

BYG•DTU

DANMARKS  
TEKNISKE  
UNIVERSITET



Toke Rammer Nielsen  
Svend Svendsen

## Harmonisering af grundlaget for beregning af energitilskud fra vinduer

Sagsrapport  
BYG•DTU SR-03-03  
2003  
ISSN 1393-402x

## Forord

Projektet ”Harmonisering af grundlaget for beregning af energitilskud fra vinduer” med J.nr. 75661/01-0004 er finansieret af Energistyrelsen. Projektet er udført af By og Byg og BYG.DTU, Danmarks Tekniske Universitet. Projektets afrapportering består af denne rapport og notat fra By og Byg [Aggerholm, 2002].

## 1 Opsummering af anbefalinger fra projektet ”Harmonisering af grundlaget for beregning af energitilskud fra vinduer”

Projektet har resulteret i harmonisering af beregningsgrundlaget for omregning af solstrålingsdata til forskelligt orienterede flader i programmerne/metoderne Energiklassifikation af ruder og vinduer og BSim. En harmonisering af vejrdata på denne baggrund ved videreudviklingen af Bv98 er igangværende.

Projektets anbefalinger for et harmoniseret beregningsgrundlag kan sammenfattes i:

- Benyt vejrdata fra det danske design reference år (DRY)
- Benyt Perez solalgoritmer til beregning af diffus solstråling på forskelligt orienterede skrå flader [Perez et al., 1990]
- Benyt metode af Karlsson og Roos til vinkelkorrektion af total solenergitransmittans for direkte solstråling [Karlsson og Roos, 2000]
- Skyggekorrektion af den direkte solstråling baseres på en detaljeret beregning af det vinduesareal der er dækket af skygge

## 2 Baggrund

Vinduers energitilskud beregnes i forskellige sammenhænge og med forskellige metoder/programmer. Det har vist sig at der opstår afvigelser mellem resultaterne som følge af brug af forskellige vejrdata og forskellig omregning af solstrålingsdata til solindfald på forskelligt orienterede lodrette og skrå flader. På grund af forskellig detaljeringsgrad i de forskellige metoder/programmer vil visse afvigelser ikke helt kunne undgås men en bedre overensstemmelse kan opnås ved at harmonisere beregningsgrundlaget.

Projektets formål er at etablere et fælles grundlag for beregning af energitilskuddet for ruder og vinduer for metoderne/programmerne: Energiklassifikation af ruder og vinduer, diagrammetoden, Bv98, BSim og evt. andre relevante programmer. Det fælles grundlag vil omfatte valg af samme vejrdata, algoritme til omregning af solstrålingsdata og korrektion for indfaldsvinkel.

Publikationen European Solar Radiation Atlas [Scharmer and Greif, 2000] benyttes som grundlag for valg af solalgoritmer til omregning af solstrålingsdata til solindfald på forskelligt orienterede skrå flader. European Solar Radiation Atlas er udarbejdet af europæiske eksperter på området på anbefaling af den europæiske kommission med støtte fra JOULE II programmet.

## 3 Vejrdata

I forbindelse med beregning af bygningers energibehov anvendes referenceår der indeholder typiske vejrdata på timebasis for et givet sted. De mest benyttede danske referenceår er test reference year (TRY) og design reference year (DRY). Begge referenceår indeholder data for direkte normal solstråling, diffus og global

solstråling på vandret, udeluftens temperatur samt flere andre vejrdata. DRY er baseret på 15 års vejr-observationer i perioden 1975-1989 fra Flyvestation Værløse og fra Landbohøjskolens målestation ved Højbakkegaard i Tåstrup [Jensen og Lund, 1995].

I energiklassifikationen af ruder og vinduer benyttes data for direkte normal solstråling, diffus solstråling på vandret og udeluftens temperatur fra DRY.

Bsim er et generelt termisk bygningssimuleringsprogram og kan benytte et brugerdefineret referenceår. Med Bsim distribueres filen "Danmark.dry" der indeholder vejrdata fra DRY.

Vejrdata i Bv98 er givet i filen "Dk.cli". Heri er angivet månedsgennemsnit for udeluftens temperatur og solstrålingsdata for flader med forskellig orientering og hældning. Solstrålingsdata er baseret på 15-års vejrdata i perioden 1959-1973 fra Tåstrup og er gengivet i Danvak Grundbogen [Hansen et al., 1997 p. 483]. Disse data er også anvendt i den tidligere beregningsmetode beskrevet i SBI-rapport 148. I SBI-anvisning 184 og Bv98 er talværdierne omregnet til MJ/m<sup>2</sup> og afrundet til hele multipla af 5 MJ/m<sup>2</sup>.

## 4 Solindfald på skrå flader

Ud fra timeværdier for solstrålingsdata i et referenceår beregnes solindfaldet på forskelligt orienterede lodrette og skrå flader ud fra fladens orientering og hældning. Solindfaldet opdeles i et direkte, diffust og reflekteret bidrag. Disse bidrag bestemmes ud fra solens position på himlen og algoritmer der omregner data fra referenceåret til solindfald på den aktuelle flade. Flere forskellige beregningsalgoritmer eksisterer og adskiller sig mest hvad angår beregning af det diffuse bidrag.

### 4.1 Solens position

Solens position på himlen kan beskrives ud fra solhøjden og solens azimuth. Ud fra solens position kan den direkte solstrålings indfaldsvinkel på en given flade bestemmes ud fra fladens orientering og hældning. Algoritmer til bestemmelse af disse størrelser er angivet i European Solar Radiation Atlas [Scharmer and Greif, 2000, p. 105-114].

### 4.2 Direkte stråling

Den direkte solstråling på en skrå flade bestemmes ved en omregning ud fra den direkte normalstråling fra referenceåret og solstrålingens indfaldsvinkel på fladen [Scharmer and Greif, 2000, p. 139].

### 4.3 Reflekteret stråling

Den reflekterede solstråling på en skrå flade bestemmes som den diffust reflekterede stråling fra jordoverfladen. Den reflekterede stråling afhænger af den globale solstråling på vandret fra referenceåret, jordens albedo og den andel af jordoverfladen der ses af fladen [Scharmer and Greif, 2000, p. 140].

### 4.4 Diffus stråling

I European Solar Radiation Atlas [Scharmer and Greif, 2000] vurderes flere forskellige algoritmer til omregning af solstrålingsdata og det anbefales at bruge algoritmer af Muneer eller Perez til omregning af solstrålingsdata ud fra vejrdata med timeværdier. Muneers metode er beskrevet i European Solar Radiation Atlas [Scharmer and Greif, 2000, p. 142-143]. Perez metode er beskrevet i [Perez et al., 1990].

Både Muneer og Perez benytter i algoritmerne en vurdering af om himlen er klar eller overskyet. Perez metode benytter ikke oplysninger om skydækket og er således simplere at benytte og risikoen for forskellige fortolkninger af algoritmen er minimal. Perez metode vurderer om der er tale om klar eller overskyet himmel

vha. et udtryk for klarheden baseret på størrelserne af den diffuse stråling på vandret og den direkte normalstråling fra referenceåret. På baggrund af denne sammenligning af solalgoritmerne er det valgt at benytte Perez solalgoritmer i forbindelse med energiklassifikation af ruder og vinduer.

Ved projektets start benyttede BSim kun solalgoritmer af Petersen. I forgængerens tsbi3 kunne der vælges mellem algoritmer af Muneer, Petersen og Lund.

Bv98 udnytter metoden beskrevet i SBI anvisning 184 og anvender tabellerede månedsmiddelværdier for solindfald for forskellige hældninger og orienteringer samt for udetemperatur. Omregning til solstråling på flader med hældning og orientering forskellig fra de tabellerede værdier foretages ved interpolation.

## 5 Sammenligning af beregnet solindfald

Det totale solindfald givet som summen af direkte, diffus og reflekteret solstråling på en given flade sammenlignes for tre forskellige benyttede beregningsmodeller. De tre modeller er BSim og Bv98, der udvikles af By og Byg, og solalgoritmer, der benyttes af BYG.DTU i forbindelse med energimærkning af ruder og i beregningsværktøjer. Ved beregningerne ses bort fra nære og fjerne skyggegivere og det antages at jordens albedo er 0,2.

Data fra BSim er beregnet som summen af parametrene DirRad, SkyRad og GroundRad for en konstruktion på en flade med den aktuelle orientering og hældning når vejrdatabasen "Danmark.dry" benyttes. Værdierne for Bv98 er fundet ud fra værdierne i databasen "Dk.cli". Solindfaldet beregnet af BYG.DTU er beregnet på timebasis ud fra normal strålingen og den diffuse stråling på vandret fra det danske Design Reference Year (identisk med Danmark.dry i BSim).

Tabel 1 viser det årlige solindfald delt op på direkte, diffus og reflekteret solstråling for lodrette flader med forskellige orienteringer beregnet med BSim og af BYG.DTU ved projektets start. Der observeres forskelle for de direkte og diffuse bidrag. BSim har implementeret Petersen solalgoritme hvorimod BYG.DTU benytter Perez solalgoritme. For at harmonisere beregningerne i BSim og ved BYG.DTU identificeres flere forskelle mellem beregningerne. Hovedsageligt benyttes forskellige algoritmer til beregning af solens placering og til beregning af den diffuse solstråling. Desuden beregnes solens position på forskellige tider indenfor hver time. Efter disse forskelle er identificerede implementeres de solalgoritmer der benyttes af BYG.DTU i BSim. Det drejer sig om beregning af solens placering ifølge algoritmer fra European Solar Radiation Atlas [Scharmer and Greif, 2000, p. 105-114] og beregning af diffust bidrag ifølge Perez algoritme [Perez et al., 1990]. I Tabel 2 sammenligner resultaterne fra BSim og BYG.DTU efter ændringerne og der ses en bedre overensstemmelse mellem resultaterne. Der er stadig små forskelle hvilket skyldes at der stadig er små forskelle i implementeringen af algoritmerne såsom hvor ofte solens placering beregnes indenfor hver time.

Tabel 1. Resultater ved projektets start. Direkte, diffus og reflekteret årligt solindfald i kWh/m<sup>2</sup> på lodret flade med forskellig orientering.

	BSim2000 (Petersen)			BYG.DTU		
	Direkte	Diffus	Reflekteret	Direkte	Diffus	Reflekteret
Nord	26	221	100	25	213	100
Syd	465	288	100	470	338	100
Øst	303	260	100	283	287	100
Vest	245	254	100	266	287	100

Tabel 2. Resultater af harmoniserede solberegninger. Direkte, diffus og reflekteret årligt solindfald i kWh/m<sup>2</sup> på lodret flade med forskellig orientering.

	BSim2002 (v. 3,2,7,25) (Perez)			BYG.DTU		
	Direkte	Diffus	Reflekteret	Direkte	Diffus	Reflekteret
Nord	26	213	100	25	213	100
Syd	467	337	100	470	338	100
Øst	283	288	100	283	287	100
Vest	267	288	100	266	287	100

Tabel 3 angiver det årlige solindfald på en lodret flade med forskellig orientering efter ændringerne ifølge BSim, Bv98 og BYG.DTU. Som det ses er der god overensstemmelse mellem resultater fra BSim og BYG.DTU hvilket er at forvente når samme vejrdata og solberegninger anvendes. Der er således opnået en ensartet beregning mellem BSim og BYG.DTU. En mere detaljeret sammenligning og diskussion af vejrdata i Bv98 fremgår af notat fra By og Byg [Aggerholm, 2002].

Tabel 3. Årligt total solindfald i kWh/m<sup>2</sup> på lodrette flader med forskellig orientering.

	BSim2002 (Perez)	Bv98	BYG.DTU (Perez)
Nord	339	361	338
Syd	905	955	908
Øst	671	714	670
Vest	655	714	653

## 6 Korrektion for indfaldsvinkel

En rudes evne til at transmittere direkte solstråling afhænger af solstrålingens indfaldsvinkel. For at tage hensyn til dette bestemmes den vinkelafhængige solenergitransmittans for direkte solstråling af udtrykket

$$g_{\text{corr}} = g \cdot f_{i,\text{dir}}$$

hvor korrektionsfaktoren  $f_{i,\text{dir}}$  afhænger af indfaldsvinklen og  $g$  er den totale solenergitransmittans ved en indfaldsvinkel på  $i=0^\circ$ .

I energimærkningsordningen bestemmes korrektionsfaktoren som funktion af indfaldsvinklen i grader af

$$f_{i,\text{dir}} = 1 - \tan^n(i/2)$$

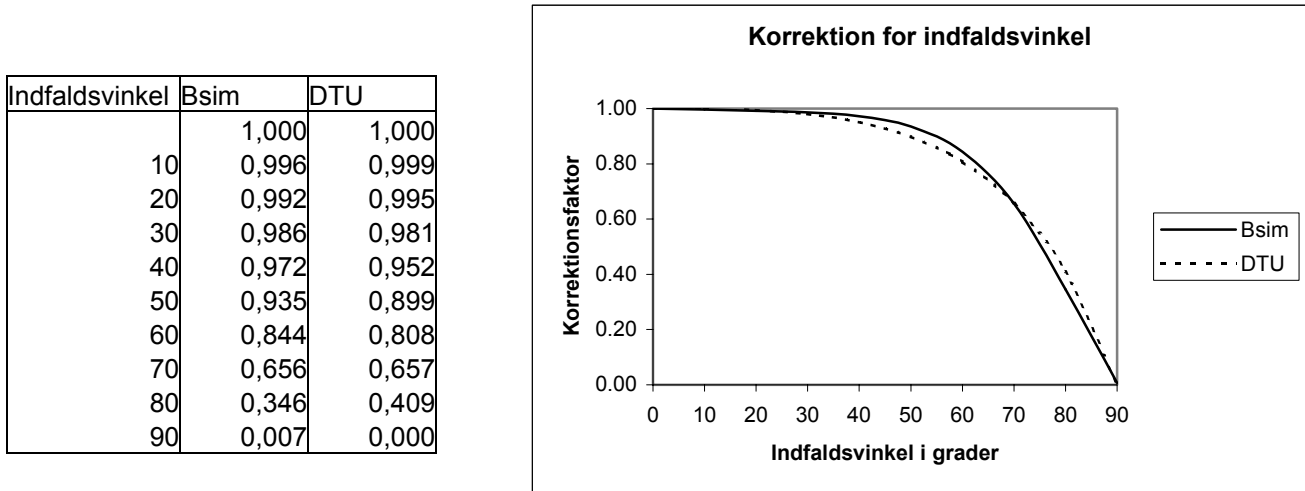
Faktoren  $n$  er bestemt vha. programmet WIS og som gennemsnit for energiruder med 2 lag glas benyttes værdien  $n = 3$ .

I BSim bestemmes korrektionsfaktoren som funktion af indfaldsvinklen i grader af

$$f_{i,\text{dir}} = 1 - 0.04 \cdot \frac{i}{100} - \left( 2.933 - 2.13 \cdot \left( \frac{i}{100} \right)^6 \right) \cdot \left( \frac{i}{100} \right)^6$$

indenfor de øvre og nedre grænser  $f_{i,dir} = 1$  og  $f_{i,dir} = 0$ .

Figur 1 viser korrektionsfaktorerne for indfaldsvinkler mellem  $0^\circ$  og  $90^\circ$  beregnet med de to udtryk.



Figur 1. Korrektion af solenergitransmittans for indfaldsvinkel

Korrektionen i BSim er uafhængig af rudens type mens korrektionen i energimærkningsordningen kan varieres for forskellige typer ruder ved parametren  $n$ . En bedre model til korrektion for indfaldsvinklen bestemmer korrektionsfaktoren ud fra antallet af glaslag,  $p$ , og en kategoriparameter,  $q$ , mellem 1 og 10, der afhænger af rudens type, af følgende udtryk [Karlsson og Roos, 2000].

$$f_{i,dir} = 1 - a \cdot z^\alpha - b \cdot z^\beta - c \cdot z^\gamma$$

hvor  $z = i/90^\circ$ ,  $a = 8$ ,  $b = 0,25/q$ ,  $c = 1-a-b$ ,  $\alpha = 5,2+0,7 \cdot q$ ,  $\beta = 2$  og  $\gamma = (5,26+0,06 \cdot p)+(0,73+0,04 \cdot p) \cdot q$  og  $i$  er indfaldsvinklen i grader.

En rudes evne til at transmittere diffus og reflekteret solstråling baseres på den diffuse solenergitransmittans. Solenergitransmittansen for diffus solstråling bestemmes ud fra den totale solenergitransmittans af udtrykket

$$g_{dif} = g \cdot f_{i,dif}$$

hvor korrektionsfaktoren  $f_{i,dif}$  i energimærkningsordningen er bestemt vha. programmet WIS til  $f_{i,dif} = 0,86$  for to-lags energiruder. Solenergitransmittansen for diffus solstråling er i BSim lig den direkte solenergitransmittans ved en indfaldsvinkel på  $60^\circ$  dvs.  $f_{i,dif} = 0,84$ .

## 7 Korrektion for skygger

I BSim er det muligt at korrigerer solindfaldet for nære og fjerne skygger. Skyggekorrektionen er baseret på en detaljeret beregning af det vinduesareal der er dækket af skygge for hver time. Kun den direkte solstråling korrigeres for skygger.

I Bv98 inddrages nære og fjerne skygger ved hjælp af skyggefaktorer. Skyggefaktoren vurderes ud fra en tabel på baggrund af størrelsen af udhæng og sidefiner samt en horisontafskæring. Skyggefaktoren er en middelværdi for alle måneder.

## 8 Konklusion

### 8.1 Solens position og solindfald på skrå flader

Et grundlag for beregning af solindfald på skrå flader baseres på algoritmer fra European Solar Radiation Atlas til bestemmelse af solens position [Scharmer and Greif, 2000, p. 105-114], den direkte solstråling på en skrå flade [Scharmer and Greif, 2000, p. 139] og den reflekterede solstråling på en skrå flade [Scharmer and Greif, 2000, p. 140]. Den diffuse solstråling på en skrå flade bestemmes vha. Perez solalgoritmer [Perez et al., 1990]. De enkelte bidrag til solindfaldet på skrå flader kan beregnes på baggrund af direkte normal stråling og diffus solstråling på vandret fra målt vejrdata eller referenceår. I appendix 1 er vedlagt de Matlab funktioner til beregning af solens position og solindfald på skrå flader der er benyttet af BYG.DTU i forbindelse med dette projekt.

### 8.2 Korrektion for indfaldsvinkel og skygger

Den totale solenergitransmittans korrigeres for indfaldsvinkel ved at benytte metoden beskrevet af Karlsson og Roos [2000]. Denne metode kræver kendskab til antallet af glaslag i ruden og en kategoriparameter, der afhænger af rudens type. Korrektionsfaktoren for diffus og reflekteret solstråling kan beregnes ved en effektiv indfaldsvinkel vurderet ud fra fladens hældning. Den effektive indfaldsvinkel for diffus himmelstråling,  $i_{dif}$ , og den effektive indfaldsvinkel for reflekteret stråling fra jordoverfladen,  $i_{ref}$ , kan bestemmes af [Duffie and Beckman, 1991]

$$i_{dif} = 59.7 - 0.1388 \cdot h + 0.001497 \cdot h^2$$

$$i_{ref} = 90 - 0.5788 \cdot h + 0.002693 \cdot h^2$$

hvor  $h$  er fladens hældning i grader.

Korrektion for nære og fjerne skygger kan foretages ved at benytte skyggekorrektionsfaktorer,  $f_s$ . Det anbefales at en skyggekorrektion af den direkte solstråling baseres på en detaljeret beregning af det vinduesareal der er dækket af skygge for hver time. Skyggekorrektion for diffus og reflekteret solstråling behandles ikke detaljeret i denne rapport men der kan for fjerne skygger henvises til metoden benyttet i Meteororm [Meteororm].

I programmer som Bv98, der benytter månedsmiddelværdier for solindfaldet, kan en korrektion for indfaldsvinkel inkluderes vha. månedsvise korrektionsfaktorer. Disse korrektionsfaktorer kan tabelleres ud fra antallet af glaslag, rudens kategoriparameter og skyggegeveren. For en given periode kan korrektionsfaktoren der korrigerer den transmitterede solstråling mht. indfaldsvinklen og skygger bestemmes af summen af det korrigerede solindfald på timebasis divideret med summen af det ukorrigerede solindfald på timebasis ud fra følgende udtryk

$$F = \frac{\sum (I_{dir} \cdot f_{i,dir} \cdot f_{s,dir} + I_{dif} \cdot f_{i,dif} \cdot f_{s,dif} + I_{ref} \cdot f_{i,ref} \cdot f_{s,ref})}{\sum (I_{dir} + I_{dif} + I_{ref})}$$

hvor  $I_{dir}$  er den direkte solstråling på fladen for en given time,  $I_{dif}$  er den diffuse solstråling på fladen for en given time,  $I_{ref}$  er den reflekterede solstråling på fladen for en given time,  $f_{i,dir}$ ,  $f_{i,dif}$  og  $f_{i,ref}$  er timevise korrektionsfaktorer for vinkelafhængighed for hhv. direkte, diffus og reflekteret solstråling som funktion af indfaldsvinklen for direkte solstråling,  $i_{dir}$ , og de effektive indfaldsvinkler for diffus og reflekteret stråling,  $i_{dif}$  og  $i_{ref}$ , og  $f_{s,dir}$ ,  $f_{s,dif}$  og  $f_{s,ref}$  er timevise korrektionsfaktorer for skygger for hhv. direkte, diffus og reflekteret solstråling.

## 9 Litteratur

Aggerholm, S. (2002) Harmonisering af grundlaget for beregning af energitilskud fra vinduer. Notat.

Duffie, J. A. og Beckman, W. A. (2001) *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & sons, Inc., New York.

Hansen, H. E., Kjerulf-Jensen, P. og Stampe, O. B. (1997) *Varme- og klimateknik. Grundbog*. Danvak Aps. 2. udgave.

Jensen, J. M. og Lund, H. (1995) *Design reference year, DRY – Et nyt dansk referenceår*. Meddelelse nr. 281. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Universitet.

Nielsen, T. R., Svendsen, S., Duer, K., Schultz, J. M., Mogensen, M. M. og Laustsen, J. B. (1999) *Ruder og vinduers energimæssige egenskaber. Kompendium 1: Grundlæggende energimæssige egenskaber*, Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet.

Karlsson, J. og Roos, A. (2000) Modelling the angular behavior of the total solar energy transmittance of windows. *Solar energy*, Vol. 69, No. 4.

Meteonorm. (2000) *Meteotest*. Bern, Switzerland.

Perez, R., Ineichen, P. og Seals, R. (1990) Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance, *Solar Energy*, vol. 44, p. 271-289.

Scharmer, K. og Greif, J. (coordinators) (2000) *The European Solar Radiation Atlas*, Ecole des Mines de Paris, vol. 2.



# Appendix 1.

## *Matlab funktion til beregning af solens position*

```
function [LAT,delta,omega,gamma_s,psi_s,alpha_s,tr,ts,omega_s]=sun(day,lst,y,lat,lon,lsm);

%SUN calculates the position of sun on the sky at times corresponding to vectors
%
%[LAT,delta,omega,gamma_s,psi_s,alpha_s,tr,ts,omega_s]=sun(day,lst,y,lat,lon,lsm)
%
%LAT: time in LAT (solar time) [h]
%delta: Vector containing declination [deg]
%omega: Vector containing hour angle [deg]
%gamma_s: Vector containing solar elevation [deg]
%psi_s: vector containing solar zenith [deg]
%alpha_s: Vector containing solar azimuth [deg]
%tr: Vector containing sunrise in local standard time [h]
%ts: Vector containing sunset in local standard time [h]
%
%day: vector containing day numbers
%lst: vector containing local standard time [h]
%y: year
%lat: latitude [deg] (optional: default Copenhagen 55.5 deg)
%lon: longitude [deg] (optional: default Copenhagen 12.5 deg)
%lsm: local standard time meridian (optional: default Copenhagen 15 deg)
%
%Numbers refer to formulaes in The European Radiation Atlas
%
%References:
%           The European Solar Radiation Atlas
%           École des Mines de Paris, 2000
%
% Duffie & Bechmann
%
%Written by: Toke Rammer Nielsen
%Creation date: 6 dec. 2000
%Last modified: 18 sep. 2001

if nargin==3
    lat=55.5;
    lon=12.5;
    lsm=15;
elseif nargin==2
    lat=55.5;
    lon=12.5;
    lsm=15;
    y=inf;
elseif nargin<2
    error('Wrong input')
end

%deg to rad
dg_rd=2*pi/360;
lat=dg_rd*lat; %[rad]
lon=dg_rd*lon; %[rad]
lsm=dg_rd*lsm; %[rad]
```

```

%Declination
day_1=2*pi*day/365.25; %(3.3.4)
if y==inf
    delta=23.45*sin(dg_rd*360*(284+day)/365)*dg_rd; %Simple [rad] (Duffie & Bechmann)
else
    %More precise calculation of delta with y as the year
    n0=78.8946+0.2422*(y-1957)-floor((y-1957)/4); %(3.3.2e)
    omega0=2*pi/365.2422; %(3.3.2d)
    t1=-0.5-lon/(2*pi)-n0; %(3.3.2c)
    omegat=omega0*(day+t1); %(3.3.2b)
    delta=0.0064979+0.405906*sin(omegat)+0.0020054*sin(2*omegat)-
0.002988*sin(3*omegat)...
    -0.0132296*cos(omegat)+0.0063809*cos(2*omegat)+0.0003508*cos(3*omegat); %[rad]
(3.3.2a)
end

%Time in LAT
ET=-0.128*sin(day_1-0.04887)-0.165*sin(2*day_1+0.34383); %[h] (3.3.22)
c=0; %Correction for summertime not used
LAT=lst+ET+12*((lon-lsm)/pi)-c; %[h] (3.3.23)

%Hour angle
omega=(LAT-12)*pi/12; %[rad] (3.3.1)

%Solar elevation
gamma_s=asin(sin(lat)*sin(delta)+cos(lat)*cos(delta).*cos(omega)); %[rad] (3.3.5)

%Solar zenith
psi_s=pi/2-gamma_s; %[rad] (3.3.6)

%Solar azimuth
sine_alpha_s=cos(delta).*sin(omega)./cos(gamma_s); %(3.3.9)
cosine_alpha_star=(sin(lat)*sin(gamma_s)-sin(delta))./(cos(lat)*cos(gamma_s)); %(3.3.8)
logic=(sine_alpha_s<0);
alpha_s=logic.*(-acos(cosine_alpha_star))+(logic==0).*acos(cosine_alpha_star); %[rad] (3.3.7)

%Sunrise and sunset (with refraction)
check=(sin(-0.0145444)-sin(lat)*sin(delta))./(cos(lat)*cos(delta));
omega_s=acos(check); %(3.3.10)
logic1=check>=1;
logic2=check<=-1;
omega_s=(logic1==0 & logic2==0).*omega_s+logic1*0+logic2*pi; %[rad]

tr=12-12/pi*omega_s-ET-12*((lon-lsm)/pi)+c; %(3.3.13a) in local standard time
ts=12+12/pi*omega_s-ET-12*((lon-lsm)/pi)+c; %(3.3.13b) in local standard time

%rad to dg
rd_dg=360/(2*pi);
delta=rd_dg*delta;
omega=rd_dg*omega;
gamma_s=rd_dg*gamma_s;
psi_s=rd_dg*psi_s;
alpha_s=rd_dg*alpha_s;
omega_s=rd_dg*omega_s;

```

## *Matlab funktion til beregning af solstråling på skrå flader*

```
function [E,i,alpha_f,gamma_v]=irrad(day,lst,Dh,En,cloud,alpha,beta,y,lat,lon,lsm,albedo);

%IRRAD calculates solar radiation, angle of incidence, horisontal shadow angle
%          and vertical shadow angle on inclined surface at times corresponding to vectors
%          on sloped surfaces
%
%[E,i,alpha_f,gamma_v]=irrad(day,lst,Dh,En,alpha,beta,lat,lon,lsm,albedo)
%
%E(1,:): direct solar radiation on inclined surface [W/m2]
%E(2,:): diffuse solar radiation on inclined surface [W/m2]
%E(3,:): refelcted solar radiation on inclined surface [W/m2]
%E(4,:): total solar radiation on inclined surface [W/m2]
%i: angle of incidence [deg]
%alpha_f: Horisontal shadow angle [deg]
%gamma_v: Vertical shadow angle [deg]
%
%day: vector containing day numbers
%lst: vector containing local standard time [h]
%Dh: diffuse horisontal irradiation [W/m2]
%En: direct normal irradiation [W/m2]
%cloud: Total cloud cover [00..80] Set to 0 no clouds or 80 if clouded. NOT USED !!
%alpha: azimuth angle of the surface [deg],
%       east:alpha = -90, west:alpha = 90
%       south:alpha = 0, north:alpha = 180
%beta: inclination angle of the surface [deg],
%       horizontal: beta=0, vertical: beta=90
%y: year (set year to inf to use mean calculation of declination)
%lat: lattitude [deg] (optional: default Copenhagen 55.4 deg)
%lon: longitude [deg] (optional: default Copenhagen 12.19 deg)
%lsm: local standard time meridian (optional: default Copenhagen 15 deg)
%albedo: ground reflectivity (optional: default 0.2)
%
%Numbers refer to formulaes in The European Radiation Atlas
%
%References:
%          The European Solar Radiation Atlas
%          École des Mines de Paris, 2000
%
%Functions
%          Uses sun.m
%
%Written by: Toke Rammer Nielsen
%Creation date: 5 dec. 2000
%Last modified: 4 jan. 2001

if nargin==11
    albedo=0.2;
elseif nargin==8
    lat=55.4;
    lon=12.19;
    lsm=15;
    albedo=0.2;
elseif nargin==7
    lat=55.4;
```

```

lon=12.19;
lsm=15;
albedo=0.2;
y=inf;
elseif (nargin<7) | (8<nargin & nargin<11)
    error('Wrong input arguments');
end

logic=cloud>80;
cloud=(logic==0).*cloud+logic.*80;

%Solar position
[LAT,delta,omega,gamma_s,psi_s,alpha_s,tr,ts,omega_s]=sun(day,lst,y,lat,lon,lsm);

%deg to rad
dg_rd=2*pi/360;
lat=dg_rd*lat; %[rad]
lon=dg_rd*lon; %[rad]
lsm=dg_rd*lsm; %[rad]
alpha=dg_rd*alpha; %[rad]
beta=dg_rd*beta; %[rad]
delta=dg_rd*delta;
omega=dg_rd*omega;
gamma_s=dg_rd*gamma_s;
psi_s=dg_rd*psi_s;
alpha_s=dg_rd*alpha_s;
omega_s=dg_rd*omega_s;

day_1=2*pi*day/365.25; %(3.3.4)

%Incidence angle
cosine_theta_star=cos(omega).*(cos(delta).*(cos(lat)*cos(beta)+cos(alpha)*sin(lat)*sin(beta)))...
    +sin(omega).*(cos(delta)*sin(alpha)*sin(beta))+sin(delta).*(sin(lat)*cos(beta)-cos(lat)*sin(beta)*cos(alpha));
%(3.3.16)
logic=cosine_theta_star>0;
theta=logic.*acos(cosine_theta_star)+(logic==0).*pi/2; %[rad] (3.3.15)
theta2=acos(cosine_theta_star);

%sun path
alpha_f_star=alpha_s-alpha;
logic1=alpha_f_star>pi;
logic2=alpha_f_star<-pi;
alpha_f=(logic1==0 & logic2==0).*alpha_f_star+logic1.*(alpha_f_star-2*pi)+logic2.*(alpha_f_star+2*pi);
%[rad] (3.3.20)

gamma_v_star=atan(tan(gamma_s)./cos(alpha_f)); %(3.3.21a)
logic=gamma_v_star<0;
gamma_v=(logic==0).*gamma_v_star+logic.*(gamma_v_star+pi/2); %[rad] (3.3.21b)

%Sky and ground
ri=(1+cos(beta))/2; %(3.3.24)
rg=(1-cos(beta))/2; %(3.3.25)

%%% RADIATION CALCULATIONS %%%
%Direct solar radiation on sloped surface
logic=(cos(theta)<0 | cos(psi_s)<0);
E(1,:)=(logic==0).*En.*cos(theta)+logic.*0; %[Wh/m2] (3.6.2)

```

```

%Reflected solar radiation on sloped surface
logic=cos(psi_s)<0;
Bh=(logic==0).*En.*cos(psi_s)+logic.*0;
E(3,:)=albedo.*(Bh+Dh)*rg; %[Wh/m2](3.6.4)

%Diffuse irradiation
%Perez "Solar Energy" 1990
%Air mass
m=1./(cos(psi_s)+0.15./((93.885-180/pi*psi_s).^1.253));
logic_m=m>0;
m=logic_m.*m+(logic_m==0)*0;

%Extraterrestrial radiation
e_0=1367; %[W/m2]
E_on=e_0*(1+0.033*cos(dg_rd*360*day/365)); %[W/m2]

    %DETERMINING f11, f12, f13, f21, f22, f23
    logic_Dh=(Dh>0);
    a=1.041*psi_s.^3;
    Dha=Dh+(logic_Dh==0)*1; %To avoid division by zero
    eps=logic_Dh.*(((Dha+En)./Dha+a)./(1+a))+(logic_Dh==0)*1000;

    logic1=(0<=eps & eps<=1.065);
    logic2=(1.065<eps & eps<=1.23);
    logic3=(1.23<eps & eps<=1.5);
    logic4=(1.5<eps & eps<=1.95);
    logic5=(1.95<eps & eps<=2.8);
    logic6=(2.8<eps & eps<=4.5);
    logic7=(4.5<eps & eps<=6.2);
    logic8=(6.2<eps & eps <=inf);

%Perez fra 1990 "Solar Energy"
f11=logic1*(-0.008)+logic2*0.130+logic3*0.330+logic4*0.568+logic5*0.873+logic6*1.132+logic7*1.060...
+logic8*0.678;
f12=logic1*(0.588)+logic2*0.683+logic3*0.487+logic4*(0.187)+logic5*(-0.392)+logic6*(-
1.237)+logic7*(-1.6)+...
    logic8*(-0.327);
f13=logic1*(-0.062)+logic2*(-0.151)+logic3*(-0.221)+logic4*(-0.295)+logic5*(-0.362)+logic6*(-
0.412)+logic7*(-0.359)+...
    logic8*(-0.25);
f21=logic1*(-0.06)+logic2*(-0.019)+logic3*0.055+logic4*0.109+logic5*0.226+logic6*0.288+logic7*0.264...
+logic8*0.156;
f22=logic1*(0.072)+logic2*0.066+logic3*(-0.064)+logic4*(-0.152)+logic5*(-0.462)+logic6*(-
0.823)+logic7*(-1.127)+...
    logic8*(-1.377);
f23=logic1*(-0.022)+logic2*(-0.029)+logic3*(-0.026)+logic4*(-
0.014)+logic5*(0.001)+logic6*(0.056)+logic7*0.131+...
    logic8*0.251;

%Determining F1, F2

F1=f11+f12.*Delta+psi_s.*f13;
F2=f21+f22.*Delta+psi_s.*f23;

a=max(0,cos(theta));
b=max(0.087,cos(psi_s));

```

```
%Diffuse solar radiation on inclined surface
E(2,:)=Dh.*((1-F1).*(1+cos(beta))/2+F1.*a./b+F2.*sin(beta)); %[W/m2]
```

```
%Global radiation on sloped surface
E(4,:)=E(1,:)+E(2,:)+E(3,:); %[Wh/m2] (3.6.1)
```

```
%Angles in degrees
i=180/pi*theta; %[deg]
alpha_f=180/pi*alpha_f; %[deg]
gamma_v=180/pi*gamma_v; %[deg]
```