

SOLIND
PROGRAM TIL BEREGNING AF SOLINDFALD
PÅ FACADER, PÅ TAGE OG GENNEM VINDUER

AF
HANS LUND
LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE



APRIL 1977
MEDDELELSE NR 69
2. UDGAVE

Solind

<u>Indhold</u>	side
<u>Generelt</u>	2
<u>Beregningsdata</u>	2
<u>Resultater</u>	5
<u>Kort-output</u>	5
<u>Bilag:</u> Algoritmer.....	6
Kontrol på indgangsdata.....	6
Dagnummer.....	6
Tidsjævning.....	6
Stedtiden.....	7
Solens højde og azimuth.....	7
Solindfald på facade og tag.....	8
Direkte stråling.....	8
Diffus himmelstråling.....	9
Reflekteret stråling fra jorden.....	9
Transmissionsfaktorer for vinduet og absorptionen i de enkelte ruder.....	9
Stråling gennem vinduet.....	11
Vindue med udhæng.....	12
Vindue med lodrette ribber ved siden.....	12
Vindue med både udhæng og ribbe.....	13

Maj 1975

Rev. april 1977

SOLIND

PROGRAM TIL BEREGNING AF SOLINDFALD
PÅ FACADER, PÅ TAGE OG GENNEM VINDUER

For de projekterende arkitekter og ingeniører er det vigtigt at vide, hvor stort et varmetilskud solen kan give i et rum, når den opvarmer bygningens ydervægge og tag eller kommer direkte ind i rummet gennem vinduet.

Det har endvidere betydning at vide, hvor meget solvarme der kommer ind gennem vinduerne som direkte solstråling, som diffus himmelstråling og som reflekteret stråling fra jorden.

Dette program udfører en sådan beregning for en klar, skyfri solskinsdag.

Programmet foreligger i flere udgaver. Den her omtalte er den, der køres på NEUCC's IBM 370/165, men den vil kunne køres på meget mindre maskiner. Programmet er skrevet i FORTRAN IV og hullet i EBCDIC-kode.

Beregningsdata

Til beregningen behøves følgende oplysninger:

1. kort: Geografisk breddegrad (nordlig 0°-90°, sydlig 0°-÷90°)
Væggens orientering (syd 0°, øst -90°, vest 90°, nord 180 eller -180°, eller værdier derimellem)
Evt. taghældning (større end 0° (~ vandret), mindre end 90° (~ lodret))
Eventuelt indikator 1., hvis resultater ønskes i kcal/hm² og kcal/h i stedet for W/m² og W.
2. kort: Dag og måned
Stedtidstillæg i minutter. For København -10.
Hvis stedtidstillæg ikke angives, eller angives som 0., udføres beregningen for "sand soltid", d.v.s. at tidsjævningen heller ikke beregnes.

3. kort: Atmosfærens klarhed (extinktionskoefficient, 0,14-0,20 i ren landluft, 0,16-0,24 i bymæssig bebyggelse, op til 0,30 i udprægede storby- eller industriområder. Tallet afhænger foruden af støvindhold og CO₂ også af luftens vanddampindhold, hvorfor det kan regnes lavest i januar-februar og højest i juli-august. For sommerforhold her i landet kan man skønne en værdi 0,22).
- Refleksionskoefficient for jordoverfladen foran facaden. (Almindeligvis kan regnes 0,25 for græs-mark, 0,2 for asfalt, 0,8 for sne).
4. kort: Glastykkelse og antal glaslag.
5. kort: Vindueshøjde og -bredde (glasmål m)
6. kort: Udhæng over vinduet, højde over glassets overkant og fremspring (m).
7. kort: Ribber ved siden af vinduet, afstand fra nærmeste glaskant og fremspring (m).

Data hules i kort, første kort med breddegrad, vægorientering, evt. taghældning og evt. indikator for resultater givet i kcal/h (FORMAT 4F10.2), følgende kort med to eller tre data hver (FORMAT 3F10.2), ialt 7 kort.

Efterfølgende datasæt kan specificeres med kun eet kort (FORMAT 3F10.2) med indholdet:

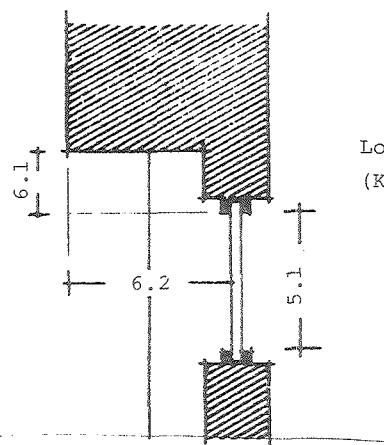
999.X AAA.AA BBB.BB

hvor X er nummeret på det kort i det forudgående datasæt, hvis værdipar skal ændres (f.eks. 999.2, hvis dag og måned skal ændres), og AAA.AA BBB.BB er de nye værdier, der skal indsættes.

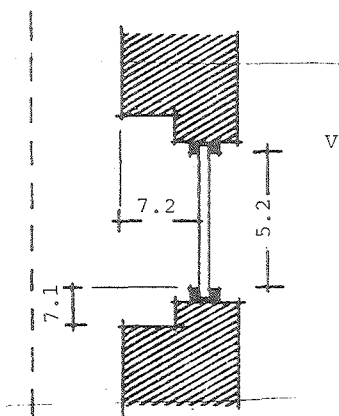
Ved ændringer til første datakort kan kun vægorientering og taghældning ændres, ikke geogr. breddegrad. I andet datakort kan kun dag og måned ændres, ikke stedtidstillæg.

Hvis der er ændringer i mere end eet værdipar fra een beregning til den næste, kan man i stedet for et 999.-kort indlægge et helt sæt på 7 kort.

NB Hvis der specificeres en taghældning, bør der ikke samtidig regnes med skyggende udhæng eller ribber.



Lodret snit gennem vindue.
(Kortnummer. Datanummer)



Vandret snit i vindue.

Resultater

Beregningen giver time for time dels solens koordinater (højde og aximuth), dels solindfaldet på facade eller tag (W/m^2) og dels solindfaldet gennem et vindue (W), og til slut døgnsummerne. Solindfaldet er opdelt i direkte, diffust og reflekteret, og hvis der er specificeret skyggende udhæng eller ribbe, angives solindfaldet gennem vindue dels uden, dels med solafskærmning.

De angivne klokkeslet er "lokal tid", såfremt et stedtidstillæg er angivet, ellers "sand soltid".

I de angivne solindfald gennem vindue er ikke indregnet det sekundære solindfald, d.v.s. den del af solvarmen, der absorberes af vinduesglasset og herfra afgives ind i rummet til rumluften og som mørk varmestråling.

Endelig er angivet, hvor stor en del af den direkte solstråling der kommer igennem den angivne glaskonstruktion som primær (kortbølget) stråling for indfaldsvinkler $\leq$ ca. 45° (TDIR), og hvor stor en del af den samlede diffuse og reflekterede stråling (TDIF) der kommer igennem som primær stråling.

Kort-output

Resultaterne kan fås udhullet i kort ved efter et datasæt at lægge et kort med indholdet:

991. CC. DD.

hvor CC. og DD. er numrene på de kolonner i udskriften, der ønskes udhullet, idet klokkeslet ikke tælles med. FORMAT (3F10.2).

Eksempel:

991. 2. 9. vil give hullet output med azimuth og med totalt solindfald gennem uafskærmet vindue.

Kort-output har et antal kort med klokkeslet og værdi (FORMAT (F5.2,5x,F10.2)). Der hules kort ud for kl. 0, kl. 24 og for hver heltime, hvor solen er over horisonten, samt for solopgang og solnedgang.

Maj 1975

Bilag 1.

Algoritmer benyttet i programmet "SOLIND".

Kontrol på indgangsdata

Fejludskrift fremkommer, hvis nedenstående grænser overskrides.

Breddegrad $-90^\circ \leq A(1,1) \leq +90^\circ$ (90° syd - 90° nord)

Vægorientering $-180^\circ \leq A(2,1) \leq +180^\circ$ (regnet fra syd)

Taghældning $0^\circ < A(3,1) \leq +90^\circ$ (regnet fra vandret)

$A(3,1) = 0^\circ$ bevirker, at beregning gennemføres for en lodret væg. For et vandret tag må derfor angives

$A(3,1) = 0,1^\circ$.

$A(3,1) < 0^\circ$ giver ikke umiddelbart fejludskrift, men resultaterne bliver i nogle tilfælde urimelige.

Dag $1 \leq A(1,2) \leq 31$

Måned $1 \leq A(2,2) \leq 12$

Stedtid ingen grænser

Extinktionskoeff. $0,05 \leq A(1,3) \leq 0,5$

Refleksionskoeff. $0 \leq A(2,3) \leq 1,0$

Glas- og vinduesangivelser er interlocked således, at negative mål ikke accepteres, og såfremt der er angivet glasantal og -tykkelse, skal der også være angivet vindueshøjde og -bredde.

Der er ingen begrænsning på antallet af glaslag, men for mere end 10 glaslag angives kun absorptionen i de 10 yderste lag, og TSEK, det sekundære solindfald fra vinduesfladen, er meningsløs.

Beregningen gennemføres med resultater angivet i SI-systemet. Ønskes i stedet resultaterne angivet i kcal/h, anføres tallet 1. som fjerde parameter i første kort (kol 41-50).

Beregning af dagnummer DN

DN = dag + dagantal i de foregående måneder. Februar regnes altid til 28 dage.

Beregning af tidsjævning TEQ

Udføres kun, hvis stedtid $A(3,2)$ er angivet forskellig fra 0. Stedtid og tidsjævning beregnes i minutter. For stedtid = 0 eller ikke angivet regnes i sand soltid. For stedtid $\neq 0$ regnes i lokaltid, og tidsjævningen medregnet. Ønskes for lokaliteter med stedtid = 0 beregnet tidsjævning, må stedtiden angives f.eks. som 0.1.

For	$0 < DN \leq 20$	$TEQ = -2.6 - 0.44 \cdot DN$
	$21 \leq DN \leq 135$	$TEQ = -5.2 - 9.0 \cdot \cos((DN-43) \cdot 0.0357)$
	$136 \leq DN \leq 240$	$TEQ = -1.4 + 5.0 \cdot \cos((DN-135) \cdot 0.0449)$
	$241 \leq DN \leq 335$	$TEQ = 6.3 + 10.0 \cdot \cos((DN-306) \cdot 0.0360)$
	$336 \leq DN \leq 365$	$TEQ = -0.46 \cdot (DN - 359.0)$

Stedtiden ($A(3,2)$) angives som det antal minutter, uret vil være foran (-) eller bagefter (+) middelsoltid.

Bornholm	0 min	København	-10 min
Kalundborg	-12 -	Ålborg	-14 -
Esbjerg	-17 -		

Idet I er klokkeslettet, beregnes sand soltid TP, som bruges i beregningen:

$$TP = I + TEQ/60 + A(3,2)/60$$

TP omregnes derefter til radian, timevinkel.

Beregning af solens højde og azimuth

Geografisk bredde BR ($\sim A(1,1)$)

Timevinkel TP

Solens deklination VA beregnes ud fra dagnummer DN:

$$VA = 0.33 - 22.96 \cos DF - 0.37 \cos 2DF - 0.15 \cos 3DF + 4.00 \sin DF$$

hvor $DF = DN \cdot \pi / 182.5$.

Solhøjden H beregnes af:

$$\sin H = \sin VA \cdot \sin BR - \cos VA \cdot \cos BR \cdot \cos TP$$

Solens azimuth AZ beregnes af udtrykket:

$$\cos AZ = -(\sin BR \cdot \cos VA \cdot \cos TP + \cos BR \cdot \sin VA) / \cos H$$

Fortegnet på AZ indrettes efter timevinklen TP.

Den optiske solhøjde H_2 korrigeres for refraktionen i atmosfæren, for H (i radian) > -0.005 ($\sim -0.3^\circ$):

$$H_2 = H + 0.000225 / (H + 0.023)$$

Solindfald på facade eller tag

Den beregnede stråling er den indfaldende effekt. Hvor meget deraf der absorberes, afhænger af fladens absorptionskoefficient.

Den direkte stråling på en facade beregnes, idet der benyttes følgende størrelser:

En tilsyneladende solkonstant $SK_1 = 1163 \text{ W/m}^2 \sim 1000 \text{ kcal/m}^2\text{h}$

Korrektion for den varierende jord-sol afstand:

$$SF = 1. - 0,0334 \cdot \cos((DN-173) \cdot \pi/182.5) \quad (\text{maks. 21. dec.})$$

Korrektion for strålingsvejens længde i atmosfæren:

$$FL = 1.01/(\sin H + 0.01)$$

Extinktionsfaktor indlæst $A(1,3)$

Normalstråling er da:

$$SM = SK_1 \cdot SF \cdot e^{(-A(1,3) \cdot FL)}$$

Vinkel mellem væggen normal og solazimut:

$$X = AZ - A(2,1) \cdot 0,01745 \quad (\text{i radian})$$

Idet solhøjden medtages, vil faktoren for direkte sol på en lodret væg være:

$$ZA = \cos H \cdot \cos X$$

På en flade (el. tag) med hældning AL i forhold til vandret (indlæst $A(3,1)$) fås faktoren for direkte stråling på fladen:

$$ZAT = \cos X \cdot \cos H \cdot \sin AL + \sin H \cdot \cos AL,$$

som er et mere generelt udtryk, der også indeholder ZA , svarende til $\sin AL = 1$, $\cos AL = 0$.

Den direkte stråling på fladen til tiden I , $B(3,I)$ beregnes derefter af normalstrålingen SM og ZAT :

$$B(3,I) = SM \cdot ZAT,$$

idet $B(3,I)$ dog ikke kan være mindre end 0.

Den diffuse himmelstråling

For en vandret flade kan den diffuse himmelstråling HH beregnes af:

$$HH = 0,333 \cdot (SK \cdot SF - SM) \sin H$$

hvor 0,333 er en empirisk bestemt konstant og

SK er den virkelige solkonstant, $1370 \text{ W/m}^2 \sim 1180 \text{ kcal/h m}^2$

For en lodret flade vil den diffuse stråling være

$$B(4,I) = HH \cdot F,$$

hvor F er en faktor, der afhænger af vinklen til solen.

For $ZA \leq -0,2$ $F = 0,45$

For $ZA \geq -0,2$ $F = 0,55 + 0,437 \cdot ZA + 0,313 \cdot ZA^2$

For en skrå flade benyttes ZAT i stedet for ZA , hvorefter der interpoleres til en vandret flade med $\cos AL$:

$$B(4,I) = HH \cdot (F \cdot (1 - \cos AL) + \cos AL)$$

Reflekteret stråling fra jorden, $B(5,I)$, beregnes summarisk, som om arealet foran facaden eller taget er stort og fladt og reflekterer diffust. $A(2,3)$ er den indlæste refleksionskoefficient.

$$B(5,I) = 0,5 \cdot A(2,3) (SM \cdot \sin H + HH) \cdot (1 - \cos AL)$$

Den totale stråling på fladen, $B(6,I)$, fås ved summering af den direkte, den diffuse og den reflekterede stråling.

Beregning af transmissionsfaktorer for vinduet og absorptionen i de enkelte ruder

Der beregnes for det primære solindfald to transmissionsfaktorer, for direkte stråling $TDIR$ og for diffus stråling $TDIF$. Endvidere beregnes summarisk absorptionen i de enkelte glaslag (højst 10), og der beregnes en faktor for sekundært solindfald $TSEK$, d.v.s. den del af den i ruderne absorberede varme, der afgives indad til rummet ved konvektion og lang-

bølget stråling. De beregnede værdier for solindfaldet angiver kun det primære solindfald.

Beregningsen af TSEK er summarisk, idet der for overgangsmodstandene antages:

$$m_u = 0,08 \text{ m}^2 \text{ h}^\circ \text{C/kcal}, \quad m_1 = 0,15, \text{ og pr. luftlag (+ glas)}$$

$$m_1 = 0,18, \text{ eller tilsvarende værdier i SI-systemet.}$$

For et vindue med eet lag glas haves:

$$\text{TDIR} = 0,96^2 \cdot 0,981^{T_y} = 0,922 \cdot 0,981^{T_y}$$

$$\text{ABS}(1) = 0,96 \cdot (1 - 0,981^{T_y})$$

For vinduer med K (≥ 1) glaslag haves for hvert glaslag $1 \leq N \leq K$, og idet der begyndes med $\text{TDIR} = 1$ udefra:

$$\text{TDIR} = \text{TDIR} \cdot 0,922 \cdot (1 + 0,0064 \cdot (N-1)) \cdot 0,981^{T_y}$$

$$\text{ABS}(N) = \text{TDIR} \cdot (1 - 0,981^{T_y}) \cdot 0,96 \cdot (1 + (K-N) \cdot 0,07)$$

$$\text{TSEK} = \sum_{N=1}^K \text{ABS}(N) \cdot (0,08 + (N-1)0,18) / (0,08 + (K-1)0,18 + 0,15)$$

Der regnes med almindeligt vinduesglas, der pr. overflade reflekterer 4% og absorberer 1,9% pr. mm. Tykkelsen T_y angives i mm.

For eet lag glas haves:

$$\text{TDIR} = 0,96^2 \cdot 0,981^{T_y}$$

For et vindue med K (> 1) glaslag regnes for de følgende, $2 \leq N \leq K$, lag glas:

$$\text{TDIR} = \text{TDIR} \cdot (0,96^2 \cdot 0,981^{T_y} \cdot (1 + 0,0064 \cdot (N-1)))$$

$$0,96^2 = 0,922$$

$$0,0064 (N-1) \text{ angiver tillægget for den to gange reflekterede stråling.}$$

For direkte stråling, der kommer næsten vinkelret ind på glasset (indfaldsvinkel $< 30^\circ$), er $\text{TDIR} = 0,73$ for en dobbeltrude med 2×4 mm glas.

Transmissionsfaktoren FK for den aktuelle indfaldsvinkel VI (angivet i grader) fås af:

$$\text{FK} = \text{TDIR} \cdot (1 - 0,04 \cdot \text{VI}/100 - 2,933 (\text{VI}/100)^6 + 2,13 (\text{VI}/100)^{12})$$

Transmissionsfaktoren for den diffuse stråling TDIF regnes som en middelværdi for stråling fra hele den synlige halvkugle.

$$\text{TDIF} = 0,857 \cdot \text{TDIR}$$

For en dobbeltrude med 2×4 mm glas: $\text{TDIF} = 0,627$.

Hvis antal glaslag er angivet til 0, sættes TDIR og TDIF begge lig 1, og $\text{TSEK} = 0$.

Stråling gennem vinduet
(kun primær stråling)

Stråling gennem vinduet beregnes først for det uafskærmede vindue. Den diffuse plus den reflekterede stråling beregnes under ét, og fås, idet AV er vinduets areal, af:

$$B(8, I) = \text{TDIF} \cdot \text{AV} \cdot (B(4, I) + B(5, I))$$

Den direkte strålingstransmission er afhængig af indfaldsvinklen VI, hvor

$$\cos \text{VI} = \text{ZAT}$$

Idet VI angives i grader, beregnes transmissionen af:

$$\text{FK} = \text{TDIR} \cdot (1 - 0,04 \cdot (\text{VI}/100) - 2,933 \cdot (\text{VI}/100)^6 + 2,13 \cdot (\text{VI}/100)^{12})$$

hvorefter den direkte stråling fås:

$$B(7, I) = \text{FK} \cdot \text{AV} \cdot B(3, I)$$

Den totale stråling gennem det uafskærmede vindue er summen:

$$B(9, I) = B(7, I) + B(8, I)$$

Vindue med udhæng

Udhængt regnes uendelig langt til begge sider i facadens retning. Beregningen kan gennemføres for vinduer i både facade og tag, men beregningen for tagvinduer er ikke kontrolleret.

For facaden beregnes, hvor stor en del AU af vinduesarealet AV der er skærmet mod direkte stråling, idet VB er glasbredden, og A(1,6) er højden af den skyggende kant af udhængt over glasoverkant og A(2,6) dens fremspring foran glasfladen.

$$AU = VB \cdot ((A(2,6) \cdot \text{tgH} / \cos X - A(1,6)))$$

(For et tag benyttes et tilsvarende, mere generelt udtryk:

$$AU = VB \cdot (A(2,6) - A(1,6) \cdot \cos X / \text{tgH}) / (\cos AL + \sin AL \cdot \cos X / \text{tgH})$$

men denne beregning bør ikke benyttes uden en manuel kontrol).

Den direkte stråling bliver derfor reduceret:

$$B(10, I) = (AV - AU) \cdot FK \cdot B(3, I)$$

For den reflekterede stråling regnes ikke med nogen reduktion.

Den diffuse stråling reduceres i forhold til den del af himmelen, der afskærmes, set fra rudens midte. For afskærmningsvinkler, regnet i forhold til fladenormalen, større end 80°, regnes ikke med nogen reduktion, RD = 0. For 0° ~ en uendelig lang afskærmning regnes med reduktion RF = 0,9. For 45° regnes RD = 0,3. Mellem disse værdier interpoleres lineært.

Samlet diffus og reflekteret stråling:

$$B(11, I) = RF \cdot AV \cdot (B(4, I) \cdot (1 - RD) + B(5, I))$$

Vindue med lodrette ribber ved siden

Der regnes med ribber til begge sider og højt op over vinduesoverkant. Beregningen kan rent teknisk gennemføres både for vinduer i facade og tag, men beregningen for afskærmede tagvinduer er ikke kontrolleret.

For facade beregnes, hvor stor en del af AR af vinduesarealet AV der er skærmet mod direkte stråling, idet VH er glashøjden, og A(1,7) er afstanden (i facadeplanet) fra ribbens skyggende kant til den nærmeste glaskant, og A(2,7) er dens fremspring foran glasfladen.

$$AR = VH \cdot [A(2,7) \cdot \sin X \cdot \cos H / (\cos X \cdot \sin AL \cdot \cos H + \cos AL \cdot \sin H) - A(1,7)]$$

(Dette udtryk er generelt og benyttes også for tagvinduer, men kun med en manuel kontrol).

For en lodret væg kan det forenkles til:

$$AR = VH \cdot [A(2,7) \cdot \text{tgX} - A(1,7)]$$

Der bruges en absolut værdi for sinX og tgX, fordi der regnes med ribber til begge sider.

Den direkte stråling bliver da:

$$B(10, I) = (AV - AU) \cdot FK \cdot B(3, I)$$

Den diffuse og den reflekterede stråling antages summarisk ikke at blive reduceret p.gr.a. ribberne. Det svarer til, at den formindskelse af strålingen, som skyldes afskærmningen af en del af himmelen og jorden, stort set opvejes af den reflekterede stråling fra ribberne selv.

$$B(11, I) = B(8, I)$$

Vinduer med både udhæng og ribber

Den direkte solbestrålede del AX af vinduesarealet AV beregnes af:

$$AX = AV - (AV - AU) \cdot (AV - AR) / AV$$

Det direkte solindfald bliver da:

$$B(16, I) = AX \cdot FK \cdot B(3, I)$$

og den diffuse og reflekterede stråling:

$$B(17, I) = B(11, I)$$