

HOOFDSTUK 2: ZONLICHT, KENMERKEN EN BESCHIKBAARHEID

2.1. BASISEIGENSCHAPPEN VAN ZONLICHT	22
2.2. BESCHIKBAARHEID VAN ZONLICHT	25
2.2.1. Definities.....	25
2.2.2. Opsplitsing van globale in directe en diffuse instraling	28
2.2.3. Berekening van de zonne-instraling op een hellend vlak	29
2.2.4. Besluit.....	31
2.3. METING VAN DE ZONNE-INSTRALING.....	32

HOOFDSTUK 2: ZONLICHT, KENMERKEN EN BESCHIKBAARHEID

2.1. BASISEIGENSCHAPPEN VAN ZONLICHT

Zonlicht bestaat uit energiedeeltjes, fotonen genoemd, met een variabele energieinhoud maar een constante snelheid. Zonnestraling is gekarakteriseerd door een golfvorm; de golflengte λ is omgekeerd evenredig met de fotonenenergie E_f

$$\lambda = h \cdot c / E_f$$

met c : de snelheid van licht in vacuüm ($299,8 \cdot 10^3$ km/s)

h : de constante van Planck ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s).

De basis voor de fotonvoltaïsche conversie is de absorptie van fotonen door een halfgeleider. Enkel fotonen met een bepaalde energie kunnen geabsorbeerd worden door de halfgeleider. Daarom is het spectrum van zonlicht van belang.

De zon kan beschouwd worden als een nucleaire reactor waarbij het interne fusieproces resulteert in een straling met een vermogen van $3,8 \cdot 10^{20}$ MW. De temperatuur in het centrum van de zon is in de orde van $1 \cdot 10^6$ K terwijl de temperatuur aan het oppervlak slechts 5.762 K bedraagt. Het buitenaards spectrum van de zon kan beschouwd worden als dat van een zwarte straler bij deze temperatuur.

Doordat de absorptie door de atmosfeer verschillend is voor verschillende golflengten, is het zonnespectrum op aarde verschillend in intensiteit en vorm van dat uitgestraald door de zon. Absorptie in het ultraviolet gedeelte vindt plaats door elektronentransities in zuurstof, stikstof en ozon in de bovenste lagen van de atmosfeer. Waterdamp en koolstofdioxidemoleculen zijn verantwoordelijk voor de absorptiebanden in het infrarode gedeelte.

Verspreiding van de straling in de atmosfeer zorgt voor een diffuse component, samen met de directe component van de zonnestraling op aarde. In streken met een relatief laag aantal uren zonneshijn, zoals West-Europa, is het grootste deel van de invallende zonne-energie op een horizontaal vlak op jaarbasis diffuus.

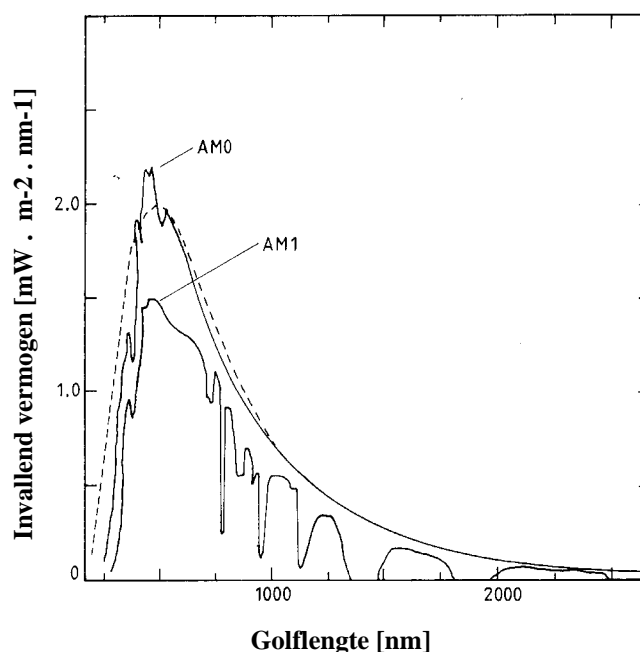
De vermogendichtheid van zonne-instraling op een vlak loodrecht op de verbindinglijn aarde-zon, bij een gemiddelde aarde-zon afstand, wordt de zonneconstante genoemd. Zij bedraagt $1,37$ kW/m² en het bijgaande spectrum wordt AM0 (air mass zero) genoemd.

Zonlicht wordt verzwakt tijdens zijn doorgang door de atmosfeer. Deze verzwakking is afhankelijk van de afstand die het zonlicht in de atmosfeer aflegt. Nu is ook de spectrale verdeling van het zonlicht afhankelijk van deze verzwakking en daardoor kunnen verschillende zonnespectra gedefinieerd worden afhankelijk van de lengte van het lichtpad door de atmosfeer. Dit lichtpad is het kortste wanneer de zon in het zenith staat. De luchtmassa (air mass AM) is de verhouding van de padlengte van de zonnestraling door de atmosfeer ten opzichte van zijn minimale waarde. Wanneer de zon in het zenith staat is de luchtmassa 1 (AM1).

Indien de zonnestraling een hoek θ maakt met het zenith wordt de luchtmassa gegeven door :

$$\text{luchtmassa} = (\cos \theta)^{-1}.$$

Hoe groter de luchtmassa, hoe sterker de verzwakking van het licht. De spectrale verdeling van de zonnestraling is tevens afhankelijk van de luchtmassa. Figuur 2.1 toont enkele veel gebruikte spectra.



Figuur 2.1 Het spectrum van het zonlicht. De streeplijn geeft de straling van een zwarte straler bij 5762 K, verder wordt het AM0 en AM1 spectrum gegeven. (Bron:[2])

AM1,5 is het spectrum van standaard zonlicht zoals het gedefinieerd wordt voor de karakterisatie van zonnecellen. AM1,5 komt overeen met een hoek van $48,2^\circ$ tussen de zon en het zenith. Tabel 2.1 geeft de spectrale verdeling van dit spectrum weer zoals het is gedefinieerd door de Commissie van de Europese Gemeenschap. De totale straling heeft een vermogen van 827 W/m^2 . Om als standaard zonnestraling te gebruiken wordt het AM1,5 spectrum nog vermenigvuldigd met een factor $1.000/827$ om de totale standaard instraling op 1.000 W/m^2 te brengen, wat ongeveer overeen komt met de maximale vermogendichtheid op het aardoppervlak.

Het piekvermogen van zonnecellen wordt gedefinieerd als het vermogen gegenereerd onder dit standaard licht (AM1,5 en 1.000 W/m^2) bij een zonneceltemperatuur van 25°C .

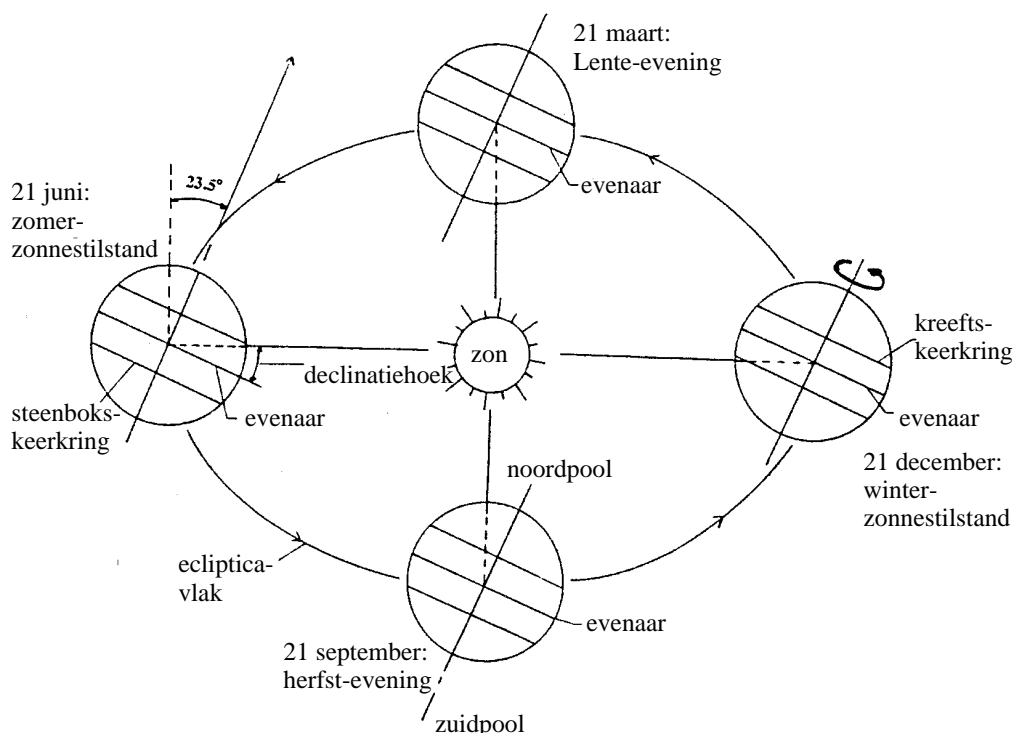
Golf- lengte [μm]	[W.m-2.μm-1]	Golf- lengte [μm]	[W.m-2.μm-1]	Golf- lengte [μm]	[W.m-2.μm-1]
0.295	0	0.700	1173.31	1.178	374.29
0.305	1.32	0.710	1152.70	1.189	383.37
0.315	20.96	0.720	1133.83	1.193	424.85
0.325	113.48	0.7277	974.30	1.222	382.57
0.335	182.23	0.730	1110.93	1.236	383.81
0.345	234.43	0.740	1086.44	1.264	323.88
0.355	286.01	0.750	1070.44	1.276	344.11
0.365	355.88	0.7621	733.08	1.288	345.69
0.375	386.80	0.770	1036.01	1.314	284.24
0.385	381.78	0.780	1018.42	1.335	175.28
0.395	492.18	0.790	1003.58	1.384	2.42
0.405	751.72	0.800	988.11	1.432	30.06
0.415	822.45	0.8059	860.28	1.457	67.14
0.425	842.26	0.825	932.74	1.472	59.89
0.435	890.55	0.830	923.87	1.542	240.85
0.445	1077.07	0.835	914.95	1.572	226.14
0.455	1162.43	0.8465	407.11	1.599	220.46
0.465	1180.61	0.860	857.46	1.608	211.76
0.475	1212.72	0.870	843.02	1.626	211.26
0.485	1180.43	0.875	835.10	1.644	201.85
0.495	1253.83	0.8875	817.12	1.650	199.68
0.505	1242.28	0.900	807.83	1.676	180.50
0.515	1211.01	0.9075	793.87	1.732	161.59
0.525	1244.87	0.915	778.97	1.782	136.65
0.535	1299.51	0.925	217.12	1.862	2.01
0.545	1273.47	0.930	163.72	1.955	39.43
0.555	1276.14	0.940	249.12	2.008	72.58
0.565	1277.74	0.950	231.30	2.014	80.01
0.575	1292.51	0.955	255.61	2.057	72.57
0.585	1284.55	0.966	279.69	2.124	70.29
0.595	1262.61	0.975	529.64	2.156	64.76
0.605	1261.79	0.985	496.64	2.201	68.29
0.615	1255.43	1.018	585.03	2.266	62.52
0.625	1240.19	1.082	486.20	2.320	57.03
0.635	1243.79	1.094	448.74	2.338	53.57
0.645	1233.96	1.098	486.72	2.356	50.01
0.655	1188.32	1.101	500.57	2.388	31.93
0.665	1228.40	1.128	100.86	2.415	28.10
0.675	1210.08	1.131	116.87	2.453	24.96
0.685	1200.72	1.137	108.68	2.494	15.82
0.695	1181.24	1.144	155.44	2.537	2.59
0.6983	973.53	1.147	139.19		

Tabel 2.1 De spectrale vermogendichtheid van het standaard spectrum AM1,5 vóór normalisatie tot 1.000 W/m².

2.2. BESCHIKBAARHEID VAN ZONLICHT

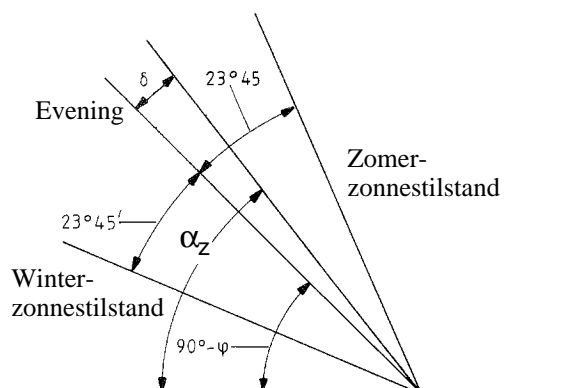
2.2.1. Definities

Om de hoeveelheid invallende zonne-energie te bepalen bekijken we eerst de omwenteling van de aarde om de zon, weergegeven in figuur 2.2.



Figuur 2.2 De omwenteling van de aarde om de zon. De N-Z-as van de aarde is geheld over een hoek van $23,5^\circ$. (Bron:[5])

Op basis van dit principe kan de theoretische zonne-instraling berekend worden aan de hand van de volgende formules. Figuur 2.3 geeft de relatie weer tussen de verschillende parameters.



Figuur 2.3 De relatie tussen de middaghoogte van de zon (α_z), de declinatie van de zon (δ) en de breedtegraad (φ) wordt hier gegeven. (Bron:[2])

De declinatie van de zon, δ , is gelijk aan het verschil tussen de stand van de zon en de stand bij dag- of nachtevening van de zon en wordt gegeven door:

$$\delta = 23^{\circ}45' \cdot \sin (2 \cdot \pi / 365 \cdot (d - 81))$$

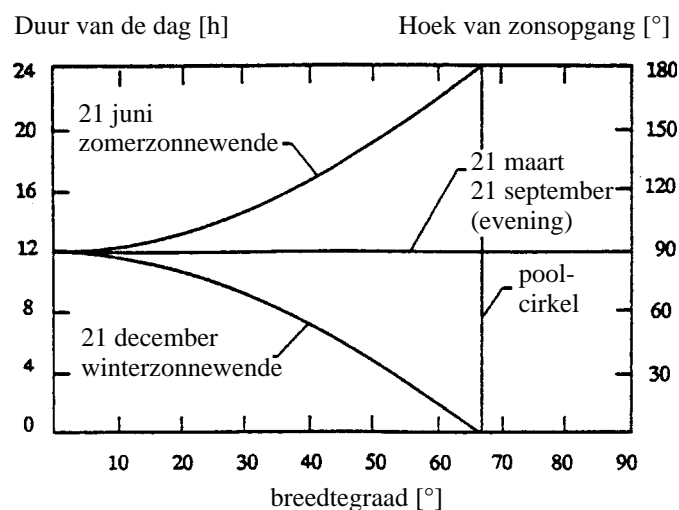
waarbij d het aantal dagen vanaf het begin van het jaar voorstelt. De hoogte van de zon op het middaguur, α_z , wordt gegeven door:

$$\alpha_z = \pi / 2 - \varphi \pm \delta$$

waarbij φ de breedtegraad is en een plus- of minteken respectievelijk dienen gebruikt te worden voor het noordelijk en zuidelijk halfrond. De dageraadhoek ω_s wordt gedefinieerd door:

$$\cos \omega_s = -\tan \varphi \cdot \tan \delta$$

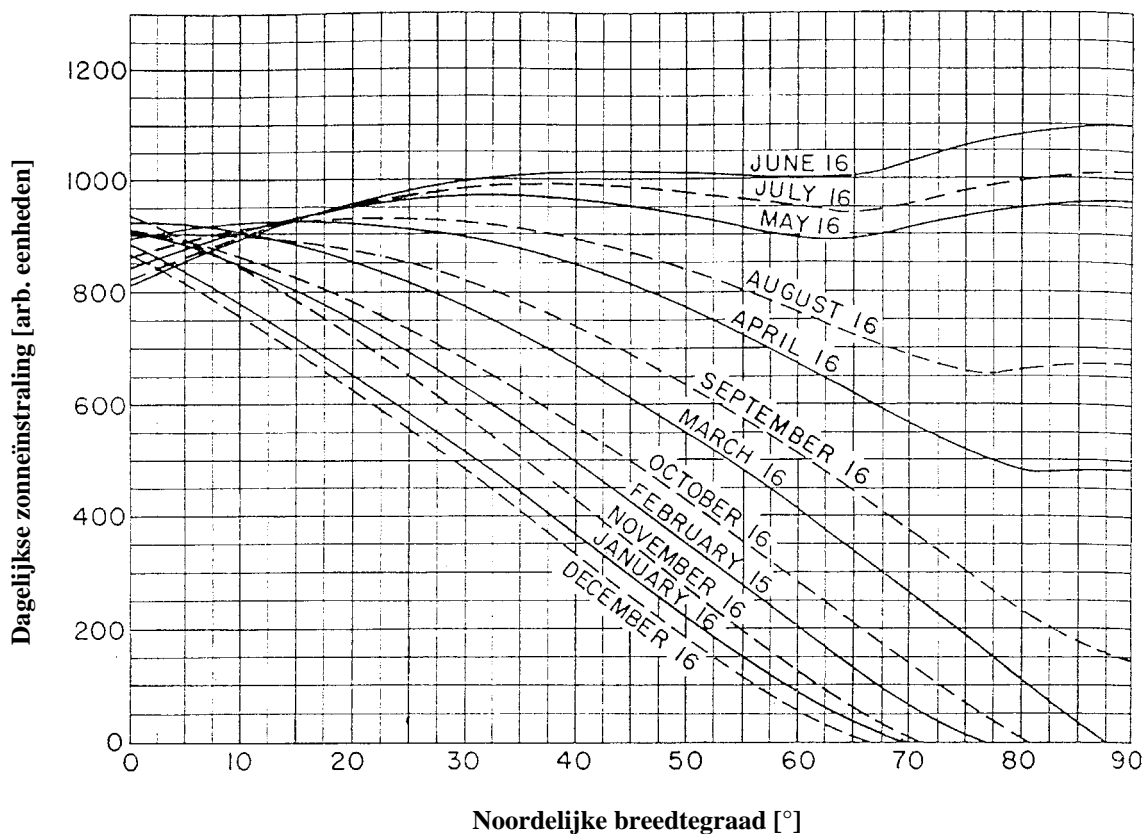
Figuur 2.4 geeft hiervan de interpretatie.



Figuur 2.4 De theoretische lengte van de dag in functie van de breedtegraad en het seizoen. (Bron:[5])

Nu wordt de zonne-instraling op een horizontaal vlak zonder de aanwezigheid van een atmosfeer berekend als H_0 , figuur 2.5 geeft hier een voorstelling van.

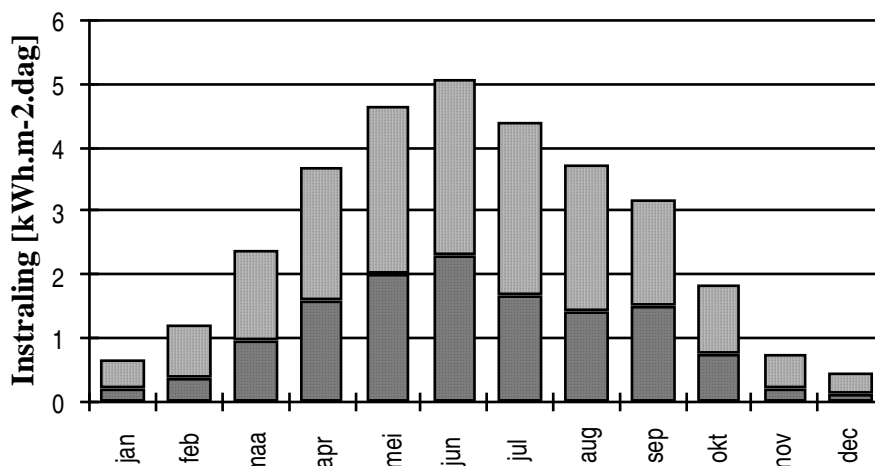
$$H_0 = \frac{24}{\pi} \times 1.35 \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi}{365} \right) \right] \times \left[\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \left(\omega_s \frac{2\pi}{360} \right) \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta \right]$$



Figuur 2.5 De theoretische zonne-instraling op een horizontaal vlak, op aarde maar wanneer de invloed van de atmosfeer niet wordt in rekening gebracht.

2.2.2. Opsplitsing van globale in directe en diffuse instraling

Om het invallend zonlicht op een hellend vlak te berekenen moet de verhouding van direct en diffuus licht gekend zijn. In figuur 2.6 is deze opsplitsing weergegeven voor Ukkel aan de hand van de dagelijks gemiddelde instraling.



Figuur 2.6 De gemiddelde dagelijkse zonne-instraling op een horizontaal vlak in Ukkel, opgesplitst naar direct en diffuus licht. De lichtgrijze balken geven het diffuus gedeelte weer en de donkergrijze het directe deel van de maandelijkse zonne-instraling.

Tabel 2.2 geeft typische waarden van zonne-instraling onder verschillende weersomstandigheden.

Weersomstandigheden	Globale straling [W/m ²]	Diffuus deel [%]
blauwe hemel zonder wolken	600 - 1.000	10 - 20
mistig bewolkt, zon zichtbaar als gele schijf	200 - 400	20 - 80
zwaar bewolkt	50 - 150	80 - 100

Tabel 2.2 Typische waarden voor zonne-instraling onder verschillende weersomstandigheden.

Omdat de standaardmeting van zonne-instraling gebeurt op een horizontaal vlak met behulp van een pyranometer, zijn er slechts in grotere meteorologische stations meetgegevens beschikbaar van de hoeveelheid diffuse straling. Men kan echter op basis van de horizontale instraling een schatting maken van de diffuse straling (Lui en Jordan, 1960). Hiervoor definieert men de helderheidsindex (k_t) als de verhouding tussen de gemeten ingestraalde zonne-energie op een horizontaal vlak (H_H : in kWh/m²/dag) en de theoretische ingestraalde zonne-energie zonder de aanwezigheid

van een atmosfeer (H_0 ; in kWh/m²/dag). Een vereenvoudigd model voor de berekening van de diffuse straling is hieronder gegeven.

$$k_T = H_H / H_0$$

$$H_{H,dif} / H_H = 1 - 1,12 \cdot k_T$$

Waarbij in deze en volgende formules deze nomenclatuur wordt aangehouden (eenheid kWh/m²/dag) :

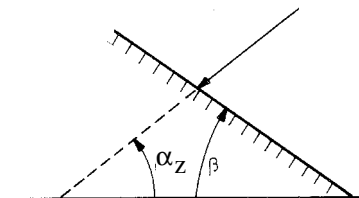
H_H	=	globale zonne-instraling op een horizontaal vlak
$H_{H,dif}$	=	diffuse zonne-instraling op een horizontaal vlak
$H_{H,dir}$	=	directe zonne-instraling op een horizontaal vlak
H_T	=	globale zonne-instraling op een hellend vlak
$H_{T,dif}$	=	diffuse zonne-instraling op een hellend vlak
$H_{T,dir}$	=	directe zonne-instraling op een hellend vlak

2.2.3. Berekening van de zonne-instraling op een hellend vlak

We berekenen de zonne-instraling op een hellend vlak door een opsplitsing te maken naar diffuse en directe straling:

$$H_T = H_{T,dir} + H_{T,dif}$$

Directe instraling



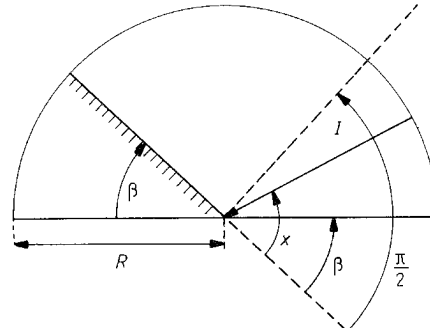
Figuur 2.7 Voorstelling van de berekening van de directe instraling op een hellend vlak. (Bron: [2])

De directe zonne-instraling kan door eenvoudige goniometrie bepaald worden. Figuur 2.7 geeft hiervan een voorstelling, β is de hellingshoek van het beschouwde vlak. Er wordt uitgegaan van de situatie op de middag wat een goede benadering is voor alle andere ogenblikken.

$$H_{T,dir} / H_{H,dir} = \sin(\alpha_z + \beta) / \sin \alpha_z$$

Diffuse instraling

Om de diffuse instraling op een hellend vlak te berekenen beschouwen we figuur 2.8.



Figuur 2.8 Voorstelling van de berekening van de diffuse instraling op een hellend vlak, een cilindrische symmetrie wordt verondersteld. (Bron: [2])

Wanneer we een cilinder met eenheidslengte en een intensiteit van de diffuse straling I veronderstellen, kan $H_{T,dif}$ geschreven worden als

$$H_{T,dif} = \left(\int_0^{\pi/2} I \cdot \sin x \cdot dx + \int_{\pi/2}^{\pi-\beta} I \cdot \sin x \cdot dx + \rho \cdot \int_0^{\beta} I \cdot \sin x \cdot dx \right) \cdot \frac{1}{2R}$$

De derde term stelt hierin de straling voor die via de reflectie op de grond, het vlak bereikt. ρ is de reflectieindex van de grond die typisch tussen de 10% en 30% is maar kan oplopen tot 70% voor een besneeuwde grond. De uitwerking van deze integraal resulteert in

$$H_{T,dif} = \frac{I}{2R} [1 + \cos\beta + \rho(1 - \cos\beta)]$$

Voor het horizontale vlak kan dezelfde berekening toegepast worden

$$H_{H,dif} = \left(\int_0^{\pi} I \cdot \sin x \cdot dx \right) \frac{1}{2R} = \frac{I}{R}$$

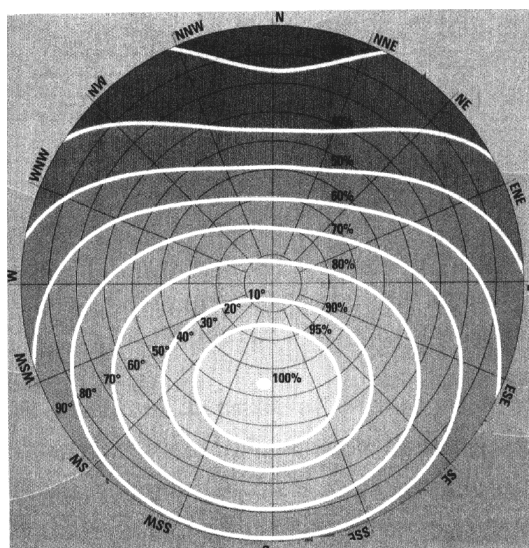
Combinatie van de vorige twee formules resulteert dan in een vergelijking die $H_{T,dif}$ geeft in functie van $H_{H,dif}$, de hellingshoek van het vlak en de grondreflectiecoëfficiënt ρ .

$$H_{H,dif} = \frac{1}{2} \cdot H_{H,dif} [1 + \cos\beta + \rho(1 - \cos\beta)]$$

2.2.4. Besluit

Er is een methode opgesteld om op basis van de meting van de invallende zonne-instraling op een horizontaal vlak, de invallende zonne-energie op een hellend vlak te berekenen door een opsplitsing te maken van de diffuse en de directe straling.

Op basis van gemeten gemiddelde zonne-instralingen kan nu de invallende zonne-energie bepaald worden op vlakken met verschillende oriëntatie en hellingshoeken. Figuur 2.9 geeft dit weer voor een typisch jaar in Nederland. Het valt op dat binnen een gebied van zuidwest tot zuidoost en een hellingshoek van 30° tot 60° de afwijking ten opzichte van de optimale situatie miniem is (minder dan 10%). De reden hiervoor is te vinden in de grote hoeveelheid diffuse instraling in onze gebieden.



Figuur 2.9 De hoeveelheid ingestraalde zonne-energie op een vlak op jaarbasis wordt getoond voor een typisch jaar in Nederland in functie van de oriëntatie en de hellingshoek (©figuur Ecofys,NL).

2.3. METING VAN DE ZONNE-INSTRALING

Meting van het aantal uren zonne-instraling

Per definitie wordt zonne-energie beschouwd als direct zonlicht zolang de zon een zichtbare schaduw toont. Om het aantal uren zonlicht te bepalen wordt gebruik gemaakt van een Campbell-Stokes zonlichtopmeter. Dit toestel gaat het zonlicht via een lens focuseren en zo op een papierstrook een bruine lijn aftekenen wanneer de hoeveelheid direct zonlicht een bepaalde waarde overschrijdt. De papierstrook wordt voortbewogen en door de lengte van de bruine streep op te meten heeft men een maat voor het aantal uren zonlicht per dag.

Pyranometer

De pyranometer meet de globale zonne-instraling over de volledige horizon, in alle richtingen. De meting is gebaseerd op de bepaling van het temperatuursverschil tussen een zwart en een wit lichaam ten gevolge van zonne-instraling. Het temperatuursverschil wordt opgemeten door een serieschakeling van thermistoren. Figuur 2.10 toont het meest gebruikte type van pyranometer.



Figuur 2.10 Een pyranometer.

Typisch heeft een pyranometer een meetbereik van 0,3 tot 3 μm . Daardoor is hij dan ook bijzonder geschikt voor het karakteriseren van zonnethermische systemen waarbij het volledige bereik van 0,3 tot 3 μm belangrijk is.

Voor fotovoltaïsche systemen is echter enkel het zonlichtspectrum van 0,3 tot 1,5 μm van belang. Daarbij komt ook dat pyranometers een typische tijdsconstante van enkele seconden hebben. Voor fotovoltaïsche systemen wordt daarom meestal gebruik gemaakt van gecalibreerde referentiezonnecellen.

Gecalibreerde zonnecellen

Om een fotovoltaïsch systeem te karakteriseren kan een gecalibreerde zonnecel gebruikt worden. De calibratie gebeurt dan voor het AM1,5 spectrum bij 1.000 W/m^2 , dezelfde condities die gebruikt zijn om het piekvermogen van de fotovoltaïsche modules te bepalen. In de ideale situatie wordt een zonnecel gebruikt die vervaardigd

is volgens dezelfde technologie als het panelenveld zodat verschillen in de spectrale gevoeligheid worden opgevangen.

Van de gecalibreerde zonnecel wordt de kortsluitstroom, of bijna-kortsluiting over een zeer kleine parallelweerstand, opgemeten daar deze recht evenredig is met het invallend lichtvermogen. Een klein temperatuurseffect kan gecompenseerd worden door het opmeten van de openketen spanning die afhankelijk is van de temperatuur (zie hoofdstuk 3).