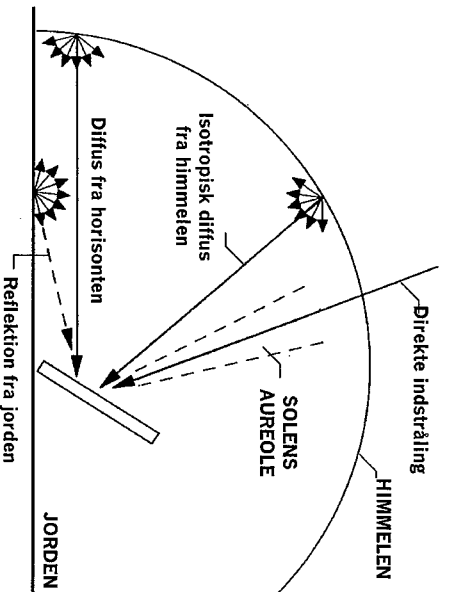


RADIANSMODEL ENS 51181/97-0066

Programdokumentation

INDLEDNING

Betragt et flade, der udsættes for såvel diffus som direkte solindstråling på en skyfri dag.



Figur 1: Solindstrålingen på en vilkårlig flade består af såvel diffus som direkte stråling.

Bidragene til indstrålingen kan opdeles som følger [Duffie, s 92] :

- I_{D-ISO} isotropisk diffus indstråling fra himmelen
- I_{D-HOR} diffus horisontstråling fra et bånd fra horisonten til ca. 10° over horisonten.
- I_{D-REF} reflekteret diffus stråling fra området foran modtagerfladen
- I_{DIR} direkte stråler fra solskiven
- I_{AUR} fremspredt stråling fra solens aureole, et cirkulært område på ca. 5° omkring solen

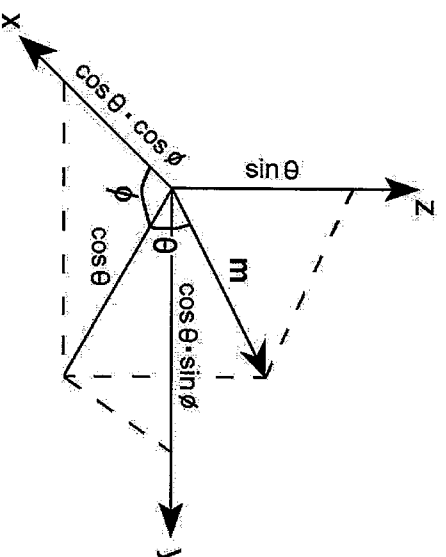
$$I_{TOT} = I_{D-ISO} + I_{D-HOR} + I_{D-REF} + I_{DIR} + I_{AUR}$$

Størrelsen I_{TOT} er et udtryk for den samlede indstråling på fladen. Kendskab til I_{TOT} giver mulighed for at vurdere ydelsen fra et fotovoltaisk anlæg. EDB programmet **RAD-RANG.CMT** er udviklet til systematiske vurderinger af virkningen af forskellige modulatorienteringer (hældning V og azimutvinkel

A), lokalitet (breddegradstal B), atmosfærisk turbiditet (L linkes turbiditetsfaktor T_{LK}) samt reflektiviteten r af jorden foran modtagerfladen. Efter en beskrivelse af beregningsalgoritmen betragtes et antal "Case Studies" til illustration af programmets praktiske anvendelse.

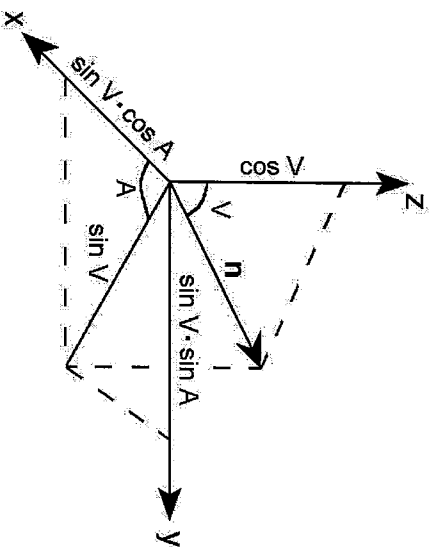
GEOMETRI

Vinklen θ er solens elevationsvinkel målt i forhold til vandret, og ϕ er solens azimutvinkel. Her anvendes den sædvanlige konvention, at i retningen mod syd (x -aksen i figur 2) regnes azimutvinklen $\phi = 0^\circ$. Azimutvinkler mod øst (modsat uret) regnes negative, og azimutvinkler mod vest regnes positive.



Figur 2: Enhedsvektoren m peger direkte mod solskiven og har koordinatsættet $(\cos\theta \cdot \cos\phi, \cos\theta \cdot \sin\phi, \sin\theta)$.

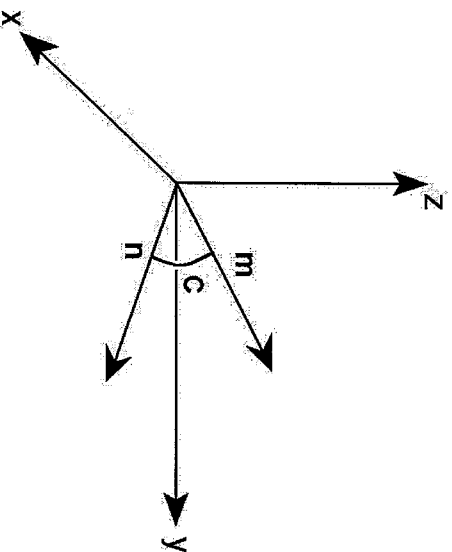
Hvad modtagerfladen angår, beskrives dens orientering som nævnt af en hældningsvinkel V målt i forhold til vandret og en azimutvinkel A målt på samme måde som for solen, altså stik syd svarer til $A = 0^\circ$. Fladens orientering beskrives ved hjælp af normalvektoren til modtagerfladen n .



Figur 3: Enhedsvektoren $\mathbf{n}$ er vinkelret på modtagerfladen og har koordinatsættet $(\sin V \cdot \cos A, \sin V \cdot \sin A, \cos V)$.

Figur 3 viser $\mathbf{n}$ og dens koordinater. Læg mærke til, at $\sin V$ indgår i koordinatsættet i stedet for $\cos \theta$ som følge af ovenstående definitioner. Fladens azimutvinkel A indgår i $\mathbf{n}$ i stedet for solens azimutvinkel ϕ .

Det skalære produkt $\mathbf{n} \cdot \mathbf{m}$ mellem vektorerne er bestemmende for den direkte indstrålings irradians samt mængden af diffus indstråling, der rammer fladen. Når $\mathbf{n} \cdot \mathbf{m}$ er negativ, rammes fladen ikke af strålingen. Vinklen mellem $\mathbf{n}$ og $\mathbf{m}$ betegnes C .



Figur 4: Det skalære produkt $\mathbf{n} \cdot \mathbf{m}$ er bestemmende for indstrålingen på modtagerfladen. Bemærk, at $\mathbf{n} \cdot \mathbf{m} = \cos C$.

Bemærk, at det skalære produkt nemt kan beregnes, når alle vinklerne er kendte:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{m} = \begin{pmatrix} \sin V \cdot \cos A \\ \sin V \cdot \sin A \\ \cos V \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta \cdot \cos \phi \\ \cos \theta \cdot \sin \phi \\ \sin \theta \end{pmatrix}$$

DIREKTE SOLINDFALD

Det direkte solindfald $I_D(m)$ er afhængig af luftmassen m samt af atmosfærens tilstand. Blandt andet indvirker mængden af vand-damp og aerosolpartikler på indstrålingen.

Deres indvirkning kan vurderes ved at sammenholde den aktuelle optiske dybde D med den optiske dybde, der vil gælde for en fuldkommen tør og ren atmosfære, hvor kun molekylær spredning (Rayleigh spredning) er til stede. Den optiske dybde D_r fra Rayleigh spredningen er en funktion af luftmassen m og kan beregnes som beskrevet her. Forholdet mellem de to optiske dybder kaldes Linkes turbiditetsfaktor T_{Lk} [Scharmer, s 32]. I følgende ligning indgår T_{Lk} svarende til luftmassen 2 (dvs. $\theta \approx 30^\circ$).

$$I_D(m) = 1367 \cdot e \cdot \exp(-0,8662 \cdot T_{Lk} \cdot m \cdot D_r(m))$$

Størrelsen e tager hensyn til den årlige variation i jord-sol afstanden og kan for dagnummer dag skrives som [Duftte, s 10]:

$$[1 + 0,033 \cdot \cos(2\pi \cdot (dag - 3)/365)]$$

Linkes turbiditetsfaktor varierer med atmosfærens tilstand. Tabel I giver et indtryk af, hvilke værdier denne faktor antager:

Atmosfærens art	Turbiditetsfaktor
Meget klar vinterluft	2
Klar, varm luft	3
Fugtig, varm luft	4-6
Forurenet luft	8

Tabel I: Linkes turbiditetsfaktor for forskellige, typiske atmosfæriske tilstande.

Såvel luftmassen som funktion af solens elevationsvinkel og den Rayleighske optiske dybde kan beregnes efter empiriske formler

af Fritz Kasten og Andrew Young [Young, s 1108]. Her er nogle brugbare ligninger, der også indgår i det anvendte program:

$$1/D_R(m) = 6,6296 + 1,7513 \cdot m - 0,1202 \cdot m^2 + 0,0065 \cdot m^3 - 0,00013 \cdot m^4$$

hvor

$$m = \frac{1,002432 \cos^2 Z + 0,148386 \cos Z + 0,0096467}{\cos^3 Z + 0,149864 \cos^2 Z + 0,0102963 \cos Z + 0,000303978}$$

Vinklen $Z = \pi/2 - \theta$ er solens zenitvinkel. Solens elevationsvinkel θ og azimutvinkel ϕ dagen igennem er givet ved:

$$\sin \theta = \cos B \cdot \cos D \cdot \cos W + \sin B \cdot \sin D$$

$$\tan \phi = \frac{\cos D \cdot \sin W}{\sin B \cdot \cos D \cdot \cos W - \cos B \cdot \sin D}$$

hvor B er breddegradstallet, D er solens deklination, og W er timevinklen (= nul lokal middag, $15^\circ/\text{time}$, positiv over middag).

Det er således muligt at beregne $I_D(m)$ på et givet tidspunkt og sted på jorden, når solens elevationsvinkel er kendt. Desuden kan man beregne det skalære produkt $\mathbf{n} \cdot \mathbf{m}$ for dermed at finde frem til solens direkte irradians på modtagerfladen. Når $\mathbf{n} \cdot \mathbf{m} < 0$ antager vi, at dette bidrag er lig med nul. Desuden er der naturligvis kun et bidrag til den direkte indstråling, når solen er over horisonten. Solnedgangstimevinklen W_{NED} kan findes ved hjælp af formlen:

$$\cos W_{NED} = -\tan B \cdot \tan D$$

Takket være en elegant algoritme, der er at finde hos Duffie og Beckman [Duffie, s 16] kan dette program ud over middelbreddegraderne også håndtere det direkte indstråling i såvel arktiske som antarktiske områder og i områder nær jordens ækvator. Algoritmen fremgår af proceduren:

PROC azim(*bx, d, w*)

i programudskriften.

DIFFUS INDSTRÅLING

Radiansen af et lille "stykke" på himmelen, som den ses fra et punkt på modtagerfladen, er forholdet mellem irradiancen fra det pågældende himmelstykke og rumvinklen, som stykket fylder. Enhederne er $W/(m^2 \cdot sr)$. I programmet anvendes rumvinkelstykker på én grad elevation gange én grad azimut.

Betragt for eksempel en vandret modtagerflade under en halvkugleformige himmelhvelving (der fylder en rumvinkel på 2π steradianer). Antag, at irradianser $I_D = 100 W/m^2$, som det godt kunne ske at være på en dag med ensartet skydække. Himmels radians R vil da være ensartet og lig med $100/2\pi = 15,9 W/(m^2 \cdot sr)$. Hvis radiansen ikke er konstant med derimod en funktion af elevations- og azimutvinkel $R(\theta, \phi)$, skal man integrere over det pågældende område for at finde den dertil svarende irradians:

$$I_0 = \int_{\phi_2}^{\phi_1} \int_{\theta_2}^{\theta_1} R(\theta, \phi) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \cdot d\phi$$

Bemærk, at dobbeltintegralet for $0 < \theta < \pi/2$ og for $0 < \phi < 2\pi$ for konstant R giver:

$$I_D = R \cdot 2\pi$$

I vort program bliver der behov for at integrere kun over området på himmelen eller på jorden foran modtagerfladen, der kan "ses" fra modtagerfladen. Igen kan det skalære produkt $\mathbf{n} \cdot \mathbf{m}$ anvendes til at afgøre, om et punkt i området ligger i halvplanen, som $\mathbf{n}$ peger ind i, og dette er netop gjort i program-

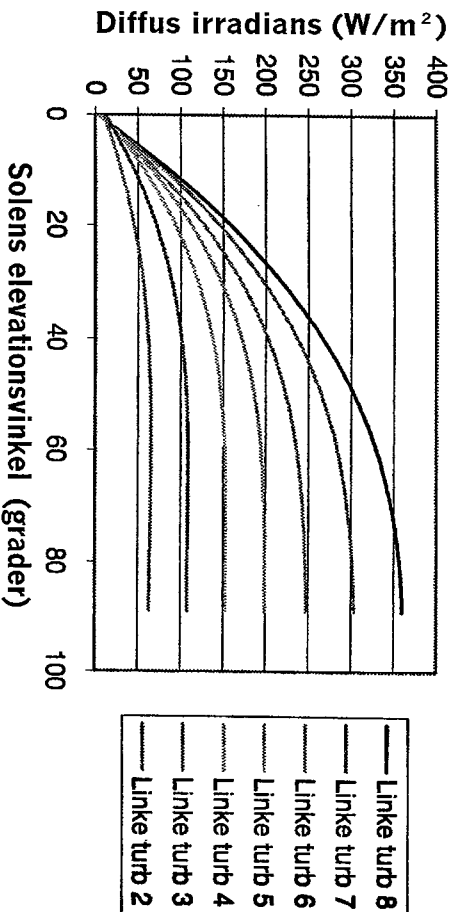
met ved hjælp af funktionen `FUNC ndotm (A, V, θ, φ)`.

Beregningerne af bidraget fra himmelhvelvingen er opdelt således, at der er tale om en lidt kraftigere (ca. 10% større) horisontstråling for elevationsvinkler på op til ca. 10°, som det også fremgår af data i Duffie og Beckman [Duffie, s 92] samt af egne observationer [Bason, s 52].

følgende form og som fremgår af programfunktion `FUNC diff(thes, t1k)`:

$$f(x) = a \cdot [1 - \exp(-b \cdot \theta)]$$

Solens *aureole* er det lyse område uden om solskiven, der skyldes fremspredt lys fra atmosfæriske aerosoler (små vanddråber og støvpartikler). Der er taget hensyn til dette fænomen ved at lade bidraget herfra være afhængig af Linkes turbiditetsfaktor i pro-



Figur 5: Diffus irradians på en vandret flade ved forskellige elevationsvinkler for en række værdier af Linkes turbiditetsfaktor.

Den diffuse irradians, der stammer fra himmelen, er dels gjort afhængig af solens elevationsvinkel, og dels af reflektiviteten r af området foran modtagerfladen (for ikke vandrette flader). Det reflekterende område antages at være en diffus reflektor (Lambertisk) undtagen for en speciel programkørsel gældende for vandrefleksion foran et fotovoltaiske anlæg monteret på et lysfyrr. Igen tager programmet kun hensyn til områder, der “ses” af modtagerfladen.

Radiansen af jorden (eller isfladen) foran modtagerfladen er afhængig af solens elevationsvinkel og af mængden af diffus lys, der rammer en vandret flade. For at tage hensyn til disse faktorer har vi benyttet resultater fra *European Solar Radiation Atlas* [Scharmer, s 34] og som er vist i overblik i figur 5.

Disse data er blevet tilpasset funktioner af

grammets funktion `FUNC aur(dx, m, t1k)`. Bidraget er sat til 10% af den direkte irradians, når $T_{LK} \approx 8$ (meget diset) og til 0%, når $T_{LK} \approx 2$ (en ren “Rayleigh” atmosfære).

For anlæg der befinder sig i en vis højde h over havet anvendes følgende korrektionsfaktor til luftmassen:

$$(p/p_0) = \exp(-h/H_s)$$

hvor p er det aktuelle tryk, p_0 er standardtrykket ved havets overflade, og H_s er 8400 meter. For eksempel på toppen af Mauna Loa, hvor $h = 3200$ m, er korrektionsfaktoren $(p/p_0) = 0,683$.

Der følger nu et eksempel på en typisk programkørsel, idet vi betragter en klar dag ved sommersolhverv på Thule Air Base.



Figur 6: Figuren viser resultaterne for en typisk program. Det drejer sig om en klar dag ved Thule Air Base den 21. juni 1999. Modtagerfladen vender mod syd og har en vippevinkel på 60° i forhold til vandret.

PROGRAMKØRSEL

Når programmet starter skal de givne parametre indtastes:

Vinkel for horisontlys: 10
FV-modul vippevinkel: 60
FV-modul azimutvinkel: 0
Årets dagnummer: 172
Bredegradstal: 76.5
Klokken (START): 0
Klokken (SLUT): 23
Linke turbiditetsfak. (0-8): 2
Jordreflektion (0-100): 70
Forsøgsbeskrivelse: tekst

Vinklen for horisontlys kan normalt sættes lig med 10°. Denne størrelse har kun lidt betydning og da mest, når FV-modulets vippevinkel er stor. Azimutvinklen indtastes i forhold til linien mod syd ($A=0^\circ$) med positive værdier mod vest. Årets dagnummer kan findes for eksempel i *Skrive- og Rejsekalender* [Norval, s 26].

Når bredegradstallet ($B > 0$ i den nordlige halvkugle) er indtastet, kommer programmet

selv med et forslag til start og slut klokkeslæt (solopgang til solnedgang). I arktiske områder i den lyse tid anvendes kl. 0 til kl. 23. Beregninger gennemføres for hver hel time. Under beregningerne bliver solskivens position med aureole vist i et polært koordinatsystem. Følgende farvekoder viser bidrag eller mangel deraf fra den diffuse stråling:

FARVE	DIFFUS BIDRAG FRA
BLÅ	Isotrop himmelstråling
HVID	Horizont stråling
BRUN	Jordreflektion
VIOLET	Uden for "synsfeltet"

Tabel II: Farvekoder i det polære koordinatsystem.

Bemærk i forbindelse med denne prøvekørsel, at solen er over horisonten dagen igennem, og at det samlede bidrag fra diffus stråling udgør ca. 2,97 kWh/m², altså lige knap

halvdelen af det direkte bidrag. Dette hænger dels sammen med, at det direkte solindfald kun rammer modtagerfladen en del af dagen, mens den diffuse stråling bidrager hele dagen. Desuden er bidraget stort, fordi snedækket i dette eksempel har høj reflektivitet.

CASE STUDIES

Der følger nu bilag med et antal studier af særlige situationer, dels for at efterprøve programets pålidelighed i forhold til faktiske målinger, og dels for at vise nogle nyttige praktiske konsekvenser af beregningerne.

Thule Air Base ($76,5^{\circ}$ N): Ydelsen ved sommersolhverv undersøges for en række hældningsvinkler for at finde den optimale vinkel. Ydelsen med og uden snedække undersøges. Variationen af ydelsen med årstid undersøges for at afsløre, i hvilke perioder et FV-anlæg kan ventes at yde et rimeligt forsyningsbidrag.

Silkeborg ($56,1^{\circ}$ N): Hos SolData har et 10 m^2 FV-anlæg været i drift siden oktober 2000. På grundlag af programmets indstrålingsberegninger laves en analyse af klardagsydelse på forskellige årstider. Beregningsresultater sammenholdes med faktiske måleresultater.

Halvkuglepyranometer: Der er udviklet et måleinstrument til samtidig målinger af globalstrålingen på fem flader samtidig (nord, syd, øst og vest samt vandret). Strålingsmodellen sammenholdes med faktiske målinger på en klar dag.

Lysfyr anlæg i Riga (57° N): Et fotovoltaisk anlæg skal forsyne et lysfyr anlæg og dermed erstatte de tidligere anvendt og farlige plutonium-generatorer. Anlægget er placeret på en mole, hvor der i vinterperioden ofte vil være diffuse refleksioner fra en snedækket isflade. Programmet anvendes blandt andet til en vurdering af klardagsydelsen i nogle vintermåneder.

Lysfyr anlæg i Bergen ($60,5^{\circ}$ N): I et fjordområde skal et FV-anlæg forsyne et lysfyr, der gør brug af lysdioder med lavt energiforbrug. Programmet anvendes til at vurdere, hvilken indflydelse sollyssets spejling på en vandflade foran modtagerfladen kan have på klardagsydelsen. Ydelsen undersøges også for en klar midvintersdag med snedække.

Mauna Loa Observatoriet ($19,5^{\circ}$ N): På bjerget Mauna Loa på Big Island, Hawaii, ligger CMDL laboratoriet, hvor man for første gang foretog omhyggelige og systematiske langtidsmålinger af atmosfærens CO_2 koncentration. Stedet ligger i en højde på ca. 3400 m. Egne målinger sammenholdes med strålingsmodellens forudsigtelse og med data fra havoverfladen i samme område.

Bangkok, Thailand ($13,7^{\circ}$ N): Danske virksomheder, der ønsker eksport til dette område skal være i stand til at levere teknisk viden om indstrålingsforhold. Der gennemføres et antal beregninger gældende for dette område i samråd med virksomheden Arcon Solceller A/S. Der er taget kontakt til Thai-landske virksomheder, der interesserer sig for etablering af FV-anlæg.

LITTERATURHENVISNINGER

- J.A. Duffie, W.A. Beckman; *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2. ed, Wiley, New York 1991.
- K. Scharner, J. Greif; *The European Solar Radiation Atlas*, vol. 1: Fundamentals and maps, École des Mines de Paris, 2000.
- A. Young; *Air mass and refraction*, *Applied Optics*, 33, no. 6, pp 1108-1110, 20 feb 94.
- F. Bason; *Aerosol optical depth measurements in the UV, visible and near infrared at Thule Air Base, Greenland ($76,5^{\circ}$ N)*, Ph.D. thesis, Aarhus University, DML, 1999.

D:\Documents\EN5 97-0066\Radiansmodel11en.wpd