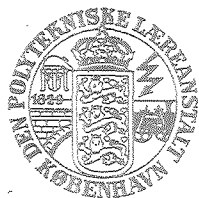


BEREGNING AF SOLINDFALD

HENRIK LAWÆTZ
LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE



DECEMBER 1975
MEDDELELSE NR. 42

BEREGNING AF SOLINDFALD

Henrik Lawætz
Laboratoriet for Varmeisolering
Danmarks tekniske Højskole

December 1975

Indledning

Beregning af solindfald på en flade kan ske ud fra Reference-årets klimadata [1]. I det følgende skal anføres en række formler hertil, men da der endnu ikke findes tilstrækkelige målinger til eftervisning af nogle af formlernes gyldighed, må de tages med et vist forbehold.

Strålingsdata og vinkler

Ved beregningerne benyttes følgende data fra Referenceåret:

Normalstråling	RNT	(W/m ²)
Diffus stråling på vandret	RDT	(W/m ²)
Skydækket	N	(oktas)

Disse findes i hvert døgn som 24 timeværdier, d.v.s. at til et givet klokkeslet er angivet middelværdien af indstrålingen i tidsrummet mellem $\frac{1}{2}$ time før og $\frac{1}{2}$ time efter klokkeslettet, hvorimod angivelsen af skydækket er en øjebliksværdi gældende for netop dette klokkeslet.

Ved beregningerne er det desuden nødvendigt at kende solens stilling på himlen på det pågældende tidspunkt. Solens position er kendt, når følgende vinkler er bestemt:

Solhøjden	HO
Solazimuth	AZ

Disse vinkler kan beregnes med subroutinen SUNR i programmet BA4 [2], og de benyttede formler hertil er nærmere beskrevet i [3].

En flades position er eentydigt angivet ved vinklerne:

Fladeazimuth AF

Hældning med vandret T

Både AZ og AF er nul imod syd og regnes positive mod vest og negative mod øst. Da AF er vinklen mellem en lodret normalplan for fladen og den lodrette plan gennem sydretningen, findes, at man for en vandret flade ikke kan angive nogen azimuthvinkel.

Som det er fremgået, kan beregningerne af solindfaldet kun foretages til et givet tidspunkt, idet solindfaldet, skydækket og solens stilling varierer med tiden. Dette forhold fremgår ikke umiddelbart af de anførte formler, hvor tidsafhængigheden for nemheds skyld er udeladt.

Indfaldsvinkel og direkte stråling

For en given flade og til et givet tidspunkt kan indfaldsvinklen I for den direkte stråling beregnes af ligningen:

$$\cos(I) = \cos(HO) \cdot \cos(AZ - AF) \cdot \sin(T) + \sin(HO) \cdot \cos(T) \quad (1)$$

For en lodret flade forenkles udtrykket til:

$$\cos(I) = \cos(HO) \cdot \cos(AZ - AF)$$

og for en vandret flade fås:

$$\cos(I) = \sin(HO)$$

Nu kan den direkte stråling DIR på fladen beregnes af:

$$DIR = RNT \cdot \cos(I) \quad (2)$$

Diffus himmelstråling

Den diffuse himmelstråling DIF på fladen beregnes af:

$$DIF = RDT \cdot F \quad (3)$$

hvor F beregnes med den nedenfor anførte formel (4) og korrigeres for hældning og skydække efter formlerne (5) og (7).

Med den af formel (1) fundne indfaldsvinkel I beregnes F således:

$$\begin{aligned} \cos(I) \geq -0,2: F' &= 0,55 + 0,437 \cos(I) + 0,313 \cos^2(I) \\ \cos(I) < -0,2: F' &= 0,45 \end{aligned} \quad (4)$$

Formel (4) er angivet i [4] og skitseret i [5]. Da den er udviklet til beregning af solindfald på lodret, korrigeres den fundne F-værdi for en hældende flade ved interpolation mellem lodret og vandret som angivet i [3]:

$$F'' = F'(1 - \cos(T)) + \cos(T) \quad (5)$$

da det jo for en vandret falde skal gælde, at F bliver lig 1 (jvf. ligning (3)).

Da formel (4) desuden kun gælder for en skyfri himmel, korrigeres endelig for skydækket, idet det antages, at for overskyet himmel (N=8) er den diffuse stråling jævnt fordelt over himlen. For fladen vil det diffuse strålingsindfald i forhold til indfaldet på vandret derfor være fladens vinkelforhold R til himlen, idet en vandret flade har vinkelforholdet 1 til himlen.

Vinkelforholdet R til himlen for fladen bestemmes af ligningen:

$$R = 0,5 \cdot (1 + \cos(T)) \quad (6)$$

Ved korrektion af F for skydækket N interpoleres der mellem overskyet og klar himmel således:

$$F = (F'' - R) \cdot (8 - N)/8 + R \quad (7)$$

På fig. 1 er det skitseret, hvorledes man af formlerne (4), (5), (6) og (7) beregner F til benyttelse i ligning (3). På figuren er følgende eksempel benyttet:

Med $\cos(I) = 0,3$ aflæses F (ligning (4)) til 0,71. Sættes hældningen af fladen til 60° , fås $\cos(T) = 0,5$, og ved interpolation mellem det fundne F og 1 fås værdien 0,84. (ligning (5)). Med $\cos(T) = 0,5$ aflæses rumvinklen $= 0,75$ (ligning (6)), og med skydækket $N = 6$, fås $F = 0,77$ (ligning (7)).

Det er klart, at man kun ved en enkelt eller to beregninger vil benytte et diagram som fig. 1, og dette er da også kun medtaget for at give en illustration af, hvorledes F kan variere. Ved mange beregninger, hvor man f.eks. ønsker at bestemme solindfaldet gennem længere tid, er det formålstjenligt at benytte edb.

Referenceårets indstråling

For forskellige hældningsvinkler er dels den direkte stråling og dels den diffuse himmelstråling på en sydvendt flade beregnet gennem Referenceåret. Dette er gjort ved hjælp af et edb-program, der for hver hele time beregner solindfaldet efter de anførte formler. Denne øjebliksværdi antages så at være middelværdien i tidsrummet mellem $\frac{1}{2}$ time før og $\frac{1}{2}$ time efter klokkeslettet. Herved fås indstrålingen i den pågældende time, og ved summation over alle årets timer fås årsindstrålingen. Resultatet findes i tabel 1, hvor der er angivet dels månedssummer og dels årssummer for både direkte og diffus stråling for fladehældninger i spring på 15° mellem vandret og lodret.

På fig. 2 er optegnet årssummerne fra tabel 1 som funktion af hældningen. Det ses, at den diffuse himmelstråling er størst på vandret og derefter aftagende med voksende hældning. Den direkte stråling har derimod et maksimum ved en hældning på ca. 50° , og den totale stråling lig summen af direkte og diffus stråling får således sin største værdi ved en hældning på $40-45^\circ$ og minimum ved 90° (lodret).

På fig. 3 er månedssummerne gennem året afbildet for hældningerne 0° , 45° og 90° . Det ses, at selv om der på årsbasis er næsten samme indstråling på en lodret og en vandret flade, så er fordelingen over året meget forskellig.

Indstrålingen på en lodret flade i afhængighed af dennes azimuthvinkel er beregnet i tabel 2 for negative vinkler, d.v.s. østvendte flader, og for positive i tabel 3. Det ses, at over året er indstrålingen symmetrisk omkring syd, således at der er det samme solindfald på en flade mod øst som på en flade mod vest.

I tabel 4 er solindfaldet på en flade med hældningen 45° beregnet i afhængighed af orienteringen. Dette er kun gjort for vestvendte flader, men af det tidligere anførte sluttes, at resultaterne direkte kan overføres til østvendte flader.

Årssummerne fra tabel 2, 3 og 4 er optegnet på fig. 4 som funktion af azimuthvinklen. Her er ligeledes skitseret den direkte og den diffuse himmelstråling på lodret samt den totale stråling på vandret.

Diffus reflekteret stråling

Ved de omtalte beregninger og resultater er der ikke regnet med reflekteret stråling fra jordoverfladen. Regnes denne af uendelig stor udstrækning foran fladen, fås den diffust reflekterede stråling RDIF af ligningen:

$$RDIF = R_0 (1 - R) (RNT \sin(H_0) + RDT) \quad (8)$$

hvor R_0 er jordens refleksionskoefficient, og $(1-R)$ er fladens vinkelforhold til jorden. Forskellige størrelser af R_0 er anført i [4] og [5].

Herved fås den totale indstråling RTOT som summen:

$$RTOT = DIR + DIF + RDIF \quad (9)$$

I visse tilfælde er man interesseret i så stort et solindfald som muligt. For at øge størrelsen af den reflekterede stråling kan man anbringe en reflektor, d.v.s. et areal med en speciel stor refleksionskoefficient, foran den flade, f.eks. en solfanger, hvor solindfaldet ønskes. Refleksionen fra en vandret reflektor kan under forudsætning af, at den reflekterede stråling er diffus, med rimelighed beregnes efter formel (8), idet man da benytter fladens vinkelforhold til reflektoren. Dette vinkelforhold er vanskeligt at beregne, men for specielle størrelser af hældningen T er optegnet kurver til bestemmelse heraf i [6] og [7], hvor der i førstnævnte også er angivet en generel formel.

En tilnærmet måde at bestemme vinkelforholdet VF mellem en vandret reflektor og en flade med hældningen T er ud fra kurveblade at finde vinkelforholdet, når T = 90° og så for andre hældninger benytte formlen:

$$VF = VF_{(T=90)} (1 - \cos(T)) \quad (10)$$

Referencer

- [1] Referenceåret, Vejrdata for VVS-beregninger.
Statens Byggeforskningsinstitut, Rapport nr. 89, 1974.
- [2] Hans Lund: Program BA4 til beregning af rumtemperaturer og varme- og kølebehov.
Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole, juli 1974.
- [3] Hans Lund: Algoritmer benyttet i programmet "Sun Radiation".
Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole, internt notat (ikke offentliggjort), maj 1975.
- [4] Erwin Petersen: Solindfald og solafskærmning af vinduer.
Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole, forelæsningsnotat.
- [5] Brown, G. & Isfält, E.: Solinstrålning och solavskärmning.
Statens Institut för Byggnadsforskning, Stockholm, rapport R 19:1974.
- [6] Sparrow, E.M. & Cess, R.D.: Radiation Heat Transfer.
Brooks/Cole. New York 1972.
- [7] Bisgaard, N.F.: Opvarmning og Ventilation: 1. Varmetransmission.
Akademisk Forlag, København 1969.

F - faktor til diffus himmelstråling

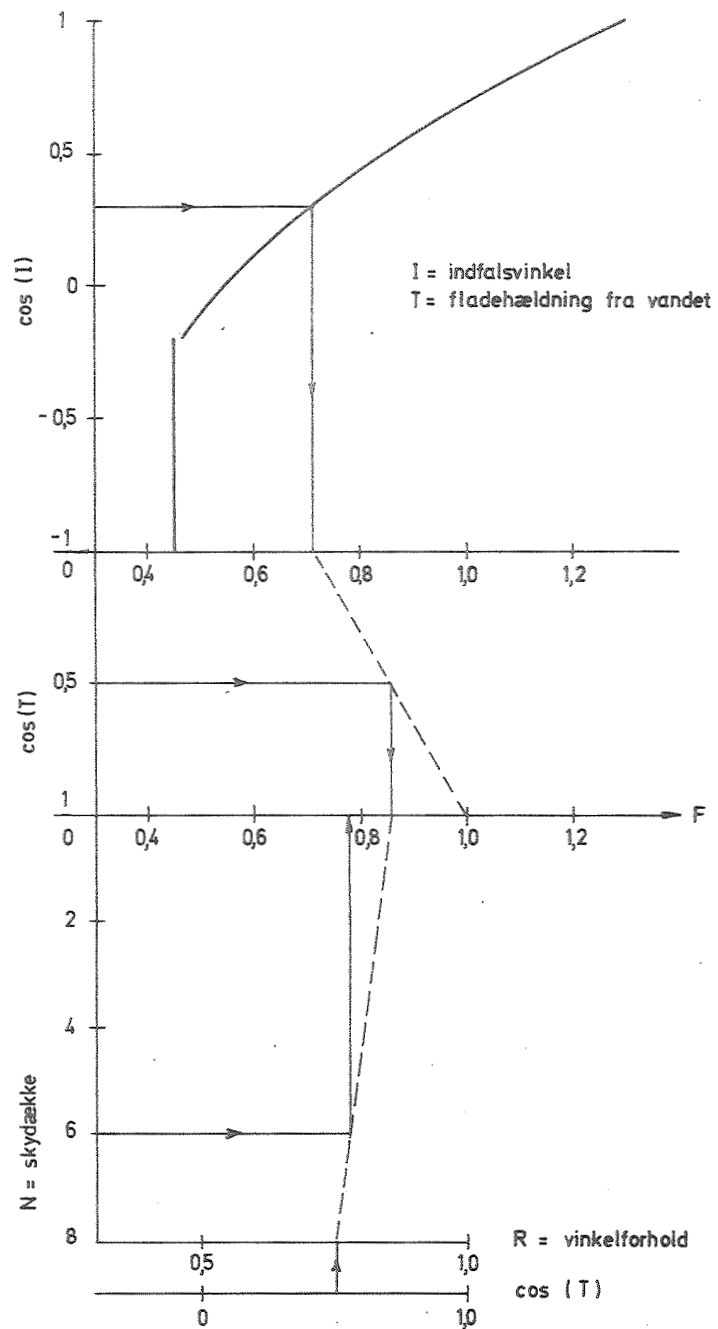


Fig. 1

Solindfald på sydvendt flade

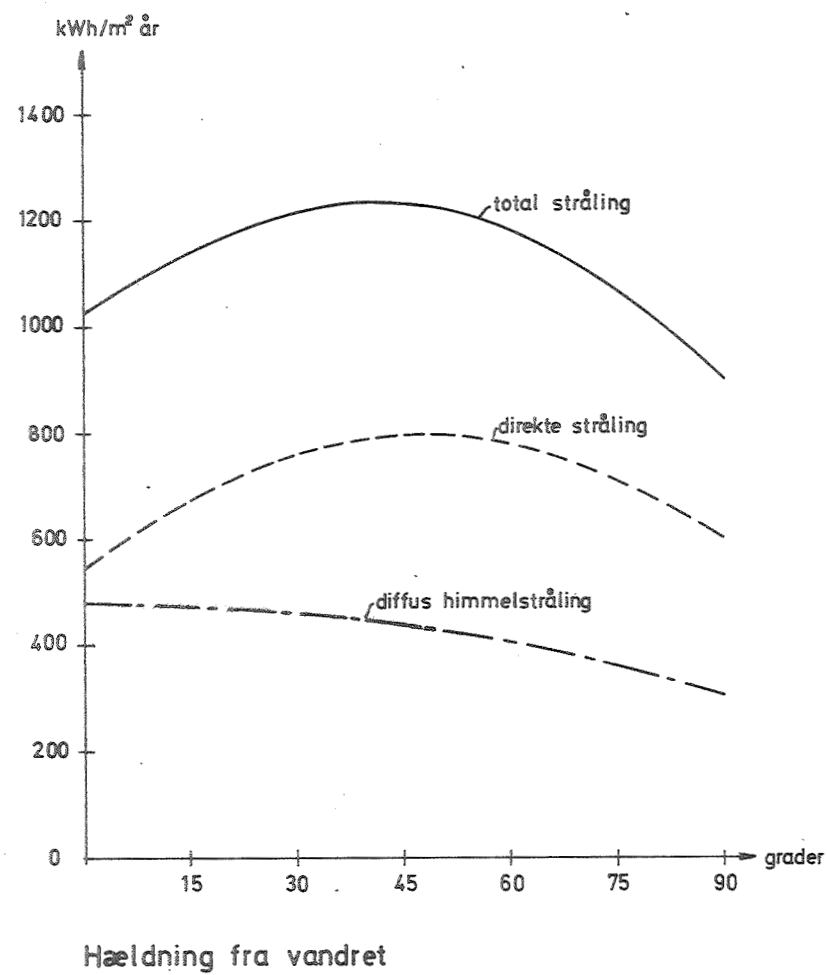


Fig. 2

Totalt solindfald på sydvendt flade

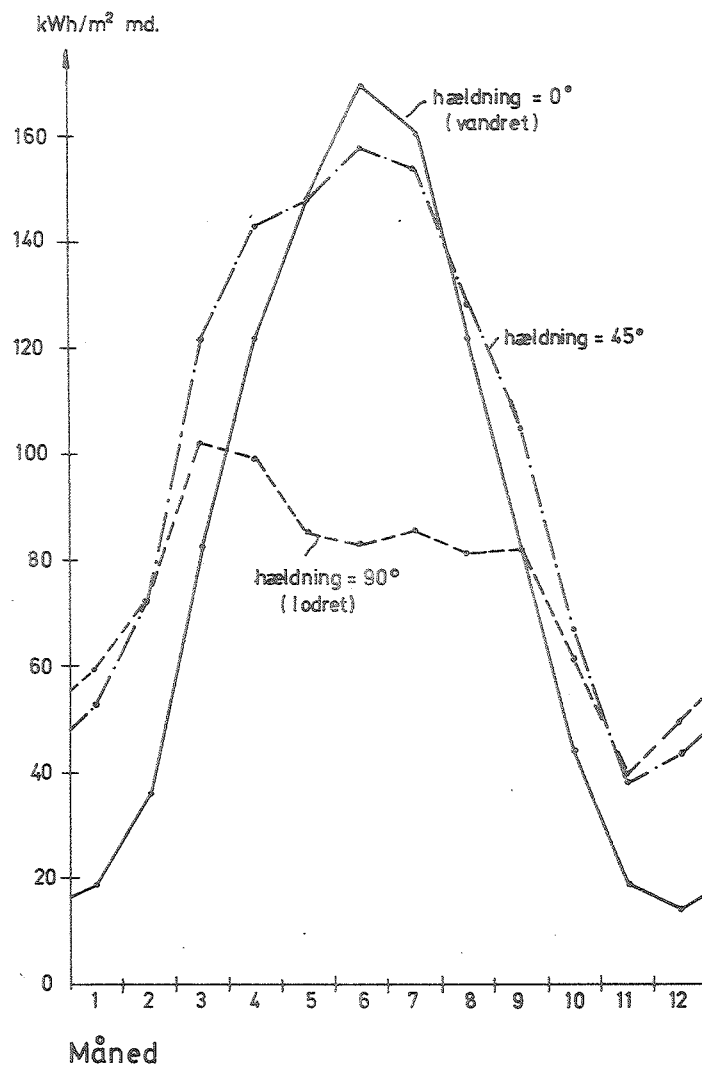


Fig. 3

Solindfald på flade

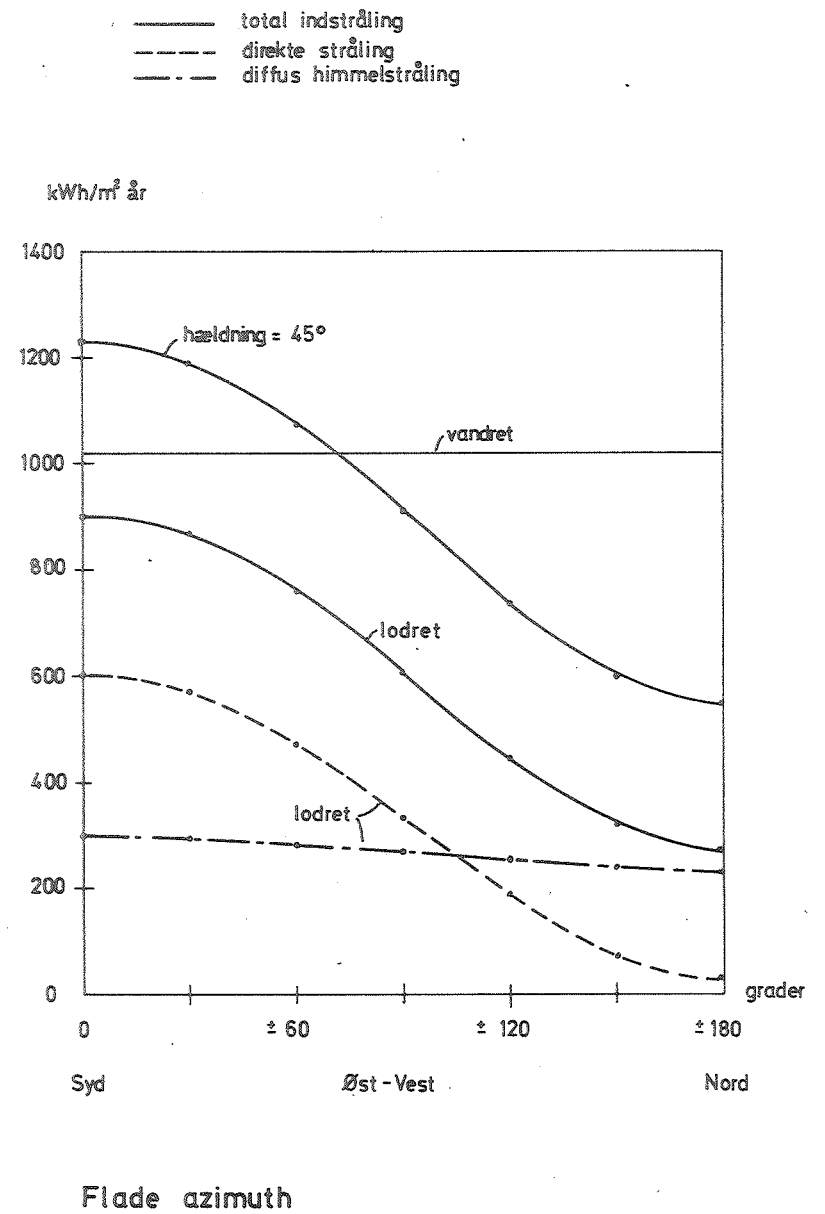


Fig. 4

SOLLINDFALD PÅ EN SYDVENDT FLADE REFERENCEÅRETS STRALLINGSDATA
STRÅLING I KW/M2 HJELDNING I FORHOLD TIL VANDRET

MD	HJELDNING	0	15	30	45	60	75	90
1	DIF	10.3	23.7	35.5	44.9	51.2	54.0	53.2
	DIF	8.3	8.2	7.9	7.6	7.3	6.9	6.3
	SUM	18.6	31.9	43.5	52.5	58.5	60.9	59.5
2	DIF	20.4	35.6	48.4	57.9	63.4	64.7	61.5
	DIF	15.8	15.6	15.1	14.4	13.6	12.6	11.3
	SUM	36.1	51.2	63.4	72.3	77.1	77.3	72.8
3	DIF	51.9	71.0	85.3	93.7	95.8	91.3	80.7
	DIF	30.7	30.4	11.4	122.1	26.8	116.0	21.5
	SUM	82.6	101.4	114.8	122.1	122.6	116.0	102.2
4	DIF	73.2	87.9	96.6	98.8	94.5	84.0	67.7
	DIF	48.6	48.1	46.7	44.5	41.4	37.0	31.1
	SUM	121.8	136.0	143.3	143.4	135.9	120.9	98.8
5	DIF	82.5	90.2	92.3	88.4	78.8	64.8	46.4
	DIF	65.8	65.1	63.0	59.5	54.6	47.4	38.6
	SUM	148.4	155.3	155.3	147.9	133.2	112.2	84.9
6	DIF	92.1	96.3	94.7	87.7	75.3	58.9	39.1
	DIF	77.7	78.9	74.3	70.0	63.6	52.8	44.1
	SUM	169.8	175.1	169.0	157.7	138.9	113.8	83.2
7	DIF	81.2	86.7	86.8	81.6	71.4	56.9	39.3
	DIF	79.6	79.6	76.2	72.1	65.8	57.2	46.3
	SUM	160.7	165.4	163.0	153.7	137.2	114.1	85.5
8	DIF	56.3	64.6	68.6	68.0	63.0	53.9	41.3
	DIF	65.9	65.2	63.1	59.7	54.9	48.2	39.8
	SUM	122.2	129.8	131.7	127.8	117.9	102.1	81.0
9	DIF	38.6	50.9	59.8	64.6	65.1	61.0	52.9
	DIF	44.3	43.8	42.5	40.6	38.0	34.4	29.5
	SUM	82.9	94.7	102.3	105.2	103.1	95.5	82.4
10	DIF	19.4	30.3	39.1	45.3	48.4	48.1	44.6
	DIF	24.2	23.9	23.2	21.9	20.4	18.6	16.2
	SUM	43.6	54.2	62.2	67.2	68.8	66.7	60.9
11	DIF	7.4	15.3	22.2	27.5	31.0	32.4	31.6
	DIF	11.6	11.4	11.0	10.4	9.7	9.3	7.9
	SUM	19.0	26.7	33.2	38.0	40.8	41.4	39.5
12	DIF	6.7	17.8	27.6	35.6	41.2	43.9	43.7
	DIF	7.7	7.6	7.3	7.0	6.7	6.4	5.9
	SUM	14.4	25.4	35.0	42.7	47.9	50.3	49.6
	DIF	539.9	670.2	756.9	794.1	779.1	713.9	601.9
	DIF	480.2	474.7	459.7	436.1	402.6	357.1	298.5
	SUM	1020.2	1144.9	1216.6	1230.3	1181.7	1071.0	900.3

TABELL 1

SOLLINDFALD I KW/M2 PÅ EN FLADE MED HJELDNINGEN = 90 GRADER
REFERENCEÅRETS STRÅLINGSDATA

MD	AZIMUTH	0	30	60	90	120	150	180
1	DIF	53.2	44.3	25.9	10.5	1.7	0.0	0.0
	DIF	6.3	5.9	5.2	4.9	4.1	4.0	4.0
	SUM	59.5	50.2	31.0	14.9	5.8	4.0	4.0
2	DIF	61.5	55.8	38.6	19.6	5.3	0.2	0.0
	DIF	11.3	11.0	9.9	8.3	8.0	7.6	7.6
	SUM	72.8	66.8	48.5	28.3	13.2	7.8	7.6
3	DIF	80.7	76.2	60.3	39.7	17.6	3.5	0.0
	DIF	21.5	21.0	19.6	17.8	16.1	15.1	14.8
	SUM	102.2	97.2	79.9	56.5	33.7	18.5	14.8
4	DIF	67.7	66.6	60.6	46.3	27.2	9.5	1.8
	DIF	31.1	30.7	29.8	28.0	26.0	24.3	23.7
	SUM	98.8	97.3	90.4	74.4	53.2	33.9	25.5
5	DIF	46.4	49.4	51.4	45.1	31.6	15.0	6.5
	DIF	38.6	38.6	38.4	37.2	35.4	33.5	32.7
	SUM	84.9	88.0	89.8	82.3	67.0	48.5	39.2
6	DIF	39.1	42.7	48.6	47.2	36.8	20.7	12.0
	DIF	44.1	44.2	44.4	43.8	42.2	40.2	39.3
	SUM	83.2	86.9	92.9	91.0	79.1	60.9	51.4
7	DIF	39.3	44.6	48.7	45.0	33.1	17.0	7.9
	DIF	46.3	46.6	46.6	45.6	43.4	41.0	39.8
	SUM	85.5	91.2	95.3	90.5	76.5	58.0	47.7
8	DIF	41.3	41.7	39.6	31.7	19.9	8.1	1.9
	DIF	39.8	39.0	38.0	37.3	35.0	33.2	32.4
	SUM	81.0	81.4	78.5	69.1	55.0	41.3	34.3
9	DIF	52.9	47.3	36.4	22.9	10.7	2.5	0.1
	DIF	29.5	28.8	27.1	24.9	23.0	21.8	21.5
	SUM	82.4	76.1	63.5	47.8	33.7	24.3	21.5
10	DIF	44.6	39.3	27.5	15.0	4.9	0.3	0.0
	DIF	16.2	15.7	14.6	13.3	12.3	11.1	11.7
	SUM	60.9	55.1	42.0	28.3	17.2	12.1	11.7
11	DIF	31.6	27.5	17.0	6.8	0.8	0.0	0.0
	DIF	7.9	7.7	6.9	6.2	5.8	5.6	5.6
	SUM	39.5	35.2	23.9	13.0	6.6	5.6	5.6
12	DIF	43.7	36.9	21.0	7.0	0.6	0.0	0.0
	DIF	5.9	5.5	4.8	4.1	3.8	3.7	3.7
	SUM	49.6	42.4	25.8	11.1	4.3	3.7	3.7
	DIF	601.9	572.2	475.4	335.8	190.2	76.8	30.3
	DIF	298.5	293.5	286.1	271.4	253.1	241.9	236.8
	SUM	900.3	867.7	761.5	607.2	443.3	318.6	267.0

TABELL 2

SOLINDFALD I KWH/M2 PÅ EN FLADE MED HÆLDNINGEN = 90 GRADER
REFERENCEÅRETS STRÅLINGSDATA HÆLDNING I FORHOLD TIL VANDRET

MD	AZIMUTH	0	-30	-60	-90	-120	-150	-180
1	DIR	53.2	47.7	31.2	13.9	2.3	0.0	0.0
	DIF	6.3	5.1	5.3	4.6	4.1	4.0	4.0
	SUM	59.5	52.8	36.6	18.5	6.4	4.0	4.0
2	DIR	61.5	51.0	31.8	14.7	3.6	0.1	0.0
	DIF	11.5	10.8	9.6	8.5	7.9	7.6	7.6
	SUM	72.8	61.7	41.4	23.2	11.5	7.7	7.6
3	DIR	80.7	69.7	51.8	31.6	13.8	2.8	0.0
	DIF	21.5	20.8	19.2	17.5	15.9	15.0	14.8
	SUM	102.2	90.5	71.0	49.1	29.7	17.8	14.8
4	DIR	67.7	63.0	64.2	51.1	31.7	11.8	1.8
	DIF	31.1	30.8	29.9	28.3	26.2	24.4	23.7
	SUM	98.8	93.8	94.2	79.3	58.0	36.3	25.5
5	DIR	46.4	50.6	53.4	47.3	33.4	15.9	6.5
	DIF	38.6	38.6	38.2	37.2	35.4	33.6	32.7
	SUM	84.9	89.2	91.7	84.5	68.8	49.5	39.2
6	DIR	39.1	46.3	54.0	51.3	38.6	21.3	12.0
	DIF	44.1	44.7	45.2	44.6	42.7	40.5	39.3
	SUM	83.2	90.9	99.1	95.9	81.3	61.8	51.4
7	DIR	39.3	41.8	44.6	40.2	28.9	15.0	7.9
	DIF	46.3	46.2	46.0	45.0	42.9	40.8	39.8
	SUM	85.5	88.0	90.7	85.1	71.8	55.8	47.7
8	DIR	41.3	42.7	40.5	32.8	20.8	8.1	1.9
	DIF	39.8	39.4	38.5	36.9	34.9	33.1	32.4
	SUM	81.0	82.1	79.0	69.7	55.7	41.3	34.3
9	DIR	52.9	49.0	38.5	24.5	11.4	2.3	0.1
	DIF	29.5	29.0	27.3	25.1	23.1	21.8	21.4
	SUM	82.4	78.0	65.8	49.6	34.5	24.1	21.5
10	DIR	44.6	38.5	26.4	14.1	4.3	0.2	0.0
	DIF	16.2	15.7	14.5	13.3	12.3	11.8	11.7
	SUM	60.9	54.2	41.0	27.4	16.6	12.0	11.7
11	DIR	31.6	27.2	16.4	6.5	0.9	0.0	0.0
	DIF	7.9	7.6	6.9	6.1	5.8	5.6	5.6
	SUM	39.5	34.8	23.2	12.6	6.7	5.6	5.6
12	DIR	43.7	38.8	24.1	8.9	0.9	0.0	0.0
	DIF	5.0	5.6	4.9	4.2	3.9	3.7	3.7
	SUM	48.6	44.4	29.0	13.1	4.7	3.7	3.7
	DIR	601.9	572.3	476.9	336.8	190.5	77.7	30.3
	DIF	298.5	295.2	285.8	271.1	255.0	242.0	236.8
	SUM	900.3	867.5	762.6	607.9	445.5	319.7	267.0

TABEL 3

SOLINDFALD I KWH/M2 PÅ EN FLADE MED HÆLDNINGEN = 45 GRADER
REFERENCEÅRETS STRÅLINGSDATA HÆLDNING I FORHOLD TIL VANDRET

MD	AZIMUTH	0	30	60	90	120	150	180
1	DIR	44.9	38.6	25.0	11.5	2.2	0.0	0.0
	DIF	7.6	7.5	7.2	7.1	7.1	7.1	7.1
	SUM	52.5	46.2	32.4	18.7	9.3	7.1	7.1
2	DIR	57.9	53.8	40.4	23.3	8.1	0.3	0.0
	DIF	14.4	14.3	14.1	13.8	13.6	13.4	13.4
	SUM	72.3	68.1	54.5	37.1	21.6	13.7	13.4
3	DIR	93.7	89.5	74.2	52.2	28.5	8.5	0.1
	DIF	28.4	28.2	27.8	27.3	26.7	26.3	26.2
	SUM	122.1	117.7	102.0	79.5	55.2	34.9	26.3
4	DIR	98.8	94.3	83.0	65.8	44.3	22.0	8.7
	DIF	44.5	44.4	43.9	43.3	42.6	42.0	41.9
	SUM	143.4	138.6	127.0	109.1	86.9	64.1	50.6
5	DIR	88.4	86.7	81.1	69.9	53.8	35.3	30.2
	DIF	59.5	59.4	59.1	58.6	57.9	57.4	57.1
	SUM	147.9	146.1	140.2	128.5	111.7	92.7	87.3
6	DIR	87.7	86.3	83.2	74.9	61.6	47.1	46.0
	DIF	70.0	69.9	69.6	69.2	68.6	68.1	67.9
	SUM	157.7	156.2	152.8	144.1	130.2	115.1	113.9
7	DIR	81.6	82.5	79.8	71.1	56.8	40.3	35.2
	DIF	72.1	72.0	71.7	71.2	70.4	69.7	69.4
	SUM	153.7	154.5	151.5	142.2	127.2	110.0	104.6
8	DIR	68.0	65.8	59.1	48.4	34.5	19.7	12.2
	DIF	59.7	59.6	59.2	58.6	57.8	57.2	56.9
	SUM	127.8	125.4	118.3	107.0	92.3	76.9	69.1
9	DIR	64.6	59.7	48.3	33.7	18.7	6.2	0.3
	DIF	40.6	40.4	39.8	39.2	38.5	38.0	37.8
	SUM	105.2	100.0	88.1	72.8	57.2	44.2	38.1
10	DIR	45.3	41.5	31.4	19.6	8.4	1.0	0.0
	DIF	21.9	21.8	21.5	21.1	20.8	20.6	20.5
	SUM	67.2	63.3	52.9	40.7	29.2	21.7	20.5
11	DIR	27.5	24.7	16.9	8.0	1.6	0.0	0.0
	DIF	10.4	10.4	10.4	10.0	9.9	9.9	9.8
	SUM	38.0	35.0	27.1	18.1	11.5	9.9	9.8
12	DIR	35.6	30.8	19.5	7.7	0.8	0.0	0.0
	DIF	7.0	7.0	6.8	6.6	6.5	6.5	6.5
	SUM	42.7	37.8	26.3	14.4	7.4	6.5	6.5
	DIR	794.1	754.0	641.9	486.0	319.3	180.5	132.6
	DIF	436.1	434.9	431.3	426.0	420.4	416.2	414.6
	SUM	1230.3	1188.9	1073.2	912.1	739.7	596.7	547.2

TABEL 4