punt op 5° OL, waar $\lambda/15 = -20^m$, wordt dan

$$\text{op 20 maart: } z_{\text{op}} (\text{MET}) = 13^h + 7^m - 20^m - 6^h = 6^h 47^m$$

$$z_{\text{on}} (\text{MET}) = 13^h + 7^m - 20^m + 6^h = 18^h 47^m$$

$$\text{op 22 september: } z_{\text{op}} (\text{MET}) = 13^h - 7^m - 20^m - 6^h = 6^h 33^m$$

$$z_{\text{on}} (\text{MET}) = 13^h - 7^m - 20^m + 6^h = 18^h 33^m$$

Tabel 6.4 Tijden van zonsopkomst en zonsondergang, in GMT, en daglengte in uren en min. voor De Bilt, De Kooy, Eelde, Vlissingen en Zuid-Limburg

DATUM	DE BILT			DE KOOIJ			EELDE			VLISSINGEN			ZUID-LIMBURG		
	op	onder	dagl.	op	onder	dagl.	op	onder	dagl.	op	onder	dagl.	op	onder	dagl.
1 januari	7.48	15.37	7.49	7.54	15.34	7.40	7.48	15.26	7.38	7.51	15.46	7.55	7.40	15.40	8.00
6	7.47	15.43	7.56	7.53	15.40	7.47	7.47	15.32	7.45	7.50	15.52	8.02	7.39	15.46	8.07
11	7.44	15.49	8.05	7.50	15.47	7.57	7.44	15.38	7.54	7.48	15.58	8.10	7.37	15.52	8.15
16	7.41	15.56	8.15	7.46	15.55	8.09	7.40	15.46	8.06	7.44	16.06	8.22	7.34	15.59	8.25
21	7.36	16.05	8.29	7.41	16.03	8.22	7.35	15.55	8.20	7.40	16.14	8.34	7.29	16.07	8.38
26	7.30	16.13	8.43	7.35	16.12	8.37	7.28	16.04	8.36	7.34	16.22	8.48	7.23	16.16	8.53
1 februari	7.21	16.25	9.04	7.26	16.23	8.57	7.19	16.15	8.56	7.25	16.33	9.08	7.15	16.26	9.11
6	7.13	16.34	9.21	7.17	16.33	9.16	7.11	16.25	9.14	7.17	16.42	9.25	7.07	16.35	9.28
11	7.04	16.43	9.39	7.08	16.43	9.35	7.02	16.35	9.33	7.09	16.51	9.42	6.59	16.44	9.45
16	6.55	16.53	9.58	6.58	16.52	9.54	6.52	16.44	9.52	6.59	17.01	10.02	6.50	16.53	10.03
21	6.45	17.02	10.17	6.48	17.02	10.14	6.41	16.54	10.13	6.50	17.10	10.20	6.40	17.02	10.22
26	6.34	17.11	10.37	6.37	17.11	10.34	6.31	17.04	10.33	6.40	17.19	10.39	6.30	17.11	10.41
1 maart	6.28	17.17	10.49	6.31	17.17	10.46	6.23	17.10	10.47	6.33	17.24	10.51	6.24	17.16	10.52
6	6.17	17.26	11.09	6.19	17.26	11.07	6.12	17.19	11.07	6.22	17.32	11.10	6.13	17.24	11.11
11	6.05	17.34	11.29	6.07	17.35	11.28	6.01	17.28	11.27	6.11	17.41	11.30	6.02	17.33	11.31
16	5.53	17.43	11.50	5.55	17.44	11.49	5.49	17.37	11.48	6.00	17.50	11.50	5.51	17.41	11.50
21	5.42	17.52	12.10	5.44	17.53	12.09	5.36	17.46	12.10	5.49	17.58	12.09	5.40	17.49	12.09
26	5.30	18.01	12.31	5.31	18.02	12.31	5.24	17.55	12.31	5.37	18.07	12.30	5.28	17.58	12.30
1 april	5.16	18.11	12.55	5.17	18.13	12.56	5.10	18.06	12.56	5.23	18.16	12.53	5.15	18.07	12.52
6	5.05	18.19	13.14	5.05	18.22	13.17	4.58	18.15	13.17	5.12	18.25	13.13	5.04	18.15	13.11
11	4.53	18.28	13.35	4.53	18.31	13.38	4.46	18.24	13.38	5.01	18.33	13.32	4.53	18.23	13.30
16	4.42	18.36	13.54	4.42	18.40	13.58	4.34	18.32	13.58	4.50	18.41	13.51	4.42	18.31	13.49
21	4.31	18.44	14.13	4.31	18.48	14.17	4.23	18.41	14.18	4.39	18.49	14.10	4.32	18.40	14.08
26	4.21	18.53	14.32	4.20	18.57	14.37	4.13	18.50	14.37	4.29	18.58	14.29	4.22	18.48	14.26
1 mei	4.11	19.02	14.51	4.10	19.06	14.56	4.02	18.59	14.57	4.19	19.06	14.47	4.12	18.56	14.44
6	4.02	19.10	15.08	4.00	19.15	15.15	3.52	19.08	15.16	4.10	19.14	15.04	4.03	19.04	15.01
11	3.53	19.19	15.26	3.51	19.23	15.32	3.43	19.17	15.34	4.02	19.22	15.20	3.55	19.11	15.16
16	3.45	19.26	15.41	3.43	19.32	15.49	3.35	19.25	15.50	3.54	19.30	15.36	3.47	19.19	15.32
21	3.38	19.34	15.56	3.35	19.40	16.05	3.27	19.33	16.06	3.47	19.37	15.50	3.41	19.26	15.45
26	3.32	19.41	16.09	3.29	19.47	16.18	3.21	19.41	16.20	3.41	19.44	16.03	3.35	19.33	15.58
1 juni	3.25	19.49	16.24	3.23	19.55	16.32	3.14	19.49	16.35	3.35	19.52	16.17	3.29	19.40	16.11
6	3.22	19.54	16.32	3.19	20.00	16.41	3.10	19.54	16.44	3.32	19.56	16.24	3.26	19.45	16.19
11	3.19	19.58	16.39	3.16	20.04	16.48	3.08	19.58	16.50	3.29	20.01	16.32	3.23	19.49	16.26
16	3.18	20.01	16.43	3.15	20.08	16.53	3.06	20.02	16.56	3.28	20.04	16.36	3.22	19.52	16.30
21	3.18	20.03	16.45	3.15	20.10	16.55	3.06	20.04	16.58	3.28	20.06	16.38	3.22	19.54	16.32
26	3.19	20.04	16.45	3.16	20.10	16.54	3.08	20.04	16.56	3.29	20.07	16.38	3.23	19.55	16.32
1 juli	3.22	20.03	16.41	3.19	20.10	16.51	3.10	20.04	16.54	3.32	20.06	16.34	3.26	19.55	16.29
6	3.26	20.01	16.35	3.23	20.07	16.44	3.14	20.01	16.47	3.36	20.04	16.28	3.30	19.52	16.22
11	3.31	19.58	16.27	3.28	20.04	16.36	3.19	19.58	16.39	3.40	20.01	16.21	3.34	19.49	16.15
16	3.37	19.53	16.16	3.34	19.59	16.25	3.25	19.53	16.28	3.46	19.56	16.10	3.40	19.45	16.05
21	3.43	19.48	16.05	3.40	19.53	16.13	3.32	19.47	16.15	3.52	19.51	15.59	3.46	19.40	15.54
26	3.50	19.41	15.51	3.47	19.47	16.00	3.40	19.40	16.00	3.59	19.44	15.45	3.53	19.34	15.41
1 augustus	3.59	19.32	15.33	3.57	19.37	15.40	3.49	19.31	15.42	4.08	19.36	15.28	4.01	19.25	15.24
6	4.07	19.23	15.16	4.05	19.28	15.23	3.57	19.22	15.25	4.16	19.28	15.12	4.08	19.17	15.09
11	4.15	19.14	14.59	4.14	19.19	15.05	4.05	19.12	15.07	4.23	19.19	14.56	4.16	19.08	14.52
16	4.23	19.05	14.42	4.22	19.08	14.46	4.14	19.02	14.48	4.31	19.09	14.38	4.24	18.59	14.35
21	4.31	18.54	14.23	4.31	18.58	14.27	4.23	18.52	14.29	4.39	18.59	14.20	4.32	18.49	14.17
26	4.40	18.44	14.04	4.39	18.47	14.08	4.31	18.40	14.09	4.47	18.49	14.02	4.40	18.38	13.58
1 september	4.49	18.30	13.41	4.49	18.33	13.44	4.42	18.26	13.44	4.57	18.35	13.38	4.49	18.26	13.37
6	4.58	18.19	13.21	4.58	18.22	13.24	4.50	18.14	13.24	5.05	18.24	13.19	4.56	18.15	13.19
11	5.05	18.07	13.02	5.06	18.10	13.04	4.59	18.02	13.03	5.13	18.13	13.00	5.04	18.04	13.00
16	5.14	17.55	12.41	5.15	17.58	12.43	5.07	17.50	12.43	5.20	18.01	12.41	5.12	17.52	12.40
21	5.22	17.44	12.22	5.23	17.46	12.23	5.16	17.38	12.22	5.28	17.50	12.22	5.20	17.41	12.21
26	5.30	17.32	12.02	5.32	17.34	12.02	5.25	17.26	12.01	5.37	17.38	12.01	5.28	17.29	12.01
1 oktober	5.38	17.20	11.42	5.40	17.21	11.41	5.33	17.14	11.41	5.44	17.26	11.42	5.35	17.18	11.43
6	5.47	17.08	11.21	5.49	17.10	11.21	5.42	17.02	11.20	5.53	17.15	11.22	5.43	17.07	11.24
11	5.55	16.57	11.02	5.58	16.58	11.00	5.51	16.50	10.59	6.01	17.04	11.03	5.52	16.56	11.04
16	6.04	16.46	10.42	6.07	16.46	10.39	6.00	16.39	10.39	6.09	16.53	10.44	6.00	16.45	10.45
21	6.13	16.35	10.22	6.16	16.35	10.19	6.09	16.28	10.19	6.18	16.43	10.25	6.08	16.35	10.27
26	6.22	16.25	10.03	6.25	16.25	10.00	6.19	16.17	9.58	6.26	16.32	10.06	6.17	16.25	10.08
1 november	6.32	16.13	9.41	6.37	16.13	9.36	6.30	16.05	9.35	6.37	16.21	9.44	6.27	16.14	9.47
6	6.42	16.04	9.22	6.46	16.03	9.17	6.40	15.55	9.15	6.46	16.13	9.27	6.36	16.05	9.29
11	6.51	15.56	9.05	6.55	15.55	9.00	6.49	15.47	8.58	6.55	16.04	9.09	6.44	15.58	9.14
16	7.00	15.49	8.49	7.04	15.47	8.43	6.58	15.39	8.41	7.04	15.57	8.53	6.53	15.50	8.57
21	7.08	15.42	8.34	7.13	15.40	8.27	7.07	15.32	8.25	7.12	15.51	8.39	7.01	15.44	8.43
26	7.17	15.37	8.20	7.22	15.34	8.12	7.16	15.26	8.10	7.20	15.46	8.26	7.09	15.39	8.30
1 december	7.24	15.32	8.08	7.30	15.30	8.00	7.23	15.22	7.59	7.28	15.41	8.13	7.17	15.35	8.18
6	7.31	15.29	7.58	7.37	15.27	7.50	7.31	15.19	7.48	7.34	15.39	8.05	7.23	15.32	8.09
11	7.37	15.28	7.51	7.43	15.25	7.42	7.37	15.17	7.40	7.40	15.37	7.57	7.29	15.31	8.02
16	7.42	15.28	7.46	7.47	15.25	7.38	7.41	15.16	7.35	7.45	15.37	7.52	7.34	15.31	7.57
21	7.45	15.29	7.44	7.51	15.26	7.35	7.45	15.17	7.32	7.48	15.38	7.50	7.37	15.32	7.55
26	7.47	15.31	7.44	7.53	15.28	7.35	7.47	15.20	7.33	7.50	15.41	7.51	7.39	15.35	7.56

In tabel 6.4 zijn voor 5 plaatsen in Nederland de tijden van zonsopkomst en zonsondergang in UT (volgens formule 6.2.9) en de daglengte (volgens formule 6.2.7) gegeven voor 72 dagen verdeeld over het jaar. Uit die tabel blijkt dat op 21 december de dag in het noorden van het land 23 minuten korter is en op 21 juni 26 minuten langer is dan in Zuid-Limburg.

Tot besluit willen we nog een aardig effect bespreken waartoe de tijdvereffening leidt.

Op 3 november heeft e haar maximale waarde 16^m , op 24 december is $e = 0$, op 12 februari heeft e haar minimale waarde -14^m . Dat heeft tot gevolg dat op de drie genoemde data de Zon op 5° OL culmineert (in het zuiden staat) om:

3 november $12^h + 1^h - 16^m - 20^m = 12^h 24^m$ MET

24 december $12^h + 1^h - 20^m = 12^h 40^m$ MET

12 februari $12^h + 1^h + 14^m - 20^m = 12^h 54^m$ MET.

Het culminatietijdstip van de Zon verdeelt de daglengte in twee gelijke delen. Op 3 november is het na een halve dag daglicht pas $12^h 24^m$ klokke tijd, op 12 februari is het na een halve dag licht al $12^h 54^m$ klokke tijd. Begin november lijkt de voormiddag dus ruim een half uur langer dan de namiddag, in februari lijkt de namiddag bijna een half uur langer dan de ochtend. De verandering van e draagt er verder toe bij dat begin november de dagen zo snel schijnen te korten en in februari zo snel schijnen te lengen.

6.3 Eenheden en definities

6.3.1 Eenheden¹²⁾

Straling is een vorm van energie. Volgens het Internationale Stelsel van Eenheden (SI) dat in 1960 is vastgesteld, wordt voor de grootheid energie de eenheid J (*joule*) gebruikt. Daarom is de zonnestralingenergie in dit boek ook uitgedrukt in joules, met de dimensie $Nm = kg\ m^2s^{-2}$.

Een andere energie-eenheid is kWh (*kilowattuur*) met

$$1\ kWh = 3.600.000\ J = 3,6\ MJ.$$

Energie per tijdseenheid is een energiestroom of vermogen. Dat wordt uitgedrukt in de SI-eenheid W (watt) met de dimensie $J\ s^{-1}$ of $kg\ m^2\ s^{-3}$.

De stralingsenergie die door een oppervlakte-element wordt ontvangen heet de stralingsexpositie, uitgedrukt in: $J\ m^{-2}$ of $kWh\ m^{-2}$.

Het vermogen dat door een oppervlakte-element wordt ontvangen heet de *irradiantie*, uitgedrukt in $W\ m^{-2}$.

De over één uur (één dag) geïntegreerde irradiantie wordt uurlijkse (dagelijkse) stralingsexpositie of uursom (dagsom) van de straling genoemd en uitgedrukt in $J\ m^{-2}$.

De in deze publikatie gegeven uur- en dagsommen kunnen in een gemiddelde uurlijkse of dagelijkse irradiantie worden omgerekend.

$$\text{uursommen } 1\ kJ\ m^{-2}\ h^{-1} = \frac{1000}{3600}\ W\ m^{-2} = 0,278\ W\ m^{-2}$$

$$\text{dagsommen } 1\ kJ\ m^{-2}\ d^{-1} = \frac{1000}{86400}\ W\ m^{-2} = 0,0116\ W\ m^{-2}$$

¹²⁾ voor het vormen van decimale veelvouden gebruikt men de voorvoegsels: mega (M): factor 10^6 en kilo (k): factor 10^3

Met algemeen geldende relaties

$$1 \text{ kJ m}^{-2} = 0,278 \text{ Wh m}^{-2} \quad \text{of}$$

$$1 \text{ MJ m}^{-2} = 1000 \text{ kJ m}^{-2} = 0,278 \text{ kWh m}^{-2}$$

kunnen de gegeven stralingsexposities makkelijk worden omgerekend naar andere eenheden.

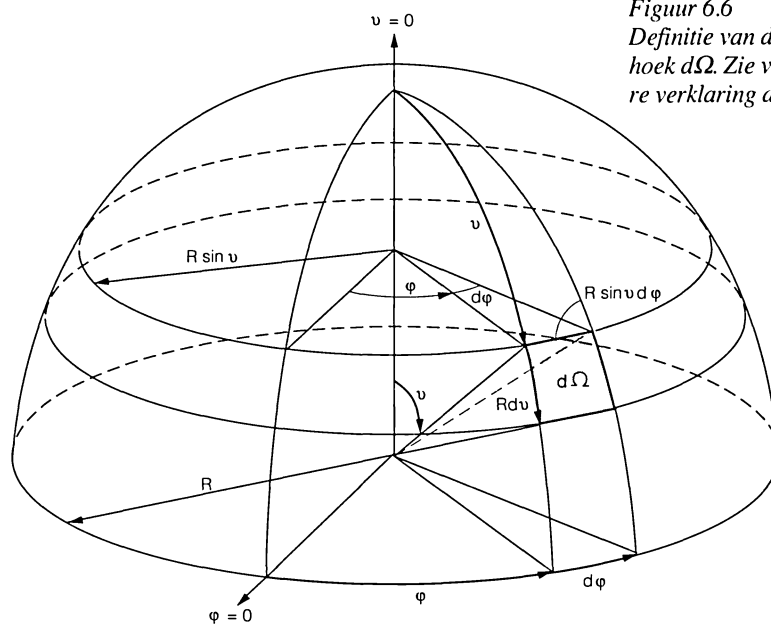
6.3.2 Definities

In het volgende zullen we een aantal stralings- en fotometrische (daglicht) grootheden (figuur 6.5) bespreken en definiëren. Verder worden de Engelse, Duitse en Franse vertalingen gegeven. We beginnen met enkele inleidende opmerkingen.

Straling			
Uitgaand		Invallend	
stralingsenergie	Q_e [J]		
stralingsflux	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$ [W]		expositie H_e [Jm^{-2}]
intensiteit	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$ [Wsr^{-1}]	emittantie $M_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$ [Wm^{-2}]	irradiantie $E_e = \frac{dH_e}{dt}$ [Wm^{-2}]
radiantie	$L_e = \frac{dI_e}{dA \cos \nu}$ [$\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}$]	angulaire emittantie $M_\Omega = \frac{dM_e}{d\Omega}$ [$\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}$]	angulaire irradiantie $E_\Omega = \frac{dE_e}{d\Omega}$ [$\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}$]
Fotometrie			
Uitgaand		Invallend	
lichtstroom	Φ_v [lm, cd sr]		licht-expositie H_v [lx s]
lichtsterkte	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$ [cd]	licht-emittantie $M_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$ [lm m^{-2}]	verlichtingssterkte $E_v = \frac{dH_v}{dt}$ [$\text{lm m}^{-2} = \text{lx}$]
luminantie	$L_v = \frac{dI_v}{dA \cos \nu}$ [cd m^{-2}]		

Figuur 6.5
Diagram van stralings- en fotometrische eenheden

Stralings- en daglichtgrootheden hebben dezelfde symbolen; wanneer er verwarring dreigt worden ze van een index e (stralingsenergie) of v (visibel = zichtbaar licht) voorzien om ze te kunnen onderscheiden.



*Figuur 6.6
Definitie van de ruimte-
hoek $d\Omega$. Zie voor verde-
re verklaring de tekst*

De ruimtehoek $d\Omega$ is gedefinieerd in figuur 6.6. Een ruimtehoek is een deel van de ruimte begrensd door een kegelmantel. Deze kegel snijdt een oppervlakje uit een bol, waarvan het middelpunt samenvalt met de top van de kegel. De grootte van de ruimtehoek is nu de verhouding van het uitgesneden (in de figuur gearceerde) oppervlakje dA en het kwadraat van de straal R van de bol:

$$d\Omega = \frac{dA}{R^2}$$

Uit de figuur blijkt dat voor kleine $d\Omega$ het gearceerde oppervlak $dA = R d\vartheta \cdot R \sin \vartheta d\phi$, waarbij ϑ de poolhoek en ϕ de azimuthhoek zijn. Dus $d\Omega = \sin \vartheta d\vartheta d\phi$. De eenheid van ruimtehoek heet steradiaal [sr]. Integreeren we $d\Omega$ over de hele bol, dan vinden we:

$$\Omega = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\vartheta=0}^{\pi} \sin \vartheta d\vartheta d\phi = 4\pi \text{ sr}.$$

Een hele bol heeft dus een ruimtehoek van 4π steradianen.

Stralingsenergie, radiant energy, Strahlungsenergie, énergie rayonnante.

Symbol Q_e eenheid J

De hoeveelheid energie overgedragen door straling.

De stralingsenergie van de Zon is $3,83 \cdot 10^{26}$ J, in één seconde uitgezonden!

Stralingsflux, vermogen, radiant flux, Strahlungsfluss, flux énergétique.

Symbol Φ_e eenheid W

De stralingsenergie per tijdseenheid. Het vermogen dat wordt uitgezonden, overgedragen of ontvangen in de vorm van straling.

De stralingsflux van de Zon is $3,83 \cdot 10^{26}$ W.

Emittantie, radiant exitance, spezifische Ausstrahlung, exitance énergétique.

Symbool M_e eenheid $W m^{-2}$

De stralingsflux die per oppervlakte-element dA wordt uitgezonden.

De emittantie van de Zon is $6,33 \cdot 10^7 W m^{-2}$.

Angulaire emittantie.

Symbool M_Ω eenheid $W m^{-2} sr^{-1}$

De stralingsflux die door een oppervlakte-element dA per eenheid van ruimtehoek $d\Omega$ wordt uitgezonden.

Stralingssterkte, intensiteit, radiant intensity, Strahlstärke, intensité énergétique.

Symbool I_e eenheid $W sr^{-1}$

De stralingsflux die door een puntbron in een zeer kleine kegel langs een bepaalde richting wordt uitgezonden, gedeeld door de ruimtehoek $d\Omega$ van die kegel.

De intensiteit van de Zon is $3,05 \cdot 10^{25} W sr^{-1}$.

Radiantie, radiance, Strahldichte, luminance énergétique.

Symbool L_e eenheid $W m^{-2} sr^{-1}$

De intensiteit in een bepaalde richting van een oppervlakte-element gedeeld door het oppervlak van de loodrechte projectie van het element op een vlak loodrecht op de gegeven richting.

$L_e = dI_e/dA \cos \vartheta$ waarbij ϑ de hoek is tussen de gegeven richting en de normaal op het oppervlakte-element dA .

De radiantie van de Zon is $2,07 \cdot 10^7 W m^{-2} sr^{-1}$.

Irradiantie, irradiance, Bestrahlungsstärke, éclairément énergétique.

Symbool E_e eenheid $W m^{-2}$

De stralingsflux die van een willekeurige bron door een oppervlakte-element dA wordt opgevangen.

De irradiantie van de Zon aan de rand van de atmosfeer (de zonneconstante, zie hoofdstuk 1) is $1367 W m^{-2}$.

Angulaire irradiantie.

Symbool E_Ω eenheid $W m^{-2} sr^{-1}$

De stralingsflux die door een oppervlakte-element dA uit een bepaalde zeer kleine ruimtehoek (richting) wordt opgevangen.

Stralingsexpositie, radiant exposure, Bestrahlung, exposition énergétique.

Symbool H_e eenheid $J m^{-2}$

De stralingsenergie die van een willekeurige bron door een oppervlakte-element dA wordt opgevangen. Het is de integraal over een bepaalde tijd (uur, dag, jaar) van de irradiantie.

Lichtstroom, luminous flux, Lichtstrom, flux lumineux.

Symbool Φ_v eenheid lm (lumen)

De lichtstroom is een flux te vergelijken met de stralingsflux Φ_e , doch met de eigenschap dat hij een bepaalde lichtindruk geeft die samenhangt met de relatieve ooggevoeligheid.

Lichtsterkte, luminous intensity, Lichtstärke, intensité lumineuse.

Symbool I_v eenheid cd (candela) = $lm \cdot sr^{-1}$

De lichtstroom die door een puntbron in een zeer kleine kegel langs een bepaalde richting

wordt uitgezonden, gedeeld door de ruimtehoek $d\Omega$ van die kegel, dus $I_v = d\Phi/d\Omega$.
 De candela is een grondeenheid in het SI voor de fotometrie. Het is de lichtsterkte in loodrechte richting van een oppervlak van $1/600.000 \text{ m}^2$ van een zwart lichaam bij de steilste temperatuur (1773°C) van platina onder een druk van $101325 \text{ Pa} = 1013,25 \text{ hPa}$.

Luminantie, luminance, Leuchtdichte, luminance.

Symbool L_v eenheid cd m^{-2}

De lichtsterkte in een bepaalde richting van een oppervlakte-element gedeeld door het oppervlak van de loodrechte projectie van het element op een vlak loodrecht op de gegeven richting.

$L_v = dI_v/dA \cos \vartheta$, waarbij ϑ de hoek is tussen de gegeven richting en de normaal op het oppervlakte-element dA .

De luminantie van de Zon is $1,844 \cdot 10^9 \text{ cd m}^{-2}$ (Krochmann, Seidl, 1974).

Lichtemittantie, luminous exitance, specifieke Lichtausstrahlung, exitance lumineuse.

Symbool M_v eenheid lm m^{-2}

De lichtstroom die per oppervlakte-element dA wordt uitgezonden.

Verlichtingssterkte, illuminance (illumination), Beleuchtungsstärke, éclairnement lumineux.

Symbool E_v eenheid lx (lux)

De lichtstroom die van een willekeurige bron door een oppervlakte-element dA wordt opgevangen. Dus $E_v = d\Phi_v/dA$, uitgedrukt in lm m^{-2} . Deze eenheid heeft een eigen naam en symbool gekregen, namelijk lux (lx), waarbij $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm m}^{-2} = 1 \text{ cd sr m}^{-2}$.

De verlichtingssterkte van de Zon aan de rand van de atmosfeer is ongeveer 130 klx .

Lichtexpositie, luminous exposure, Belichtung, exposition lumineuse.

Symbool H_v eenheid lx s

De integraal over een bepaalde tijd (uur, dag, jaar) van de verlichtingssterkte.

Opmerkingen

De bovengenoemde grootheden kunnen afhankelijk zijn van de golflengte of frequentie. We moeten ze dan per eenheid van golflengte $d\lambda$ of eenheid van frequentie dv beschouwen. De naam wordt dan voorafgegaan door het woord "spectrale" of "monochromatische" en de symbolen krijgen een (λ) of (v) toegevoegd.

Bijvoorbeeld voor de radiantie is de spectrale radiantie $L(\lambda)$ de radiantie bij golflengte λ , eigenlijk in het zeer kleine golflengte-interval $\lambda - \Delta\lambda/2$ tot $\lambda + \Delta\lambda/2$. Verder geldt:

$$L = \int_0^{\infty} L(\lambda) d\lambda = \int_0^{\infty} L(v) dv .$$

De spectrale dichtheid van een stralingsgrootte is het quotiënt van deze grootte genomen over een zeer klein golflengte-interval, gedeeld door dat interval, b.v. $dL(\lambda) / d\lambda$.

6.3.3 Zonnestralingsschalen

De in 3.1 genoemde stralingsinstrumenten worden geijkt volgens een internationaal aangenomen standaard. Daarvoor zijn in het verleden verschillende schalen gebruikt. Omdat bij de publikatie van stralingsgegevens wel eens de termen "IPS 1956" of "WRR-schaal" worden genoemd, geven we hieronder een kort overzicht van de zonnestralingsschalen.

In 1905 is de Ångström-schaal vastgesteld, gebaseerd op de werking van de Ångström compensatie pyrheliometer.

In 1913 stelde dr. C.G. Abbott van het Smithsonian Institute in de Verenigde Staten een schaal vast die sindsdien de “Smithsonian Scale” heet. Deze twee schalen zijn gedurende een groot aantal jaren over de hele wereld gebruikt, hoewel men zich realiseerde dat ze niet met elkaar in overeenstemming waren. Bij verschillende vergelijkingen bleken verschillen van 3-6% in de schalen te bestaan.

Met het oog op het Internationale Geofysische Jaar (1958-1959) werd het noodzakelijk geacht een universele schaal voor de hele wereld in te voeren. In 1956 werd internationaal overeenstemming bereikt over een nieuwe schaal, de International Pyrheliometric Scale van 1956 of IPS 1956.

In de jaren zestig werden betere instrumenten ontwikkeld, zoals de Kendall Absolute Cavity Radiometer (zie 3.1), waardoor bleek dat de IPS 1956-schaal niet helemaal correct was. In de jaren zeventig werd een aantal vergelijkingsmetingen verricht, hetgeen resulteerde in een nieuwe schaal, de World Radiometric Reference of WRR genoemd. De WRR is uitgedrukt in SI-eenheden en geeft de absolute waarde van de irradiantie met een nauwkeurigheid beter dan $\pm 0,3\%$. Het effect van de verandering van IPS 1956 naar WRR is dat de meetresultaten verkregen met de IPS-schaal met 2,2% moeten worden verhoogd. De Wereld Meteorologische Organisatie heeft het gebruik van de WRR-schaal vanaf 1 januari 1981 aanbevolen. De stralingsgegevens van Nederland zijn aangepast aan de WRR-schaal. Ook de oudere gegevens werden in 1979 gecorrigeerd.

In de Verenigde Staten ging men in 1977 over op de z.g. “Absolute Schaal” die ongeveer 0,3% lager is dan de WRR-schaal.

De omrekeningsfactoren ten opzichte van de WRR zijn:

Ångström-schaal	x 1,026	=	WRR
Smithsonian schaal	x 0,977	=	WRR
Absolute schaal (USA)	x 1,003	=	WRR
Intern. Pyrhel. Schaal	x 1,022	=	WRR.

In Nederland wordt de WRR gebruikt.

6.4 Symbolenlijst

Bij de genoemde symbolen staat tussen vierkante haken [...] het nummer vermeld van de paragraaf, waar het symbool en het bijbehorende begrip worden geïntroduceerd en besproken. Daarachter staan de (afgeleide) SI-eenheden waarin de grootheid of het begrip wordt aangeduid. Indien hier niets is vermeld, betekent dit dat de grootheid dimensieloos is.

a	volume-absorptiecoëfficiënt	[2.2.5]	m^{-1}
A	oppervlakte	[5.5]	m^2
b	breedte van de Zon	[6.1]	rad
B	directe straling op het horizontale vlak	[1]	Jm^{-2}
B	turbiditeitscoëfficiënt van Schüepp	[2.3.3]	
c	lichtsnelheid	[2.1]	ms^{-1}
d	dagnummer	[5.1.2]	
D	diffuse straling	[1]	Jm^{-2}
e	waterdampdruk	[2.4.1]	Pa
e	tijdvereffening	[6.2.2]	s
E_c	(hemisferische) irradiantie	[2.2.4]	Wm^{-2}
E_Ω	angulaire irradiantie	[5.1.2]	$Wm^{-2}sr^{-1}$
E_v	illuminantie, verlichtingssterkte	[5.5]	lx of $lm\ m^{-2}$
f	fotometrisch stralingsequivalent	[5.5]	$lm\ W^{-1}$
G	globale straling	[1]	Jm^{-2}

G_o	globale straling bij afwezigheid van de atmosfeer	[4.6]	Jm^{-2}
G_{onb}	globale straling bij onbewolkte hemel	[5.1.3]	Jm^{-2}
h	constante van Planck	[2.2.1]	Js^{-1}
H	halve daglengte	[6.2.2]	s
H_e	stralingsexpositie	[5.1.2]	Jm^{-2}
H_v	lichtexpositie	[6.3.2]	lx s
I	directe straling op een vlak loodrecht op de richting van de Zon	[1]	Jm^{-2}
I_e	stralingssterkte, intensiteit	[2.2.5]	$W sr^{-1}$
I_o	directe straling op een vlak loodrecht op de richting naar de Zon buiten de atmosfeer	[5.2.2]	Jm^{-2}
I_v	lichtsterkte, intensiteit	[6.3.2]	cd of $lm sr^{-1}$
k	constante van Boltzmann	[2.2.1]	JK^{-1}
k	massa-absorptiecoëfficiënt	[2.2.5]	$m^2 kg^{-1}$
K	rechte klimming	[6.1]	s
l	dikte van de verticale hoeveelheid ozon	[2.4.1]	m
l	lengte van de Zon	[6.1]	rad
L^+	invalende langgolvlige straling	[2.5]	Jm^{-2}
L_e	radiantie	[6.3.2]	$Wm^{-2} sr^{-1}$
L_v	luminantie	[6.3.2]	cd m^{-2}
m	absolute optische massa	[2.2.6]	$kg m^{-2}$
m_r	relatieve optische massa	[2.2.6]	
M_e	emittantie	[2.2.1]	Wm^{-2}
M_v	lichtemittantie	[6.3.2]	$lm m^{-2}$
M_Ω	angulaire emittantie	[6.3.2]	$Wm^{-2} sr^{-1}$
n	brekingsindex	[2.2.5]	
N	gedeelte van de hemel bedekt met wolken	[2.5]	
N	aantal deeltjes per m^3	[2.2.5]	m^{-3}
p	luchtdruk	[2.2.6]	Pa
Q_e	stralingsenergie	[6.3.2]	J
r_z	straal van de Zon	[5.1.2]	m
R	afstand Aarde-Zon	[5.1.2]	m
R	straal van de Aarde	[2.2.4]	m
s	weglengte	[2.2.5]	m
S	zonneshijnduur	[4.1.2]	s
S_o	maximale zonneshijnduur	[4.1.2]	s
T	absolute temperatuur	[2.2.1]	K
T_L	turbiditeitsfactor van Linke	[2.3.1]	
V_λ	relatieve ooggevoeligheid	[5.5]	
w	hoeveelheid condenseerbaar water	[2.4.1]	m of kgm^{-2}
x	cartesische horizontale coördinaat, afstand	[2.2.5]	m
α	absorptiefactor	[2.2.1]	
α	golflengte exponent bij turbiditeit	[2.3.2]	
α	azimut van een schuin vlak	[5.2.1]	rad
β	volume-verstrooiingscoëfficiënt	[2.2.5]	m^{-1}
β	hellingshoek van een schuin vlak	[5.2.1]	rad
β	turbiditeitscoëfficiënt van Ångström	[2.3.2]	
γ	zonshoogte	[2.2.6]	rad
δ	declinatie	[5.1.2]	rad

Δ	verschilteken	[2.2.1]	
ε	emissiefactor	[2.2.1]	
ε	helling van het eclipticavlak	[6.1]	rad
ζ	zenithoek van de Zon	[2.2.6]	rad
η	$2\pi/360$ of $2\pi/365$ of $2\pi/366$	[5.1.2]	
θ	verstrooiingsrichting van gereflecteerde straling	[2.2.3]	rad
θ	hoek van invallende straling	[5.2.1]	rad
λ	golflengte	[2.1]	m
λ	lengtegraad (W.L.; O.L.)	[6.1]	rad
μ'	volume-extinctiecoëfficiënt	[2.2.5]	m^{-1}
μ''	massa-extinctiecoëfficiënt	[2.2.5]	$m^2 kg^{-1}$
ν	frequentie	[2.1]	s^{-1}
π	3,1415	[2.2.1]	
Π	produktteken	[2.4.1]	
ρ	dichtheid	[2.2.5]	$kg m^{-3}$
ρ	reflectiefactor, albedo	[2.4]	
σ	constante van Stefan-Boltzmann	[2.2.1]	$Wm^{-2} K^{-4}$
σ	massa-verstrooiingscoëfficiënt	[2.2.5]	$m^2 kg^{-1}$
τ	transmissiefactor	[2.4]	
ϕ	breedtegraad (N.B.; Z.B.)	[5.1.2]	rad
Φ_e	stralingsflux, vermogen	[5.5]	W
Φ_v	lichtstroom	[5.5]	lm
ψ	azimut van de Zon	[5.2.1]	rad
ω	uurhoek van de Zon	[5.1.2]	rad of s
Ω	ruimtehoek	[5.1.2]	sr

S U M M A R Y

In this book both physical and statistical aspects of solar radiation in the Netherlands are discussed. Emphasis is put on available data of global, diffuse, direct-beam and long-wave radiation of the climate.

After a brief introductory chapter, the second chapter deals with the properties of solar radiation in the atmosphere at an elementary level. The electromagnetic spectrum is introduced in section 2.1.

Section 2.2 starts with the physical aspects of absorption, emission and scattering of radiation. After that, attention is paid to absorption and scattering in the atmosphere and to the energy budget of the Earth-atmosphere system. Formulas are given for absorption, scattering and extinction and the optical mass is introduced.

Section 2.3 is devoted to the turbidity. Linke's turbidity factor and the turbidity formulas according to Ångström and Schüepp are reviewed.

The concept of transmittance to calculate direct-beam radiation is given in section 2.4. Data for absorption by ozone, water vapour and other gases, as well as Rayleigh scattering and absorption by aerosols are included in this section. A short subsection is devoted to the reflected radiation or the albedo of various surfaces.

In section 2.5 an empirical equation is introduced, estimating the incoming long-wave radiation according to Swinbank. This has been used to calculate the long-wave radiation climate in the Netherlands.

In chapter 3 attention is paid to radiation instruments and to the network for radiation and sunshine measurements in the Netherlands. The pyrheliometer for measuring direct-beam radiation is discussed, with the Ångström and Linke-Feussner pyrheliometers as examples of instruments which require calibration, and the cavity pyrheliometer as an example of a self-calibrating instrument. Measurements of the direct-beam radiation at De Bilt have been made with the Linke-Feussner instrument.

Kipp and Eppley pyranometers used for measuring global radiation in the Netherlands are discussed. A short subsection is devoted to the diffusometer for measuring the diffuse radiation.

Next, the Campbell-Stokes sunshine recorder to measure the duration of sunshine and the new automatic sunshine recorders of Soni and Haenni are briefly described. Sunshine observations with the Campbell-Stokes recorder commenced in 1899 at De Bilt. At present there are 35 stations in the network (Table 3.2 and Figure 3.9).

Global radiation observations commenced in 1957 at De Bilt. Ten years later the network consisted of 5 stations. Now there are 19 stations where global radiation is measured (Table 3.1 and Figure 3.8). Direct radiation has been measured at De Bilt since 1971 and diffuse radiation since 1986. Also, from 1979 to 1981 the global radiation was measured at Cabauw for 12 differently inclined surfaces.

In chapter 4 the results are given of the global radiation measured at seven stations and the direct radiation measured at De Bilt. These results are supplemented with calculated values of direct radiation at four other stations. The diffuse radiation is calculated as the difference between global and direct radiation.

The Tables 4.1, 4.11, 4.12 and 4.15 show the daily means of global, direct, diffuse and incoming long-wave radiation respectively in MJ m⁻² per 10 days, month, season and year. The diurnal cycles per month of the global, direct, diffuse and incoming long-wave radiation are given in the Tables 4.4, 4.13, 4.14 and 4.16 respectively.

Comparison of the long-term records of global radiation and duration of sunshine (Figure 4.1) shows that the forties were, so far, the sunniest decennium of this century. The fifties and sixties were less sunny, then the amount of solar radiation increased in the seventies and decreased again during the last decennium.

Frequency distributions of daily and hourly solar radiation are given for global radiation only (Tables 4.5-4.9). The average longest runs of days with a global radiation sum above various threshold values have been calculated for De Bilt and are presented in Table 4.10.

The results of calculations of incoming long-wave radiation are discussed in section 4.3. They are compared with the results of two short series of measurements. It appears that the calculations did not reproduce the measured diurnal cycle very well.

In section 4.4 the results of observations on the duration of sunshine are presented. The data are given in Tables 4.17 and 4.18.

Special measurements to investigate the small-scale space variability of global radiation are described in section 4.5. It appeared that due to air pollution in the industrialised Rijnmond area the amount of global radiation in the city of Rotterdam and leewards of the industrial area is less than upwind of the industrial area; the differences are 11 per cent in the summer and 19 per cent in winter. At a small-scale line of stations perpendicular to the North Sea coast measurements have been made to investigate coastal effects on solar radiation. They show that the global radiation decreases about 3 per cent over a 10 km distance inland.

Section 4.6 gives some examples of global, direct and diffuse radiation during different weather types: 23 May 1989, a clear day with low turbidity; 20 May 1989, a clear day with high turbidity; 10 March 1989, a day which is initially sunny, becoming alternating cloudy and ending totally cloudy; 6 March 1989, a sunny day with Cirrus clouds and condensation trails; 21 March 1989, a day with highly variable cloudiness.

Chapter 5 presents models for estimating solar radiation on horizontal and inclined surfaces. The contents are based partly on the results of a study by Task Group IX "Solar radiation and pyranometry studies" of the International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme to evaluate the performance of numerical models estimating horizontal and inclined surface solar radiation.

In section 5.1 formulas are given to calculate the solar radiation at the top of the atmosphere (the extraterrestrial radiation), taking into account the variable Sun-Earth distance. For the latter the equations of Spencer, Duffie and Beckman, and Dogniaux are introduced.

The models for calculating the solar radiation on the horizontal surface are classified in the following categories: cloud layer models, total cloud-based models, sunshine-regression models and Liu and Jordan-type models. Since the last two categories are mostly used, various examples are given. The Liu and Jordan-type model, fitted to Netherlands' circumstances by De Jong (1980), has been used to calculate the direct-beam radiation of which the results are given in chapter 4.

Models for estimating solar irradiance on inclined surfaces are treated in section 5.2. The radiation on any oriented surface is expressed in the irradiance on the horizontal surface and divided in its direct and diffuse component. The models are grouped in categories applicable

to various time scales. Successively the following categories are presented:

- the direct irradiance model for an hour or less;
- direct irradiance models for a day or longer, according to the algorithms developed by Revfeim and Page;
- diffuse irradiance models for an hour or less, with the isotropic model and the algorithms according to Hay, Gueymard and Perez as examples;
- sky diffuse irradiance algorithms applicable to time integrals of a day or longer.

According to the results of the IEA study and a separate test by Van den Brink (1987), the algorithm according to Perez is recommended to be used in the Netherlands to calculate diffuse radiation on inclined surfaces.

Section 5.3 gives the results of two years measurements of global radiation for 11 differently inclined surfaces at Cabauw. The data are given in Table 5.2 for 24 days distributed across the year, and are displayed in Figure 5.5 for every month.

Since no measurements of the spectral distribution of global radiation have been made in the Netherlands, an algorithm developed by Slob (1985) has been used to adapt spectral data collected in Ukkel (Belgium) to Netherlands' circumstances. The results are given in Table 5.5 for eight spectral bands between 300 and 1000 nm.

Chapter 5 concludes with section 5.5 on photometry, the luminous efficiency of the human eye and the conversion of radiation quantities in photometric quantities.

Various appendices have been combined in chapter 6. The first appendix, section 6.1, treats the different coordinate systems for the position of the Sun in the sky, and gives conversion formulas as well as equations for the calculation of the Sun's declination, elevation and azimuth.

Local mean, national and standard times are introduced in appendix 6.2, with an emphasis on the history in the Netherlands. Also expressions for the equation of time and the length of the day are given.

The third appendix, section 6.3, is devoted to radiometric and photometric units and their definitions, and to the various radiometric scales that are or have been in use.

With a list of symbols as the fourth appendix (section 6.4) chapter 6 is completed.

L I T E R A T U U R

1. Inleiding

Een elementair boek over de toepassing van zonneënergie is het Zonwerkboek van McCartney (1982), dat voor Nederland is bewerkt door E. Sjoerdsma. De meteorologische en technische aspecten van zonneënergie worden behandeld in een tweedelige publikatie van de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO, 1981). In het eerste deel wordt o.a. aandacht geschonken aan de prestaties van een zonneënergiesysteem, terwijl het tweede deel kaarten van de hele Aarde bevat waaruit de globale straling per maand kan worden afgelezen.

Voor meer recente informatie over technisch en wetenschappelijk onderzoek op het gebied van zonneënergie wordt de lezer aangeraden zich te wenden tot de Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu B.V. NOVEM, Utrecht. Voor allerhande informatie over zonneënergiesystemen, leveranciers en dergelijke kan men terecht bij de branchevereniging Holland Solar, Utrecht. Verder is een nuttig adres de Nederlandse afdeling van de International Solar Energy Society, ISES Nederland.

- Boer, H.J. de (1959). Normalen van de dekadesommen van de globale straling gemeten te De Bilt volgens de Internationale Pyrheliometerschaal 1956. KNMI-verslagen **V-47**, De Bilt.
- Braak, C. (1937). Het klimaat van Nederland. F Zonneschijn en Bewolking. KNMI Meded. en Verhand. **40**, Rijksuitgeverij, 's-Gravenhage.
- Fröhlich, C. (1988). Variability of the solar "constant". In: H. Wanner and U. Siegenthaler (eds) Long and short term variability of climate. Lecture notes in Earth Sciences **16**, Springer-Verlag, Berlin, pp. 6-17.
- Fröhlich, C. and London, J. (edit.) (1986). Revised instruction manual on radiation instruments and measurements. WCRP Publ. Series No. 7. WMO Technical Document **149**, World Meteorological Organization, Genève.
- KNMI (1972). Klimaatatlas van Nederland. Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage.
- Levert, C. (1957). Seizoennormalen 1911-1950 van de procentuele zonneschijnduur (2e verb. druk, uitg. 1951). KNMI-Verslagen **V-20**, De Bilt.
- McCartney, K. (1982). Zonwerkboek. Voor Nederland bewerkt door E. Sjoerdsma. Ekologische uitgeverij, Amsterdam, 352 pp.
- Palz, W. (edit.) (1984). European Solar Radiation Atlas Vol. 1 and 2. Comm. of the Europ. Communities, Brussel; Verlag TÜV Rheinland GmbH, Keulen.
- WMO (1981). Meteorological aspects of the utilization of solar radiation as an energy source. Technical Note **172** + Annex, WMO publication no 557, WMO, Genève, 298 pp.

2. Straling in de atmosfeer

Het klassieke handboek over straling in de atmosfeer is dat van Kondratyev (1969). Een ander standaardwerk is het boek van Robinson (1966). Straling in al haar vormen van ioniserende tot infrarode straling wordt behandeld in Schulze (1970), waarbij het hoofdzakelijk gaat om de invloed op de biosfeer. Een goed studieboek, dat in de meteorologie nog veel wordt gebruikt, is dat van Paltridge and Platt (1976). Moderne, op de praktijk toegepaste, boeken zijn die van Liou (1980) en van Iqbal (1983).

Verder vallen nog te noemen een uitgave van de Wereld Meteorologische Organisatie (Fröhlich and London, 1986) en van het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (Dogniaux, 1982), waarin in kort bestek de meeste aspecten van de straling worden behandeld.

De tot nu toe enige publikaties in de Nederlandse taal zijn een collegedictaat van Wisse (1977) en het eerste deel van de serie van Minnaert (1968) over de natuurkunde van het vrije veld.

- Agnihotri, O.P. and Gupta, B.K. (1981). Solar selective surfaces. John Wiley & Sons, New York.
- Ångström, A. (1929). On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. *Geografiska Annaler* **11**, 156-166.
- Ångström, A. (1930). On the atmospheric transmission of sun radiation II. *Geografiska Annaler* **12**, 130-159.
- Arnfield, A.J. (1979). Evaluation of empirical expressions for the estimation of hourly and daily totals of atmospheric longwave emission under all sky conditions. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **105**, 1041-1052.
- Atwater, M.A. and Ball, J.T. (1976). Comparison of radiation computations using observed and estimated precipitable water. *J. Appl. Meteorol.* **15**, 1319-1320.
- Bemporad, A. (1907). Versuch einer neuen empirischen Formel zur Darstellung der Änderung der Intensität der Sonnenstrahlung mit der Zenitdistanz. *Meteor. Zeitschr.* **24**, 306-313.
- Davies, J.A., Schertzer, W. and Nunez, M. (1975). Estimating global solar radiation. *Boundary-Layer Meteor.* **9**, 33-52.
- Dogniaux, R. (1982). Les rayonnements solaire, atmosphérique et terrestre. *Documentation Météorologique. Inst. Royal Météor. de Belgique, Bruxelles*, 78 pp.
- Frantzen, A.J. (1977). The turbidity at De Bilt in the Netherlands. *Arch. Met. Geoph. Biokl.* **B24**, 307-320.
- Fröhlich, C. and London, J. (edit.) (1986). Revised instruction manual on radiation instruments and measurements. WCRP Publ. Series No. 7. WMO Technical Document **149**, World Meteorological Organization, Genève.
- Holtslag, A.A.M. and Van Ulden, A.P. (1983). A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data. *J. of Climate and Applied Meteor.* **22**, 517-529.
- Iqbal, M. (1983). An introduction to solar radiation. Academic Press, London, 390 pp.
- Josefsson, W. (1986). Niet gepubliceerd. Gerefereerd in: Davies, J.A., McKay, D.C., Luciani, M. and Abdel-Wahab, M. (1988). Validation of models for estimating solar radiation on horizontal surfaces. International Energy Agency, Atmospheric Environment Service, Downsview, Canada.
- Kasten, F. (1966). A new table and approximation formula for the relative optical

- air mass. Arch. Met. Geoph. Biokl. **B14**, 206-223.
- Kondratyev, K. Ya. (1969). Radiation in the atmosphere. International Geophysics Series **12**. Academic Press, London, 912 pp.
 - Lacis A.A. and Hansen, J.E. (1974). A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. J. Atmos. Sci. **31**, 118-133.
 - Leckner, B. (1978). The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface - elements of a model. Solar Energy **20**, 143-150.
 - Linke, F. (1922). Transmissions-Koeffizient und Trübungsfaktor. Beitr. zur Physik der freien Atmos. **10**, 91-103.
 - Liou, K.-N. (1980). An introduction to atmospheric radiation. International Geophysics Series **26**. Academic Press, London, 392 pp.
 - Minnaert, M. (1968). De natuurkunde van 't vrije veld I. Licht en kleur in het landschap, 5e druk W.J. Thieme & Cie, Zutphen, 408 blz.
 - Paltridge, G.W. and Platt, C.M.R. (1976). Radiative processes in meteorology and climatology. Developments in Atmos. Sci. **5**. Elsevier Scient. Publ. Comp., Amsterdam, 318 pp.
 - Robinson, N. (1966). Solar radiation. Elsevier Publ. Comp., Amsterdam, 347 pp.
 - Schüepp, W. (1949). Die Bestimmung der Komponenten der atmosphärischen Trübung aus Aktinometermessungen. Arch. Met. Geoph. Biokl. **B1**, 257-346.
 - Schulze, R. (1970). Strahlenklima der Erde. Wissenschaft. Forschungsberichte **72**. Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, Darmstadt, 217 pp.
 - Slob, W.H. (1982). Climatological values of solar irradiation on the horizontal and several inclined surfaces at De Bilt. KNMI - Scientific Report W.R. 82-7, De Bilt.
 - Swinbank, W.C. (1963). Long-wave radiation from clear skies. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. **89**, 339-348.
 - Volz, F. (1956). Optik der Tropfen, Abschnitt I: Optik des Dunstes. Kapitel 14, Physik der Atmosphäre, Band VIII Handbuch der Geophysik. Gebrüder Borntraeger, Berlin.
 - Wartena, L., Palland, C.L. and Vossen, G.H. van der (1973). Checking of some formulae for the calculation of long wave radiation from clear skies. Arch. Met. Geoph. Biokl. **B21**, 335-348.
 - Wisse, J.A. (1977). Warmteoverdracht door straling in de atmosfeer. Vereniging voor Studie- en Studentenbelangen, Delft, 86 blz.

3. Hoe wordt de straling gemeten en waar?

Informatie over de verschillende soorten stralingsmeters is te vinden in het studieboek van Coulson (1975) en in twee publikaties van de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO, 1981; Fröhlich and London, 1986). Ook in boeken over meteorologische instrumenten worden hoofdstukken aan stralingsmeters gewijd, zoals in Fritschen and Gay (1979). In de standaardwerken van het Britse Meteorologische Bureau (Anonymus, 1980) en de WMO (1983) wordt daarnaast ook nog uitgebreid ingegaan op de opstellingseisen en nauwkeurigheid van stralingsmeters.

De proceedings van een symposium over pyranometrie (Wardle and McKay, 1986) en een rapport van de Technisch Fysische Dienst - TNO (Van den Brink et al, 1985) zijn uitsluitend gericht op de ontwikkelingen en foutenbronnen in globale-stralingsmeters. De publikatie van Josefsson en Westerberg (1980) is een catalogus van alle stations in de wereld waar straling en zonneshijn zijn of worden gemeten. In Van den Brink en Kratz (1988) wordt een overzicht gegeven van meetinstrumenten en in Nederland beschikbare stralingsgegevens.

- Anonymus (1980). Handbook of meteorological instruments, 2nd edition. Volume 6. Measurement of sunshine and solar and terrestrial radiation. Publication Met. O 919 f. Meteorological Office, Bracknell. Her Majesty's Station Office, London.
- Brink, G.J. van den, Kratz, P. and Wely, L.F. van (1985). Indoor characterization and calibration and outdoor calibration of seven IEA-pyranometers in the framework of IEA Task IX-c. Rapport no. 327.226-2. Technisch Physische Dienst TNO-TH, Delft.
- Brink, G.J. van den en Kratz, P. (1988). Publicatie "Overzicht zonnestraling". Rapport no. 714.016. Technisch Physische Dienst TNO-TH, Delft.
- Coulson, K.L. (1975). Solar and terrestrial radiation. Academic Press, London. 322 pp.
- Dehne, K. (1980). Vorschlag zur standardisierten Reduktion der Daten verschiedener nationalen Himmelsstrahlungs-Messnetze. Annalen der Meteor. (Neue Folge) **16**, 57.
- Dehne, K. (1989). Preliminary results of the WMO automatic sunshine duration measurement comparison 1988/89 in Hamburg. In: Papers presented at the fourth WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation, Brussels 4-8 September 1989. Instr. and Observ. methods Report **35**, WMO Technical Document **303**, WMO Genève, 27-32.
- Fritschen, L.J. and Gay, L.W. (1979). Environmental instrumentation. Chapter 5 Radiation. Springer-Verlag, Heidelberg, 93-118.
- Fröhlich, C. and London, J. (edit.) (1986). Revised instruction manual on radiation instruments and measurements. WCRP Publ. Series No. 7. WMO Technical Document **149**, WMO, Genève.
- Josefsson, W. and Westerberg, M.-L. (1980). Solar radiation data source catalogue. Swedish Council for Building Research. Stockholm. Svensk Byggtjänst, Stockholm, 149 pp.
- Slob, W.H. en Monna, W.A.A. (1991). Bepaling van directe en diffuse straling en van zonneshijnduur uit 10-minuutwaarden van de globale straling. KNMI Technische Rapporten **T.R.-136**, De Bilt.
- Wardle, D.I. and McKay, D.C. (edit.) (1986). Recent advances in pyranometry. Symposium proceedings Norrköping January 1984. Atmos. Environ. Service, Downsview, Canada, 386 pp.
- WMO (1981). Meteorological aspects of the utilization of solar radiation as an energy source. Technical Note **172** + Annex, WMO publication no. 557, WMO, Genève, 298 pp.
- WMO (1983). Guide to meteorological instruments and methods of observation. Chapter 9 Measurement of radiation, WMO publication no. **8**. Fifth edition. WMO, Genève.

4. Resultaten op het horizontale vlak

In de tekst is al verwezen naar een aantal publikaties met meetresultaten van de straling en zonneshijn in Nederland. De Jong (1973) heeft veel informatie over globale straling in verschillende delen van de wereld verzameld en gepubliceerd in de vorm van kaarten.

De publikatie van Thijs (1979) is gericht op bouwkundigen die naast de straling ook gegevens van de temperatuur, vochtigheid, enthalpie en windsnelheid nodig hebben. In bewerkte vorm komen deze gegevens eveneens voor bij het z.g. referentiejaar, een jaarbestand van klimaatgegevens bedoeld als invoer voor (computer-)berekeningen van het jaarlijks energiegebruik van gebouwen. Voorbeelden zijn het verkort referentiejaar voor buiten-

condities (ISSO, 1986), waarin een standaardjaar is samengevat in 56 dagen en het test-referentiejaar dat onder auspiciën van de Europese Gemeenschap is ontwikkeld (Lund, 1985). Een bezwaar van het gebruik van referentiejaar is, dat ze slechts voorspellende waarde hebben voor gemiddelde omstandigheden en dat de geselecteerde dagen soms niet natuurlijk op elkaar aansluiten.

In de publikatie van de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO, 1981) wordt aandacht geschonken aan de interpolatie van stralingsgegevens tussen verschillende meetstations en aan irradiatieverschillen op kleine schaal. Frantzen (1975) heeft een artikel gewijd aan de extinctie van de directe straling door stof van een industrie.

- Arnfield, A.J. (1979). Evaluation of empirical expressions for the estimation of hourly and daily totals of atmospheric longwave emission under all sky conditions. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **105**, 1041-1052.
- Berlage, H.P. (1962). Eerste aanwijzingen omtrent kunstmatige versluieringen, verkregen uit metingen van de totale straling op het horizontale vlak op 7 posten in en rondom Rotterdam, bij wolkenloze hemel en nagenoeg wolkenloze hemel van november 1959 tot en met juli 1960. KNMI-Verslagen **V-107**, De Bilt.
- Boer, H.J. de (1966). Attenuation of solar radiation due to air pollution in Rotterdam and its surroundings. KNMI Wetenschappelijk Rapport W.R. 66-1, De Bilt.
- Dienst Milieu Hygiëne Zaanstad (1977). Onderzoek met behulp van solarimeters naar de hoeveelheid onderschept zonlicht in de IJmond. Dienst Milieu Hygiëne Zaanstad, Zaandam.
- Frantzen, A.J. (1975). Interception of direct solar radiation by the expected dust emission of a planned iron and steel plant. *Arch. Met. Geoph. Biokl.* **B23**, 157-162.
- Frantzen, A.J. en Raaff, W.R. (1978). De globale straling in het Rijnmondgebied. KNMI Wetenschappelijk Rapport W.R. 78-14, De Bilt.
- ISSO (1986). Verkort referentiejaar voor buitencondities. Publikatie **12** (herziene uitgave). Stichting ISSO, Rotterdam.
- Jong, B. de (1973). Net radiation received by a horizontal surface at the Earth. University Press, Delft.
- Jong, J.B.R.M. de (1980). Een karakterisering van de zonnestraling in Nederland. Deel I: Tekst, Deel II: Bijlagen. Afstudeerverslag. Rapportnr. WPS-3-80.05.R306, Vakgroep Warmte- en Stromingstechniek, Afdeling Werktuigbouwkunde, Techn. Univ. Eindhoven.
- KNMI (1982). Klimatologische gegevens van Nederlandse stations, No. 10 Normalen en standaardafwijkingen voor het tijdvak 1951-1980. KNMI-Publikatienummer **150-10**, De Bilt.
- KNMI (1984). Klimatologische gegevens van Nederlandse stations, No. 11 Frequentietabellen en reeksen van dagen volgens bepaalde criteria. KNMI-Publikatienummer **150-11**, De Bilt.
- KNMI (1986a). Klimatologische gegevens van Nederlandse stations, No. 150-19 Frequentietabellen van uurwaarden van de duur van de zonneshijn per maand voor het tijdvak 1956-1980. KNMI-Publikatienummer **150-19**, De Bilt (microfiche).
- KNMI (1986b). Klimatologische gegevens van Nederlandse stations, No. 150-20 Frequentietabellen van uursommen van de globale straling in windsnelheids- en temperatuurklassen per maand en per jaar voor het tijdvak 1961-1980. KNMI-Publikatienummer **150-20**, De Bilt (microfiche).

- Landsberg, H.E. (1981). The urban climate. Internat. Geophysics Series **28**. Academic Press, London, 53-59.
- Lund, H. (1985). Test reference years TRY, Weather data sets for computer simulations of solar energy systems and energy consumption in buildings. Publication EUR no 9765. Commission of the European Communities, Directorate General XII for Science, Research and Development.
- Slob, W.H. (1989). Klimaat-onderzoek Westland ten behoeve van kustuitbreiding. KNMI-publikatie nr. **175**, De Bilt.
- Slob, W.H. en Monna, W.A.A. (1991). Bepaling van directe en diffuse straling en van zonneshijnduur uit 10-minuutwaarden van de globale straling. KNMI Technische Rapporten **T.R.-136**, De Bilt.
- Swinbank, W.C. (1963). Long-wave radiation from clear skies. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. **89**, 339-348.
- Thijs, R.V.L.M. (1979). Klimaatgegevens voor bouwkundigen. Vakgroep FAGO, Afdeling der bouwkunde, Techn. Univ., Eindhoven.
- WMO (1981). Meteorological aspects of the utilization of solar radiation as an energy source. Technical Note **172** + Annex, WMO publication no. 557. WMO. Genève, 298 pp.

5. Modellen, schuine vlakken en spectra

Modellen voor de berekening van straling op horizontale en schuine vlakken worden besproken in WMO (1981) en Dahlgren (1985). Een belangrijk boek over berekeningsmethoden voor de straling op schuine vlakken is dat van Page (1986). Ook Van den Brink (1982) bespreekt een aantal modellen voor de berekening van straling en past die toe op de werking van een zonneboiler. Lenger (1976, 1977) behandelt naast de straling op platte vlakken ook de berekening van straling op cilinder- en bolvormige lichamen.

Twee rapporten van de Technisch Fysische Dienst TNO zijn gewijd aan de metingen van de globale straling op twaalf verschillend georiënteerde vlakken in Cabauw (Slob et al, 1980, Van den Brink, 1982). Van den Brink en Schoonewille (1987) hebben met het aanbevolen model van Perez berekeningen gemaakt van de zonnestraling op verschillend georiënteerde vlakken in Nederland. Voor de berekening van de maximale koellast van gebouwen bestaat een publikatie van de ISSO (1976) waarin gegevens van de irradiantie op het horizontale vlak en acht verticale vlakken bij helder weer en minimale turbiditeit zijn gegeven. Voor bouwkundigen, die naast gegevens ook inzicht willen verkrijgen in het klimaat van een stad, is het boek van Oke (1987) zeer geschikt.

Meetresultaten van de spectrale verdeling van de globale straling in België worden besproken in IRM (1981) en in Burtin et al (1981). Bird and Hulstrom (1981) geven resultaten uit de Verenigde Staten.

Een interessant verschijnsel, dat in dit boek niet ter sprake komt, is de polarisatie van licht. Hiervoor wordt de lezer verwezen naar Können (1985) en Minnaert (1968).

- Ångström, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. Quart. J. Roy. Met. Soc. **50**, 121-125.
- Ångström, A. (1925). On radiation and climate. Geografiska Annaler, **7**, 122-142.
- Ångström, A. (1956). On the computation of global radiation from records of sunshine. Arkiv. f. Geofysik, **2**, 471-479.
- The Astronomical Ephemeris for the year 19..., Her Majesty's Stationery Office, London.
- Bird, R.E. and Hulstrom, R.L. (1981). Solar spectral measurements and modeling.

- T.R.-642-1013. Solar Energy Research Institute, Golden Co, Verenigde Staten.
- Boer, H.J. de (1961). A calculation of global radiation in the Netherlands with the aid of the relative duration of sunshine. *Arch. Met. Geoph. Biokl.* **B10**, 537-546.
 - Brink, G.J. van den (1982). Climatology of solar irradiance on inclined surfaces IV, Part II: Validation of calculation models. Rapport No. 803.229 IV-2. Technisch Physische Dienst TNO-TH, Delft.
 - Brink, G.J. van den (1987). Validation of solar radiation models and recommendation of the model for Dutch climatological circumstances, Rapport No. 314.226-3 and 514.015, Technisch Physische Dienst TNO-TH, Delft.
 - Brink, G.J. van den, Kratz, P. and Wely, L.F. van (1985). Indoor characterization and calibration and outdoor calibration of seven IEA-pyranometers in the framework of IEA Task IX-c. Rapport No. 327.226-2. Technisch Physische Dienst TNO-TH, Delft.
 - Brink, G.J. van den en Schoonewille, H. (1987). Zonnestralsingsgegevens voor Nederland per week, maand en jaar, voor verschillend georiënteerde vlakken berekend met het Perez-omrekeningsmodel. Rapport No. 2700, Technisch Physische Dienst TNO-TH, Delft.
 - Burtin, B., Carels, R., Crommelynck, D. and Dogniaux, R. (1981). Contribution to the study of spectral distribution of the global radiation in Uccle: Technological development and continuous records. Final Report including three annexes 1st April 1980 - 31st March 1981. Contract ESF-003-B-(G)CEC. Institut Royal Météorologique de Belgique, Bruxelles.
 - CIE (1973). Standardization of luminance distribution on clear skies. CIE Publ. No. 22, Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, Genève.
 - Collier, L.R. and Lockwood, J.G. (1974). The estimation of solar radiation under cloudless skies with atmospheric dust. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **100**, 678-681.
 - Coulson, K.L. (1975). *Solar and terrestrial radiation*. Academic Press, London, 322 pp.
 - Dahlgren, L. (edit.) (1985). *Handbook of methods of estimating solar radiation*. Swedish Council for Building Research, Stockholm. Svensk Byggtjänst, Stockholm, 109 pp.
 - Dave, J.V. (1977). Validity of the isotropic-distribution approximation in solar energy estimations. *Solar Energy* **19**, 331-333.
 - Davies, J.A., Schertzer, W. and Nunez, M. (1975). Estimating global solar radiation. *Boundary-Layer Meteor.* **9**, 33-52.
 - Davies, J.A. and Hay, J.E. (1980). Calculation of the solar radiation incident on a horizontal surface. In: Won, T. and Hay, J.E. (edit.), *Proc. First Canadian Solar Radiation Workshop*, 32-38.
 - Davies, J.A. and McKay, D.C. (1982). Estimating solar irradiance and components. *Solar Energy* **29**, 55-64.
 - Davies, J.A., Abdel-Wahab, M. and McKay, D.C. (1984). Estimating solar irradiation on horizontal surfaces. *Int. J. Solar Energy* **2**, 405-424.
 - Davies, J.A., McKay, D.C., Abdel-Wahab, M. and Luciani, G. (1988). Validation of models for estimating solar radiation on horizontal surfaces. Final Report, IEA Task IX. Atmospheric Environment Service, Downsview, Canada, 99 pp.
 - Davies, J.A. and McKay, D.C. (1989). Evaluation of selected models for estimating solar radiation on horizontal surfaces. *Solar Energy* **43**, 153-168.
 - Dogniaux, R. (1977). Computer procedure for accurate calculation of radiation data related to solar energy utilization. In: *Solar energy, Proceedings of the*

- UNESCO/WMO Symposium. Geneva, 30 August - 3 September 1976. WMO-Publication **477**, WMO, Genève, 191-197.
- Dogniaux, R. et Lemoine, M. (1976). Programme de calcul des éclairagements solaires énergétiques et lumineux de surfaces orientées et inclinées. *Miscellanea Serie C - No 14*. Institut Royal Météorologique de Belgique, Bruxelles.
 - Dogniaux, R. et Lemoine, M. (1978). Corrélations entre les expositions énergétiques du rayonnement solaire et l'ensoleillement à Uccle. *Miscellanea Serie B - No. 49*. Institut Royal Météorologique de Belgique, Bruxelles.
 - Drummond, A.J. (1958). Notes on the measurement of natural illumination II Daylight and skylight at Pretoria; the luminous efficiency of daylight. *Arch. Met. Geoph. Biokl.* **9**, 149-163.
 - Duffie, J.A. and Beckman, W.A. (1980). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons. New York.
 - Erbs, D.G. (1980). Methods for estimating the diffuse fraction of hourly, daily and monthly average global solar radiation. Master's thesis, Univ. of Wisconsin, Madison.
 - Erbs, D.G., Klein, S.A. and Duffie, J.A. (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation. *Solar Energy* **28**, 293-302.
 - Frantzen, A.J. en Raaff, W.R. (1982). De relatie tussen de globale straling en de relatieve zonnenschijnduur in Nederland. KNMI Wetenschappelijk Rapport W.R. 82-5, De Bilt.
 - Glover, J. and McCulloch, J.S.G. (1958). The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **84**, 172-175.
 - Gueymard, C. (1987). An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms. *Solar Energy* **38**, 367-386.
 - Hay, J.E. (1979). A study of shortwave radiation on non-horizontal surfaces. Final Report Contract Serial Number OSB78 00053. Atmospheric Environment Service, Downsview, Canada, 140 pp.
 - Hay, J.E. and Davies, J.A. (1980). Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface. In: Hay, J.E. and Won, T.K. (edit.), *Proc. First Canadian Solar Radiation Data Workshop*. Atmospheric Environment Service, Downsview, Canada, 59-72.
 - Hay, J.E. and McKay, D.C. (1988). Calculation of solar irradiances for inclined surfaces: verification of models which use hourly and daily data. Draft Final Report, IEA Task IX. Atmospheric Environment Service, Downsview, Canada.
 - Hinzpeter, H. (1959). Vergleichende Prüfung von Formeln zur Berechnung von Globalstrahlungsummen. *Arch. Met. Geoph. Biokl.* **B9**, 60-72.
 - IRM (1981). Distribution spectrale du rayonnement solaire à Uccle.
1er semestre 1980 *Miscellanea Serie B-No. 52*
2ème semestre 1980 *Miscellanea Serie B-No. 53*
Institut Royal Météorologique de Belgique, Bruxelles.
 - ISSO (1976). Zonstralingstabellen. Publicatie **3** Stichting Instituut voor Studie en Stimulering van Onderzoek op het gebied van verwarming en luchtbehandeling; Den Haag, 49 pp.
 - Jones, R.E. (1980). Effects of overhang shading of windows having arbitrary azimuth. *Solar Energy* **24**, 305-312.
 - Jong, B. de (1973). *Net radiation received by a horizontal surface at the Earth*. University Press, Delft, 49 pp.

- Jong, J.B.R.M. de (1980). Een karakterisering van de zonnestraling in Nederland. Deel I Tekst, Deel II: Bijlagen. Afstudeerverslag. Rapportnr. WPS-3-80.05.R306, Vakgroep Warmte- en Stromingstechniek, Afdeling Werktuigbouwkunde, Techn. Univ. Eindhoven.
- Joseffson, W. (1986). Niet gepubliceerd, gerefereerd in Davies, J.A., McKay, D.C., Abdel-Wahab, M. and Luciani, G. (1988).
- Kasten, F. (1983). Parametrisierung der Globalstrahlung durch Bedeckungsgrad und Trübungsfaktor. *Annalen der Meteor.* **20**, 49-50.
- Kasten, F. and Czeplak, G. (1980). Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy* **24**, 177-189.
- Klein, S.A. and Duffie, J.A. (1978). Estimation of monthly average diffuse radiation. In: *Proceed. Annual Meeting American Section of Internat. Solar Energy Soc.*, Denver, Colorado.
- Können, G.P. (1985). *Polarized light in nature*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Lenger, A. (1976, 1977). De berekening van de ingestraalde zonne-energie. *Polytechn. Tijdschr. Elektrotechniek/Elektronica* **31**, 610-615; **32**, 578-588; 633-636.
- Liu, B.Y.H. and Jordan, R.C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy* **4**, 1-19.
- Liu, B.Y.H. and Jordan, R.C. (1963). A rational procedure for predicting the long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors. *Solar Energy* **7**, 53-74.
- Lumb, F.E. (1964). The influence of cloud on hourly amounts of total solar radiation at the sea surface. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **90**, 43-56.
- Lund, H. (1985). Test reference years TRY, Weather data sets for computer simulations of solar energy systems and energy consumption in buildings. Publication EUR no 9765. Commission of the European Communities, Directorate General XII for Science, Research and Development.
- Matzke, H. (1933). Beiträge zur Kenntnis der Globalstrahlung in Greifswald. *Abh. Meteor. Hydr. Duitland* **16**.
- Minnaert, M. (1968). *De natuurkunde van 't vrije veld I. Licht en kleur in het landschap*, 5e druk W.J. Thieme & Cie, Zutphen, 408 blz.
- Oke, T.R. (1987). *Boundary layer climates*. 2nd edition. Methuen, London, 435 pp.
- Orgill, J.F. and Hollands, K.G.T. (1977). Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy* **19**, 357-359.
- Page, J.K. (1961). The estimation of monthly mean values of daily total short-wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S. In: *Proceed. UN Conference on New Sources of Energy, Rome, Vol. 4*, 378-389.
- Page, J.K. (1964). The estimation of monthly values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S. *Solar Energy* **4**, 368-382.
- Page, J.K. (edit.) (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, 459 pp.
- Palz, W. (edit.) (1984). *European solar radiation atlas Vol. 1 and 2*. Commission of the European Communities, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Keulen.
- Penman, H.L. (1948). *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*.

- Proc. Royal Soc. London, A **193**, 120-145.
- Perez, R.R., Scott, J.T. and Stewart, R. (1983). An anisotropic model for diffuse radiation incident on slopes of different orientations, and possible applications to CPCs. In: Proceed. of Amer. Solar Energy Society, Minneapolis, Minnesota, 883-888.
 - Perez, R., Stewart, R., Arbogast, C., Seals, R. and Scott, J. (1986). An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: description, performance validation, site dependency evaluation. *Solar Energy* **36**, 481-497.
 - Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R. and Menicucci, D. (1987). A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy* **39**, 221-231.
 - Perrin de Brichambaut, C. (1976). Estimation des ressources énergétiques solaires a partir de la durée d'ensoleillement. Bulletin d'information **31**, Direction de la Météorologie Paris.
 - Petersen, E. (1982). Solstråling og dagslys - målt og beregnet. Rapport Nr. 34. Lysteknisk Laboratorium, Lyngby, Denemarken, 224 pp.
 - Prescott, J.A. (1940). Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Trans. Roy. Soc. of South Austr.* **64**, 114-118.
 - Reesinck, J.J.M. (1940). Het verband tussen zonneshijnduur, bewolking en stralingsintensiteit in Nederland. Mededelingen Landbouwhogeschool Wageningen **44**, Verh. 5.
 - Revfeim, K.J.A. (1978). A simple procedure for estimating global daily radiation on any surface. *J. Appl. Meteor.* **17**, 1126-1131.
 - Revfeim, K.J.A. (1982). Simplified relationships for estimating solar radiation incident on any flat surface. *Solar Energy* **28**, 509-517.
 - Rietveld, M.R. (1978). A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. *Agric. Meteor.* **19**, 243-252.
 - Slob, W.H. (1985). Modellering van de dagsommen van de globale straling in een aantal spectrale banden met behulp van in Ukkel uitgevoerde metingen. KNMI Technische Rapporten **T.R.-65**, De Bilt.
 - Slob, W.H., Brethouwer, D.E. and Ouden, C. den (1980). Climatology of solar irradiance on inclined surfaces - I. Rapport No. 803-229. Technisch Physische Dienst TNO-TH. Delft.
 - Spencer, J.W. (1971). Fourier series representation of the position of the Sun. *Search* **2**, 172.
 - Vries, D.A. de (1955). Solar radiation at Wageningen. Mededelingen Landbouwhogeschool Wageningen **55**, 277-304.
 - WMO (1981). Meteorological aspects of the utilization of solar radiation as an energy source. Technical Note **172** + Annex, WMO publication no. 557, WMO, Genève. 298 pp.

6. Appendices

Een goede en duidelijke inleiding over coördinatenstelsels en tijdrekening met tabellen en formules is te vinden in de Sterrengids die ieder jaar door de Stichting "De Koepel" wordt uitgegeven. Ook in de bij hoofdstuk 2 genoemde standaardwerken over straling (Robinson, 1966; Paltridge and Platt, 1976; Iqbal, 1983) zijn hoofdstukken gewijd aan de berekening van de plaats van de Zon aan de hemel. Zeer nauwkeurige berekeningen zijn te maken met behulp van nautische jaarboeken e.d., zoals *The Nautical Almanac* (19..), *Nautisches Jahrbuch* (19..) en de *Astronomical Ephemeris* (19..). Sonntag (1989) heeft een gehele publikatie gewijd aan

formules voor de berekening van zonscoördinaten; voor zonneënergieberekeningen is dit boek echter te gedetailleerd. Verder wijzen we nog op een KNMI-verslag van De Bruin (1977), waarin een computerprogramma wordt gegeven voor de berekening van de inkomende straling en een populaire uiteenzetting van Den Heijer (1987) over de verschillende soorten tijdsaanduiding en de daglengte. Een beschrijving van zonnewijzers kan worden gevonden in Van Cittert en Hagen (1984).

Eenheden en definities van stralingsgrootheden worden beproven in WMO (1966), Raschke (1978) en Dogniaux et al (1984). De CEI (1987) heeft een publikatie uitgegeven, waarin de daglichteenheden in het Frans, Engels, Duits en Russisch worden gedefinieerd.

- The Astronomical Ephemeris for the year 19..., Her Majesty's Stationery Office, London.
- Bruin, H.A.R. de (1977). Een computerprogramma voor het berekenen van de inkomende straling aan de rand van de atmosfeer per dag door een horizontaal oppervlak. KNMI Verslagen V-294, De Bilt.
- CEI (1987). Vocabulaire international de l'éclairage. CIE Publ. No. 17.4. Publication 50 (845). Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, Genève.
- Cittert-Eymers, J.G. van en Hagen, M.J. (1984). Zonnewijzers in Nederland. De Walburg Pers. 40 blz.
- Dogniaux, R. (1977). Computer procedure for accurate calculation of radiation data related to solar energy utilization. In: Solar energy, Proceedings of the UNESCO/WMO Symposium Geneva, 30 August - 3 September 1976. WMO Publication No. 477, WMO, Genève, 191-197.
- Dogniaux, R., Grueter, J.W., Kasten, F., Page, J.K., Perrin de Brichambaut, C., Treble, F.C. and Palz, W. (1984). Solar meteorology (Units and symbols). Int. J. Solar Energy 2, 249-255.
- Heijer, J. den (1987). Lengen en korten van de dagen. KNMI Technische Rapporten T.R.-91, De Bilt.
- Holtslag, A.A.M. and Van Ulden, A.P. (1983). A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data. J. of Climate and Applied Meteor. 22, 517-529.
- Iqbal, M. (1983). An introduction to solar radiation. Academic Press, London, 1-28.
- Krochmann, J. and Seidl, M. (1974). Quantitative data on daylight for illuminating engineering. Lighting Res. and Technol. 6, 165-171.
- The Nautical Almanac for the year 19..., Her Majesty's Stationery Office, London.
- Nautisches Jahrbuch oder Ephemeriden und Tafeln für das Jahr 19..., Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg.
- Paltridge, G.W. and Platt, C.M.R. (1976). Radiative processes in meteorology and climatology. Developments in Atmos. Sci. 5. Elsevier Scient. Publ. Comp. Amsterdam, 53-67.
- Raschke, E. (edit.) (1978). Terminology and units of radiation quantities and measurements. Radiation Commission of the Internat. Assoc. of Meteor. and Atmos. Phys. NCAR, Boulder, Colorado, Ver. Staten.
- Robinson, N. (1966). Solar radiation. Elsevier Publ. Comp., Amsterdam, 29-46.
- Sonntag, D. (1989). Formeln verschiedenen Genauigkeitsgrades zur Berechnung der Sonnenkoordinaten. Abhand. des Meteor. Dienstes der Deutschen Demokrat. Rep. Nr. 143. Akademie-Verlag, Berlin, 107 pp.
- Spencer, J.W. (1971). Fourier series representation of the position of the Sun.

Search **2**, 172.

- Sterrengids. Stichting "De Koepel", Utrecht.
- WMO (1966). International Meteorological Vocabulary. WMO Publication No. 182, WMO, Genève. 276 pp.

TREFWOORDENREGISTER

A

Absolute schaal 147
absolute temperatuur 18, 40, 148
absorptie 9, 12, 16-24, 27, 30-34, 36-37,
41-42, 44, 87, 124
absorptieband 17, 21
absorptiecoëfficiënt 24
absorptiefactor 17, 19-20, 32, 148
absorptielijn 17, 21, 34-35
actinometer 44
aerosol 21, 30-31, 33, 36
afstand Aarde-Zon 97-100, 126-127, 136,
148
albedo 23, 37-39, 107, 114, 117, 149
amplitude 15
Angot-waarde 103
Ångström-schaal 146-147
angulaire irradiantie 99, 143, 145, 147
anisotropie index 110
aphelium 126, 131, 136
astronomische lengte 126-127, 131-133,
135, 148
atmosferisch venster 21
azimut 107-108, 125, 128, 131-136, 144,
148-149

B

Boltzmann, constante van 18, 148-149
Bouguer, wet van 24
Bouguer-Lambert-Beer, wet van 24
breedte 126-127, 132-133, 147
brekingsindex 25, 35, 148
broeikasgassen 21

C

Camera obscura 18
Chappuisbanden 21
circumsolaire straling 41, 109-112
condenseerbaar water 34-35, 124, 148
constante van Planck 17, 148
continue absorptie 17

D

dagelijkse gang 12, 31, 58-61, 74-79, 81-
83, 108-109
dag-en-nachtevening 131
daglicht 13, 97, 122-124, 143, 165
decade, definitie 53, 71, 80, 104
declinatie 100, 108-109, 127-135, 148
diffuse straling, definitie 10, 22-23
diffusometer 12, 41, 46, 91, 105
directe straling, definitie 10, 22
duur van de zonschijn,
zie zonschijnduur

E

ecliptica 126-127, 136, 149
eclipticavlak 126-127, 130-132, 136
effecten van bergen, zie orografisch effect
effecten van de kust, zie kusteffecten
elektromagnetische golven 15-17
elevatie, zie zonshoogte
emissie 12, 16-20, 22-23, 40, 80, 82
emissiefactor 20, 149
emittantie 18-19, 143, 145, 148
energiebalans 22
energiehuishouding 22
equinox 131-132

extinctie 12, 23, 27, 29, 31, 33, 98, 109,
124, 159
extinctiecoëfficiënt 27, 30
extraterrestrische straling 104

F

filter 31, 44-45, 120-121
fotometrisch stralingsequivalent 123-124,
147
foton 17-18, 20, 24
frequentie 15-17, 146, 149

G

globale straling, definitie 10, 23, 44, 101
golfenlengte 15-22, 24-25, 27, 30-38, 122-
123, 146, 149

H

helderheidscoëfficiënt 111-112
hemelequator 126-128, 130-132, 136

I

infrarood 15-16, 21, 37-38, 46, 120, 124,
156
intensiteit 18-19, 23-24, 143, 145, 148
International Pyrheliometric Scale 146-147
ionosfeer 20
irradiantie, definitie 142-143, 145
isolijn 10, 85-86, 119
isotrope model 109-110, 113
isotrope straling 18, 22, 111, 114

J

jaarlijkse gang 12, 53, 71, 74, 80-81, 124

K

kimduiking 140

Kirchhoff, wet van 19
kooldioxyde 9, 17, 21, 33-34, 40, 80, 82
kortgolvlige straling 20, 22-23, 36-37, 39,
44, 46, 120
kusteffect 10, 88-89

L

Lambert, wet van 23
langgolvlige straling 12, 20-23, 40, 44, 80-
83, 121, 148
lentepunt 126-128, 130-133
lichtemittantie 143, 146, 148
lichtexpositie 143, 146, 148
lichtquant 17
lichtsnelheid 15, 147
lichtsterkte 124, 143, 145-146, 148
lichtstroom 123-124, 143, 145-146, 149
luminantie 123, 143, 146, 148

M

massa-absorptiecoëfficiënt 24, 35, 148
massa-extinctiecoëfficiënt 27-28, 33, 149
massa-verstrooiingscoëfficiënt 25, 149
mechanisch lichtequivalent 123
meridiaan 109, 126-131, 136-137 .
Mie, theorie van 27
modellen voor het horizontale vlak 13, 34,
83, 97-106, 160
modellen voor schuine vlakken 13, 83, 97,
106-114, 118-120, 160

N

netto kortgolvlige straling 23
nulmeridiaan 127-128, 136-137

O

ooggevoeligheid 122-123, 145, 148
optische dikte 28
optische massa 28-30, 32, 148
orografisch effect 10
ozon 9, 21, 23, 25, 33-34, 120, 148

P

parallelcirkel 127-128
perihelium 126, 136
Planck, wet van 18, 20
pyranometer 12, 41, 44-46, 49-50, 106,
114-115, 120, 157
pyrgeometer 46
pyrheliometer 12, 31, 41-44, 50, 114, 146-
147

R

radiantie, definitie 143, 145
radiometer 41, 147
Rayleigh, theorie van 25
rechte klimming 130, 148
referentiejaar 158-159
reflectie 10, 12, 22-23, 32, 37-39, 46-47,
93, 106-107, 113-117
reflectiefactor 32, 37-39, 149
relatieve optische massa 28-29, 31, 34-35,
112, 124, 148
relatieve zonneshijnduur 57, 83, 85-86, 88,
102, 104, 111

S

seizoenafhankelijkheid 55, 74, 80, 85, 100,
105, 118
selectieve absorptie 17
Smithsonian Scale 147
solarimeter 44-45
solstitium 131-132
specifieke massa (dichtheid) 24-25, 28-29,
149
spectrale dichtheid 146
spectrale emittantie 19-20
spectrale radiantie 146
spectrale verdeling 13, 97, 120-122, 160
spectrum 15-16, 20-23, 27, 30-31, 33-34,
45, 101, 120, 122-123
stadsklimaat 87, 160
Stefan-Boltzmann, wet van 18
stikstof 9
straling, definitie 15

stralingsmeetnet 10, 12, 49-50, 86, 88-89,
157
stratosfeer 21

T

terrestrische straling 20
terugverstrooiing, zie reflectie
Test Reference Year 119, 159
thermiek 23
tijd, time
- , Amsterdamse (AT) 137
- , Greenwich (GMT) 58, 136-137, 141
- , klokke- 12, 136, 139, 142
- , middelbare (MT) 136-139
- , middelbare plaatselijke (MPT) 136-
137, 139-140
- , midden Europese (MET) 12-13, 58,
136-137, 139-140, 142
- , midden Europese zomer- (MEZT) 58,
137
- , Nederlandse (NT) 137
- , plaatselijke ware (PWT) 135-136
- , Universal (UT) 13, 58, 136, 142
- , ware (WT) 136-140
- , wereld, zie Universal Time
- , zonne- 12, 100, 136-138, 140
tijdrekening 12-13, 136-139, 164
tijdvereffening 13, 138-140, 142, 147
transmissie 12, 22, 27, 32-34, 102-103
transmissiefactor 32-33, 35-36, 97, 102,
109, 149
troebelheid, zie turbiditeit
turbiditeit 12, 29-30, 41, 44, 88, 104, 110,
124, 148, 160
turbiditeitscoëfficiënt van Ångström 29-31,
36, 148
turbiditeitscoëfficiënt van Schüepp 29, 31-
32, 147
turbiditeitsfactor van Linke 29-30, 92, 102,
148

U

ultraviolet 15-17, 23, 33, 38, 120-121
uurhoek 100, 108-109, 127-129, 131-134,
137, 140, 149

V

verlichtingssterkte 124, 143, 146-147
verschuivingswet van Wien 18, 20
verstrooiing 10, 12, 16-17, 21-23, 25-27,
30, 32-33, 36, 87, 92, 106, 109, 121,
124
verstrooiingshoek 22, 25-27, 149
volume-absorptiecoëfficiënt 24-25, 33-34,
147
volume-extinctiecoëfficiënt 27, 149
volume-verstrooiingscoëfficiënt 25, 27, 148

W

waterdamp 9, 21, 25, 30, 33-35, 40, 80, 120
waterdampdruk 34-35, 40, 147
weglengte 27-28, 36, 88, 148
World Radiometric Reference 40, 146-147

Z

zenithoek 28-29, 99-100, 107, 111, 113,
125, 149
zichtbaar licht 13, 15-17, 21, 31, 33, 37, 97,
120, 122-124, 143
Zon 9
zonneconstante 9, 99-100, 104, 145
zonneënergie 9-10, 13, 16-17, 25, 42, 44,
56, 61, 89, 106, 113, 118, 125,
127, 131, 139-140, 142, 155, 165
zonschijnduur 9-11, 13, 41, 46-47, 49,
51-53, 56-58, 83-86, 93, 102,
115, 148
zonschijnmeter 12, 41, 46-49, 51, 115
zonnestralingsschaal 13, 146-147
zonshoogte 10, 27-29, 33, 36-38, 46, 98-
102, 104, 108, 110, 124-128,
131-136, 140, 148
zonvolger 43, 114
zuurstof 9, 21, 33-34
zwart lichaam 18-20, 40, 124, 146