

SOLINDFALD OG SOLVARMEANLÆG

MÅLT OG BEREGNET

AF

HENRIK LAWÆTZ



LABORATORIET FOR VARMEISOLERING

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

MEDDELELSE NR. 106

OKTOBER 1980

FORORD

Denne rapport markerer afslutningen af mit licentiatstudium, der blev påbegyndt i sommeren 1975 ved Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole, med professor Vagn Korsgaard som faglærer.

Målingerne af solindfaldet er støttet økonomisk af Teknologirådet og er kun blevet gennemført takket være en stor indsats af Erwin Petersen, Lysteknisk Laboratorium.

Arbejdet med at foretage de nødvendige beregninger og skrive rapporten har kun været mulig takket være den inspiration og støtte, jeg har modtaget fra mange af laboratoriets medarbejdere, samt ikke mindst af den forståelse og overbærenhed Lise, Anne og Jacob har udvist.

Henrik Lawaetz
Oktober 1980

INDHOLDSFORTEGNELSE

0.	SAMMENFATNING	1
1.	SOLEN OG SOLSTRÅLING	3
2.	MÅLING AF SOLINDFALD	6
2.1	Måling af direkte stråling	7
2.2	Måling af globalstråling	9
2.3	Sammenlignende målinger	13
3.	SOLENS POSITION OG EXTRATERRESTRIALSTRÅLINGEN	16
3.1	Deklination og tidsekvation	18
3.2	Solopgang og solnedgang	20
3.3	Extraterrestriel stråling	23
4.	MÅLEOPSTILLING I VÆRLØSE	26
4.1	Måleinstrumenter og registreringsudstyr	26
4.2	Måleperioden	30
5.	BEHANDLING AF MÅLEDATA	33
5.1	Korrektion for skyggering	34
5.2	Dagtimeværdier og vejrobservationer	37
6.	SOLINDFALD I MÅLEÅRET	40
6.1	Direkte og diffus stråling	40
6.2	Sammenligning med andre målinger	43
7.	BEREGNING AF SOLINDFALD PÅ VANDRET	43
7.1	Diffus/globalstråling på døgnbasis	48
7.2	Diffus/globalstråling på månedsbasis	53
8.	SOLINDFALD PÅ HÆLDENDE FLADER	56
8.1	Direkte stråling på månedsbasis	56
8.2	Diffus himmelstråling på månedsbasis	62
8.3	K_T -metoden sammenlignet med målinger	64
8.4	Diffus himmelstråling på timebasis	66
9.	SOLINDFALD I DANMARK	76
9.1	Sammenhæng mellem solindfald og soltimetal ..	76
9.2	Solindfald i referenceåret	76
9.3	Nyt referenceår	81

10.	SOLVARMEANLÆG	85
11.	SOLFANGEREN	88
11.1	Solfangerens udbytte	88
11.2	Absorberet stråling	94
11.3	Varmetabskoefficienter	99
11.4	Solfangereffektiviteter	105
11.5	Solfangeres beregnede langtidsudbytte	109
12.	VARMEKAPACITET I SOLFANGERE	113
12.1	Effektiv varmekapacitet	113
12.1	Varmekapacitet uden solfangerdrift	114
12.3	Varmekapacitet med solfangerdrift	115
12.4	Beregningseksempel med varmekapacitet	117
13.	SOLFANGERKREDSEN	120
13.1	Varmetab i solfangerkredsen	120
13.2	Solfangerudbytte incl. varmetab fra solfan- gerkredsen	123
13.3	Varmeveksleren	126
13.4	Kapacitetstab	131
14.	VARMELAGERET	134
14.1	Varmelagerets varmetab	135
14.2	Varmtvandsforbruget	137
14.3	Solfangerydelse og lagertemperatur	138
14.4	Nettoydelse og effektivitet	142
15.	BEREGNET OG MÅLT SOLVARMEYDELSE	146
15.1	Solfangerens effektivitet	146
15.2	Solvarmeoverførslen til lagertanken	148
15.3	Anlæggets drift	150
16.	BEREGNINGSFORUDSÆTNINGER FOR BRUGSVANDSANLÆG	155
16.1	Referenceanlæg	155
16.2	Varmtvandsforbruget	157
16.3	Tidssteppets indflydelse	159
16.4	Solfangerens varmekapacitet	159
16.5	Klimadata m.v.	162

17.	PARAMETERANALYSER AF BRUGSVANDSANLÆGGET	167
17.1	Varmekapacitet i solfangeren	167
17.2	Solfangerkredsens kapacitets- og varmetab ...	167
17.3	Varmelagerstørrelse og -isolering	169
17.4	Styresystemet	173
18.	DIMENSIONERING AF SOLVARMEANLÆG	178
18.1	Solfangertype og -areal	178
18.2	Sparet varmetab fra oliefyret	180
18.3	Økonomisk optimering	184
19.	REFERENCER	192
20.	SYMBOLLISTE	198
21.	SUMMARY	205

Bilag I: Recordformat for måleårets datasæt

0. Sammenfatning

Solstrålingens fysiske egenskaber beskrives og på baggrund heraf vurderes forskellige metoder til måling af solindfaldet ved jordoverfladen. Med kendskab til solens bevægelser på himlen er der opstillet formeludtryk til beregning af den direkte strålings indfaldsvinkel på en given flade til et vilkårligt tidspunkt.

Et måleudstyr til kontinuerte målinger af solindfaldet på 7 flader beskrives kortfattet. Måleresultaternes behandling og evt. korrektioner omtales. Måleudstyret blev placeret i Værløse, og for en udvalgt periode på ét år er der foretaget en opgørelse af solindfaldet på månedsbasis, og ved brug af de opstillede formeludtryk er det opdelt i direkte og diffus stråling.

Målingerne af solindfaldet i Værløse er sammenlignet med tilsvarende målinger i Tåstrup, og der findes nogen uoverensstemmelse, som ikke umiddelbart kan forklares. Målingerne er desuden benyttet til en vurdering af en beregningsmetode, K_T -metoden, til bestemmelse af solindfald, og beregningsresultaterne findes at afvige noget fra målingerne.

Ud fra målingerne af solindfaldet og de på samme sted foretagne meteorologiske vejrobservationer er der opstillet en ny beregningsmetode til bestemmelse af diffus himmelstråling på vilkårlige flader ud fra måling på vandret. Denne giver i forhold til en tidligere ofte anvendt metode en noget bedre overensstemmelse med målingerne, især for nordvendte flader.

Det årlige solindfald i Danmark diskuteres, og med brug af en ny metode til udvælgelse af referenceår er der ud fra 15 års vejrobservationer udvalgt et sådant og solindfaldets fordeling gennem året optegnet.

En matematisk model af en solfanger gennemgås. Herunder gengives formler til beregning af absorberet energi, varmetab og solfangerydelser. For givne solfangerudformninger og vejrpåvirkninger eftervises det, at solfangerudbyttet beregnet med den beskrevne model er i god overensstemmelse med mere komplicerede modeller.

Formler til beregning af udbytte under hensyntagen til varmekapaciteten i solfangeren opstilles. Disse suppleres med udviklede formeludtryk, der gør det muligt at tage hensyn til en varmeveksler samt til varmekapacitet i og varmetab fra rørstrækningerne mellem solfangeren og varmelageret.

De udviklede beregningsudtryk benyttes til opbygning af en edb-model af et solvarmeanlæg. Ud fra målte vejrdata og varmeudtag fra lageret fra et eksisterende anlæg simuleres driften gennem nogle perioder. De beregnede driftstilstande sammenholdes med de målte, og der findes en god overensstemmelse.

Det kan således antages, at man med den udviklede model og med det udvalgte referenceår kan beregne de ydelser, man faktisk ville have fået fra et tilsvarende udført anlæg under de samme påvirkninger. Der er derfor udført en række parameteranalyser af et brugsvandsanlæg med 10 m^2 solfanger og et varmelager på $0,5 \text{ m}^3$. Disse viser at varmekapaciteten i solfangeren kun har ringe indflydelse på udbyttet. Derimod kan dårligt udført isolering af rørstrækninger og forkert installeret styresystem medføre en betydelig reduktion af anlæggets ydelse.

Endelig er der foretaget beregninger af solvarmeanlæggets nettoydelse i afhængighed af solfangerareal og -type. Ud fra disse er optegnet kurveblade til dimensionering af brugsvandsanlæg, og der er som afslutning foretaget en enkelt økonomisk optimering af anlægsstørrelsen.

1. SOLEN OG SOLSTRÅLING

Solen er jordens nærmeste stjerne. Afstanden mellem solen og jorden varierer gennem året mellem ca. $147 \cdot 10^6$ og ca. $152 \cdot 10^6$ km med en middelf afstand på $149,5 \cdot 10^6$ km.

Temperaturen nær solcentret er meget høj, almindeligvis antaget at være $10 - 20 \cdot 10^6$ K. I solens centrale dele sker der en sammensmeltning af brintkerner til heliumkerner, en såkaldt fusionsproces, og masse omdannes til energi. Den udviklede varme transporteres ud til solens overflade, hvorfra den udstråles i universet.

Den totale udstråling fra solens overflade er ca. $3,8 \cdot 10^{26}$ W, hvilket svarer til en gennemsnitlig udstråling på ca. $6 \cdot 10^7$ W/m². Et absolut sort legeme med en temperatur på ca. 5760 K (~5500 °C) har en tilsvarende udstråling og en spektralfordeling, der stort set svarer til solens.

På grund af afstanden til solen modtager jorden kun en ringe del af solens energiudstråling. Målinger umiddelbart uden for jordens atmosfære har vist, at solintensiteten vinkelret på stråleretningen, normalstrålingen, varierer mellem ca. 1400 W/m² og ca. 1300 W/m², med størst intensitet omkring vintersolhverv, hvor jord-solafstanden er mindst.

Intensiteten ved jordens middelf afstand til solen kaldes "Solkonstanten" I_{sc} . Denne er dog ikke helt konstant gennem tiden, idet fx antallet af solpletter har indflydelse på soludstrålingen. I de seneste år har man dog almindeligvis regnet med

$$I_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2 \quad (1.1)$$

hovedsagelig baseret på satellitmålinger [1]. De benyttede målemetoder giver dog en usikkerhed i bestemmelsen af I_{sc} på ca. $\pm 1,5\%$.

Solstrålingen uden for atmosfæren kaldes også extra-terrestrialstrålingen, og den er altid større end strålingen ved jordens overflade, da strålingen ved passage gennem atmosfæren svækkes noget. Det skyldes dels en absorption af visse dele af solspektret i nogle af atmosfærens luftarter og dels en spredning og refleksion af strålingen p.g.a. partikler.

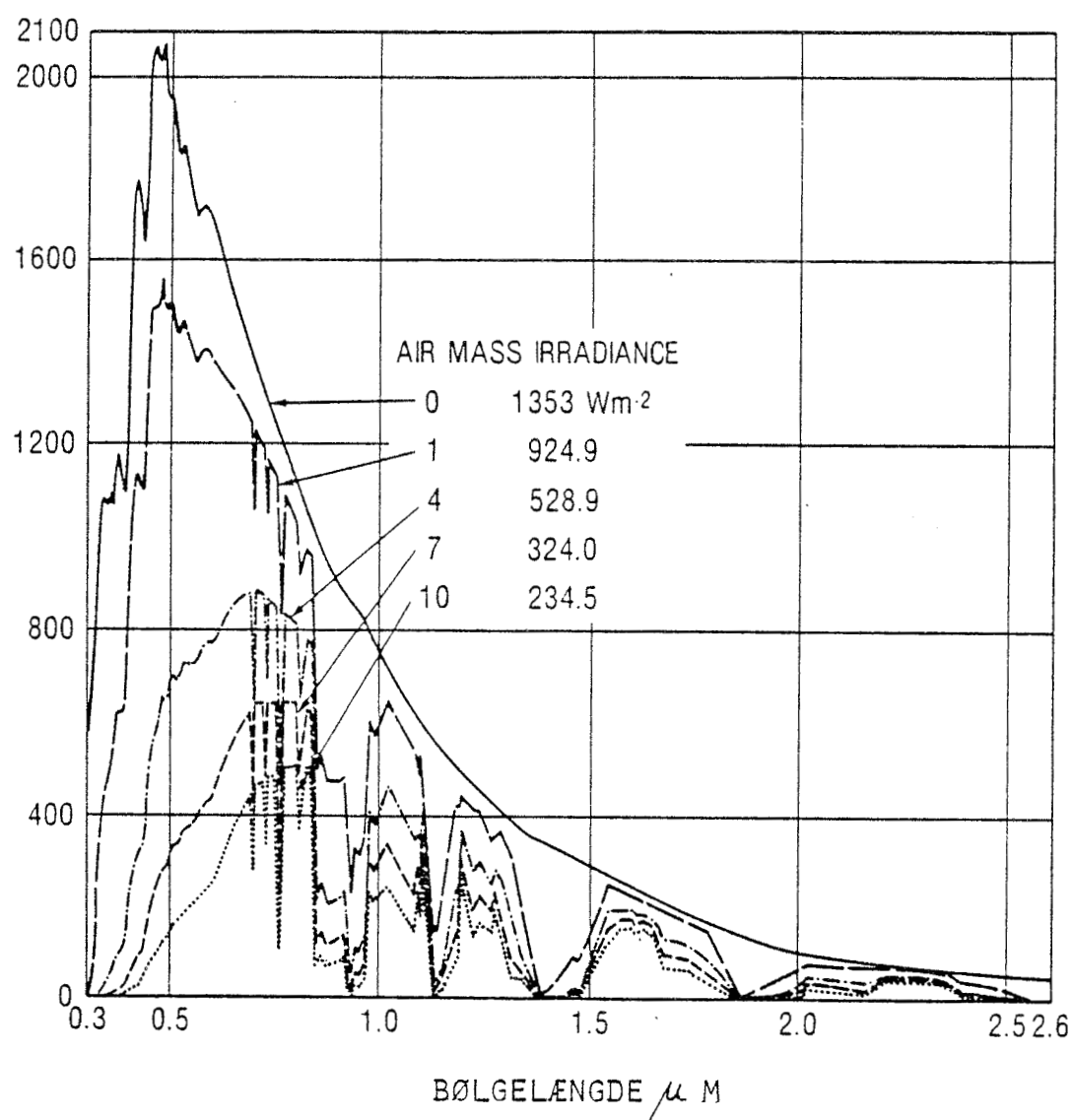
På figur 1.1 er solstrålingens spektralfordeling og intensitet ved jordoverfladen i klart vejr vist som funktion af vejlængden gennem atmosfæren. Vejlængden er angivet i antal luftmasser, hvor luftmassen 1 svarer til atmosfæretykkelsen ved havoverfladen ved normal barometerstand.

Af figuren ses, at maksimal solintensitet ved jordens overflade vil være omkring 1000 W/m^2 .

Praktisk talt hele energiindholdet (mere end 99%) findes mellem bølgelængderne $0,25 \mu\text{m}$ og $4,0 \mu\text{m}$. Området op til ca. $0,4 \mu\text{m}$ kaldes den ultraviolette del, mellem ca. $0,4 \mu\text{m}$ og ca. $0,8 \mu\text{m}$ den synlige del og over ca. $0,8 \mu\text{m}$ den infrarøde del. Energiindholdet i den synlige og infrarøde del er næsten af samme størrelse, knap 50% af den totale indstråling, idet energiindholdet i det ultraviolette område er beskeden (mindre end 10%).

SOLENS SPEKTRALFORDDELING OG NORMALSTRÅLING
VED JORDOVERFLADEN I KLART VEJR, REF. [1]

$W/M^2/\mu M$



Figur 1.1

2. MÅLING AF SOLINDFALD

Solindfaldet på en flade kan opdeles i 2 komponenter: direkte stråling, I_D og diffus stråling I_d .

Den direkte stråling har retning fra solen, og kendes intensiteten vinkelret på stråleretningen, normalstrålingen I_{DN} , og indfaldsvinklen i , vinklen mellem stråleretningen og fladens normal, bestemmes den direkte stråling som

$$I_D = I_{DN} \cdot \cos(i) \quad (2.1)$$

Den diffuse stråling er ikke retningsbestemt og består normalt af diffus stråling fra den del af himlen, fladen "ser" samt diffus reflekteret stråling fra de omgivelser, fladen "ser".

På et vandret plan vil der normalt ikke være tale om reflekteret stråling fra omgivelserne og solindfaldet, der også kaldes globalstrålingen I_G , sammensættes da således:

$$I_G = I_{DN} \cdot \cos(i) + I_{dh} \quad (2.2)$$

hvor I_{dh} er den diffuse himmelstråling på vandret, dvs på et plan, der "ser" hele himmelhvalvingen. I stedet for at benytte solstrålingens indfaldsvinkel med vandret kan solhøjden h , der er vinklen mellem stråleretningen og vandret, benyttes. Herved findes globalstrålingen:

$$I_G = I_{DN} \cdot \sin(h) + I_{dh} \quad (2.3)$$

På flader med en vis hældning med vandret kan måling af solindfaldet uafhængigt af omgivelserne finde sted, såfremt der afskærmes fra den diffusreflekterede stråling. Dette kan fx gøres ved at anbringe måleinstrumentet i en "tønde" med ikke-reflekterende indvendige overflader, således at instrumentet afskærmes fra reflekteret stråling fra omgivelserne.

2.1 Måling af direkte stråling

Til måling af den direkte stråling er der gennem tiderne udviklet adskillige instrumenter. For en nærmere historisk gennemgang, se fx [2]. I dag er det mest almindeligt benyttede instrument til absolutte målinger af direkte stråling et Ångström pyrheliometer, figur 2.1.

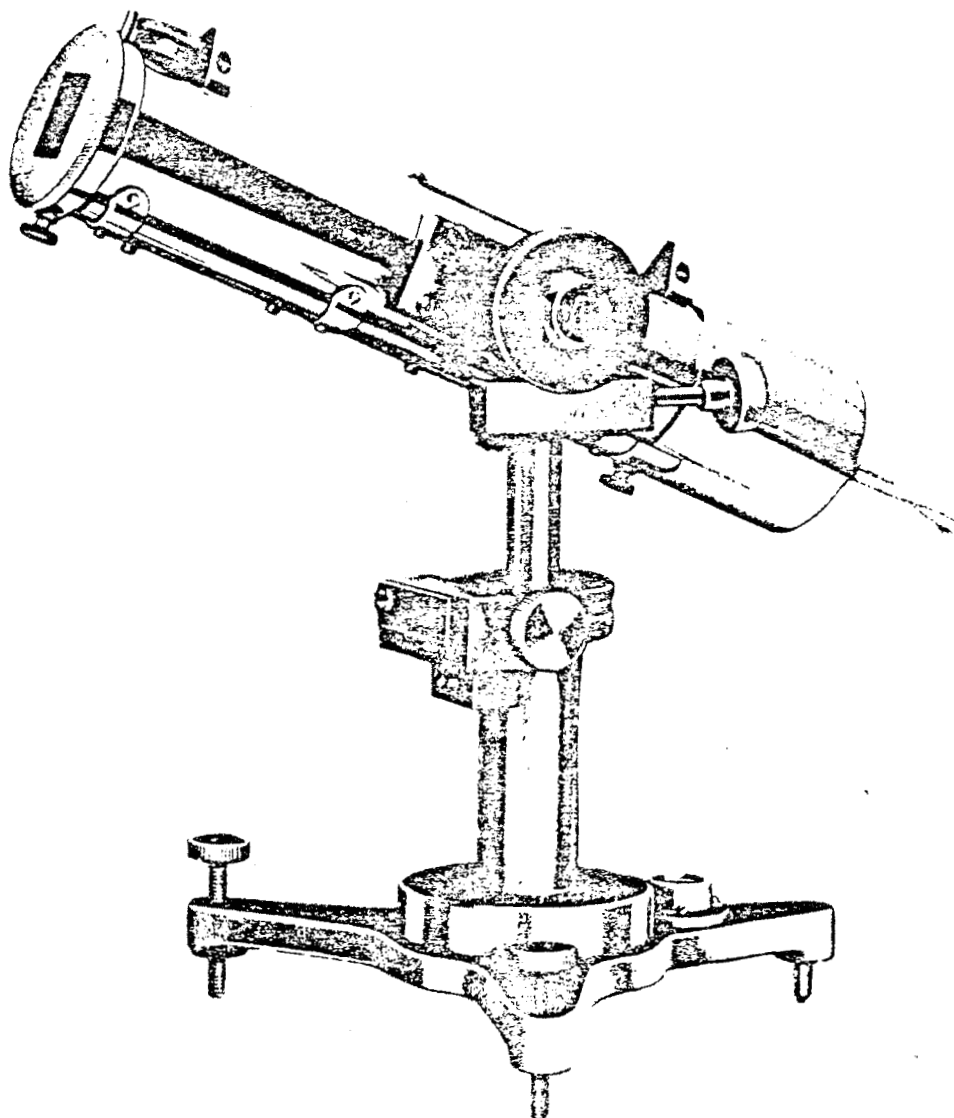
Instrumentet måler normalstrålingen, idet sigterøret indstilles med retning mod solen. I bunden af sigterøret er der 2 ens sorte plader med indbyggede termoelementer og varmetråde. Når den ene plade holdes afskærmet fra solen, og den anden belyses og dermed opvarmes, opstår der en temperaturdifferens mellem dem. Med et passende hjælpeudstyr er det nu muligt at sende og regulere en elektrisk strøm gennem den skyggede plade, således at denne opnår nøjagtig samme temperatur som den belyste. Den af strømmen afsatte effekt, der er proportional med kvadratet på strømstyrken, vil således være et mål for solindfaldet på den belyste flade. Ved at foretage en serie målinger, hvor skiftevis den ene og den anden plade belyses og de tilsvarende strømstyrker bestemmes, kan normalstrålingen findes af ligningen

$$I_{DN} = K \cdot \bar{A}^2 \quad (2.4)$$

hvor K er en kalibreringskonstant og $\bar{A}$ middelværdien af de målte strømstyrker.

Nøjagtigheden i målingen, udover bestemmelsen af strømstyrkerne, afhænger af kalibreringskonstanten. Ved køb af instrumentet oplyses den af fabrikanten, der har fundet den ved sammenligning med sit eget "standard" instrument. Kalibreringen af disse standardinstrumenter foregår som oftest ved regelmæssige sammenlignende målinger, hvorved der fastlægges en skala. I øjeblikket er den accepterede skala IPS 1956 (International Pyrheliometric Scale), men næste år går man over til en ny: World Radiometric Reference 1981, (WRR).

EPPLEY ÅNGSTRØM PYRHELIOMETER, MODEL ANG



Figur 2.1

Laboratoriet for Varmeisolering har indkøbt et pyrheliometer fabrikeret af Eppley [3]. Ved købet blev kalibreringskonstanten opgivet til $7,04 \text{ cal/cm}^2/\text{min/A}^2 = 491,3 \text{ mW/cm}^2/\text{A}^2$ og en angivet målenøjagtighed på ca. 0,5%. Ved en sammenlignende måling i Carpentras 1978 [4] fandtes kalibreringskonstanten til $487,6 \text{ mW/cm}^2/\text{A}^2$ efter IPS 56 og til $498,3 \text{ mW/cm}^2/\text{A}^2$ efter WRR 81. I forhold til den oprindelige kalibreringskonstant er den nye fundet at være 0,75% mindre.

2.2 Måling af globalstråling

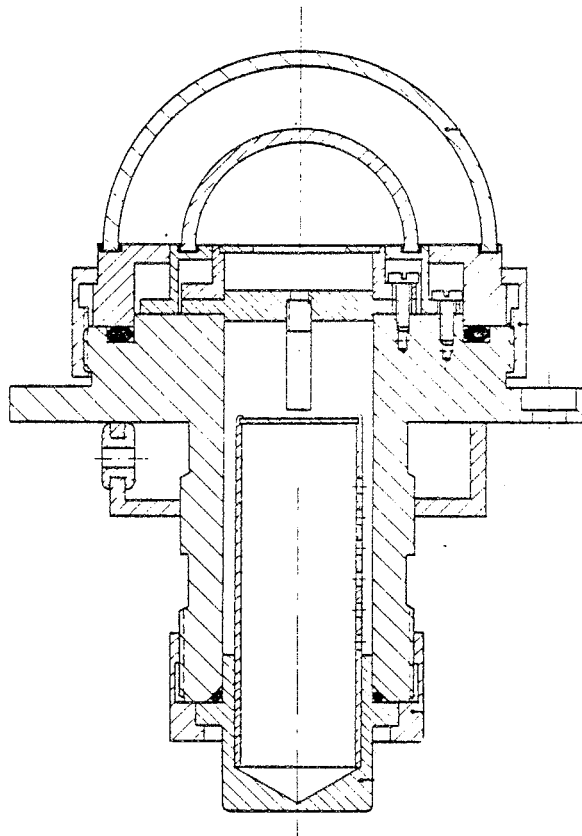
Måling af diffus himmelstråling kræver et instrument, som kan integrere indstrålingen over hele himmelhvalvingen. Hertil benyttes ofte et såkaldt solarimeter (eng. pyranometer). Den mest benyttede model i Europa fremstilles af Kipp & Zonen og har et tværsnit som vist på figur 2.2. Under 2 glaskupler er anbragt en række termoelementer, hvis varme loddesteder er farvet sorte. De kolde loddesteder er anbragt i tæt kontakt med en kobberplade, der så godt som muligt holdes på lufttemperaturen. På figur 2.3 er termosøjlels principielle opbygning vist.

Når solen skinner på instrumentet bliver temperaturen under glaskuplerne højere end lufttemperaturen og den derved fremkomne temperaturdifferens, der medfører en spændingsforskel mellem loddestederne, er et mål for solindfaldet. For bedst muligt at beskytte de kolde loddesteder mod at blive opvarmet af solen anbringes solarimetret som regel i en holder med en stor hvid skærm, der beskytter solarimeterhuset mod solstrålingen.

Ved køb af instrumentet angiver fabrikanten en kalibreringskonstant, der er fundet ved sammenligning med fabrikantens eget "standard" instrument.

Anbragt i vandret stilling måles globalstrålingen som summen af direkte og diffus stråling. Såfremt der kun

SNIT AF KIPP & ZONEN SOLARIMETER



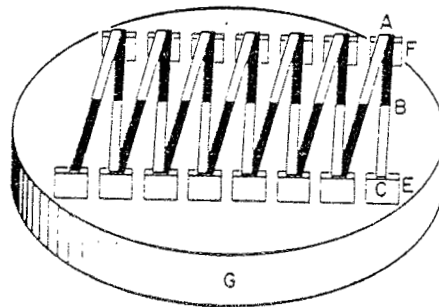
Figur 2.2

ønskes målt den diffuse stråling, må der afskærmes for den direkte stråling. Dette kan gøres ved at anbringe solarimetret i en opstilling, hvor en passende stor skive hele tiden fastholdes i retningen mod solen. Dette kræver ved måling over længere tidsrum, at skiven hele tiden bevæger sig i takt med solen. Alternativt kan benyttes en skærm, der fastholdt gennem længere tid (fx en uge) afskærer den direkte stråling, se figur 4.2. Herved afskæres naturligvis også en del af den diffuse himmelstråling, hvad der derfor bør korrigeres for, men til gengæld er måleopstillingen enklere og mere robust.

Måling med solarimeter er behæftet med nogen usikkerhed. De to glaskupler tillader kun transmission af stråler med bølgelængder mellem 0,32 og 2,5 μm [2], og derved afskæres en mindre del af spektret, jævnfør figur 1.1. Skønsmæssigt afskæres 3 - 5%, hvilket der naturligvis korrigeres for ved kalibreringen, og da spektralfordelingen ikke ændrer sig væsentligt med intensiteten, giver dette forhold ikke anledning til fejlmålinger af betydning. Væsentligere er imidlertid, at glaskuplerne kan virke som samlelinser og i visse tilfælde forøge strålingsintensiteten netop på de varme loddesteder, hvorved der måles et større solindfald end der faktisk forekommer. Hvor stor fejlen kan blive er vist på figur 2.4. Fejlen ses her at være størst med små indfaldsvinkler, hvorfor den i Danmark får størst betydning for solarimetre, der ikke er anbragt vandret, idet solens mindste indfaldsvinkel på vandret er ca. 34 grader.

Den vel nok væsentligste fejlkilde ved solarimetermålinger er, at de varme loddesteders absorptionskoefficient ikke er uafhængige af indfaldsvinklen. I almindelighed vil man finde, at jo større indfaldsvinkel, jo større er usikkerheden ved målingen. For instrumenter med en angivelig bedre udførelse og mindre måleusikkerhed, fx et præcisionssolarimeter fra Eppley [5] anføres

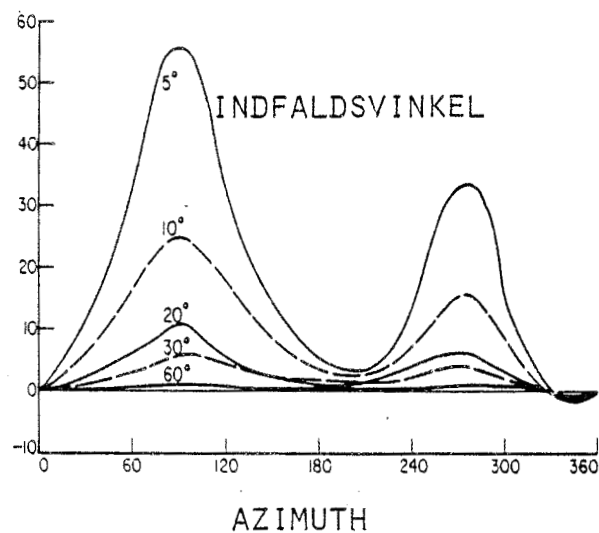
PRINCIPSKITSE AF SOLARIMETRETS TERMOSØJLE,
B ER VARME LODDESTEDER, A OG C KOLDE LODDE-
STEDER, E OG F FASTGØRELSE TIL KOBBERPLADEN G.



Figur 2.3

EKSEMPEL PÅ ET SOLARIMETERS FEJLVISNING SOM
FUNKTION AF INDFALDSVINKEL OG AZIMUTH, REF. [2]

% FEJLVISNING



Figur 2.4

en afvigelse på mindre end $\pm 1\%$ ved indfaldsvinkler mindre end 70 grader og mindre end $\pm 3\%$ mellem 70 og 80 grader, men der angives ingen usikkerhed ved indfaldsvinkler over 80 grader. Man må derfor regne med nogen usikkerhed på målinger foretaget med store indfaldsvinkler, hvilket betyder, at globalstrålingen målt ved lave solhøjder er usikkert bestemt.

Endelig er der ved solarimetre anbragt i hældende stillinger også fundet fejlvisninger op til 10% i forhold til vandret stilling [6]. Dette er forklaret med, at ændrede konvektionsstrømme inden i solarimetret medfører, at afkølingen foregår anderledes og derved giver fejlmålinger. Generelt gælder det desuden, at solarimetrene er lidt temperaturafhængige, idet luftens varmeoverføringsevne ved ledning og konvektion ændres med temperaturen. For almindelige Kipp & Zonen solarimetre angives en temperaturkoefficient på 0,1 - 0,2% pr. $^{\circ}\text{C}$, hvilket medfører, at følsomheden stiger med faldende temperatur. Da instrumenterne er kalibreret ved omkring 20 $^{\circ}\text{C}$, vil de omkring 0 $^{\circ}\text{C}$ vise mellem 2 og 4% for lidt, hvis der ikke korrigeres herfor.

Sammenfattende findes, at målinger af solindfaldet er behæftet med nogen usikkerhed, når det foretages med almindelige solarimetre. Almindeligvis antages da også, at målenøjagtigheden er ca. $\pm 5\%$.

2.3 Sammenlignende målinger

Med et solarimeter er det også muligt at måle den direkte stråling alene. Først måles det totale solindfald og dernæst måles det diffuse solindfald, idet der med en lille rund skive (diameter ca. 10 cm) holdt i en passende afstand (1 - 2 m) fra solarimetret afskærmes fra den direkte stråling. Differensen mellem de to målinger er da udtryk for den direkte stråling. Målingen forudsætter at solstrålingen ikke ændrer sig under og mellem de to målinger. Den kan således kun foretages på dage med skyfri eller næsten skyfri himmel.

På disse dage vil det også være muligt at måle normalstrålingen med pyrheliometer og derved foretage en kontrol af solarimetres kalibreringskonstant. Metoden kræver enten, at solarimetret anbringes hældende, således at indfaldsvinklen bliver lig med nul, eller at solens position måles eller udregnes, således at den målte direkte stråling kan omregnes til normalstråling. Begge metoder medfører en vis usikkerhed ved sammenligningen.

Metoden og resultaterne af sammenlignende målinger er nærmere beskrevet i [7]. Desuden er metoden benyttet til kontrol af et enkelt af de syv Kipp & Zonen solarimetre, der blev benyttet i Værløse (se nærmere beskrivelse i kapitel 4). Her fandtes ved målinger med solarimetret fra Værløse (752610), et ubrugt solarimeter (763310) og et Eppley præcisionssolarimeter den 23/10-1979 solindfald ved forskellige hældninger som angivet i tabel 2.1. Ved måling af normalstrålingen samme dag med en solhøjde på omkring 15 grader fandtes de i tabel 2.2 angivne værdier. Under hensyntagen til en vis aflæsningsusikkerhed (svarende til ca. $\pm 2,5 \text{ W/m}^2$) findes overensstemmelsen mellem de forskellige instrumenter rimelig god.

Tabel 2.1 Målt solindfald, W/m^2				
Solarimeter	Hældning fra vandret, grader			
	0	30	60	90
1) 752610	276	585	772	759
2) Eppley	271	589	796	775
1 i % af 2	102	99	99	98
3) 763310	268	592	763	748
4) Eppley	266	588	774	751
3 i % af 4	101	101	99	100

Tabel 2.2 Målt normalstråling, W/m^2			
Måling ¹⁾ nr.	Måleinstrument		
	Pyrheliometer	Eppley	763310
1	733		
2		714	711
3	715		
4		701	699
1) Der er ca. 5 min. mellem hver måling			

3. SOLENS POSITION OG EXTRATERRESTRIALSTRÅLINGEN

For at kunne behandle målte strålingsdata er det ofte nødvendigt at kende solens position på himlen til et vilkårligt tidspunkt τ_N , angivet i normaltid, dvs. det klokkeslet urene viser. Solens position er fastlagt, når

h = solhøjden

og

az = solazimuth

kendes. h er vinklen mellem retningen mod solen og vandret, men az er vinklen mellem stråleretningens projektion på vandret og sydretningen. az er nul mod syd og regnes negativ mod øst og positiv mod vest.

Når observationsstedets geografiske bredde er kendt, kan solhøjden bestemmes af ligningen:

$$\sin(h) = \sin(\delta) \cdot \sin(b) + \cos(\delta) \cdot \cos(b) \cdot \cos(\omega) \quad (3.1)$$

hvor

δ = solens deklination

b = stedets geografiske bredde

ω = solens timevinkel

Solens timevinkel, der er vinklen mellem sydretningen og solen, målt på solens banecirkel, findes (i grader):

$$\omega = 15 \cdot (\tau_s - 12) \quad (3.2)$$

hvor

τ_s = sand soltid i timer

ω er således nul for $\tau_s = 12$, når solen står i syd, og regnes negativ mod øst og positiv mod vest, ligesom az .

Den sande soltid kan findes ud fra normaltiden, stedets længdegrad og korrektion for solens uregelmæssige bevægelse:

$$\tau_s = \tau_N + \frac{1}{15} (l_N - l_{ob}) + \frac{1}{60} E \quad (3.3)$$

hvor

l_N = normallængdegraden

l_{ob} = stedets længdegrad

E = tidsekvationen (min)

Længdegraderne regnes positive vest for og negative øst for Greenwich. Tidsforskellen mellem normaltid og soltid, der alene opstår på grund af stedets placering i forhold til normallængden kaldes ofte stedtiden.

Jordbanens elliptiske form medfører, at solens bevægelser på himmelhvælvingen ikke er helt regelmæssige gennem året. Derfor er normaltiden (der jo ønskes regelmæssig) afstemt efter middelsoltiden, og forskellen mellem middelsoltid og sand soltid kaldes tidsekvationen.

Når solens højde er bestemt, kan solazimuth beregnes af:

$$\cos(az) = \frac{[\cos(\delta) \cdot \sin(b) \cdot \cos(\omega) + \cos(b) \cdot \sin(\delta)]}{\cos(h)} \quad (3.4)$$

eller af

$$\sin(az) = [\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)] / \cos(h) \quad (3.5)$$

Når solens position således er kendt, kan den direkte strålings indfaldsvinkel på en flade bestemmes af ligningen:

$$\cos(i) = \cos(h) \cdot \cos(az - af) \cdot \sin(t) + \sin(h) \cdot \cos(t) \quad (3.6)$$

hvor

af = fladeazimuth

t = fladehældning

På figur 3.1 er de forskellige vinkler illustreret, idet fladeazimuth er vinklen mellem projektionen af faldens normal på vandret og sydretningen. På figuren er sol-fladeazimuth = az-af betegnet med β . Endelig måles fladens hældning i forhold til vandret.

3.1 Deklination og tidsekvation

Solens position kan findes ved hjælp af de i afsnit 3. givne ligninger. Hertil kræves blot oplysninger om deklinationen og tidsekvationen. Disse kan findes i tabelværker fx [8] for hvert år, eller de kan aflæses af kurveblade (figur 3.2). For et gennemsnitsår kan man ofte finde kurveblade, gældende for en given lokalitet, hvor man direkte kan aflæse solens position til et ønsket tidspunkt, se fx [9].

Ved edb-beregninger er kurveblade ikke særlig hensigtsmæssige, hvorfor der er udarbejdet formelsæt til bestemmelse af deklination og tidsekvation blot som funktion af dagens nummer i året.

Tilnærmet kan deklinationen udtrykkes ved:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin(360(284 + ND)/365) \quad (3.7)$$

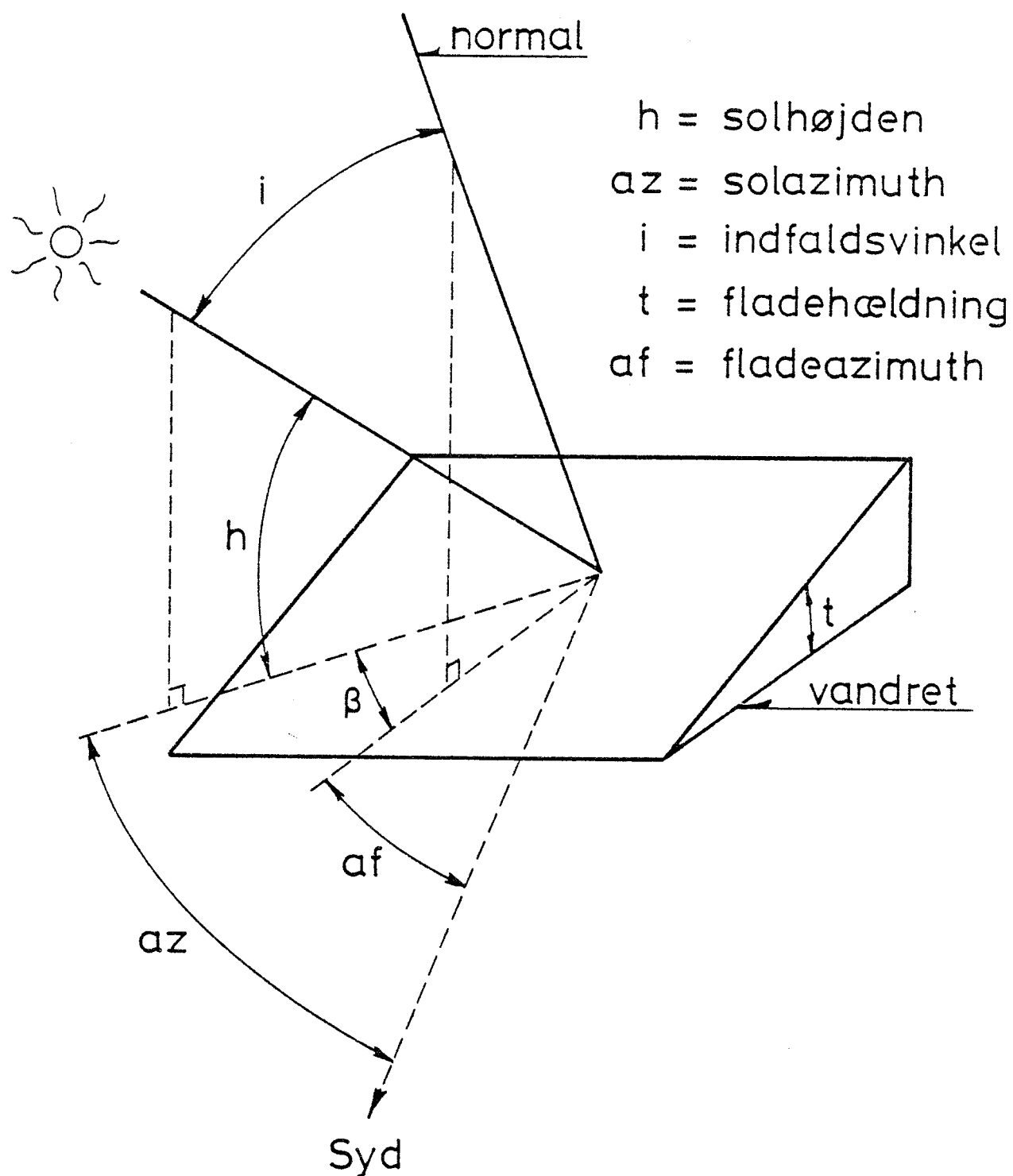
hvor ND er dagens nummer i året, startende med 1. januar.

Et lidt nøjagtigere udtryk findes i [10], og dette benyttes fremover:

$$\delta = 0,33 - 22,96 \cos(DF) - 0,37 \cos(2 DF) - 0,15 \cos(3 DF) + 4,0 \sin(DF) \quad (3.8)$$

hvor DF er lig $360 \cdot ND/365$.

VINKLER TIL BEREGNING AF SOLINDFALD PÅ FLADE



Figur 3.1

Ligeledes i [10] er angivet et udtryk for beregning af tidsekvationen (i minutter) som funktion af dagens nummer:

$$\begin{aligned} 0 < ND \leq 20 & : E = -2,6 - 0,44 \cdot ND \\ 20 < ND \leq 135 & : E = -5,2 - 9 \cdot \cos((ND - 43) \cdot 0,0357) \\ 135 < ND \leq 240 & : E = -1,4 + 5 \cdot \cos((ND - 135) \cdot 0,0449) \\ 240 < ND \leq 335 & : E = 6,3 + 10 \cdot \cos((ND - 305) \cdot 0,036) \\ 335 < ND \leq 365 & : E = -0,46 \cdot (ND - 359) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Med ligning (3.8) og (3.9) er deklinationen (i grader) og tidsekvationen (i minutter) beregnet gennem året og optegnet på figur 3.2.

3.2 Solopgang og solnedgang

Solcentres timevinkel ω_s ved passage af horisonten findes af ligning (3.1), idet højden er lig med nul:

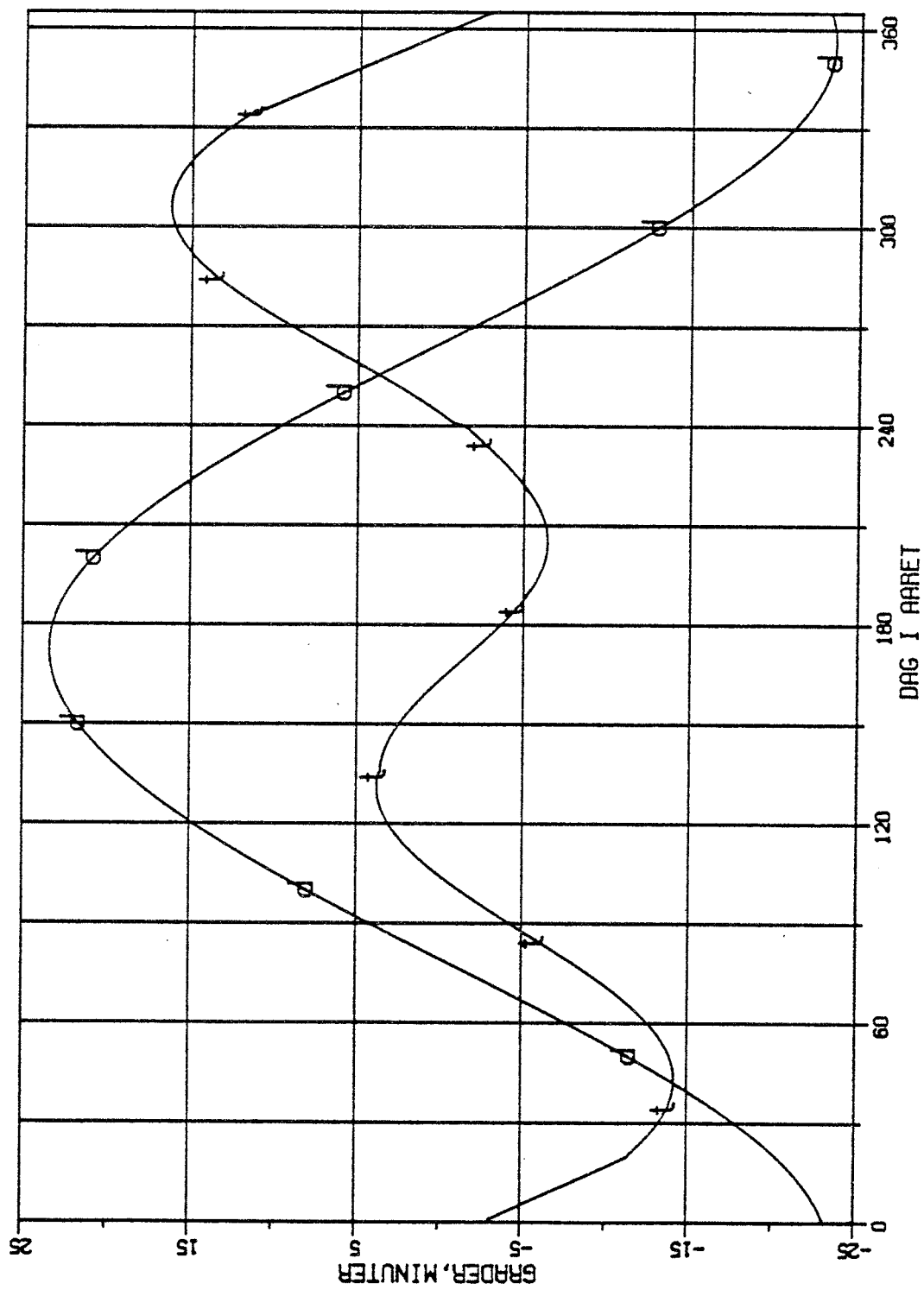
$$\cos(\omega_s) = -\operatorname{tg}(\delta) \cdot \operatorname{tg}(b) \quad (3.10)$$

På grund af lysets afbøjning i atmosfæren (refraktionen) bliver solen ved solopgang synlig, før den rent faktisk kommer over horisonten, og den kan ses et lille stykke tid efter den er gået under horisonten ved solnedgang. Beregnes dagens længde uden hensyntagen hertil, fås en daglængde, der er 10 - 15 minutter for kort. Beregningsmæssigt tages der hensyn hertil ved at indsætte effekten af refraktionen, der er ca. 0,6 grader i ligning (3.1), og da $\sin(-0,6) \approx -0,01$, fås:

$$\cos(\omega_s) = [-0,01 - \sin(\delta) \cdot \sin(b)] / [\cos(\delta) \cdot \cos(b)] \quad (3.11)$$

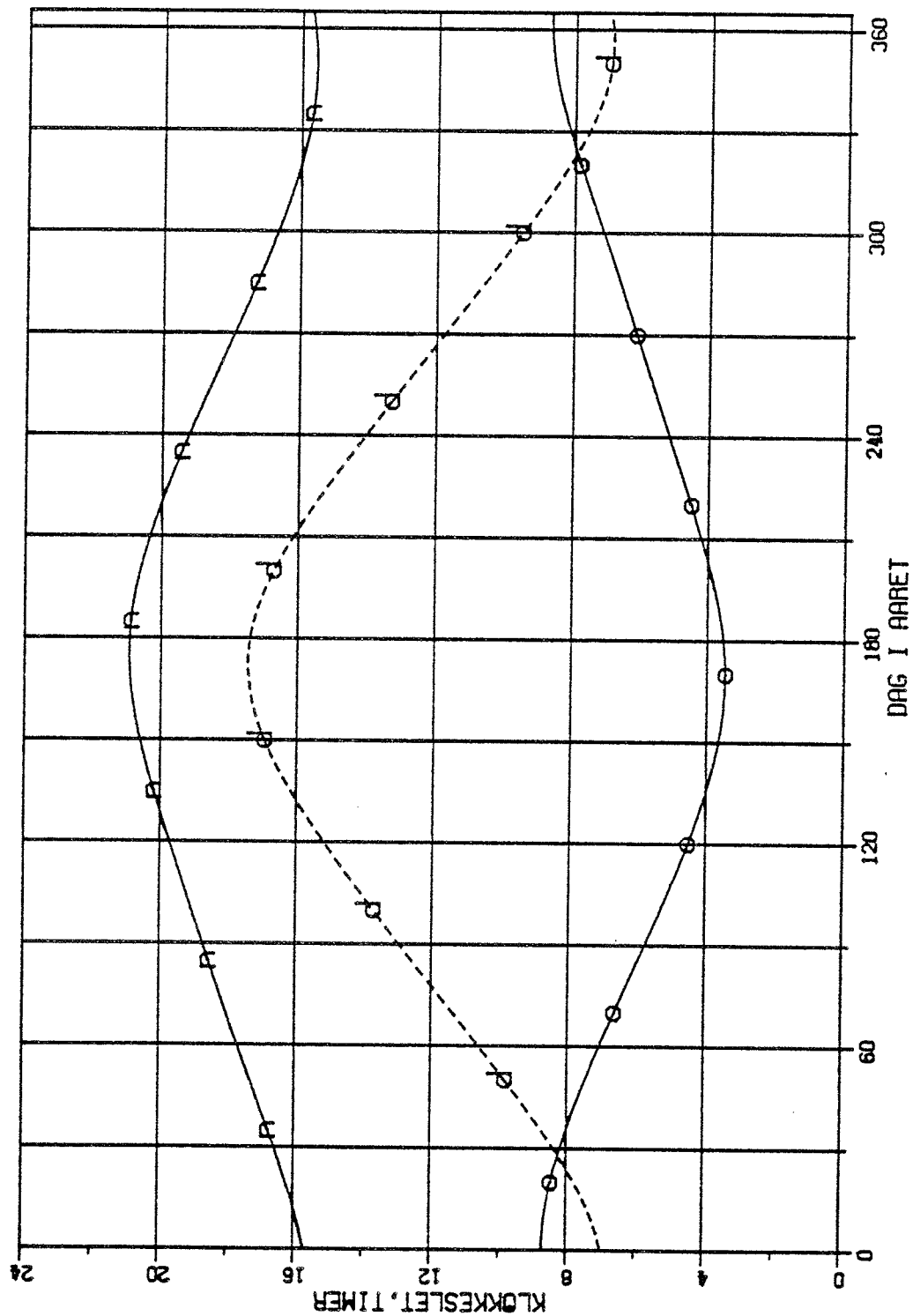
Ved at omregne ω_s til normaltids kan solopgangen og solnedgangen tidsbestemmes, ligesom dagens længde kan findes. For den i næste kapitel omtalte målestations placering i Værløse ($55^{\circ} 46'$ nordlig bredde og $12^{\circ} 18' 41''$ østlig længde) er dette gjort, og resultatet er optegnet på figur 3.3.

DEKLINATION OG TIDSEKVATION
D=DEKLINATION T=TIDSEKVATION



Figur 3.2

SØLØPGANG, SØLNEDGANG OG DAGLÆNGDE ¹⁾
 Ø=ØPGANG N=NEDGANG D=DAGLÆNGDE



¹⁾ GÆLDENDE FOR 55° 46' NORDLIG BREDDER OG 120° 18' 41" ØSTLIG LÆNGDE (VÆRLØSE)

Figur 3.3

3.3 Extraterrestrial stråling

På en vandret flade kan den direkte solstrålings indfaldsvinkel bestemmes af formel (3.1), idet $\sin(h) = \cos(i)$. Det er derfor forholdsvis let at bestemme den stråling en vandret flade modtager fra solopgang til solnedgang, såfremt der ingen atmosfære fandtes. Idet normalstrålingen uden for atmosfæren gennem året har værdien lig solkonstanten korrigeret for den varierende jord-solafstand:

$$I_N = I_{sc} \cdot (1 + 0,033 \cos(360 \cdot ND/365)) \quad (3.12)$$

findes ved integration af ligning (3.1) fra solopgang til solnedgang, at extraterrestrialstrålingen H_0 på en vandret flade er:

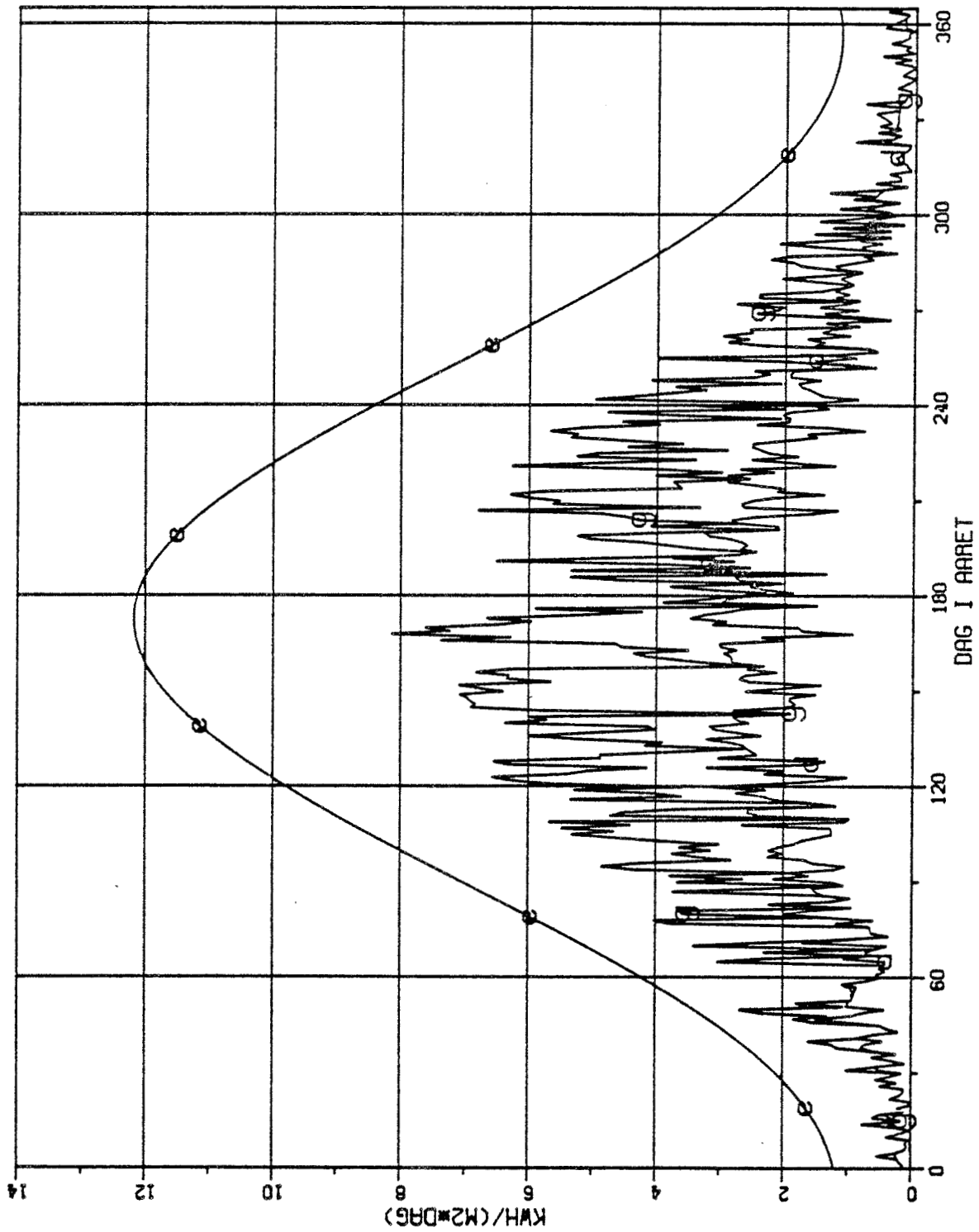
$$H_0 = I_N \cdot 24/\pi \cdot [\sin(\delta) \cdot \sin(b) \cdot (\omega_s \cdot 2\pi/360) + \cos(\delta) \cdot \cos(b) \cdot \sin(\omega_s)] \quad (3.13)$$

hvor I_N bestemmes af ligning (3.12) og ω_s af ligning (3.11).

Bestemmes H_0 gennem hver dag i året, fås værdierne som optegnet på figur 3.4. Her er ligeledes til sammenligning optegnet målte værdier af globalstråling og diffus himmelstråling i 12 på hinanden følgende måneder. Målingerne er foretaget på den i kapitel 4 omtalte måleopstilling i Værløse. Det ses helt tydeligt, at passagen gennem atmosfæren svækker solstrålingen væsentligt.

Endelig er der i tabel 3.1 angivet månedssummer af extraterrestrialstråling og timer med solen over horisonten. Desuden er det daglige gennemsnit i hver måned udregnet, og på baggrund heraf er månedens "middeldag" fundet. Såfremt tilsvarende værdier for en anden geografisk placering ønskes, kan man nøjes med for den angivne dag i hver måned at udregne indstrålingen og daglængden. Derefter kan man med rimelig god tilnærmelse bestemme månedssummerne ved at multiplicere med antallet af dage i hver måned.

EXTRATERRESTRIAL¹⁾, GLOBAL OG DIFFUS STRAALING²⁾
E=EXTRATERRESTRIAL G=GLOBAL D=DIFFUS



1) GÆLDENDE FOR 55° 46' NORDLIG BREDDE (VÆRLØSE)

2) MÅLT I VÆRLØSE 1/12-1977 - 30/11-1978

Figur 3.4

Tabel 3.1 Extraterrestrialstråling og daglængder ¹⁾					
Måned	Solindfald på vandret uden for atmosfæren		Maximalt opnåelige antal solskinstimer		Middel dag i måneden
	kWh/m ² ·md	kWh/m ² ·dag	h/md	h/dag	
Januar	49,4	1,59	236,5	7,63	17
Februar	87,1	3,11	266,3	9,51	15
Marts	173,7	5,60	365,5	11,79	16
April	255,2	8,51	424,2	14,14	16
Maj	338,2	10,91	502,4	16,21	15
Juni	362,3	12,08	520,6	17,35	11
Juli	357,6	11,53	520,9	16,80	17
August	293,2	9,46	462,8	14,93	16
September	199,7	6,66	379,6	12,65	15
Oktober	122,3	3,95	320,5	10,34	16
November	60,5	2,02	246,9	8,23	15
December	37,9	1,22	218,1	7,03	11
Året	2307,1	6,32	4464,3	12,33	
1) Beregnet for 55° 46' nordlig bredde (Værløse)					

4. MÅLEOPSTILLING I VÆRLØSE

Kontinuerte solstrålingsmålinger blev indtil for ganske nylig hovedsagelig kun foretaget på en vandret flade (globalstråling og evt. diffus himmelstråling), og målingerne blev ikke foretaget på de samme steder, hvor øvrige meteorologiske observationer fandt sted. Inden for de seneste år er der dog af Meteorologisk Institut påbegyndt målinger af solindfaldet, dels globalstrålingen ved en række meteorologiske stationer og dels solindfaldet på lodrette flader ved nogle få stationer.

I 1975 havde Lysteknisk Laboratorium (et ATV institut) til hensigt at begynde en række kontinuerlige lystekniske målinger i umiddelbar nærhed af en meteorologisk station. Da både Lysteknisk Laboratorium og Laboratoriet for Varmeisolering havde interesse i solstrålingsmålinger, blev måleprojektet udvidet til også at omfatte solstrålingsmålinger.

Der blev opbygget et automatisk registreringsudstyr, som placeret i et lille skur i foråret 1977 blev opstillet i nærheden af den meteorologiske station i Værløse. Herfra var det muligt at få meteorologiske målinger, således at man, når solstrålings- og lysmålingerne blev kombineret med vejrobservationerne, fik et mere fuldstændigt datagrundlag, end der tidligere fandtes.

4.1 Måleinstrumenter og registreringsudstyr

Lysteknisk Laboratorium opbyggede et automatisk registreringsudstyr, der mellem to frit valgte tidspunkter hver dag med en periodelængde på 10 minutter kunne integrere signaler fra 20 indgange. En nærmere beskrivelse af opbygningen og virkemåden findes i [11]. Princippet er kort fortalt, at man fra måleinstrumenterne, fx et solarimeter, får en spændingsforskelle (der er proportional med solindfaldet), og denne benyttes til at

oplade en kondensator. Efter ni minutters opladning aflæses kondensatorens ladning, og værdien udhulles på en papirtape, samtidig med at kondensatoren aflades i et minut, hvorefter en ny måleperiode begynder. Når måleinstrumentets kalibreringskonstant og registreringsudstyrets opbygning kendes, kan den udhullede værdi omsættes til middelværdien af den målte fysiske størrelse i måleperioden. Den er her 9 minutter, men det antages, at den målte middelværdi er repræsentativ for hele 10 minutters perioden.

Når målingerne foregik fra ca. en time før solopgang til ca. en time efter solnedgang, så var der på papirtapen plads til 1 uges målinger selv i sommerperioden, således at det kun var nødvendigt at tilse udstyret ca. 1 gang om ugen. Dette betød til gengæld, at fx svigt i udstyret kunne give op til en uges "hul" i målingerne.

Som nævnt blev solindfaldet målt. Der blev her benyttet solarimetre fra Kipp & Zonen. 5 solarimetre blev placeret i en terningformet holder, se figur 4.1, hvorved solindfaldet kunne måles på:

- vandret (globalstråling)
- lodret syd
- lodret vest
- lodret nord
- lodret øst

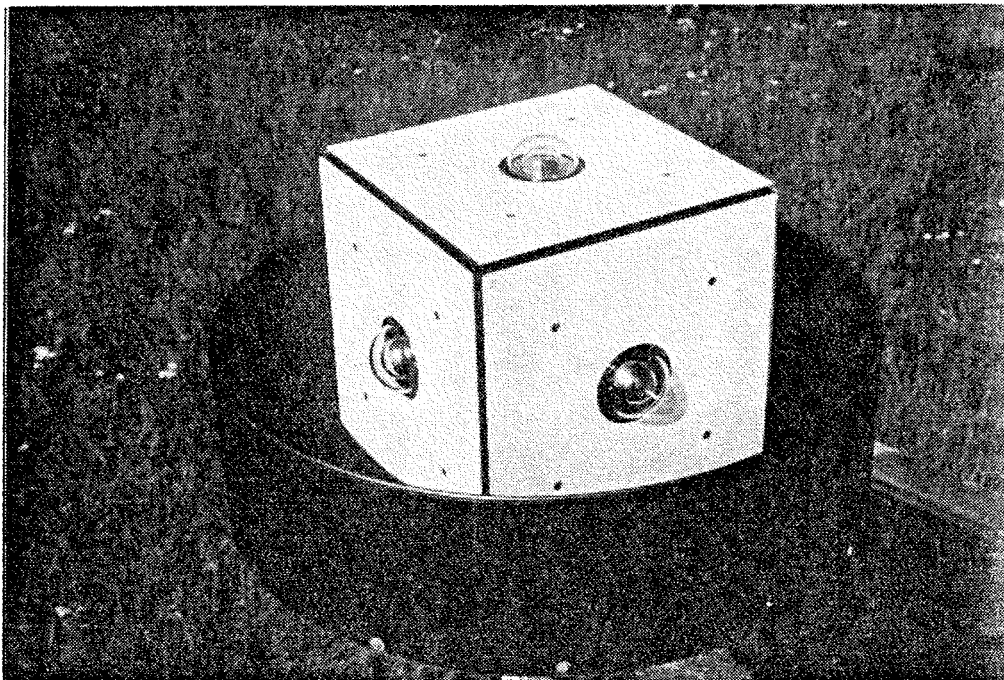
Desuden blev 2 solarimetre anbragt afskærmet fra den direkte stråling, således at de målte den diffuse stråling på flader, der var henholdsvis

- vandret
- og
- sydvendt med hældning 60 grader.

Se figur 4.2 og 4.3.

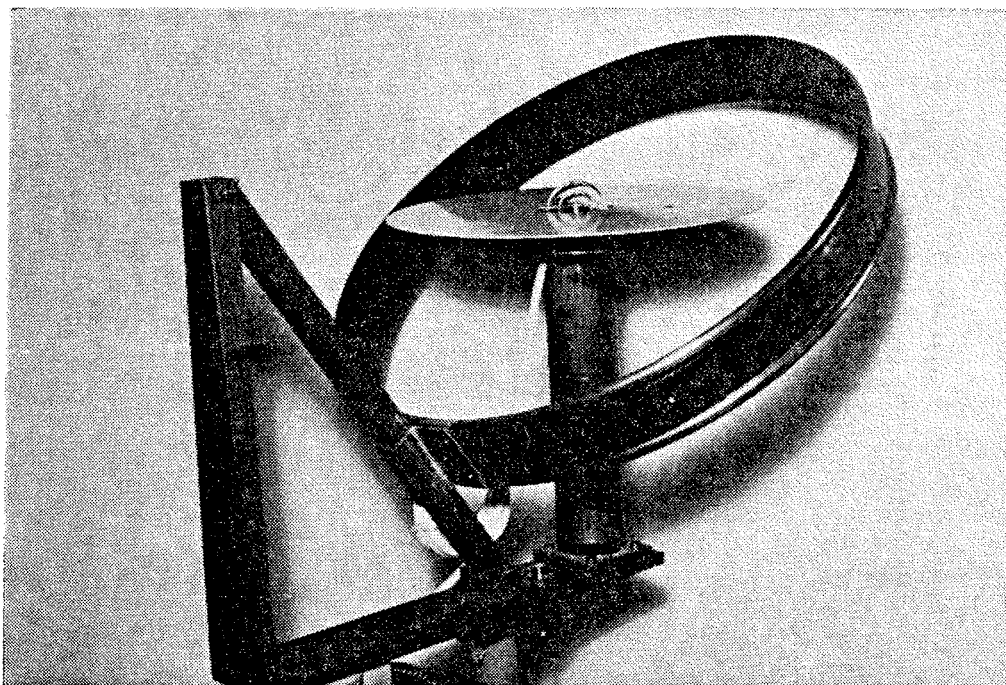
I alle opstillingerne var solarimetrene med en skærm afskåret fra at modtage diffus reflekteret stråling fra de omgivende arealer. De førstnævnte måler således summen af direkte stråling og diffus himmelstråling på

SOLARIMETEROPSTILLING TIL MÅLING AF GLOBALSTRÅLING
SAMT SOLINDFALD PÅ FIRE LODRETTE FLADER



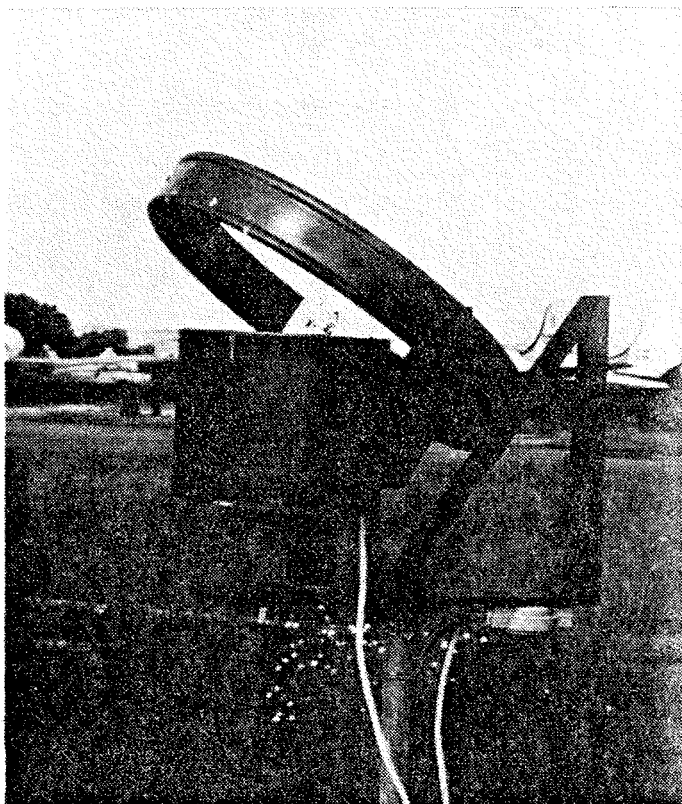
Figur 4.1

MÅLING AF DIFFUS HIMMELSTRÅLING PÅ VANDRET



Figur 4.2

MÅLING AF DIFFUS HIMMELSTRÅLING PÅ SKRÅ FLADE



Figur 4.3

MÅLEOPSTILLING OG INSTRUMENTHUS I VÆRLØSE



Figur 4.4

de angivne flader, mens de sidstnævnte 2 kun målte diffus himmelstråling.

Ud over solstrålingsmålingerne, der vil blive behandlet nærmere i det følgende, målt belysningen på de samme vandrette og lodrette flader samt luminansen i nogle retninger. De to sidstnævnte målinger er nærmere beskrevet i [11].

Alle instrumentholderne blev placeret på eller i umiddelbar nærhed af skuret til registreringsudstyret, se situationsbilledet figur 4.4. Placeringen i Værløse blev foretaget på en sådan måde, at der praktisk talt ingen horisontafskærmning forekom, idet der ikke fandtes bygninger eller bevoksning i nærheden, der kunne skygge for den direkte stråling eller væsentlig nedsætte den diffuse himmelstråling.

Selve målestationens geografiske beliggenhed er:

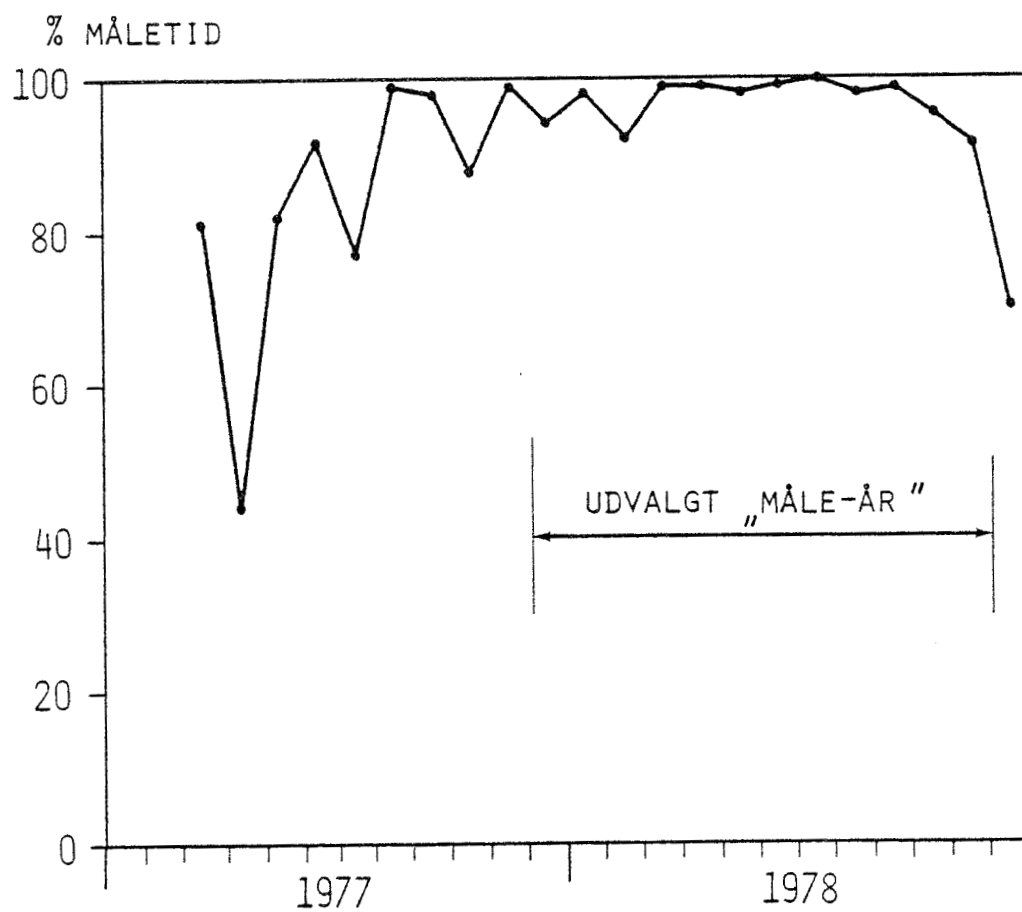
55° 46' 0" nordlig bredde
12° 18' 41" østlig længde
18 m over havoverfladen

Dette giver en stedtid på -10,75 minutter før middelsoltiden for 15. længdegrad øst for Greenwich, der kaldes mellemeuropæisk tid og er den vore ure viser (når der ikke er sommertid).

4.2 Måleperioden

Målingerne startede i begyndelsen af marts 1977 og fortsatte til efteråret 1979. Da det tog nogen tid at edb-behandle de målte værdier, og da de øvrige meteorologiske data først kunne fås færdigbehandlet 1/2 - 3/4 år efter observationstidspunktet, så var der til dette arbejde kun data tilgængelige til udgangen af 1978.

Som tidligere nævnt kunne der optræde uønskede stop i registreringsudstyret, og derfor er måledataene ikke fuldstændige. På figur 4.5 er vist den registrerede måletid i % af den ønskede, der er fra solopgang til



Figur 4.5

solnedgang.

Denne måletid angiver blot, om der findes data eller ej, og den siger ikke noget om dataenes beskaffenhed. Det viste sig nemlig, at selvom måleudstyret var i drift kunne der opstå fejl, således at dataene var mere eller mindre ubrugelige. Dette forhold behandles nærmere i kapitel 5.

På grundlag af bl.a. figur 4.5 udvalgte de 12 sammenhængende måneder med størst måletid. Det viste sig at være perioden fra 1/12-1977 til 30/11-1978. Denne periode på ét år kaldes i det følgende "måleåret", og i de følgende kurver og tabeller er december 1977 af praktiske grunde altid anbragt efter november 1978, således at måleåret fremtræder som et fysisk år fra januar til december. Man skal således have dette in mente ved læsningen af de følgende afsnit.

5. BEHANDLING AF MÅLEDATA

De målte værdier fra Værløse blev, i første omgang, overført til papirtape. Disse data, rådataene, var ikke umiddelbart tilgængelige og krævede derfor en nærmere behandling. For det første skulle de registrerede værdier "oversættes" til de rette fysiske størrelser, og dernæst skulle de forkerte værdier enten rettes eller kasseres. Til behandlingen blev der derfor udviklet et større edb-program. Med dette var det muligt, dels at give målingerne de rigtige enheder, dels at rette visse typer af fejl og dels at kassere nogle af de åbenbare fejlmålinger. Efter denne automatiske behandling blev der foretaget en nærmere manuel gennemgang af målingerne for enten at kassere yderligere åbenbare fejl, at rette ikke behandlede fejl eller at kassere visse af de automatisk rettede målinger.

Registreringsudstyret var lavet således, at efter udhulningen hvert 10. minut blev klokkeslettet angivet. Den oftest forekommende fejl var manglende tidsangivelse. Så længe der kun manglede et begrænset antal kunne man ud fra de forrige og de efterfølgende forholdsvis let generere de rigtige klokkeslet. Manglede derimod tidsangivelse for en længere periode omfattende datoskift, var fejlen vanskeligere at rette, ja, i visse tilfælde umulig.

Af andre typer fejl kan nævnes manglende registrering af en enkelt eller nogle få kanaler. I sådanne tilfælde måtte hele registreringen for den gældende periode kasseres, hvis det ikke tydeligt fremgik, præcis hvilken kanal eller kanaler, der manglede.

Endelig kunne der være ufuldstændig registrering af en enkelt kanal eller fejl ved selve måleinstrumentet, hvorved forkerte værdier blev registreret. I disse tilfælde blev kun de fejlbehæftede målinger kasseret.

Efter denne gennemgang havde man et datasæt næsten uden

fejlmålinger, men med en del manglende data tilfældigt fordelt i perioden.

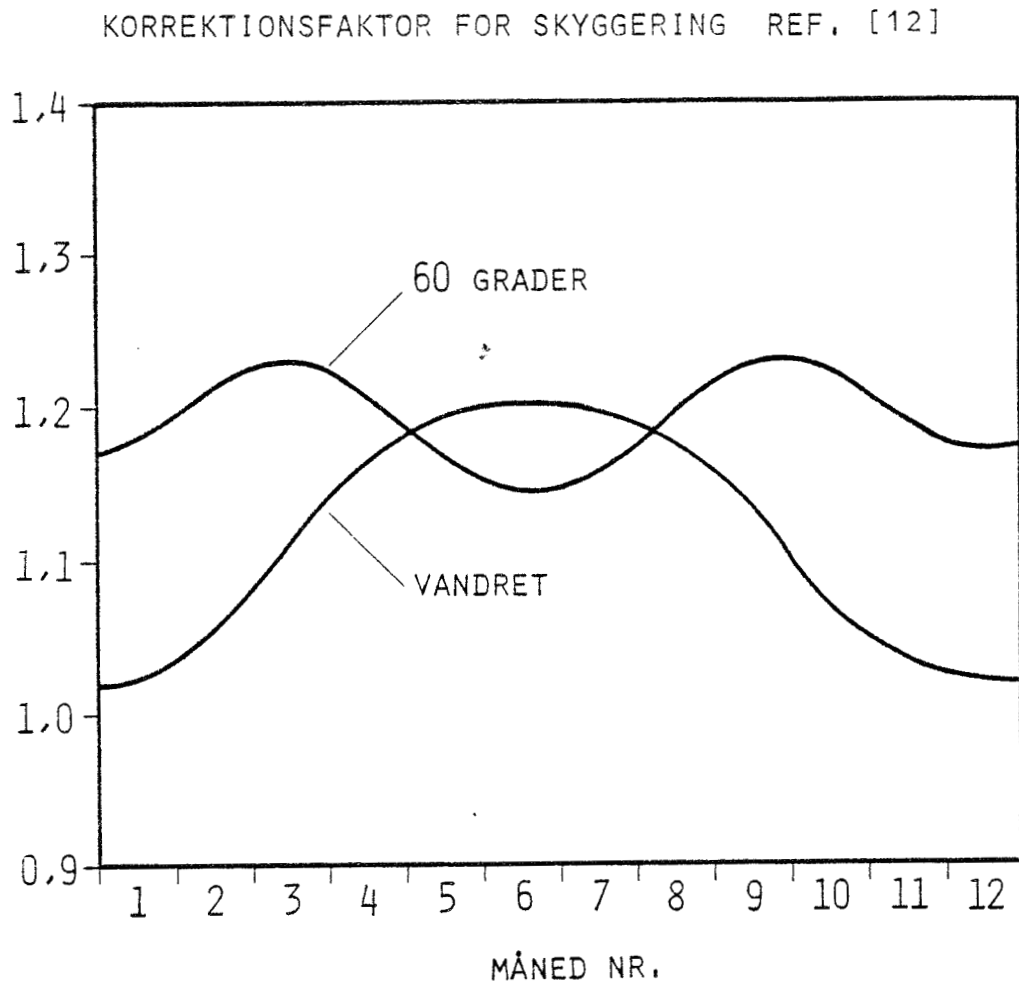
5.1 Korrektion for skyggering

Målingerne af den diffuse himmelstråling skete ved at afskære den direkte stråling med en skyggering. Skyggeringen blev ved hvert besøg på målestedet kontrolleret og justeret hvis nødvendigt. Da skyggeringen også afskærmer en del af den diffuse himmelstråling, er det nødvendigt at korrigere målingerne herfor.

Med antagelse af at den diffuse himmelstrålings intensitet er isotropisk (ensartet) fordelt over himlen, reduceres himmelstrålingen med forholdet mellem solarimetrets vinkelforhold til skærmen og til himlen.

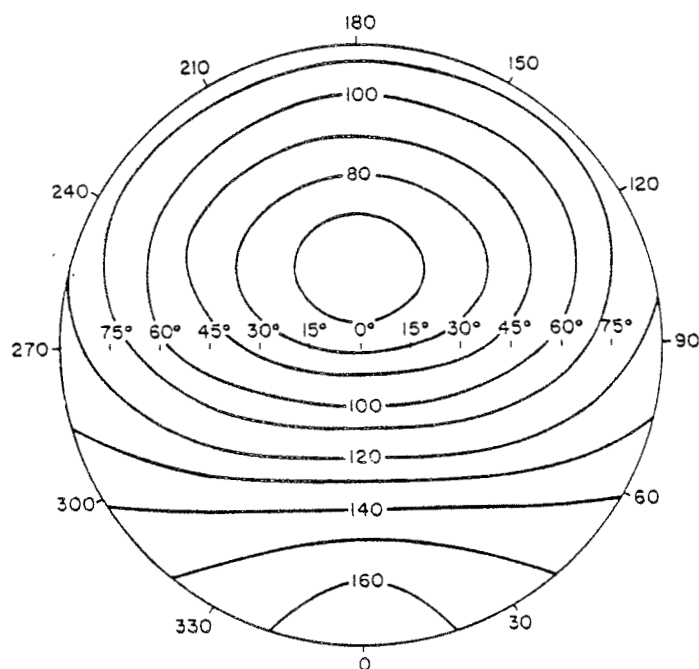
Ud fra de anvendte solarimeterholdere er der i [12] givet en række formler til bestemmelse af vinkelforholdene. Af disse er beregnet de på figur 5.1 viste korrektionsfaktorer.

De målte diffuse strålinger blev korrigeret med de anførte faktorer. Disse er beregnet for en isotropisk himmelstråling, og en sådan fordeling forekommer måske kun med overskyet himmel, men næppe med halvskyet eller skyfri himmel. I [13] er gennemført en måling af diffus stråling i klart vejr (dvs. incl. diffus reflekteret stråling fra jorden) på alle hældninger og orienteringer. Resultatet er vist på figur 5.2, og selvom den reflekterede stråling (i størrelsesorden 50 W/m^2 for lodret af-tagende til 0 ved vandret) slører billedet lidt, ses den diffuse himmelstrålings anisotropi tydeligt. For at tage højde herfor foreslås det i [14], at korrektionsfaktorerne forøges med 4% i forhold til de ud fra vinkelforholdene beregnede. Denne yderligere korrektion er dog ikke gennemført med målingerne.



Figur 5.1

DIFFUS STRÅLING FRA HIMLEN OG OMGIVELSERNE
MÅLT MED ET SOLARIMETER EN KLAR DAG, SO-
LARIMETRETS HÆLDNING ER AFSTAND FRA CENTRUM,
MENS AZIMUTHVINKEL TIL SOLEN ER ANGIVET PÅ
PERIFERIEEN. SOLHØJDEN ER 34° OG STRÅLINGEN
ER 1 W/M^2 , REF.[13]



Figur 5.2

Den direkte stråling på vandret, I_{Dv} , kan nu findes som differensen mellem globalstrålingen og den diffuse himmelstråling:

$$I_{Dv} = I_G - I_{dh} \quad (5.1)$$

Da målingerne af globalstrålingen og den diffuse himmelstråling er foretaget med to forskellige solari-metre, og den diffuse stråling yderligere er korrigeret for skyggeringen, kan det ikke forventes, at den direkte stråling beregnet efter formel (5.1) altid vil være større end eller lig med nul. En nærmere analyse heraf viste den i tabel 5.1 angivne fordeling. Antages det, at globalstrålingen er målt korrekt ses det således, at i 37% af tilfældene er den korrigerede diffuse stråling for stor, enten fordi korrektionsfaktoren eller målin-gen er for stor. På baggrund af den gennemførte analyse besluttedes det at korrigere den diffuse stråling endnu en gang, således at den blev sat lig med globalstrålingen i alle de tilfælde, hvor den direkte stråling på vandret var mindre end 20 W/m^2 , hvilket forekom i 54% af målinger-ne, jævnfør tabel 5.1. Denne korrektion betød, at i måle-året blev den diffuse himmelstråling ialt reduceret med knap 1% i forhold til tidligere, altså en meget beskeden reduktion. Samtidig betød den, at der ikke forekommer direkte stråling på vandret med en intensitet under 20 W/m^2 . Dette kan have en vis indflydelse ved meget lave solhøjder, idet der således fx ved solhøjder under ca. 5 grader ikke vil kunne beregnes normalstrålinger under 200 W/m^2 . På den anden side er målingerne netop ved de lave solhøjder behæftet med så stor usikkerhed, jævnfør kapitel 2, at ovennævnte korrektion ikke synes uforsvarlig.

5.2 Dagtimeværdier og vejrobservationer

Ved gennemgang af 10-minutters-målingerne omkring solens op- og nedgang fandtes, at indstrålingen, når solen ikke var på himlen, var så beskeden, at man kunne tillade sig

Tabel 5.1 Beregning af direkte stråling på vandret før korrektion	
$I_{Dv} = I_G - I_{dh}$, W/m ²	Procentvis fordeling
$I_{Dv} < -10$	2
$-10 \leq I_{Dv} < 0$	35
$0 \leq I_{Dv} < 10$	14
$10 \leq I_{Dv} < 20$	3
$20 \leq I_{Dv}$	46
	100

at se bort herfra. Samtidig elimineredes muligheden for fejlmålinger, idet solarimetrene pga. af udstrålingen om natten normalt vil vise negative indstrålinger, der dog af registreringsudstyret opfattes positive.

Tilbage blev et korrigeret strålingsdatasæt med målinger hvert 10. minut i dagtimerne, bortset fra evt. huller pga. manglende eller kasserede data. Dette datasæt blev suppleret med timeobservationer af en lang række vejrparametre samt solskinstimetallet registreret med en solautograf. Endelig blev der af 10-minuttersværdierne dannet timemiddelværdier, således at det fuldstændige datasæt, lagret på et magnetbånd, består af de i bilag I anførte data, alle gældende for måleåret 1/12-79 til 30/11-78.

6. SOLINDFALD I MÅLEÅRET

Med de korrigerede strålingsmålinger er det muligt at beregne måneds- og årssummer. Desværre mangler der som nævnt enkelte målinger, således at de fundne summer må korrigeres. Tabel 6.1 viser de korrigerede summer, idet der ud fra den ligeledes viste måletid er foretaget en forholdsvis korrektion måned for måned, og årssummen er fundet ved at summere de korrigerede månedssummer. Dette betyder, at de anførte værdier er behæftet med en vis usikkerhed, da der i de manglende måleperioder ikke nødvendigvis har været samme middelindstråling som i de målte. Der er dog tale om forholdsvis små korrektioner, specielt i sommerperioden, så usikkerheden må siges at være beskeden.

De enkelte måneders døgnmiddelværdier for de vigtigste vejrobservationer: soltimetal, skydække og udelufttemperatur er ligeledes beregnet gældende fra solopgang til solnedgang. Resultaterne heraf er vist på figur 6.1. Der ses at være rimelig overensstemmelse mellem soltime-tal og skydække, idet ringe skydække giver mange sol-skinstimer og omvendt.

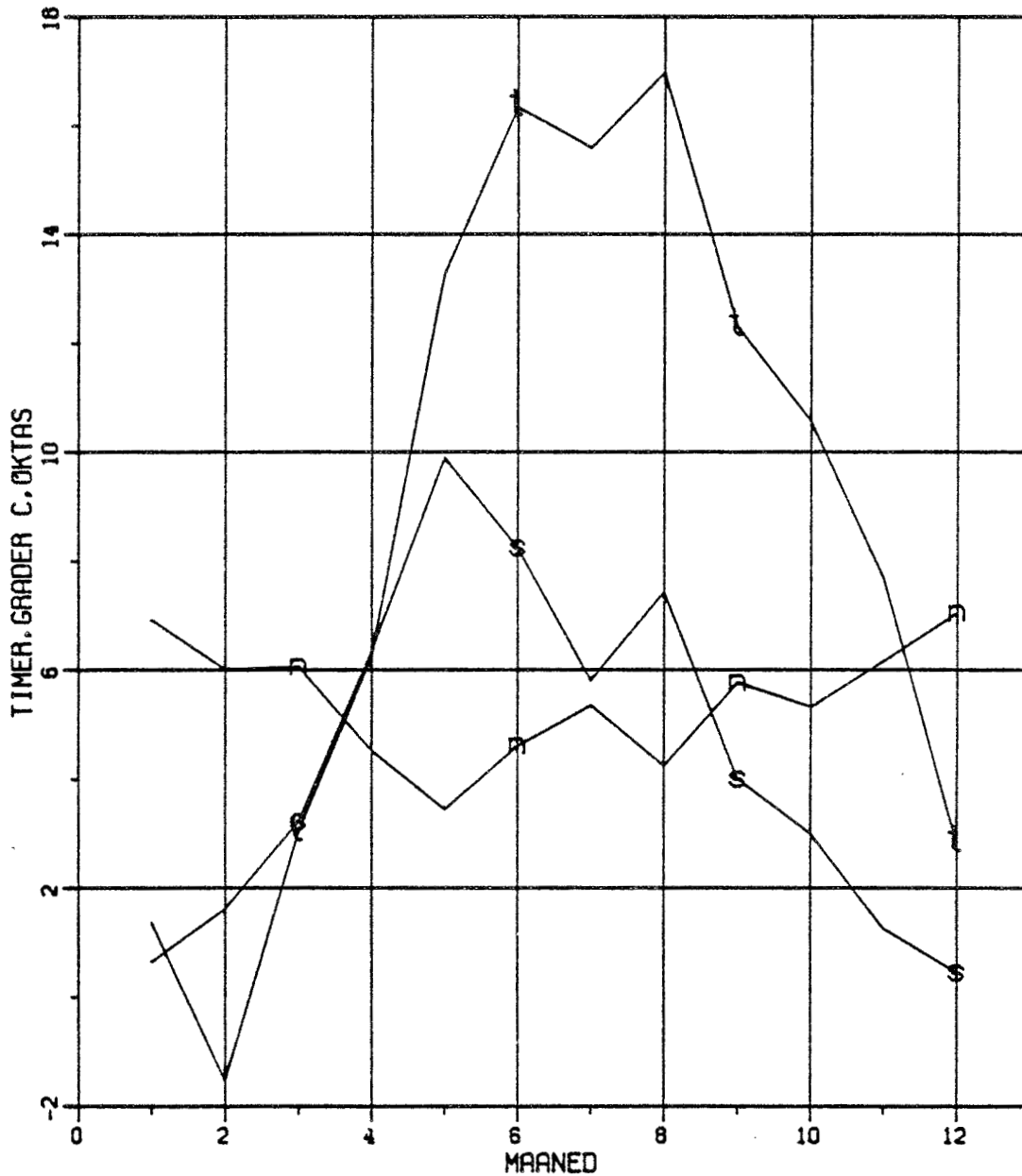
6.1 Direkte og diffus stråling

Med antagelse af at globalstrålingen og den korrigerede diffuse himmelstråling er korrekte, kan den direkte stråling på vandret findes som differensen. Da klokkeslettet også kendes, kan solens position og dermed solstrålingens indfaldsvinkel på en vilkårlig fladeorientering beregnes efter formlerne i kapitel 3. For vandret findes indfaldsvinklen let som sinus til solhøjden, hvorved normalstrålingen kan beregnes:

$$I_{DN} = (I_G - I_{dh})/\sin(h) \quad (6.1)$$

Tabel 6.1 Målte strålingsværdier (korrigerede), kWh/m ²									
Måned	Global	Diffus vandret	Syd lodret	Vest lodret	Nord lodret	Øst lodret	Diffus 60° syd	% måle-tid	
1	8,7	6,9	14,3	4,9	2,2	5,7	5,9	94	
2	29,9	20,6	39,9	18,1	8,1	16,3	22,1	88	
3	57,2	31,0	61,9	35,3	11,7	31,9	24,3	95	
4	115,5	57,9	90,5	66,6	20,8	63,3	49,0	95	
5	175,0	72,6	103,4	88,4	33,3	99,6	56,4	95	
6	154,8	75,3	77,7	79,7	38,0	80,0	52,1	99	
7	133,0	79,4	72,2	65,1	34,5	66,2	55,7	98	
8	130,1	63,4	91,1	69,2	26,2	73,8	49,6	95	
9	64,9	39,2	58,4	36,3	14,9	36,3	31,4	95	
10	39,7	24,1	52,0	23,8	8,5	22,2	22,7	89	
11	13,0	10,0	22,0	7,5	3,3	9,6	8,0	85	
12	6,4	5,1	10,2	3,0	1,6	3,5	4,9	91	
Året	928	485	694	498	203	508	382	95	

MIDDELVÆRDIER FOR MÅLEÅRET, KUN DAGTIMER
S=SØLTIMETAL T=LUFTTEMPERATUR N=SKYDÆKKE



Figur 6.1

Den direkte stråling på lodrette flader i måleopstillingen kan beregnes som normalstrålingen gange cosinus til indfaldsvinklen. Gøres dette og fratrækkes den beregnede direkte stråling de målte, fås den diffus himmelstråling fra hver af fladerne.

For måleåret er resultaterne beregnet og anført i tabel 6.2. Værdierne må igen tages med forbehold, idet resultaterne dels er korrigeret for de tilfælde, hvor den beregnede direkte stråling er større end den målte, bestående af både direkte og diffus stråling, og dels er korrigeret for manglende data, således at summen af direkte og diffus stråling giver de i tabel 6.1 korrigerede målte totalværdier. Disse korrektioner har især medført, at resultaterne i vinterhalvåret er usikre, hvortil kommer at bestemmelsen af normalstrålingen netop i denne periode er behæftet med betydelig usikkerhed. Målingerne ved lave solhøjder er som nævnt ikke særlig præcise, og disse målinger divideres med et lille tal (sinus til solhøjden), hvorved unøjagtighederne forstørres.

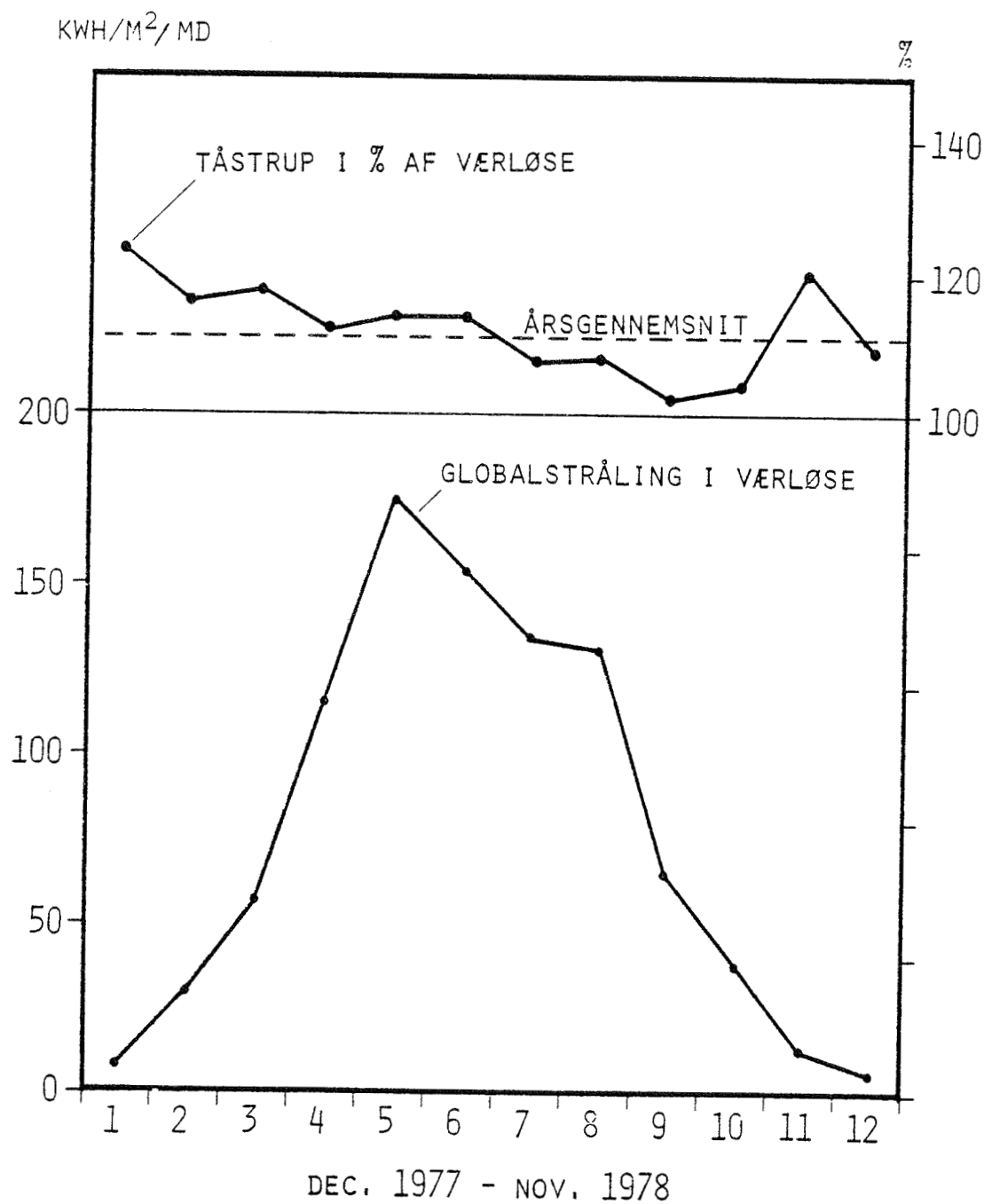
6.2 Sammenligning med andre målinger

Som nævnt tidligere måles globalstrålingen kontinuert andre steder i landet. Sammenlignes de her foretagne målinger af globalstrålingen med de tilsvarende målinger ved Hydroteknisk Laboratorium (Landbohøjskolen) i Tåstrup, findes som vist på figur 6.2, at målingerne i Tåstrup i måleåret er 11% større end i Værløse. Afvigelsen synes ikke at være afhængig af globalstrålingens absolutte størrelse, men er jævnt faldende gennem året frem til september for derefter at stige. Umiddelbart kan forskellen ikke forklares af usikkerheden ved målingerne i Værløse (incl. den foretagne korrektion for manglende data). Forskellen kan derfor enten skyldes målefejl eller databehandlingsfejl det ene eller det andet sted, eller der kan rent faktisk være tale om klimatiske forskelle, selvom målestederne er placeret med en indbyrdes afstand på kun ca. 10 km.

Tabel 6.2 Beregnede strålingsværdier ud fra målte (korrigerede), kWh/m²

Måned	Vandret direkte	Normal direkte	Lodret syd		Lodret vest		Lodret nord		Lodret øst	
			direkte	diffus	direkte	diffus	direkte	diffus	direkte	diffus
1	1,8	8,9	7,7	6,6	1,5	3,3	0,0	2,2	0,6	5,1
2	9,3	32,7	19,4	20,5	5,3	12,7	0,0	8,1	3,6	12,7
3	26,2	64,4	40,9	21,0	19,1	16,3	0,0	11,7	13,0	18,9
4	57,6	113,9	51,3	39,2	34,6	32,0	0,4	20,4	30,3	33,0
5	102,4	171,6	56,8	46,6	47,0	41,4	4,9	28,4	55,6	43,9
6	79,5	126,2	35,1	42,7	38,2	41,5	5,7	32,3	37,0	43,0
7	53,5	86,8	27,9	44,3	25,4	39,7	3,1	31,4	24,9	41,2
8	66,8	121,8	50,3	40,9	34,2	35,0	1,1	25,1	36,5	37,2
9	25,7	56,5	33,3	25,1	15,9	20,4	0,0	14,9	15,0	21,3
10	15,6	44,9	33,6	18,4	10,1	13,7	0,0	8,5	9,1	13,1
11	3,0	13,9	12,4	9,7	2,3	5,2	0,0	3,3	2,1	7,5
12	1,3	8,0	5,5	4,6	0,7	2,3	0,0	1,6	0,5	2,7
Året	443	849	374	320	234	264	15	188	228	280

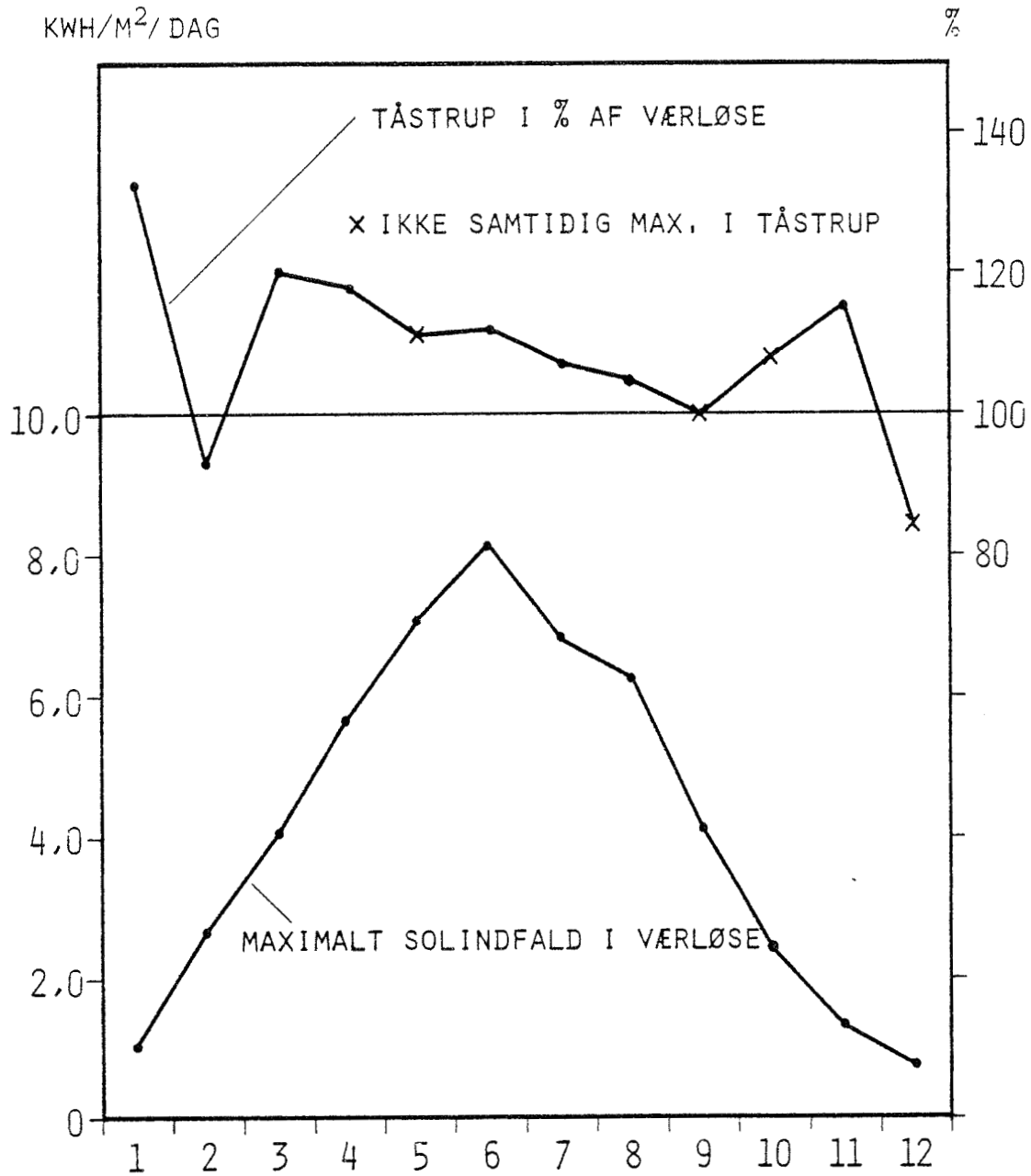
SAMMENLIGNING MED TÅSTRUP-MÅLINGER



Figur 6.2

For at undersøge dette sidste er der på den dag med størst solindfald i hver måned i Værløse foretaget en sammenligning som vist på fig. 6.3. Det fremgår heraf, at afvigelserne næsten svarer til de på figur 6.2 viste. Samtidig ses dog, at i 4 af månederne forekommer maksimalt solindfald i Tåstrup på andre dage end i Værløse. Der er altså noget der tyder på, at forskellen mellem målingerne ikke alene kan forklares med klimatiske forskelle, men må søges i måleudstyret eller databehandlingen.

SAMMENLIGNING MED TÅSTRUP-MÅLINGER PÅ DEN DAG
MED STØRST SOLINDFALD I VÆRLØSE I HVER MÅNED



DEC. 1977 - NOV. 1978

Figur 6.3

7. BEREGNING AF SOLINDFALD PÅ VANDRET

Igennem tiderne er der opstillet en række formeludtryk til beregning af den solstråling, der rammer jordoverfladen. Man har i første række beskæftiget sig med at beregne direkte og diffus stråling i klart vejr. Den direkte stråling beregnes oftest ud fra extraterrestrial-strålingen, idet man for hver bølgelængde beregner svækkelsen ved passage gennem atmosfæren efter Beer's lov:

$$dI_{\lambda} = -I_{\lambda} k_{\lambda} dx \quad (7.1)$$

hvor I_{λ} er strålingsintensiteten ved bølgelængden λ , k_{λ} er en ekstinktionskoefficient for bølgelængden ved passage af en atmosfæretykkelse på dx .

Når atmosfærens sammensætning i de forskellige højder er kendt, dvs. blandt andet dens indhold af vanddamp, kuldioxid, ozon, støvpartikler, kan man ved at integrere over alle bølgelængder og over vejlængden ved passagen finde den stråling, der når jordoverfladen. Tages alle forhold i betragtning, er det en tidskrævende og indviklet procedure at beregne den direkte stråling.

Er det besværligt at beregne den direkte stråling, er det endnu vanskeligere at beregne den diffuse himmelstråling i klart vejr. I overskyet eller halvskyet vejr bliver det næsten umuligt ud fra atmosfærens sammensætning på rimelig måde at beregne indstrålingen ved jordoverfladen. Dette er dog forsøgt i fx [15], hvor der er anført en lang række formeludtryk og givet nærmere data for ekstinktionskoefficienter m.v.

I stedet for at forsøge at beregne indstrålingen ud fra atmosfæresammensætningen og dens egenskaber er det ofte forsøgt ad empirisk vej at beregne indstrålingen efter ligning (7.1) med én eller nogle få ekstinktionskoefficienter gældende for atmosfæren som helhed og for alle bølgelængder. På denne måde kan det da også lade sig gøre at opnå rimelige resultater. I [16] er fx givet

forholdsvis simple empiriske udtryk til bestemmelse af globalstrålingen, bl.a. under hensyntagen til de forskellige skyarter.

7.1 Diffus/globalstråling på døgnbasis

Til praktiske formål, fx beregning af solvarmeanlægs ydelser, er simple metoder til beregning af solindfaldet at foretrække.

Forholdet mellem globalstråling og extraterrestrålingen, K_T , kontra forholdet mellem diffus himmelstråling og globalstråling, F_H , er som anført i [17] ret entydigt. Dette kan benyttes til bestemmelse af diffus himmelstråling ud fra globalstråling.

For dage, hvor der ikke mangler strålingsdata, er der på figur 7.1 vist ovennævnte forhold, idet der som abscisse er benyttet

$$K_T = H/H_0 \quad (7.2)$$

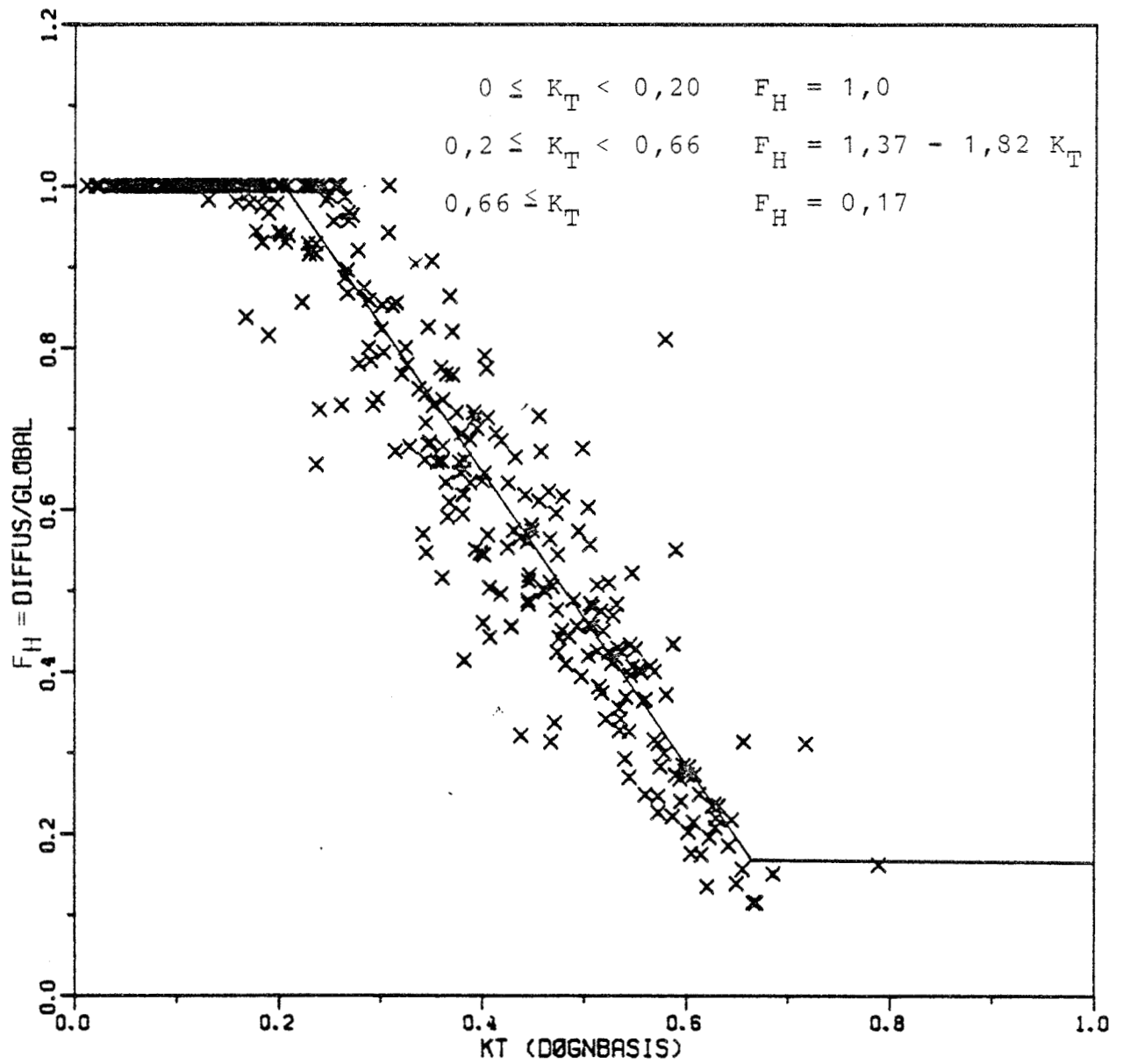
og som ordinat

$$F_H = H_d/H \quad (7.3)$$

hvor H og H_d er døgnværdier for henholdsvis globalstrålingen og diffus himmelstråling, mens H_0 er døgnværdien for indstrålingen uden for atmosfæren, beregnet efter ligning (3.13).

Af figuren ses, at for små værdier af K_T , er den diffuse himmelstråling lig med globalstrålingen, dvs. der forekommer ikke direkte stråling. For værdier af K_T over en vis størrelse synes der at være en lineær sammenhæng mellem K_T og F_H . På baggrund af en lineær regressionsanalyse kan følgende sammenhæng gives:

DIFFUS/GLOBAL CONTRA KT PAA DØGNBASIS



Figur 7.1

$$\begin{aligned} 0 &\leq K_T < 0,2 & F_H &= 1,00 \\ 0,2 &\leq K_T < 0,66 & F_H &= 1,37 - 1,82 K_T \\ 0,66 &\leq K_T & F_H &= 0,17 \end{aligned} \quad (7.4)$$

For $K_T > 0,66$ er der ikke et tilstrækkeligt datagrundlag til at fastsætte værdien af F_H til 0,17. Denne er derfor antaget som middelværdien mellem angivelserne i henholdsvis [17] og nyere canadiske beregninger anført i [18]. Der er iøvrigt bemærkelsesværdig god overensstemmelse mellem ligning (7.4) og de tilsvarende resultater i [18], baseret på timeværdier. Det synes derfor rimeligt også at benytte ligning (7.4) til bestemmelse af diffus himmelstråling på vandret for kortere perioder end en dag.

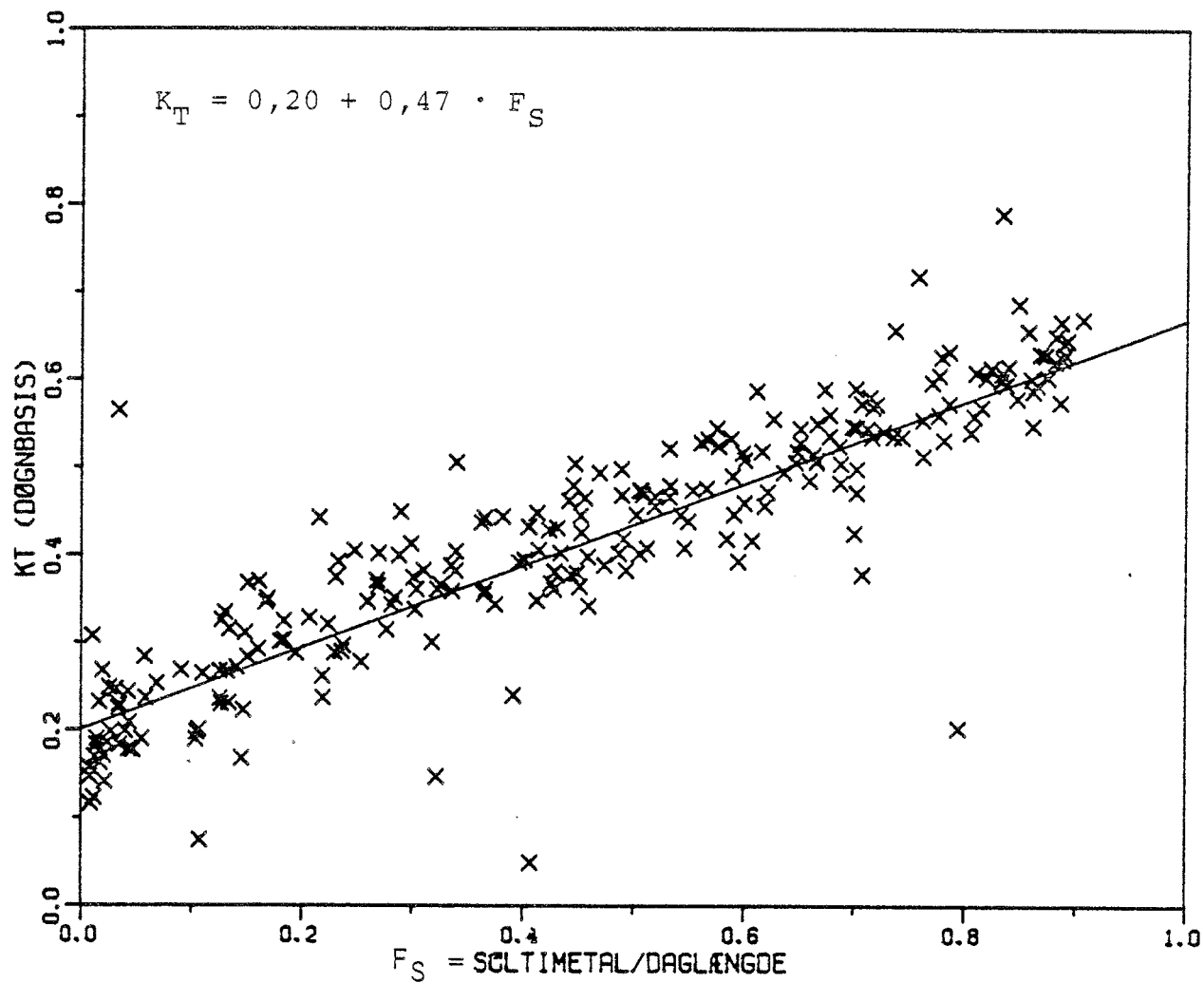
Kendes K_T ikke, fordi globalstrålingen ikke måles, kan den bestemmes ud fra forholdet mellem solskinstimetallet og daglængden, F_S . På dage med registreret solskinstimetallet større end nul er denne sammenhæng vist på figur 7.2 for måledataene fra Værløse. En lineær regressionsanalyse gav sammenhængen:

$$K_T = 0,20 + 0,47 \cdot F_S \quad (7.5)$$

Kendes soltimetallet for den pågældende dag, kan daglængden fx findes af figur 3.3, hvorefter K_T kan beregnes af ligning (7.5). Herefter kan globalstrålingen og den diffuse himmelstråling bestemmes af henholdsvis ligning (7.2) og (7.3).

På figuren er der enkelte punkter med lav K_T værdi, der afviger noget fra de øvrige. Dette skyldes sandsynligvis målefejl, muligvis på grund af sne på solarimetret, da det er data fra vinterperioden.

KT CONTRA SØLTIMETAL/DAGLÆNGDE



Figur 7.2

7.2 Diffus/globalstråling på månedsbasis.

På samme måde som med døgnværdierne kan man optegne de tilsvarende sammenhænge mellem $\bar{K}_T$, $\bar{F}_H$ og $\bar{F}_S$ på månedsbasis, idet strengen over symbolerne markerer, at det er værdier på månedsbasis.

På figur 7.3 er hver måned i måleåret markeret, og en lineær regression gav:

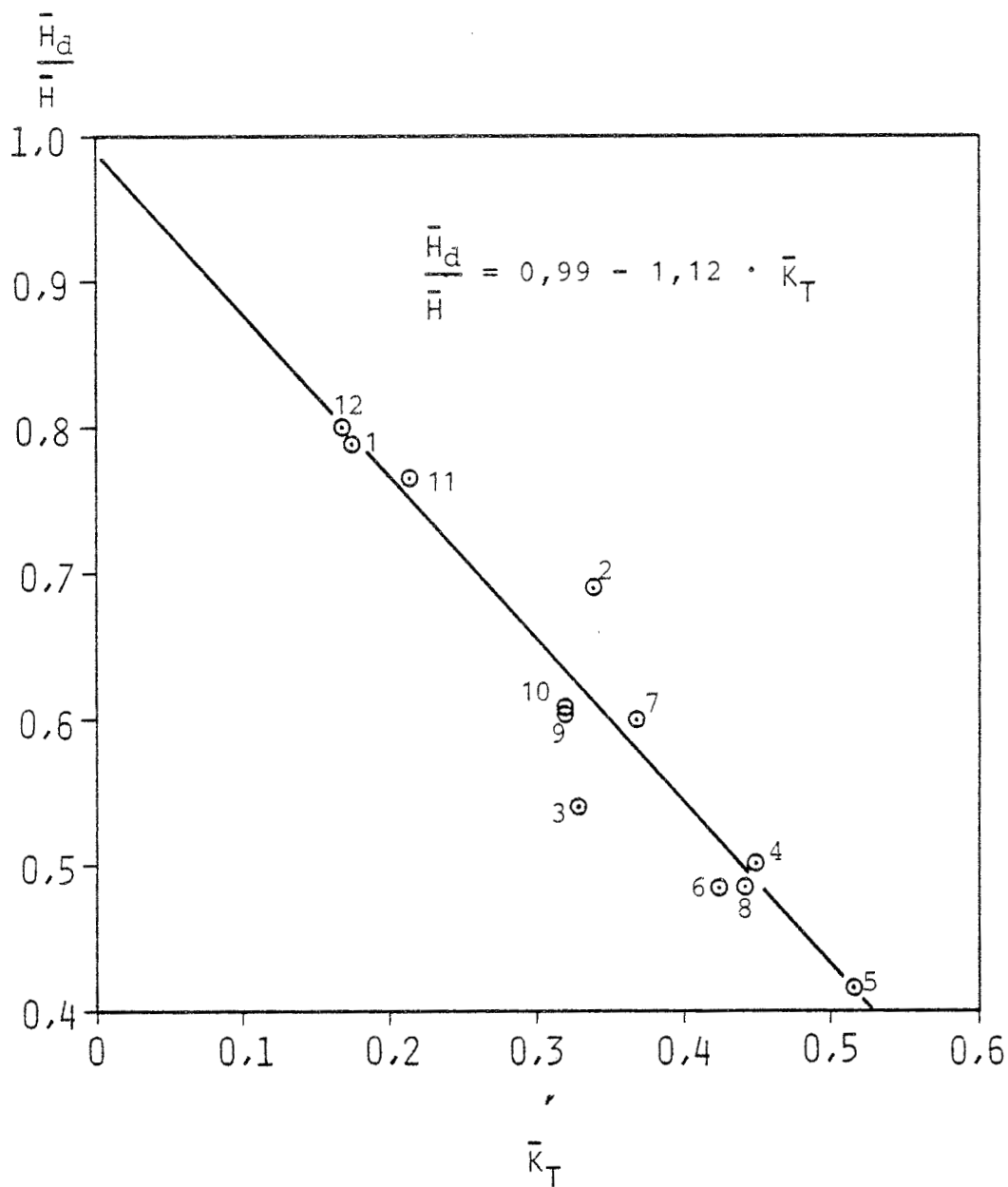
$$\bar{F}_H = 0,99 - 1,12 \cdot \bar{K}_T \quad (7.6)$$

Dette er i god overensstemmelse med de i [19] angivne resultater baseret på målingerne i Tåstrup. Derimod afviger sammenhængen mellem $\bar{F}_S$ og $\bar{K}_T$, der som vist på figur 7.4 er fundet til:

$$\bar{K}_T = 0,15 + 0,61 \cdot \bar{F}_S \quad (7.7)$$

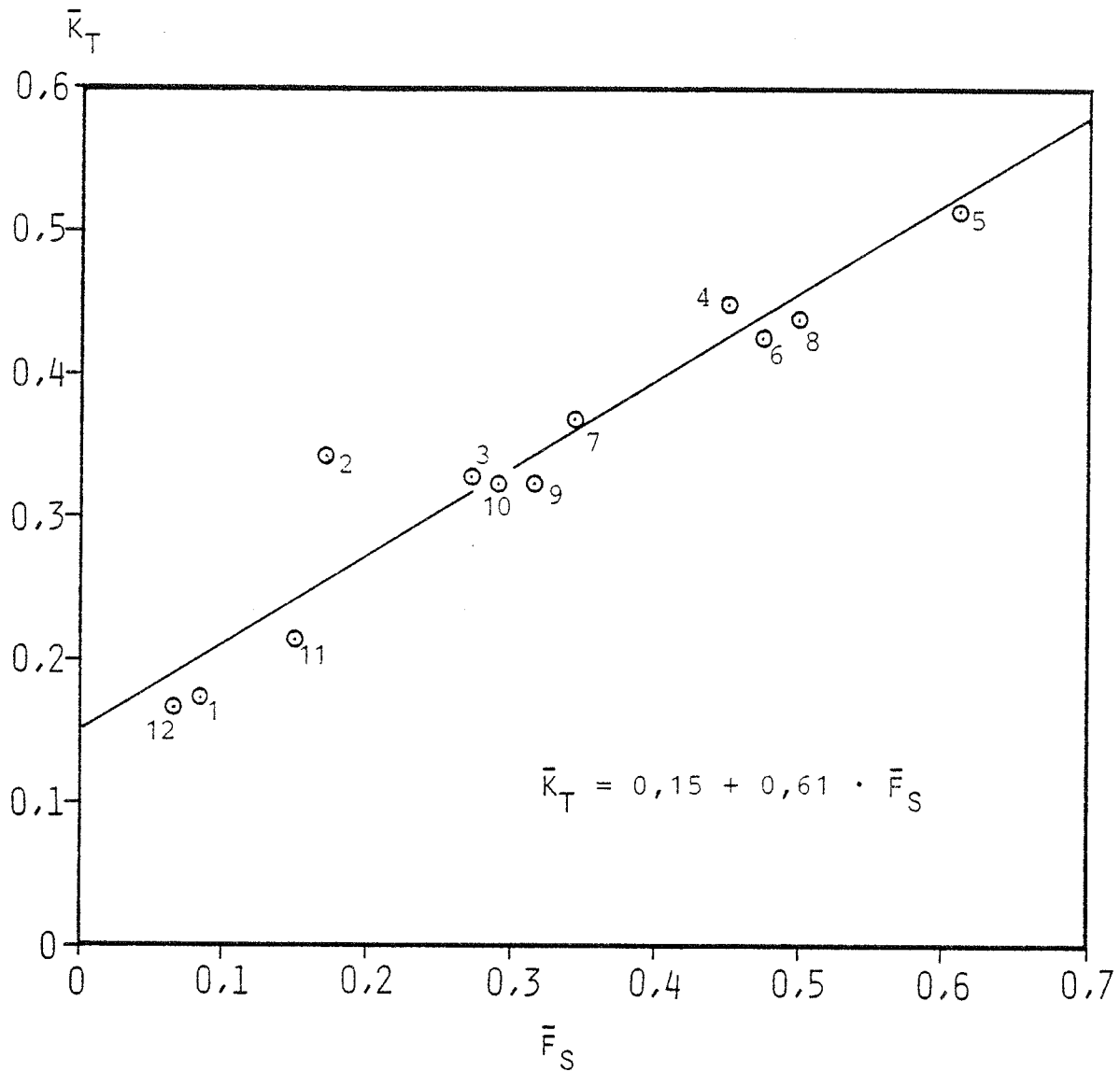
noget fra Tåstrup-målingerne. Dette skyldes sandsynligvis, at solskinstimerne i Tåstrup er beregnet ud fra strålingsmålingerne og ikke målt med en solautograf som i Værløse.

DIFFUS/GLOBAL STRÅLING CONTRA $\bar{K}_T$ PÅ MÅNEDSBASIS
MÅLEPERIODE DECEMBER 77 - NOVEMBER 78 (MÅNEDSNR.
ANFØRT)



Figur 7.3

$\bar{K}_T$ CONTRA SOLTIMETAL/DAGLÆNGDE PÅ MÅNEDSBASIS
MÅLEPERIODE DECEMBER 77 - NOVEMBER 78 (MÅNEDS-
NR. ANFØRT)



Figur 7.4

8. SOLINDFALD PÅ HÆLDENDE FLADER

Det er almindeligt kun at bestemme solindfaldet på vandret, globalstrålingen, ved målinger. Der er derfor i litteraturen omtalt en række metoder til bestemmelse af indstrålingen på hældende flader ud fra målinger på vandret. En almindelig anvendt metode er den såkaldte K_T -metode, beskrevet i [20] og gengivet på dansk i [19] og [21].

Bestemmelse af solindfaldet, $\bar{H}_t$, på en flade med hældningen t fra vandret beregnes efter K_T -metoden som:

$$\bar{H}_t = (\bar{H} - \bar{H}_d) \cdot \bar{R}_b + \bar{H}_d (1 + \cos(t)) / 2 + \bar{H} \cdot \rho \cdot (1 - \cos(t)) / 2 \quad (8.1)$$

Formlen gælder for månedsværdier, idet man ud fra $\bar{K}_T$ kan finde globalstrålingen (ligning (7.2)) og herefter den diffuse himmelstråling (ligning (7.3)). Den direkte stråling på vandret, $\bar{H} - \bar{H}_d$, omsættes til direkte stråling på fladen med faktoren $\bar{R}_b$, der er forholdet mellem det direkte solindfald på fladen og på vandret for den pågældende måned.

Ved beregningen af den diffuse stråling på fladen er det forudsat, at både himmelstrålingen og den fra jorden diffust reflekterede stråling er isotropisk fordelt, således at strålingen er proportional med fladens vinkelforhold til henholdsvis himlen og jorden. Strålingen antages at være uafhængig af fladens azimuth, og den fra jorden reflekterede stråling at være proportional med globalstrålingen, idet reflektionskoefficienten ρ angiver den del af den indfaldende stråling, der reflekteres.

8.1 Direkte stråling på månedsbasis

Bestemmelse af R_b , der er forholdet mellem det daglige direkte solindfald på en skrå flade og det daglige direkte solindfald på vandret kan bestemmes af formlerne (3.1) og 3.6):

$$R_b = \int I_{DN} \cdot \cos(i) / \int I_{DN} \cdot \sin(h) \quad (8.2)$$

idet der ved integration fra solopgang til solnedgang kun medregnes strålinger med indfaldsvinkler mindre end 90° . Antages det, at I_{DN} er konstant, udgår den af beregningen, og ligningen kan løses analytisk. For vilkårlige fladeorienteringer findes der i [21] angivet formler hertil.

Månedsmiddelværdien $\bar{R}_b$ kan enten findes ved at beregne R_b gældende for middeldagen i måneden eller ved en numerisk løsning af ligningen:

$$\bar{R}_b = \Sigma R_b \cdot H_o / \Sigma H_o \quad (8.3)$$

idet der summeres over måneden under antagelse af, at der er en lineær sammenhæng mellem den direkte stråling og extraterrestrålingen.

For Værløse ($55^\circ 46'$ nordlig bredde) er der foretaget en numerisk integration af ligning (8.2) og (8.3) for de 4 lodrette flader, og $\bar{R}_b$ findes som anført i tabel 8.1.

Værdierne i tabel 8.1 er beregnet for flader uden for atmosfæren. Derfor kan de ikke regnes eksakt at gælde ved jordoverfladen, hvor normalstrålingen bl.a. er afhængig af vejlængden gennem atmosfæren. Til illustration af dette er der på figur 8.1 for måleåret optegnet de fundne timeværdier af normalstrålingen i klart vejr som funktion af solhøjden. Klart vejr er her defineret som vejr, hvor skydækket er registreret mindre end eller lig med 1, svarende til at højst $1/8$ af himlen er dækket med skyer. Der ses ikke at være nogen entydig sammenhæng mellem normalstråling og solhøjde, men der er dog en tendens til, at større solhøjder giver større normalstråling.

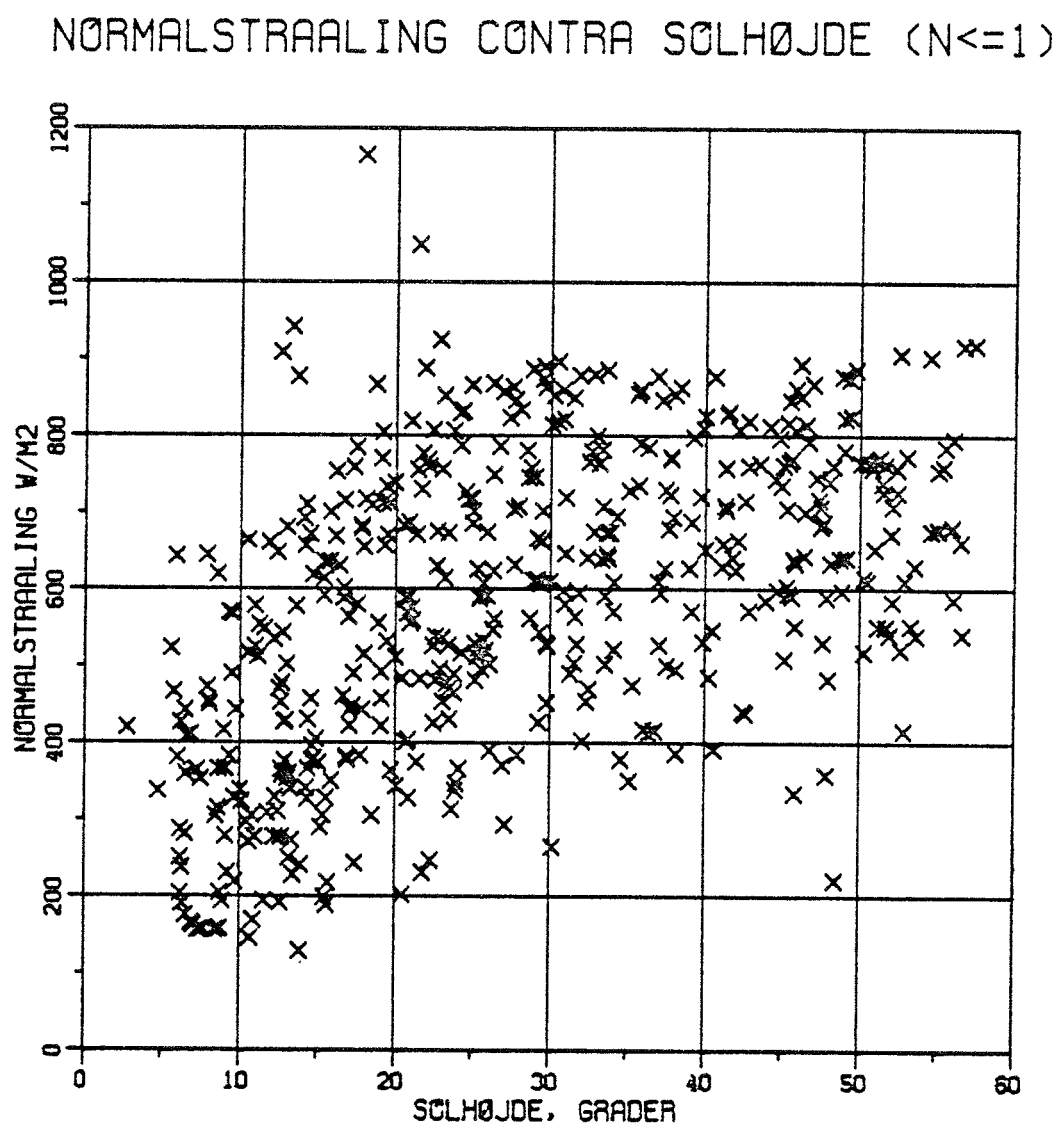
Tabel 8.1 Forholdet mellem det direkte solindfald på en lodret flade og på vandret, på månedsbasis.

Indstråling uafhængig af solhøjden

Måned	Syd	Øst/Vest	Nord
Januar	5,56	1,39	0,0
Februar	3,11	1,12	0,0
Marts	1,61	0,91	0,0
April	0,84	0,78	0,08
Maj	0,51	0,70	0,23
Juni	0,39	0,66	0,31
Juli	0,44	0,68	0,27
August	0,68	0,74	0,13
September	1,26	0,86	0,02
Oktober	2,44	1,03	0,0
November	4,58	1,29	0,0
December	6,87	1,52	0,0
Året	1,20	0,81	0,15

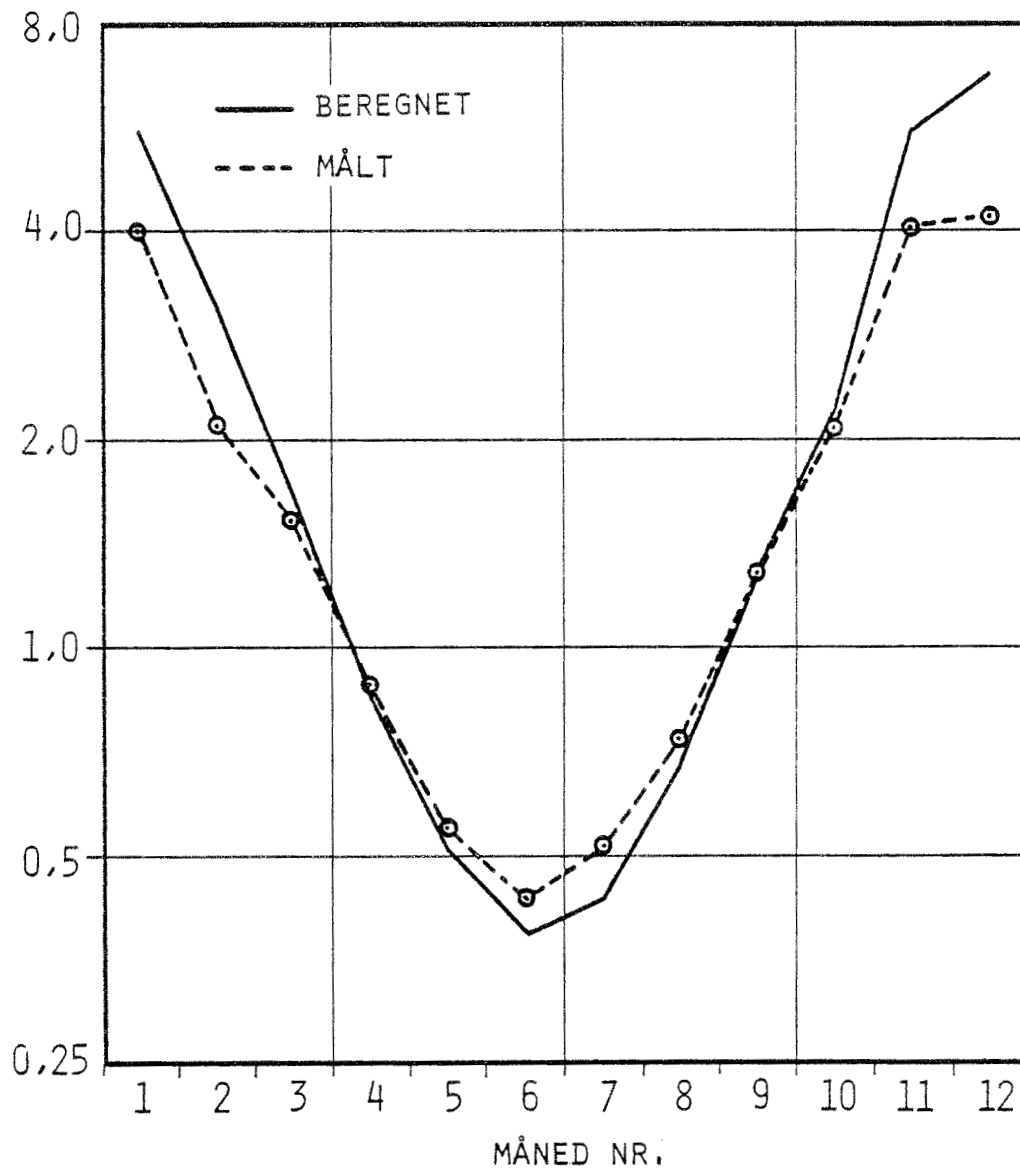
Sammenlignes den beregnede $\bar{R}_p$ med den, der kan bestemmes ud fra målingerne, findes forholdene som vist på figur 8.2 og 8.3 gældende for henholdsvis fladen mod syd og øst/vest.

For den sydvendte lodrette flade findes overensstemmelse mellem målingerne og beregningerne i månederne omkring jævndøgn. I sommerperioden måles mere direkte stråling end beregnet, mens det omvendte er tilfældet i vinterperioden.



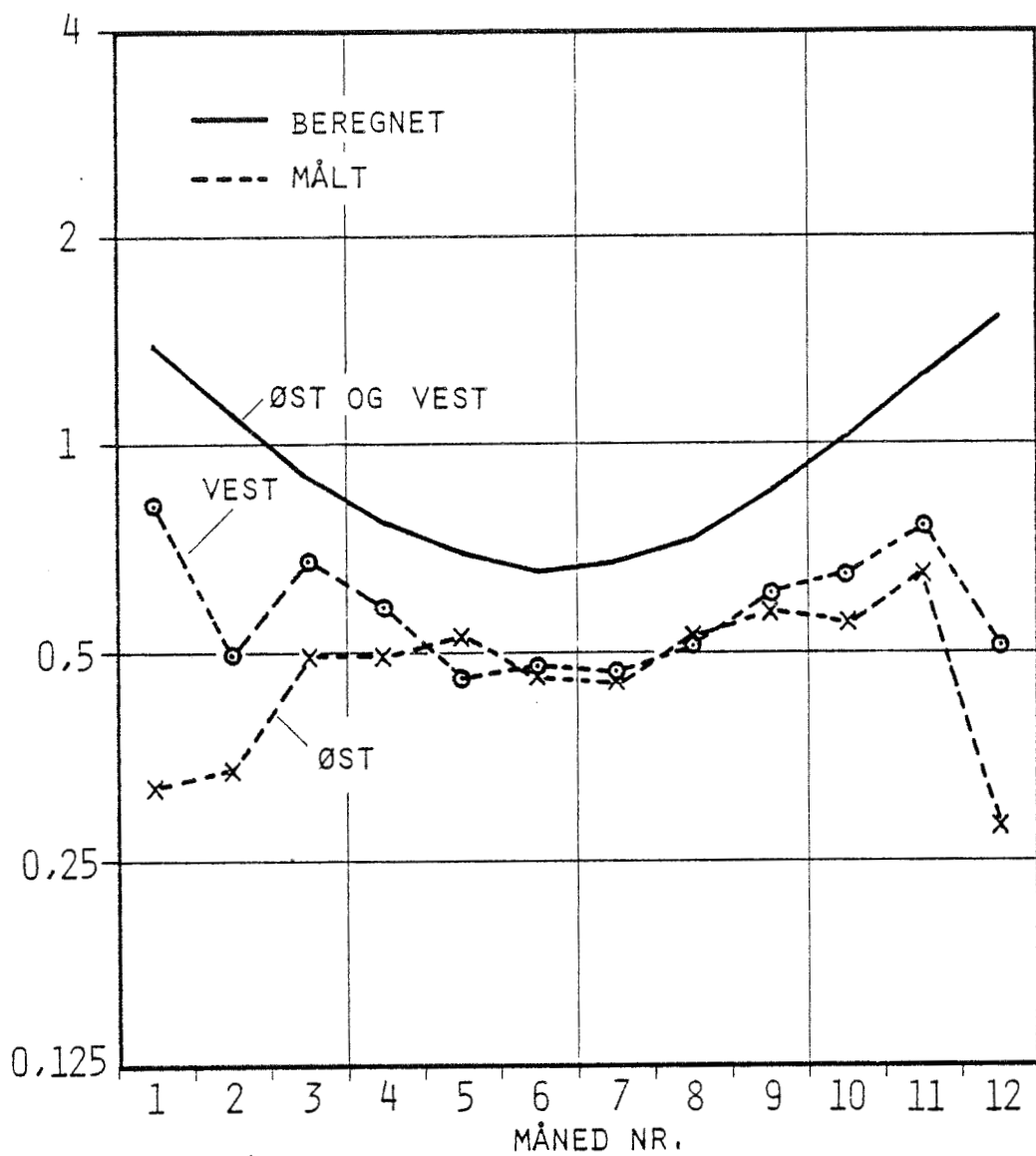
Figur 8.1

DIREKTE STRÅLING PÅ LODRET I FORHOLD TIL VANDRET



Figur 8.2

DIREKTE STRÅLING PÅ LODRET I FORHOLD TIL VANDRET



Figur 8.3

For de øst/vest - vendte flader findes hele året mindre direkte stråling end beregnet, idet der forholdsvis konstant igennem året findes, at det direkte solindfald på lodret i forhold til vandret er ca. 0,5. Desuden ses, at i måleårets vinterperiode har solen skinnet mere på den vestvendte end på den østvendte flade eller med andre ord, mere om eftermiddagen end om formiddagen.

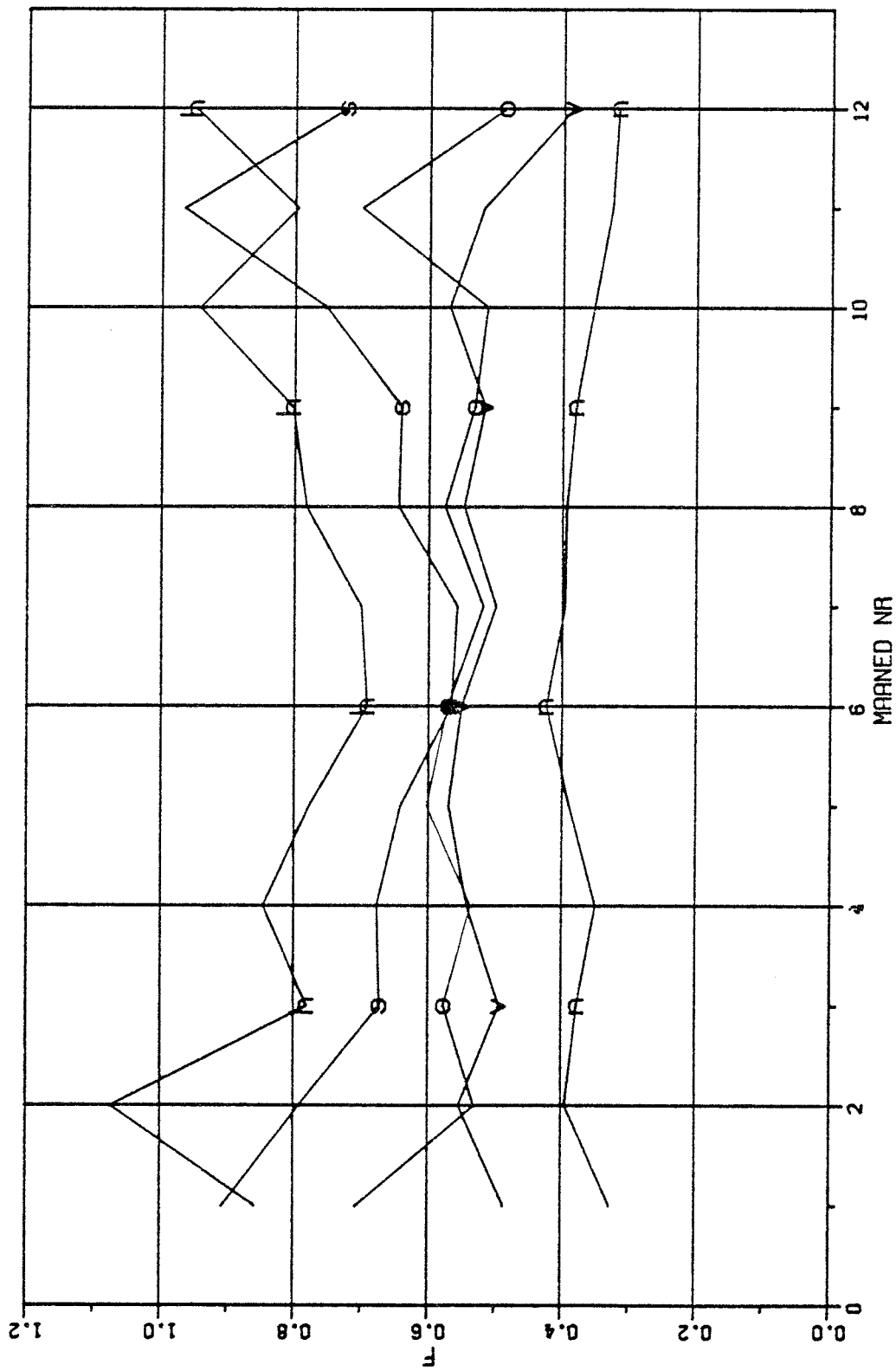
Afvigelserne mellem målt og beregnet direkte solindfald skyldes hovedsagelig det omtalte forhold, at normalstrålingen ikke er konstant, men varierer gennem dagen på grund af vekslende solhøjder og varierende klimatiske forhold. Generelt findes dog, som også antydtes i [20], at den beregnede værdi af $\bar{R}_b$ er for stor om vinteren og for lille om sommeren for en sydvendt flade. Ud fra de her foretagne målinger synes beregningen af $\bar{R}_b$ altid at give for stor værdi på øst/vest-vendte flader, ligesom den på den nordvendte flade er væsentlig større end målt, jævnfør tabel 8.1 og tabel 6.2. I den forbindelse må det dog også påpeges, at bestemmelsen af den direkte stråling ved lave solhøjder er meget usikker, og den valgte procedure med at kassere små værdier kan have medført fejlagtige måleresultater. Derfor er de anførte målinger af $\bar{R}_b$, især i vinterhalvåret, behæftet med nogen usikkerhed.

8.2 Diffus himmelstråling på månedsbasis

I ligning (8.1) er det antaget, at den diffuse himmelstråling på en flade er proportional med fladens vinkelforhold til himlen. Dette gælder kun for en isotropisk fordeling af himmelstrålingen, og som tidligere anført er dette ikke altid tilfældet.

Beregning af den diffuse himmelstråling på de hældende flader i forhold til vandret er for måleåret vist på figur 8.4. Det ses heraf, at forholdet for de lodrette flader er størst mod syd og mindst mod nord, hvor en isotropisk fordeling ville have givet ens forhold på 0,5.

DIFFUS STRAALING PAA FLADER I FØRHØLD TIL VANDRET
S=SYD V=VEST N=NØRD Ø=ØST H=60 GR SYD



Figur 8.4

For den nordvendte flade findes et næsten konstant forhold gennem året på omkring 0,4, mens det for de øst/vest-vendte flader, bortset fra enkelte vintermåneder, varierer mellem 0,5 og 0,6. Da det totale solindfald på øst og vest var næsten ens, og den direkte stråling var størst mod vest, findes ikke overraskende, at den diffuse stråling om formiddagen i de fleste måneder er målt større end om eftermiddagen.

På den sydvendte lodrette flade varierer forholdet noget gennem året, idet de største værdier findes om vinteren. På årsbasis er forholdet ca. 0,65 med 0,55 som mindste månedsværdi og 0,95 som største. På den 60 grader hældende flade varierer den diffuse himmelstråling gennem året på næsten samme måde som gældende for lodret syd, blot med lidt større værdier i forhold til vandret. Størstedelen af året findes forholdet større end det forventes ud fra vinkelforholdet til himlen på 0,75, idet der dog i sommermånederne findes lidt lavere værdier.

8.3 K_T -metoden sammenlignet med målinger

Sammenlignes de her foretagne målinger af solindfaldet på lodrette flader med tilsvarende beregnede værdier efter K_T -metoden, vil nogen uoverensstemmelse opstå. Dels er sammenhængen mellem K_T og F_H ikke helt entydig, og dels vil både den direkte og den diffuse stråling ikke være helt i overensstemmelse med målingerne.

For den sydvendte flade er der i tabel 8.2 angivet både målt og beregnet stråling. Beregningen af $\bar{F}_H$ er foretaget med ligning (7.6) og solindfaldet med ligning (8.1), under hensyntagen til at fladen ikke modtager diffus reflekteret stråling fra omgivelserne. Som det kan forventes ud fra figur 8.2 og 8.4 beregnes både den direkte og især den diffuse stråling for lille i sommerperioden, hvorfor man i denne periode finder et beregnet solindfald, der kun udgør mellem 85 og 90% af det målte. I vinterperioden findes derimod en beregnet direkte stråling, der kan være væsentlig større end den målte.

Tabel 8.2 Sammenligning mellem målt og med K_T -metoden beregnet solindfald på en lodret sydvendt flade, december 77 - november 78

	Målt solindfald kWh/m ²			$\bar{K}_T$	Beregnet solindfald kWh/m ²			Beregnet total i % af målt
	direkte	diffus	total		direkte	diffus	total	
Jan.	7,7	6,6	14,3	0,18	10,0	3,5	13,5	94
Feb.	19,4	20,5	39,9	0,34	36,4	9,1	45,5	114
Marts	40,9	21,0	61,9	0,33	34,9	17,8	52,7	85
April	51,3	39,2	90,5	0,45	49,5	28,3	77,8	86
Maj	56,8	46,6	103,4	0,52	52,6	35,9	88,5	86
Juni	35,1	42,7	77,7	0,43	29,6	39,5	69,1	89
Juli	27,9	44,3	72,2	0,37	24,6	38,6	63,2	88
Aug.	50,3	40,9	91,1	0,44	44,2	32,6	76,8	84
Sept.	33,3	25,1	58,4	0,32	30,2	20,5	50,7	87
Okt.	33,6	18,4	52,0	0,32	35,9	12,5	48,4	93
Nov.	12,4	9,7	22,0	0,21	14,7	4,9	19,6	89
Dec.	5,5	4,6	10,2	0,17	8,9	2,6	11,5	113
Året	374	320	694		372	246	617	89

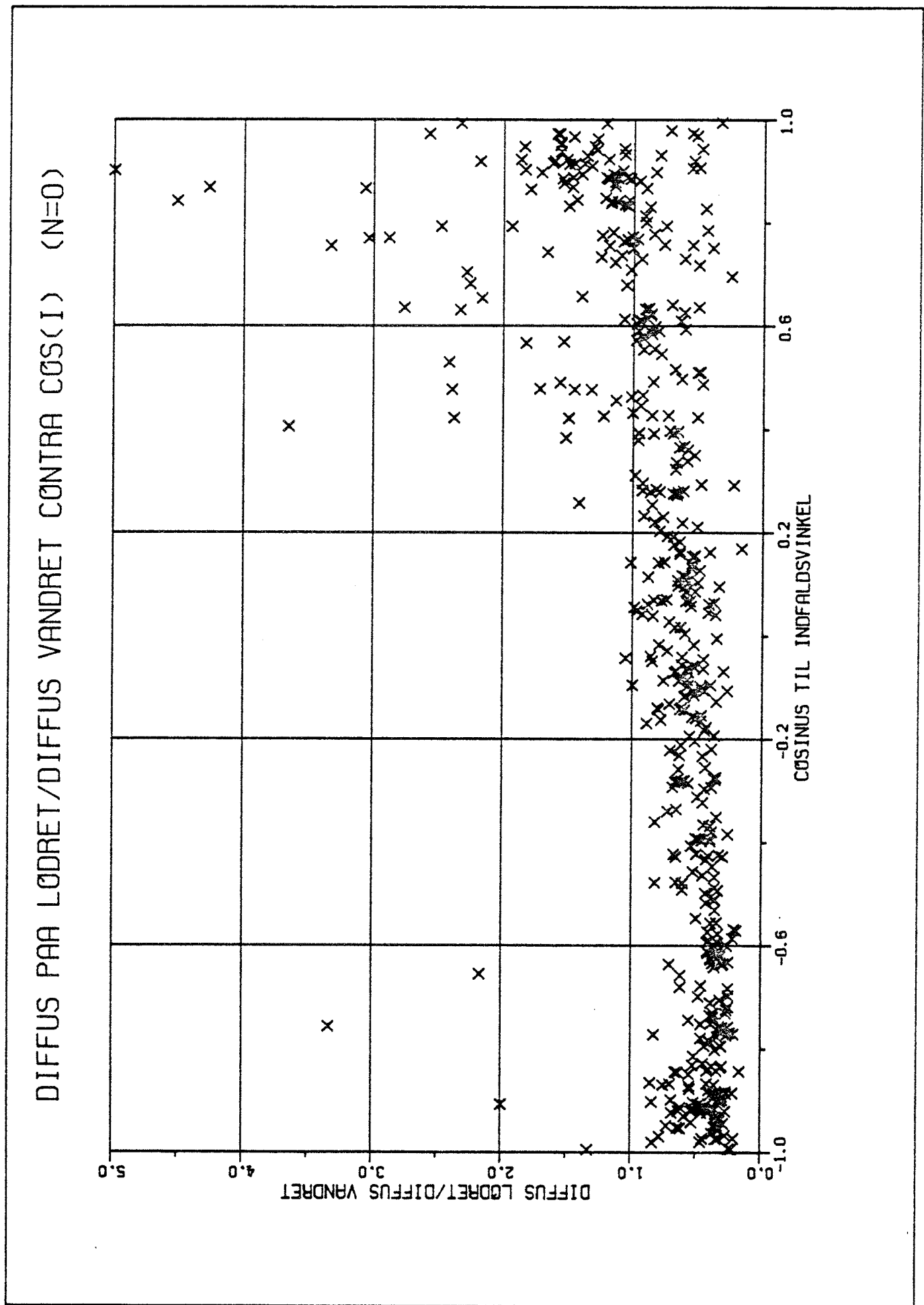
For sydvendte flader med mindre hældning forventes, bl.a. ud fra figur 8.4, en noget bedre overensstemmelse mellem målt og beregnet stråling. På de lodrette øst/vest-vendte flader fås ud fra figur 8.3 igennem hele året en for stor direkte stråling med K_T -metoden, mens der er rimelig overensstemmelse mellem den målte og beregnede diffuse himmelstråling. Derimod beregnes strålingen på lodrette nordvendte flader altid for stor. Da der hovedsagelig er tale om diffus stråling, skønnes det ud fra figur 8.4, at K_T -metoden giver værdier, der er 20 - 50% større end de målte.

8.4 Diffus himmelstråling på timebasis

Beregning af diffus himmelstråling på en hældende flade ud fra målinger på vandret er, som det er fremgået af de forrige afsnit, ikke helt enkelt. Der er i tidens løb udviklet forskellige beregningsformler hertil, næsten alle med udgangspunkt i forholdene i klart vejr. Med kendskab til skydækket er det ofte forsøgt at interpolere mellem klart vejr og fuldstændig overskyet, idet man i sidstnævnte tilfælde antager en isotropisk fordeling. En sådan metode er nærmere beskrevet i [22] og benyttet til beregning af solindfaldet på flader med vilkårlige hældninger ud fra timeværdier af solindfaldet målt på vandret og samtidig observation af skydækket.

Ved sammenligning mellem målt og efter den "gamle" metode beregnet diffus solindfald fandtes nogen afvigelse, specielt for de syd- og nordvendte lodrette flader (jævnfør figur 8.6). Der er derfor i dette arbejde udviklet en "ny" og lidt enklere metode til bestemmelse af den diffuse himmelstråling på hældende flader ud fra målinger på vandret og observationer af skydækket.

Ligesom den gamle tager den nye metode udgangspunkt i forholdene i klart vejr. På figur 8.5 er vist forholdet F_1 mellem himmelstråling på lodret og på vandret som



Figur 8.5

funktion af cosinus til den direkte solstrålings indfaldsvinkel til fladen. Målingerne, der er timemiddelværdier, er alle foretaget i perioder, hvor himlen var skyfri. Af figuren ses, at forholdet F_i ikke er en helt entydig funktion af cosinus til indfaldsvinklen. Ses bort fra de få helt store værdier, der sandsynligvis skyldes usikkerheden i bestemmelsen af den direkte stråling, især ved lave solhøjder, er der dog en tendens til, at F_i vokser med $\cos(i)$, især for $\cos(i)$ i nærheden af 1, dvs. indfaldsvinkler tæt på nul. I den gamle metode benyttedes en konstant værdi for F_i for små værdier af $\cos(i)$ og en andengradsfunktion for store værdier. Dette er også fundet hensigtsmæssigt her, og ved regressionsanalyse findes følgende:

$$\begin{aligned}\cos(i) < -0,2 : F_i &= 0,54 \\ \cos(i) \geq -0,2 : F_i &= 0,65 + 0,5 \cos(i) + 0,2 \cos^2(i)\end{aligned}\tag{8.4}$$

Koefficienterne i ligning (8.4) er afrundede, idet afhængigheden af andengradsfunktionen er svag. Den konstante værdi for $\cos(i) < -0,2$ er valgt som andengradsfunktionens værdi for $\cos(i) = -0,2$. Denne må nok erkendes at være lidt for høj for små værdier af $\cos(i)$. Det ville derfor have givet en bedre overensstemmelse, hvis der var valgt en lineær sammenhæng mellem F_i og $\cos(i)$ for $\cos(i) < -0,2$. Når dette ikke er gjort skyldes det, at de beregnede værdier med korrektion for skydække viste sig at være i rimelig overensstemmelse med målingerne.

Ligning (8.4) gælder kun i klart vejr, hvorfor den skal korrigeres i afhængighed af skydækket. Ud fra målingerne og de samtidige observationer fandtes, at en skydækkerekorrektionsfaktor F_N , der beregnes som:

$$F_N = 1 - N/16\tag{8.5}$$

gav en rimelig god overensstemmelse mellem målte og beregnede værdier. For overskyet himmel, $N = 8$, findes således

at forholdet mellem himmelstrålingen på lodret og på vandret er det halve af det tilsvarende forhold i klart vejr.

Ligningerne (8.4) og (8.5) er udviklet for lodrette flader. For flader med en anden hældning er det derfor nødvendigt at korrigere for hældningen, hvis de fundne ligninger skal benyttes. Korrektionen for hældning foretages ved at interpolere mellem lodret og vandret i afhængighed af fladens vinkelforhold til himlen.

For en lodret flade med et vinkelforhold til himlen på $\frac{1}{2}$ findes forholdet mellem himmelstråling på fladen og på vandret, R_d , som angivet til $F_i \cdot F_N$. For en vandret flade er $R_d=1$ og vinkelforholdet til himlen 1, hvorfor der for fladen med hældningen t og vinkelforholdet til himlen på $(1 + \cos t)/2$ ved lineær interpolation findes:

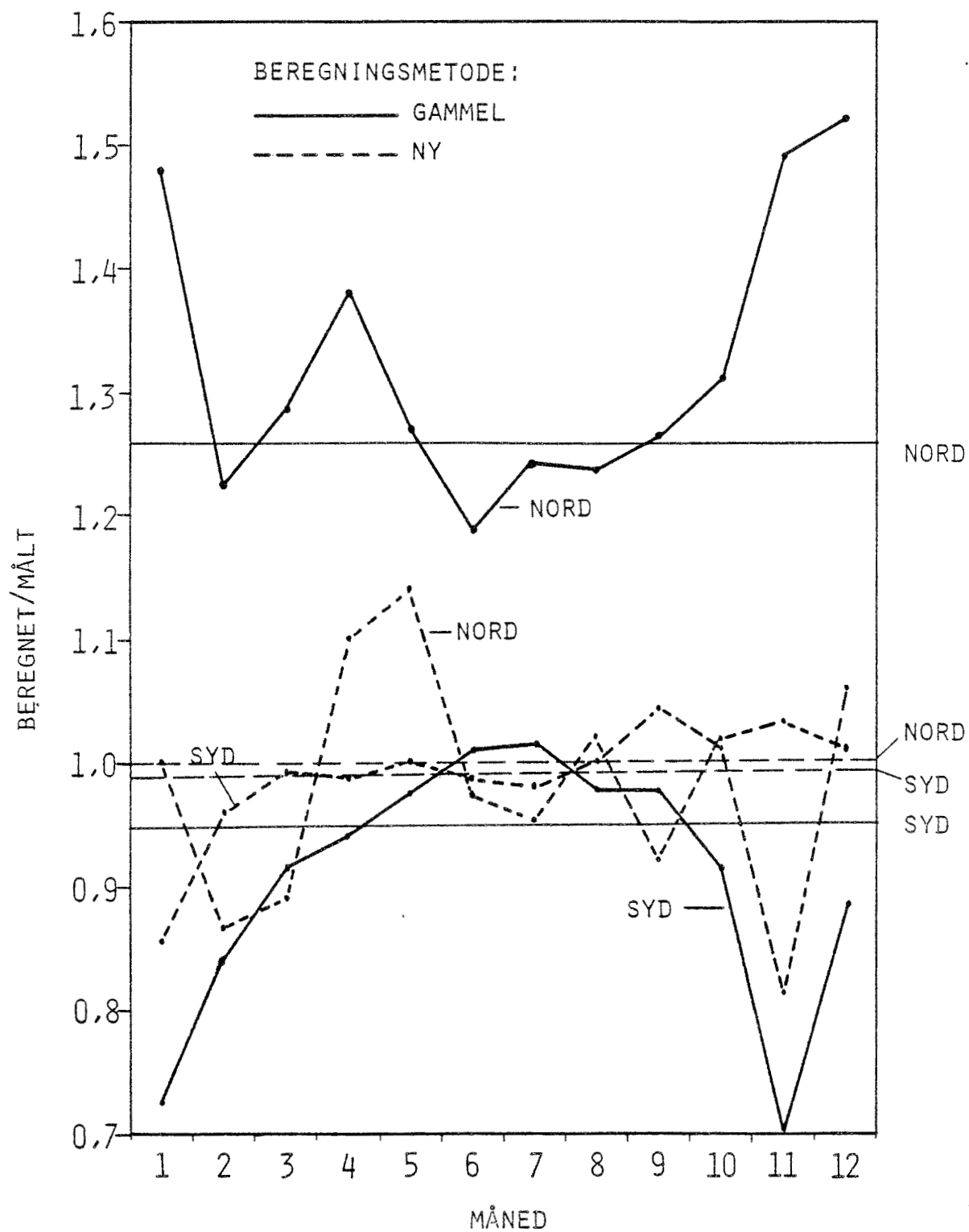
$$R_d = F_i \cdot F_N \cdot (1 - \cos(t)) + \cos(t) \quad (8.6)$$

hvor F_i beregnes af ligning (8.4) med den direkte solstrålings indfaldsvinkel til fladen og F_N af ligning (8.5) ud fra skydækkeobservationen.

Den væsentligste forskel mellem den gamle beregningsmetode [22] og den nye netop anførte er, at i den gamle blev skydækkekorrektionen gennemført, således at R_d var $\frac{1}{2}$ for en lodret flade med overskyet himmel ($N = 8$), hvor værdien af R_d i den nye beregning også afhænger af indfaldsvinklen, selv med overskyet himmel.

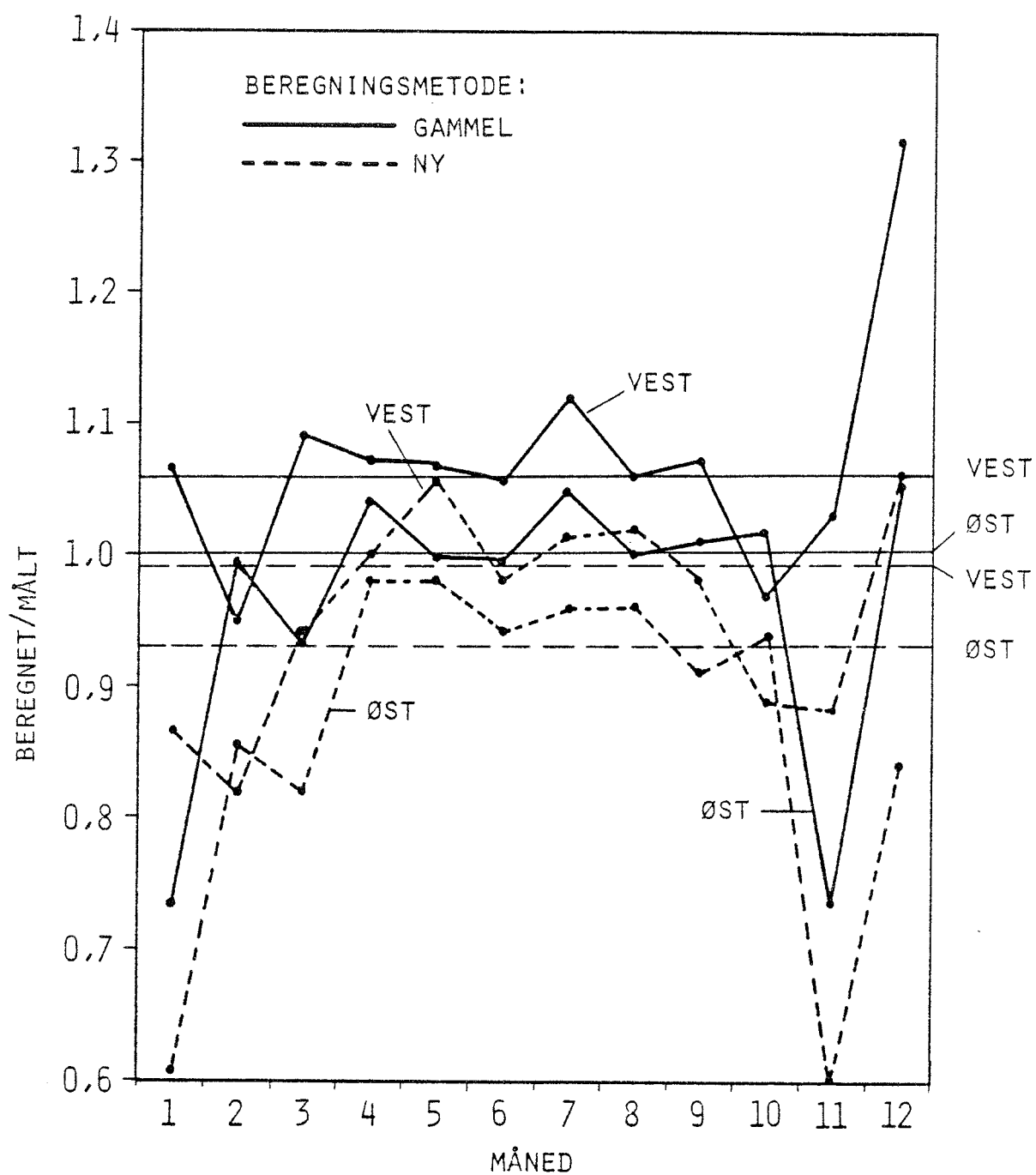
Sammenlignes de beregnede himmelstrålingsværdier med de tilsvarende målte, findes forholdene for de 2 beregningsmetoder som vist på figurerne 8.6, 8.7 og 8.8. Det fremgår heraf, at med den nye beregningsmetode bliver der bedre overensstemmelse mellem målinger og beregninger for de nord- og sydvendte lodrette flader. Derimod er forskellen mellem beregningsmetoderne for de øst/vest-vendte lodrette flader mindre tydelig, og den nye metode giver totalt set ikke et resultat, der er bedre end den gamle.

BEREGNET/MÅLT DIFFUS STRÅLING PÅ LODRET FLADE
MOD SYD OG NORD. MÅNEDS- OG ÅRSGENNEMSNIT,



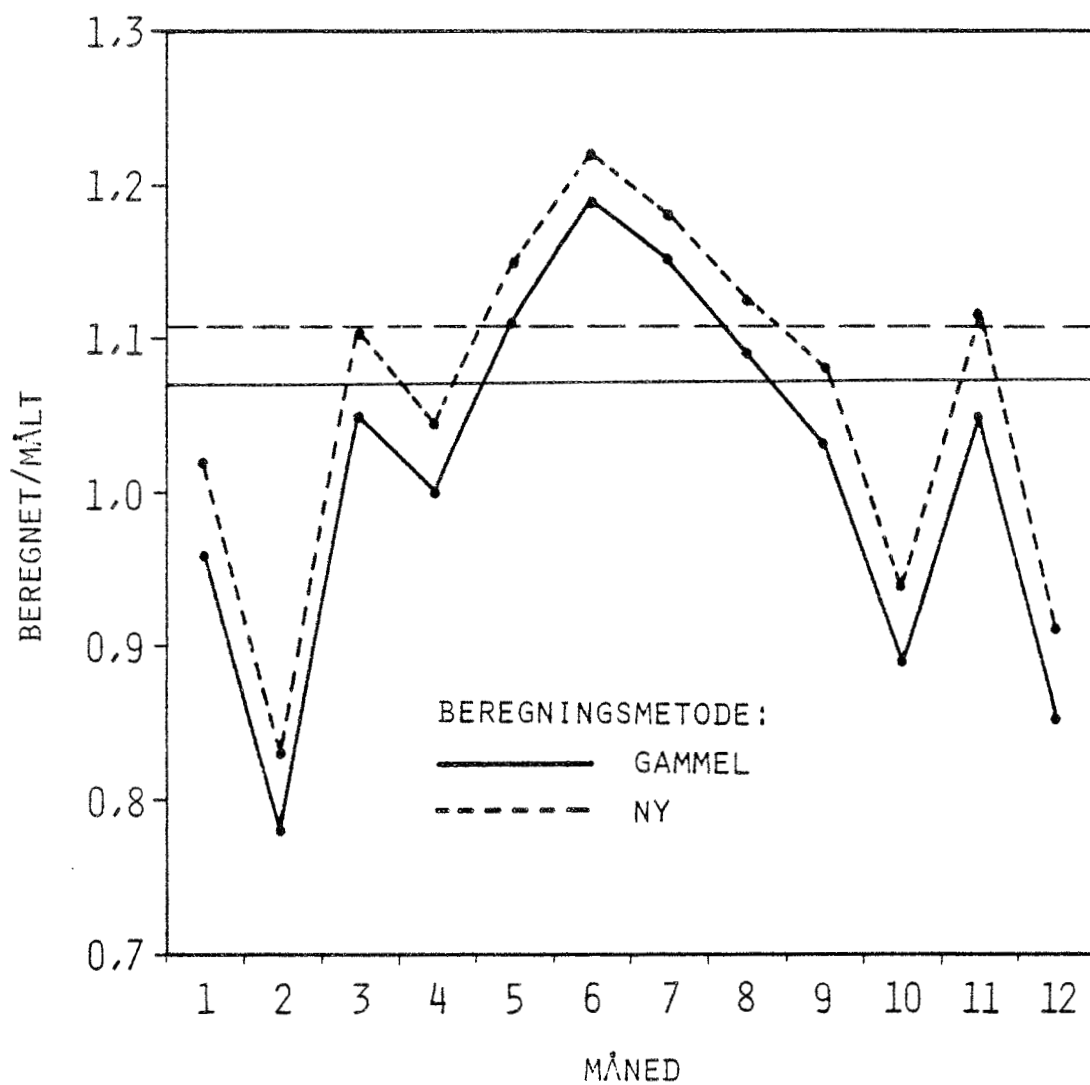
Figur 3.6

BEREGNET/MÅLT DIFFUS STRÅLING PÅ LODRET FLADE
MOD VEST OG ØST, MÅNEDS- OG ÅRSGENNEMSNIT,



Figur 8.7

BEREGNET/MÅLT DIFFUS STRÅLING PÅ 60 GRADER
SYDVENDT FLADE, MÅNEDS- OG ÅRSGENNEMSNIT.



Figur 8.8

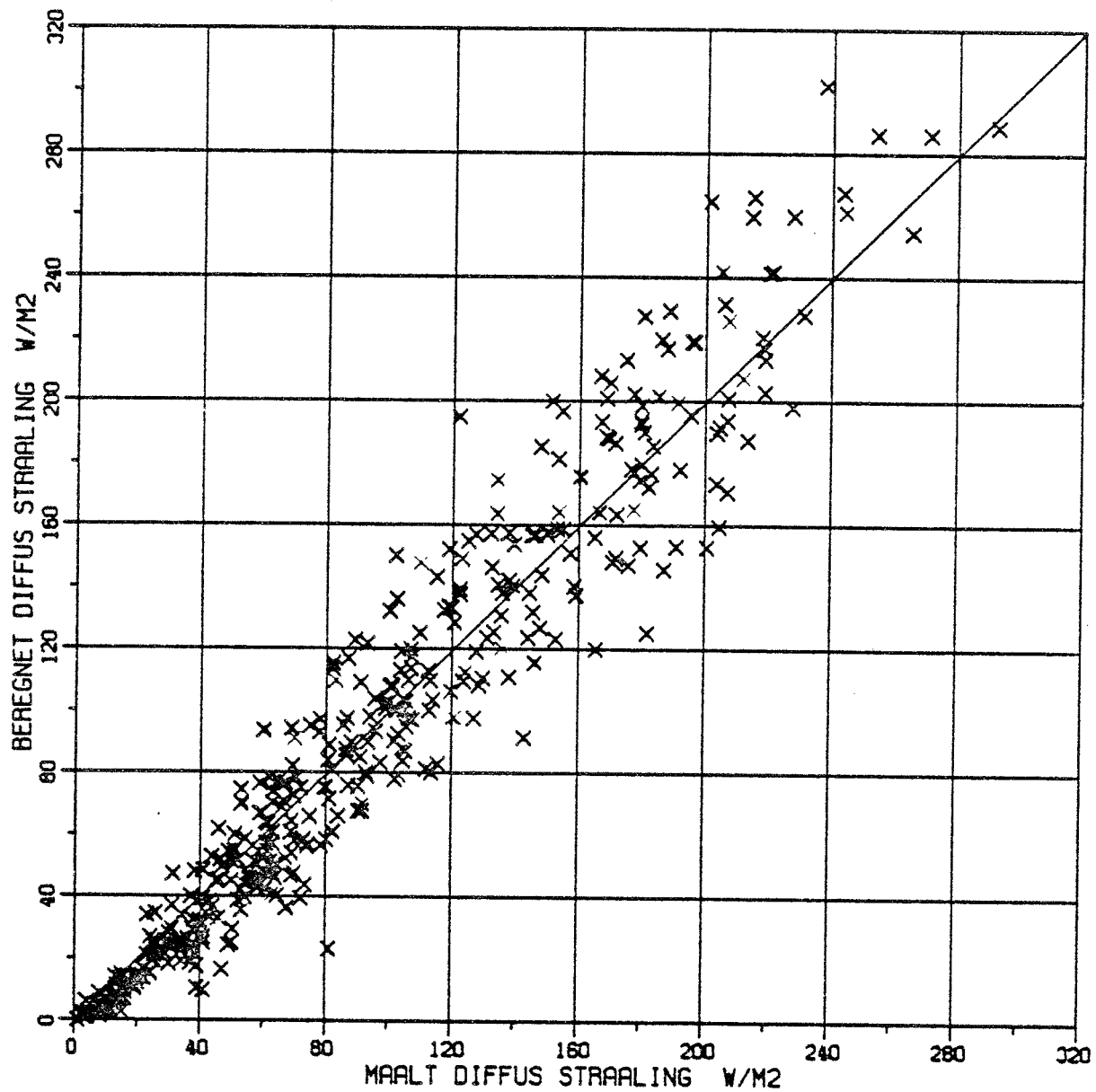
Endelig ses, at de to metoder giver stort set ens resultat for den sydvendte 60 grader hældende flade. Den nye metode giver blot lidt større værdier.

På månedsbasis fandtes altså rimelig god overensstemmelse mellem målinger og beregninger. Dette gør sig også gældende for timeværdier. På figur 8.9 er for en enkelt måned, april 1978, plottet sammenhørende værdier af målt og beregnet diffus stråling på den lodrette sydflade. Der ses at være god overensstemmelse, idet punkterne fordeler sig rimelig pænt omkring en linie med 45 graders hældning. En lille afvigelse herfra forekommer for de helt små og de helt store strålingsværdier.

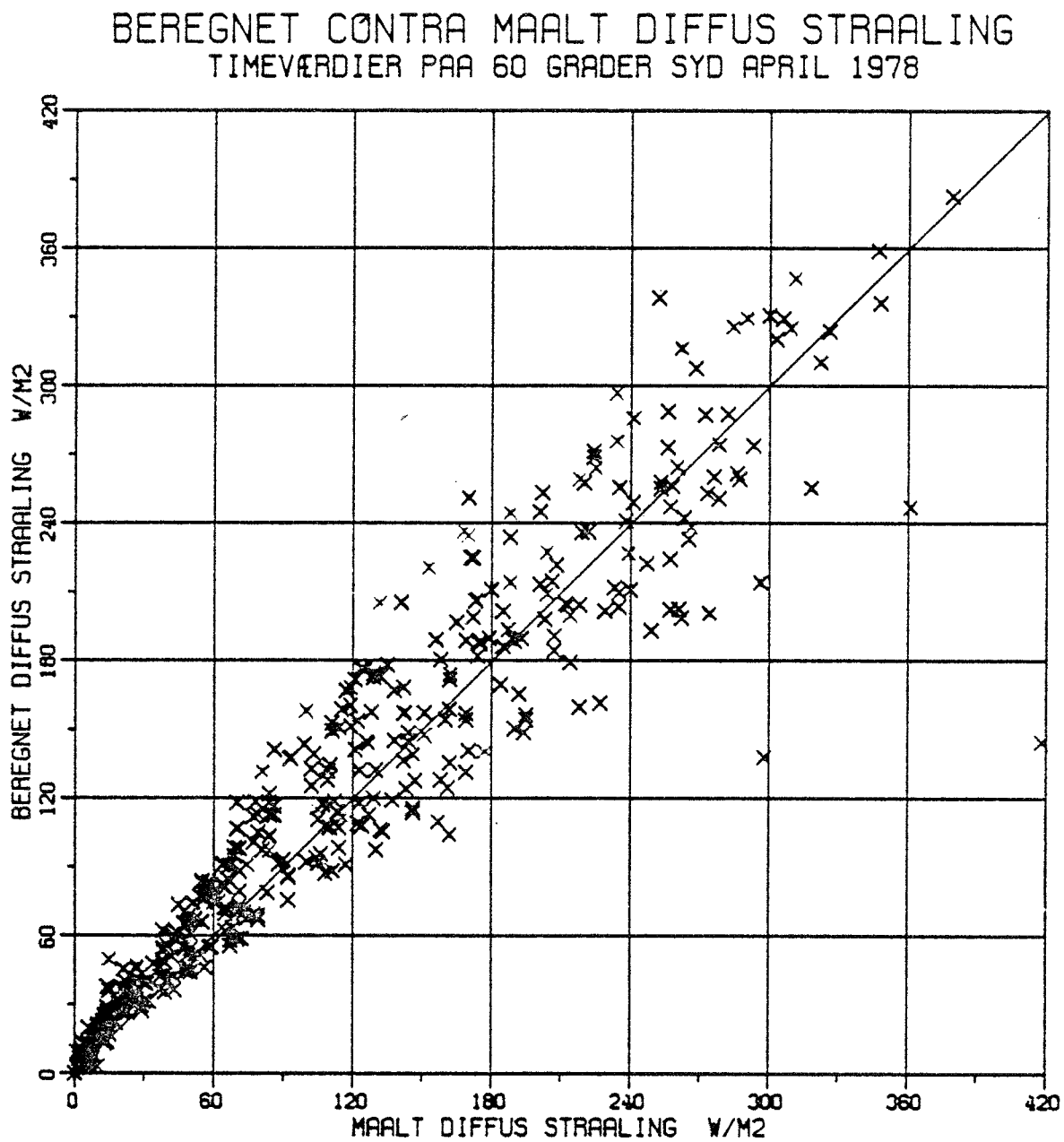
For den hældende flade er der også god overensstemmelse mellem målte og beregnede strålingsværdier som vist på figur 8.10, ligeledes gældende for timeværdier i april 1978. Fordelingen omkring 45 graders linien er bortset fra de helt små værdier rimelig god.

For begge figurer gælder det, at summen af beregningerne på månedsbasis kun afviger ganske få % fra de målte, mens der på timebasis må regnes med beregnede værdier, der afviger op til ca. 25% fra de målte. Ud fra usikkerheden i målingerne og usikkerheden i bestemmelsen af skydækket skønnes dette at være tilfredsstillende. Bedre overensstemmelse kan ikke forventes med en så relativt enkel metode.

BEREGNET CONTRA MAALT DIFFUS STRAALING
TIMEVÆRDIER PAA LØDRET SYD APRIL 1978



Figur 8.9



Figur 8.10

9. SOLINDFALD I DANMARK

I forbindelse med fx dimensionering af solvarmeanlæg og vurderinger af solindfaldets indflydelse på bygningers varme- og kølebehov er det af interesse at kende solindfaldets middelværdi over en længere periode. Oftest ønskes værdien for en fremtidig periode, men den kan af gode grunde ikke præcist angives. Som regel benyttes der derfor registreringer fra tidligere år, og disse antages da også at være repræsentative for de kommende.

9.1 Sammenhæng mellem solindfald og soltimetal

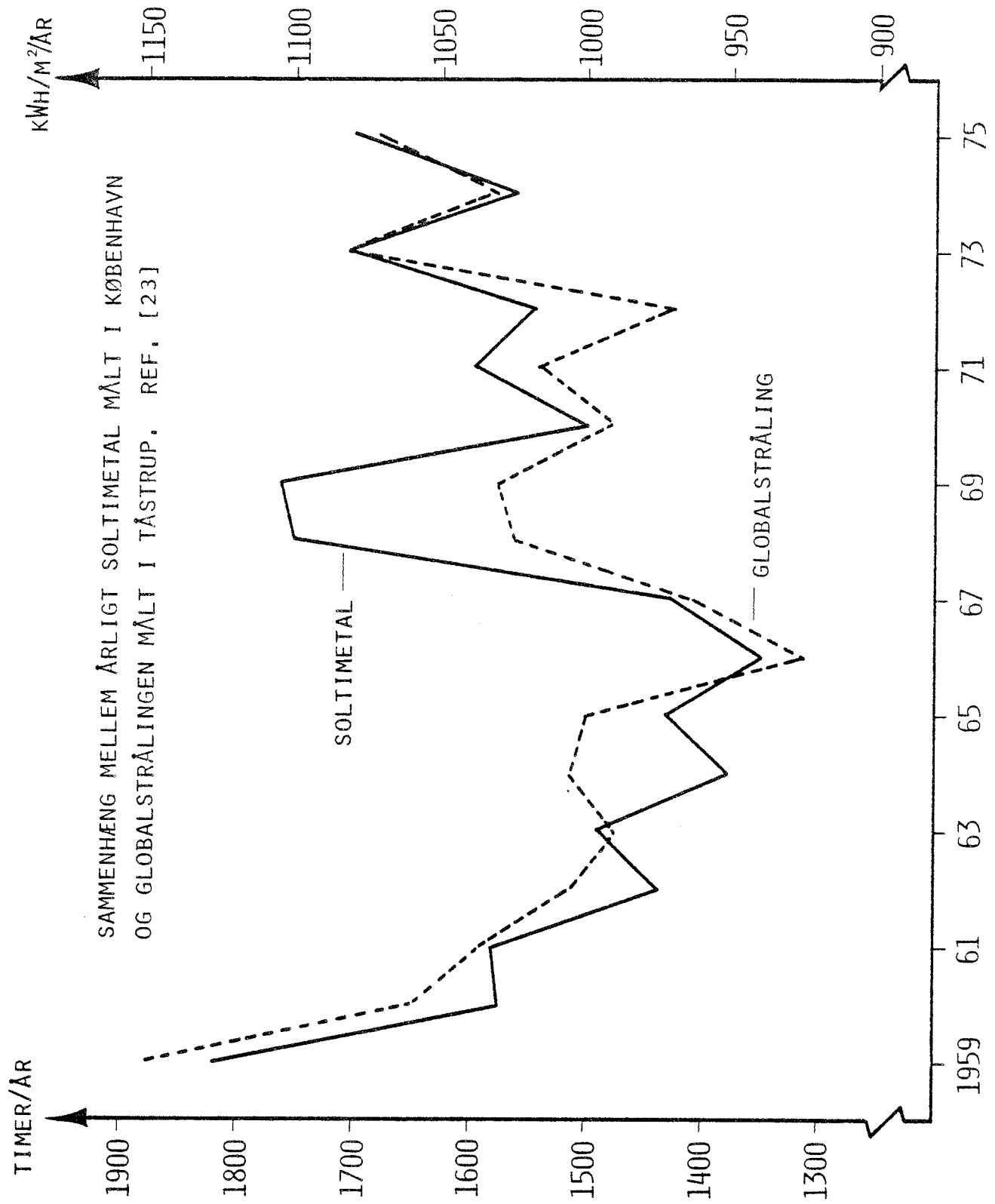
Tidligere er der anført en sammenhæng mellem solindfaldet og soltimetallet både på døgn og månedsbasis (figur 7.2 og 7.4). En tilsvarende sammenhæng kan forventes på årsbasis. På figur 9.1 er dette illustreret for en årrække. Sammenhængen er dog ikke helt entydig, hvilket bl.a. kan skyldes, at målingerne er foretaget på 2 steder med en indbyrdes afstand på omkring 20 km, hvorfor der ikke er sikkerhed for ens vejrforhold.

Solindfald er kun kontinuert registreret i Danmark gennem de sidste godt 20 år, hvorimod soltimetallet er registreret gennem flere hundrede år. Man kan derfor få en fornemmelse af forventede variationer i solindfaldet ved at sammenligne med de registrerede variationer i soltimetallet. For København (Toldboden) er der i tabel 9.1 vist langtidsvariationen i perioden 1901 - 1970. På baggrund heraf kan det slutes, at over længere perioder må regnes med nogen variation i solindfaldet, hvorfor et gennemsnit baseret fx på de sidste 10 år vil kunne vise sig at afvige en del fra de kommende 10 års gennemsnit.

9.2 Solindfald i referenceåret

Til edb-beregning, hvor man ønsker at få en nærmere analyse af det varierende klimas indflydelse på fx en bologs varmebehov eller et solvarmeanlægs ydelse, er det

Tabel 9.1 Gennemsnitligt antal soltimer målt ved Toldboden, København		
Periode	Soltimer/år	% i forh. til gns. 1931 - 60
1901 - 10	1300,5	81
1911 - 20	1493,2	93
1921 - 30	1627,6	102
1901 - 30	1473,8	92
1931 - 40	1641,0	103
1941 - 50	1632,3	102
1951 - 60	1528,2	95
1931 - 60	1600,5	100
1961 - 70	1511,9	94



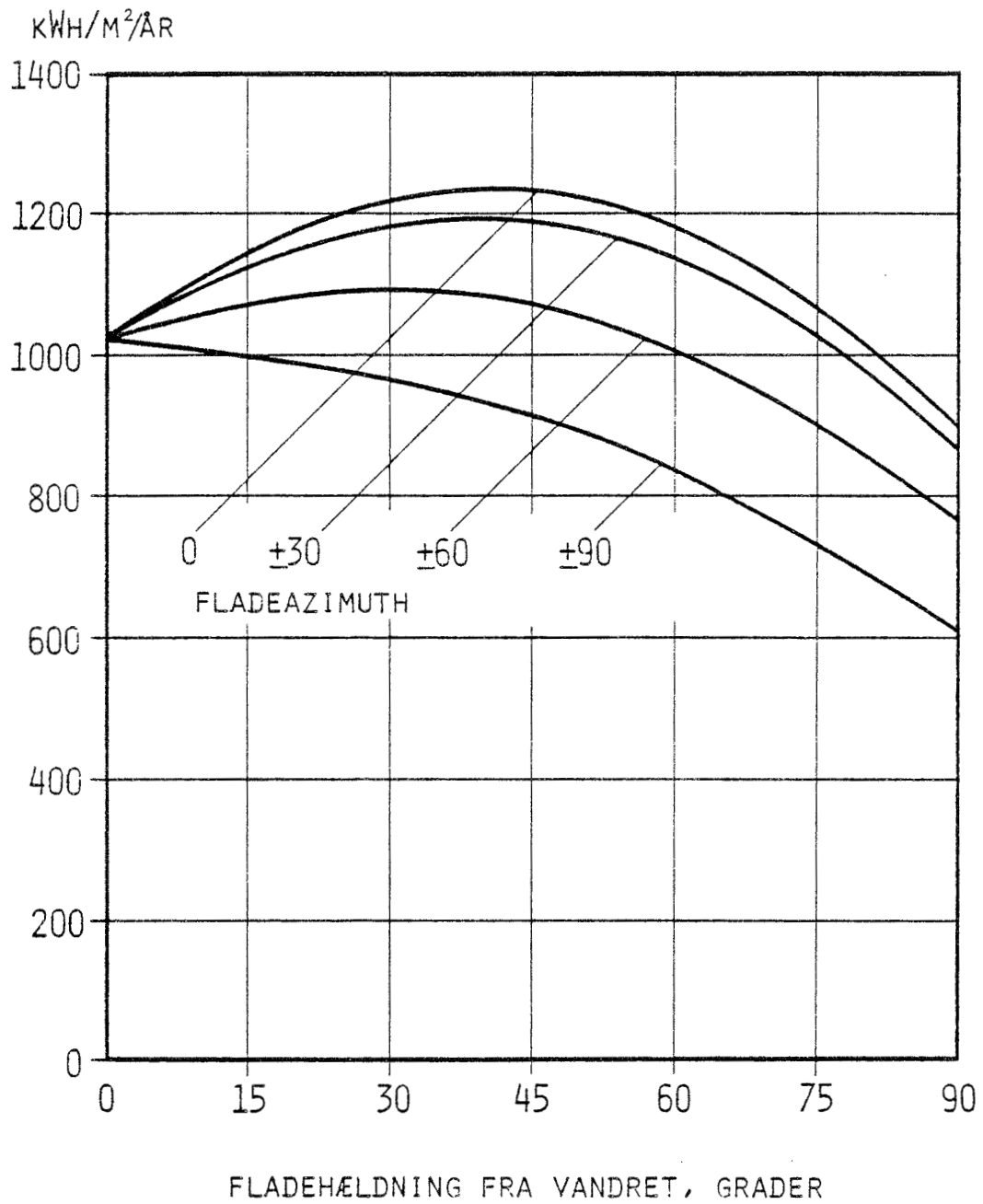
Figur 9.1

ikke tilstrækkeligt at benytte sig af gennemsnitsværdier. En samling af typisk forekommende klimadata findes i det såkaldte referenceår [24]. Dette er fremkommet ved, at der ud af 11 års kontinuerede vejrobservationer (1959 - 69) for hver måned er udvalgt den, der ud fra en række kriterier er mest repræsentativ. Det på denne måde sammensatte år indeholder for hver time en række meteorologiske observationer, hvor middelværdierne for de vigtigste er i rimelig god overensstemmelse med "normalåret", og hvor værdierne af observationerne udviser typiske variationer.

Referenceåret indeholder også værdier for solstrålingen, nemlig globalstråling og diffus himmelstråling målt i Tåstrup, samt deraf beregnet normalstråling. Selvom solindfald ikke var en nøgleparameter ved udvælgelsen af de enkelte måneder i referenceåret, så er årssummen i rimelig god overensstemmelse med udvælgelsesperiodens gennemsnit. Referenceåret er derfor ofte benyttet som "middelår" og som sådan også antaget at være repræsentativt for de fremtidige års gennemsnitlige vejrforhold.

Globalstrålingen i referenceåret er godt $1000 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$, hvilket også er årsgennemsnittet i perioden 1959 - 69, jævnfør figur 9.1. Beregnes solindfaldet på flader med forskellig hældning og orientering, fås værdierne som vist på figur 9.2. Beregningen af diffus himmelstråling er foretaget efter den "gamle" metode, som er anført i [22]. Tilsvarende beregninger med den "nye" metode (afsnit 8.4) vil kun medføre beskedne ændringer, dels fordi diffus himmelstråling kun udgør omkring halvdelen af solindfaldet, og dels fordi forskellen mellem den nye og den gamle metode på årsbasis (men ikke på månedsbasis) for de på figuren anførte fladepositioner i værste tilfælde kun er 4 - 5%. Totalt fås således, at den nye beregningsmetode vil medføre resultater, der højst afviger 3% fra de på figuren viste.

SOLINDFALD PÅ FLADER, REFERENCEÅRETS
VEJRDATA MED BEREGNINGSMETODE FRA [22]



Figur 9.2

Det største solindfald findes af figur 9.2 at være omkring $1200 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$ for en sydvendt flade med en hældning omkring 45 grader. Flader med en azimuth-vinkel på op til 30 grader har dog praktisk talt det samme solindfald som en sydvendt, ligesom en lidt ændret fladehældning kun medfører en meget beskedne reduktion i solindfaldet.

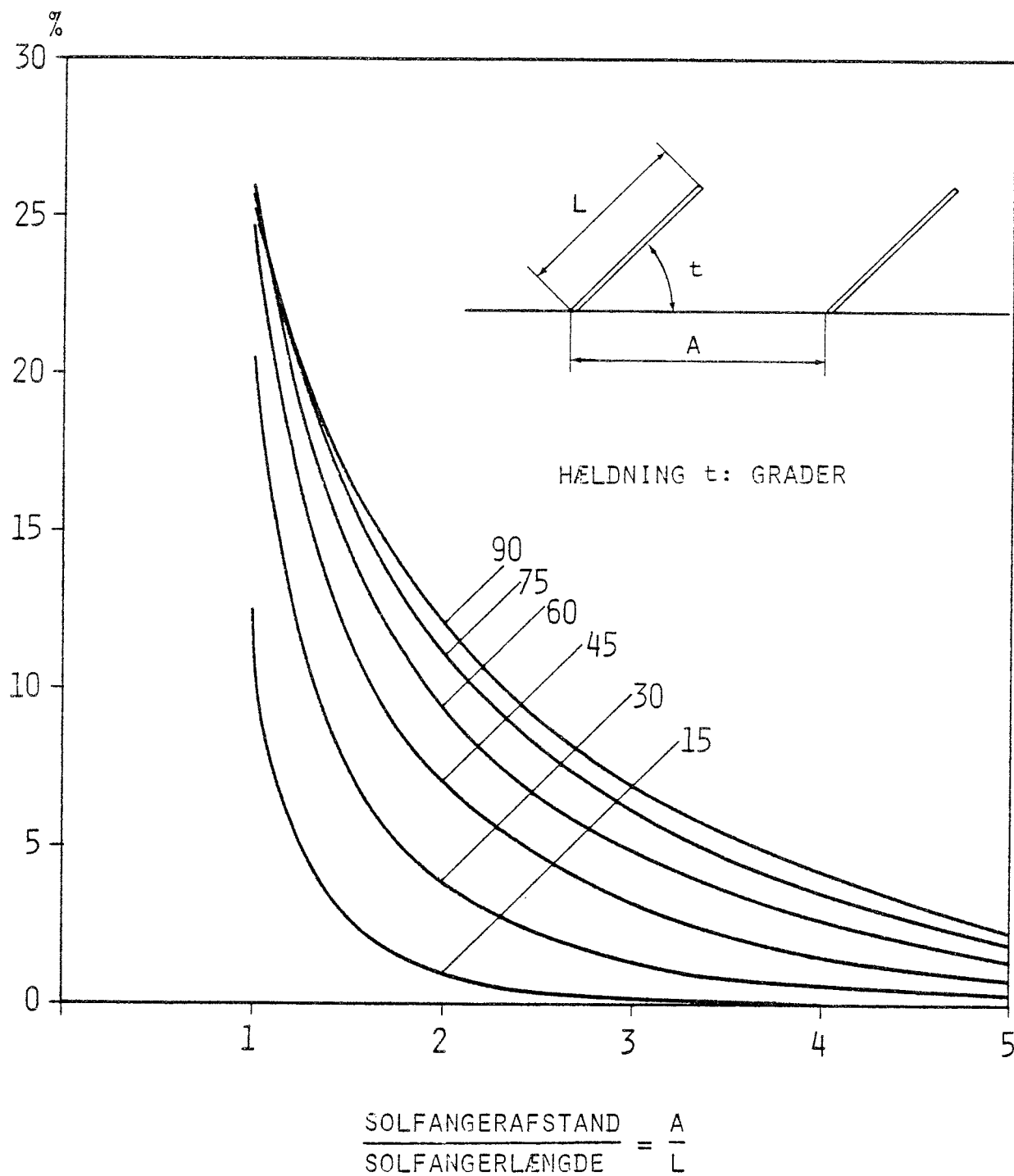
De anførte værdier for solindfaldet er beregnet under forudsætning af, at fladerne ikke på visse tidspunkter bliver afskærmet for den direkte og diffuse himmelstråling. I praksis vil det for en given flade ikke altid være tilfældet. I forbindelse med opstilling af et stort antal solfangere kan det derfor være af interesse at kende, i hvor høj grad de vil skygge for hinanden i afhængighed af deres indbyrdes afstand. På figur 9.3 er vist resultatet af en række beregninger gældende for en solfanger midt i parken. Reduktion i solindfaldet er for den direkte strålings vedkommende beregnet ud fra skyggearealet på solfangeren, mens den diffuse himmelstråling er reduceret ud fra solfangerens reducerede vinkelforhold til himlen på grund af den foranstående solfangerrække.

For solfangere med hældning på 45 grader ses, at et afstand/længde forhold større end ca. $2\frac{1}{2}$ medfører, at indstrålingen reduceres mindre end 5%. For solfangere med mindre hældning er reduktionen endnu mindre.

9.3 Nyt referenceår

Referenceårets solindfald er på årsbasis meget tæt på middelsolindfaldet i udvælgelsesperioden. Derimod forekommer der i de enkelte måneder store afvigelser fra månedsmiddel, specielt i forårs månederne. En årsagerne hertil er, at der ved udvælgelsen af de enkelte måneder ikke blev lagt afgørende vægt på solindfaldet. Referenceåret har derved fået en "skæv" fordeling med for meget solindfald i vinterhalvåret og lidt

ÅRLIG REDUKTION I SOLINDFALDET PÅ GRUND AF SKYGGE I
SYDVENDT SOLFANGERPARK. REFERENCEÅRETS KLIMADATA.



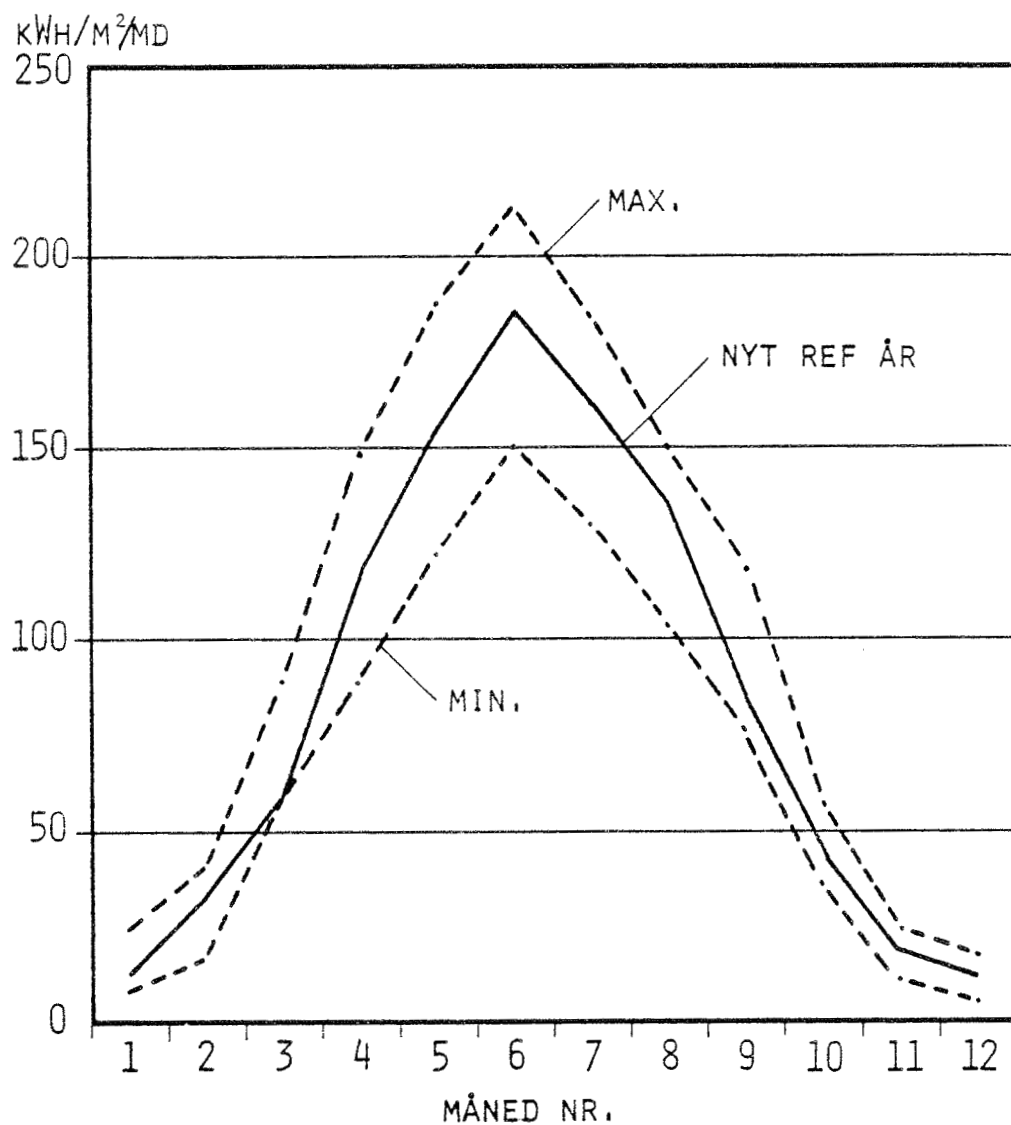
Figur 9.3

for lidt i sommerhalvåret. Dette er forsøgt ændret ved i 2. udgave af [24] at anbefale at sætte den direkte stråling til nul på visse udvalgte dage. Derved fremkommer et såkaldt modificeret referenceår.

Siden referenceåret blev dannet, er der dels fremkommet flere år med kontinuerte strålingsmålinger, og dels er der arbejdet med at finde nye udvælgelsesmetoder. En række af disse metoder er beskrevet i [25]. Anvendes den heri beskrevne danske udvælgelsesmetode, der kun afviger på enkelte punkter fra den tidligere benyttede, på 15 års perioden fra 1959 til 1973, fås et nyt sæt vejrdato. I det følgende vil dette datasæt blive omtalt som et nyt referenceår, selvom der endnu ikke er taget stilling til, om et sådant officielt skal udarbejdes og udsendes til erstatning af det eksisterende.

Det nye referenceår har samme værdi af globalstråling, godt $1000 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$, som det gamle, blot fordelt på en lidt anden måde igennem året, idet kun 4 måneder er de samme i begge år. På figur 9.4 er globalstrålingen igennem det nye referenceår optegnet. Til sammenligning er desuden anført de største og de mindste månedsværdier i 15 års perioden. Det ses, at det nye referenceårs værdier ligger rimelig pænt imellem maximum og minimum, og kun i et enkelt tilfælde, marts, er der udvalgt en måned med et ekstremt solindfald.

MIN. OG MAX. GLOBALSTRÅLING PR. MÅNED
MÅLT 1959 - 73 I TÅSTRUP



Figur 9.4

10. SOLVARMEANLÆG

Udnyttelse af solindfaldet til opvarmningsformål kan ske ved hjælp af et solvarmeanlæg. Et sådant kan udformes på utallige måder i afhængighed af komponentvalg og -sammensætning.

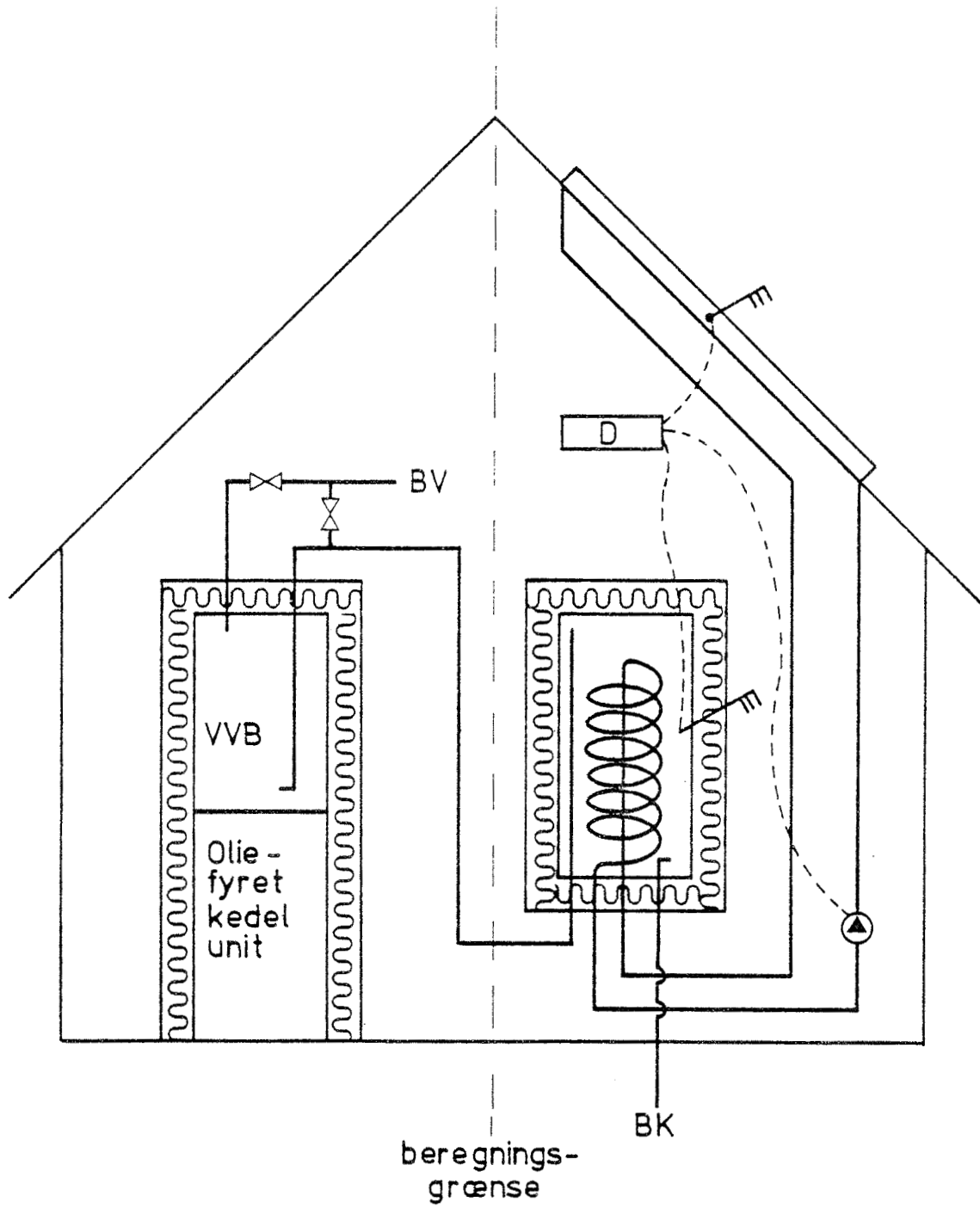
I dette arbejde vil kun de simpleste anlæg blive behandlet. Disse vil desuden kun blive belyst beregningsmæssigt. Den mere praktiske udførelse vil ikke blive omtalt.

En simpel udførelse af et solvarmeanlæg er vist på figur 10.1. Dette anlæg er et brugsvandsanlæg, idet der sker en forvarmning af brugsvandet inden en traditionel olie-fyrsopvarmning.

Når solen skinner på solfangeren, bliver den varmere end omgivelserne, og den absorberede solenergi kan via et rør-system og en varmeveksler overføres til brugsvandet i en lagerbeholder. Styringen af varmeoverføringen fra solfanger til varmelager kan ske med en differenstermostat, som starter og stopper en pumpe, når temperaturen i solfangeren bliver højere, henholdsvis lavere, end i brugsvandslageret. På figuren er systemets principielle opbygning vist, og der er således ikke vist, hvorledes ekspansionsmuligheder, snavssamler, kontraventiler, aftapningshaner m.v. skal placeres. Ligeledes er heller ikke vist, at med et frostsikret solfangerkredsløb er det ofte nødvendigt at udføre spiralvarmeveksleren som en dobbeltspiral eller på anden måde sikre dobbelt adskillelse mellem frostvæske og brugsvandet. Alle de nævnte praktiske og lovgivningsmæssige krav til udførelsen samt nærmere dimensionering af en lang række komponenter vil som tidligere nævnt ikke blive behandlet i dette arbejde.

Brugsvandsanlægget på figuren er sammenkoblet med en traditionel gasoliefyret kedelunit. Dette er for et brugsvandsanlæg, der benyttes hele året, en nødvendighed, idet man af tekniske/økonomiske grunde ikke udfører denne type anlæg, således at de kan dække varmtvandsforbruget 100% på årsbasis.

PRINCIPSKITSE AF SOLVARMEANLÆG
TIL FORVARMNING AF BRUGSVAND



Figur 10.1

Principielt kan den skitserede type solvarmeanlæg sammenkobles med alle de i dag anvendte opvarmningssystemer. Sammenkoblingen kan foregå på lidt forskellig måde, bl.a. i afhængighed af energikilde, men som skitseret på figuren med en lodret stiptet streg vil der her kun blive behandlet selve solvarmeanlægget og dets hovedkomponenter bestående af solfanger, rørsystem, varmelager og styresystem.

11. SOLFANGEREN

I solfangeren omsættes den kortbølgede solstråling til varme. Varmen transporteres med en væske eller luftart fra solfangeren til varmelageret eller direkte til brugsstedet. Solfangeren kan således opfattes som en lidt speciel form for varmeveksler, idet strålingsenergi omsættes til termisk energi, ved at et medium får en temperaturstigning.

Solfangeren skal for at give så stort et udbytte som muligt anbringes på en sådan måde, at solen uhindret kan skinne mest muligt på den. Af figur 9.2 fremgår det, at i Danmark vil sydvendte solfangere med en hældning på omkring 45 grader få størst solindfald på årsbasis.

Der kan konstrueres solfangere til mange forskellige formål og efter forskellige principper. Den mest almindelige solfanger i Danmark er en plan, væskegennemstrømmet solfanger med dæklag af glas. I dette arbejde vil kun denne type solfanger blive behandlet.

En typisk solfanger består af en plan absorberplade af metal, hvorpå et kanalsystem er fastgjort eller integreret. Absorberen er derefter anbragt bag et eller flere lag glas og isoleret bagtil og til siderne. En nærmere beskrivelse af nogle danske solfangere findes i [26] og [27].

11.1 Solfangerens udbytte

Udbyttet af en plan væskesolfanger kan for stationære forhold beregnes som den absorberede energi minus varmetabet. Det største udbytte fås, når så stor en del af solindfaldet som muligt absorberes samtidig med, at varmetabet er så lille som muligt.

Udbyttet i forhold til indstrålingen er solfangerens øjeblikkelige effektivitet.

Beregning af en given plan solfangers udbytte under kendte vejrpåvirkninger er beskrevet flere steder. Almindeligt

anvendt er metoden angivet i [28], hvor udbyttet Q_u under stationære forhold beregnes som:

$$Q_u = A \cdot F_R \cdot (S - U_L(T_i - T_a)) \quad (11.1)$$

hvor

A = absorberens areal

F_R = solfangerens effektivitetsfaktor

S = absorberet energi pr. arealenhed

U_L = varmetabskoefficient

T_i = væskens indløbstemperatur

T_a = omgivelsernes temperatur

Ligning (11.1) er opstillet under forudsætning af, at der kan ses bort fra alle randfænomener, og at absorberareal derfor er lig med dæklagets transparente areal, samt at der ikke forekommer nogen form for skyggevirkning af kanter m.v... Varmetabskoefficienten beregnes ud fra absorberpladens middeltemperatur, hvorfor varmetabet beregnet som varmetabskoefficienten gange temperaturdifferensen mellem indløb og omgivelserne bliver for lille. Dette kompenseres der for med effektivitetsfaktoren F_R . Denne er forholdet mellem det faktiske udbytte og det man ville have fået, såfremt absorberens temperatur overalt havde været lig med indløbstemperaturen. Dette ville forekomme for en ideel solfanger, hvorved F_R ville blive lig med en. En yderligere forudsætning for ligning (11.1) er, at varmetabet finder sted til omgivelserne, der overalt regnes at have ens temperatur.

En solfanger med $F_R = 1$ forekommer ikke i praksis, idet varmetransport fra absorberoverflade til væske ikke kan foregå uden en vis temperaturdifferens, og desuden giver den til væsken overførte varme anledning til en temperaturstigning heraf. Det er derfor naturligt at sammensætte F_R af to effektivitetsfaktorer: én, F' , som korri-

gerer for, at absorbertemperaturen er højere end væsketemperaturen, og én, F'' , som korrigerer for væskens (og dermed også absorberens) temperaturstigning ved gennemløbet af solfangeren. Herved findes

$$F_R = F' \cdot F'' \quad (11.2)$$

hvor F' ofte kaldes absorbereffektiviteten og F'' flowfaktoren, der henholdsvis kan beregnes af (11.5) og (11.7).

Udbytteligningen (11.1) kan nu omskrives til:

$$Q_u = A \cdot F' \cdot (S - U_L \cdot (T_f - T_a)) \quad (11.3)$$

hvor T_f er væskens middeltemperatur.

Endelig kan man også opstille energibalanceligningen:

$$Q_u = A \cdot (S - U_L \cdot (T_p - T_a)) \quad (11.4)$$

hvor T_p er absorberpladens middeltemperatur.

Absorbereffektiviteten F' afhænger hovedsagelig af selve absorberens udformning. For forskellige udførelser kan man i [28] finde formeludtryk til beregning af F' .

For en absorberudformning bestående af en plan plade, hvorunder et rørsystem er fastgjort som vist på figur 11.1, findes absorbereffektiviteten af ligningen:

$$F' = \left(\frac{W}{D + (W - D)F} + \frac{W U_L}{C_b} + \frac{W U_L}{\pi d_i \alpha_i} \right)^{-1} \quad (11.5)$$

hvor

W = rørafstand

D = ydre rørdiameter = fastgørelsesbredde

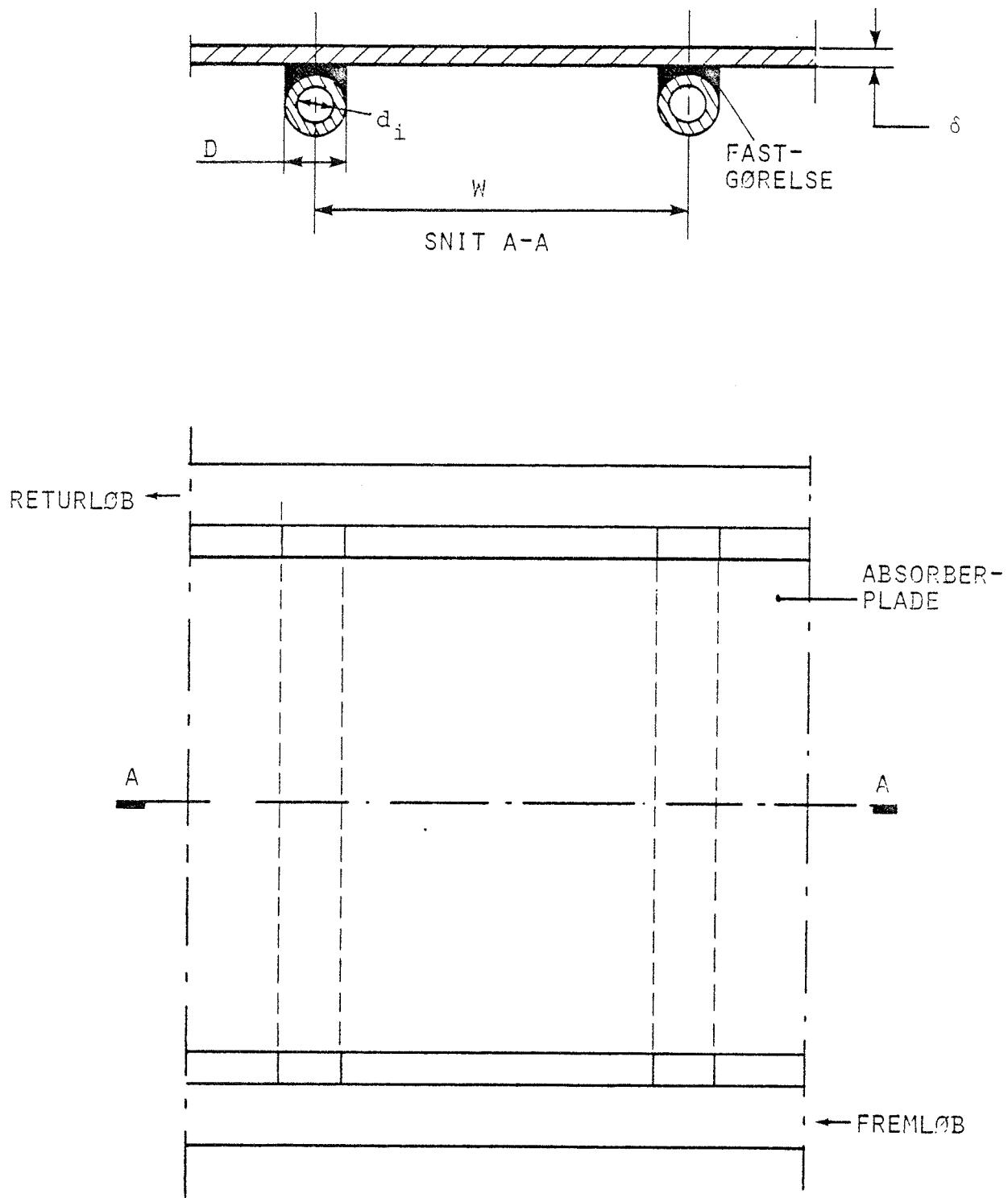
F = pladeeffektivitet

C_b = fastgørelsens varmeoverføringsevne

d_i = indvendig rørdiameter

α_i = varmeoverføringskoefficient mellem rør og væske

PRINCIPSKITSE AF RØR-PLADEABSORBER



Figur 11.1

Pladeeffektiviteten F beregnes af formelen:

$$F = \frac{\operatorname{tgh}\left(\sqrt{\frac{U_L}{\lambda_p \cdot \delta}} \cdot \frac{W-D}{2}\right)}{\sqrt{\frac{U_L}{\lambda_p \cdot \delta}} \cdot \frac{W-D}{2}} \quad (11.6)$$

hvor λ_p er absorberpladens varmeledningsevne og δ tykkelsen.

Varmetransporten i absorberen foregår gennem pladen hen til rørfastgørelsen, gennem denne til røret og endelig herfra til væsken. Jo lettere denne varmetransport kan foregå, svarende til at varmetransporten kan finde sted med små temperaturdifferenser, jo større effektivitetsfaktor. De 3 nævnte varmetransportveje og de dertil svarende isolanser fremgår af ligning (11.5). Man kan ligeledes heraf udlede, hvilken absorberudformning, der giver en høj effektivitetsfaktor.

Generelt findes, at stor absorbereffektivitet opnås med

- lille rørafstand
- lille varmetabskoefficient
- stor varmeledningsevne i fastgørelsen
- stor varmeoverføringsevne mellem rør og væske

Absorbereffektiviteten er ikke særlig afhængig af varmetabskoefficientens variation med temperaturen og er således bortset fra varmeoverføringen mellem rør og væske, der er noget afhængig af væskens strømningshastighed, en næsten konstant karakteristisk størrelse for en given solfanger. Hvis det er muligt at måle F' , har man således en størrelse, der kan benyttes til at sammenligne forskellige absorberudformningers evne til at overføre den absorberede solenergi til væsken. Desværre er det ikke muligt alene at bestemme F' , men derimod produktet af $F' \cdot S$. I en situation, hvor middelvæsketemperaturen er lig med omgivelsernes temperatur, har man netop en driftstilstand, hvor udbyttet er lig med absorbereffektiviteten gange den absorberede strålingsmængde, jævnfør ligning (11.3). Dette er omtalt nærmere i afsnit 11.4.

Varmeoverføringen mellem rør og væske er som nævnt afhængig af væskens strømningshastighed. Større varmeoverføring fås med større strømningshastigheder.

Samtidig med en øget strømningshastighed fås også en mindre temperaturstigning i væsken. Dette betyder, at absorberens middeltemperatur bliver lavere og varmetabet til omgivelserne derved reduceres, hvorfor udbyttet øges. Disse betragtninger er udtrykt i flowfaktoren F'' , der ifølge [28] kan beregnes som:

$$F'' = \frac{G \cdot C_p}{F' \cdot U_L} \cdot \left(1 - e^{-\frac{F' \cdot U_L}{G \cdot C_p}} \right) \quad (11.7)$$

hvor G er massegennemstrømningen pr. arealenhed og C_p væskens varmekapacitet.

Alt i alt findes således solfangerens effektivitetsfaktor F_R efter ligning (11.2) og (11.7) til:

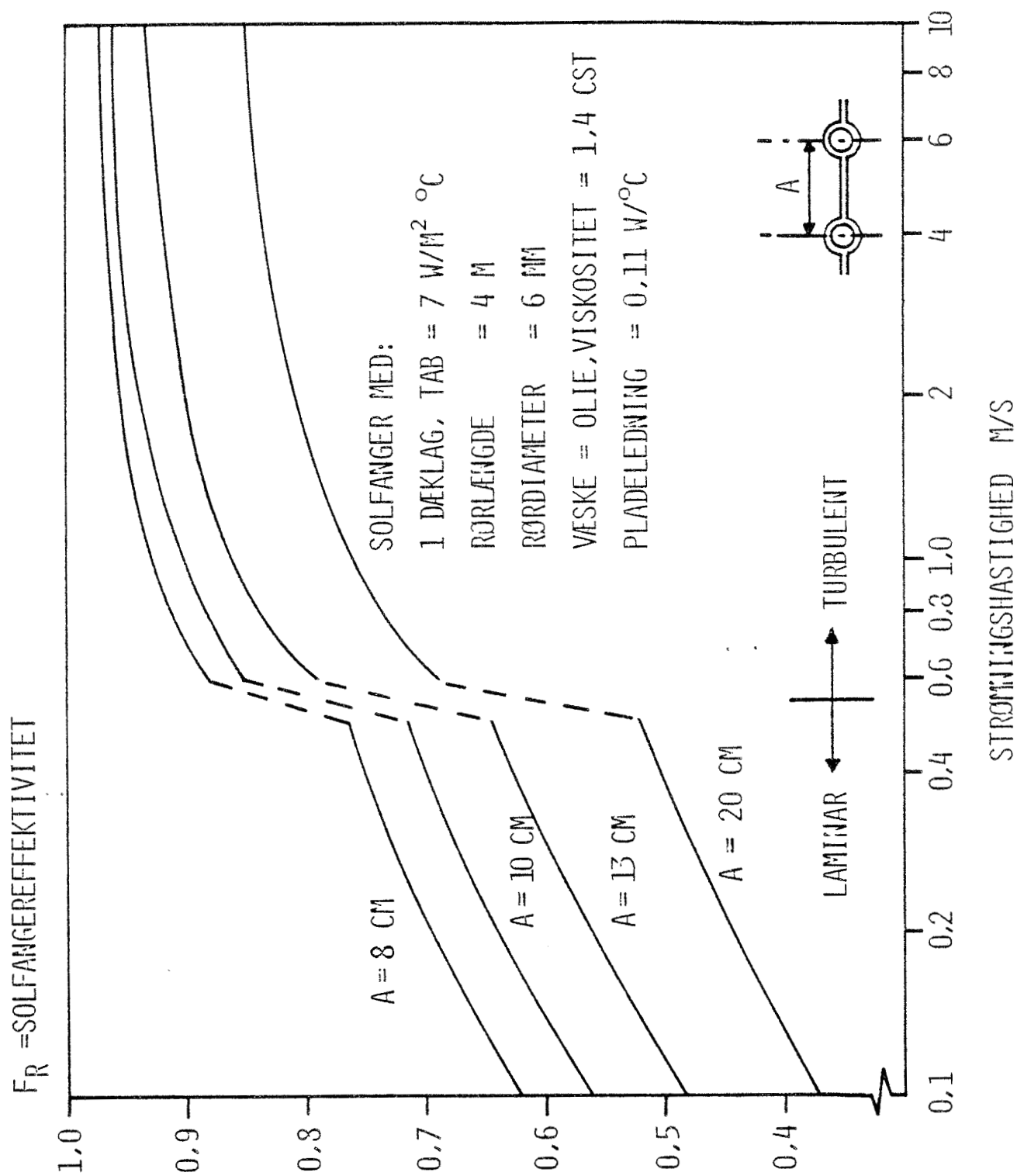
$$F_R = \frac{G \cdot C_p}{U_L} \cdot \left(1 - e^{-\frac{F' \cdot U_L}{G \cdot C_p}} \right) \quad (11.8)$$

Hvorledes F_R kan variere som funktion af strømningshastighed og rørafstand er for en given konstruktion vist på figur 11.2. Specielt ses, at F_R stiger meget, når strømmingen går fra at være laminær til at blive turbulent, idet varmeoverføringen mellem rør og væske øges væsentligt. Beregningerne er gennemført med en væske med forholdsvis stor viskositet. Tilsvarende beregninger med vand ville vise samme principielle kurveforløb, blot vil F_R være større og afhængigheden af strømningshastigheden være mindre, ligesom overgangen til turbulent strømning vil finde sted ved lavere hastigheder.

11.2 Absorberet stråling

En del af den solstråling, der rammer en solfangers dæklag, transmitteres og absorberes af absorberens overflade. Hvor

SOLFANGEREFFEKTIVITET SOM FUNKTION AF STRØMNINGSFASTIGHED OG RØRAFSTAND, REF. [29]



Figur 11.2

meget der transmitteres og absorberes afhænger af dæklaget og absorberens overflade.

Beregningen af absorberet stråling er vist i [28], idet man her angiver, at forholdet mellem absorberet og indfaldende stråling, transmissionsabsorptionsproduktet $(\tau\alpha)$ kan beregnes som:

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha}{1 - (1-\alpha) \cdot \rho_d} \quad (11.9)$$

hvor

τ = transmissionskoefficient

α = absorberens absorptionskoefficient

ρ_d = dæklagets reflektionskoefficient for reflekteret stråling fra absorberen

Transmissionskoefficienten τ beregnes som produktet af transmissionskoefficienten τ_r kun med hensyn til refleksion ved overfladerne og transmissionskoefficienten τ_a kun med hensyn til absorption i dæklaget, idet:

$$\tau_r = \frac{1 - \rho}{1 + (2N-1)\rho} \quad (11.10)$$

$$\tau_a = e^{-KL} \quad (11.11)$$

og dermed

$$\tau = \tau_r \cdot \tau_a \quad (11.12)$$

hvor

ρ = reflektionskoefficienten for dæklagets overflade

N = antal dæklag

K = dæklagets ekstinktionskoefficient

L = strålingens vejlængde gennem dæklaget

Ligning (11.10) gælder kun eksakt for ét dæklag. For flere dæklag skal τ_r beregnes for de to polarisationsretninger, der indgår i Fresnels formel (11.13), og midelværdien heraf benyttes i (11.12). For indfaldsvinkler mindre end ca. 45 grader kan man dog uden væsentlige fejl benytte middelreflektionskoefficienten efter ligning (11.13) i ligning (11.10).

Refleksionskoefficienten ρ afhænger af strålingens indfaldsvinkel i og beregnes med Fresnels formel som middelværdien af de to polarisationsretningers refleksioner:

$$\rho = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(i-b)}{\sin^2(i+b)} + \frac{\operatorname{tg}^2(i-b)}{\operatorname{tg}^2(i+b)} \right) \quad (11.13)$$

idet brydningsvinklen b beregnes af:

$$b = \arcsin \left(\frac{\sin(i)}{n} \right) \quad (11.14)$$

hvor n er brydningsindekset for dæklaget.

For indfaldsvinklen lig med nul, vinkelret strålingsindfald, findes refleksionskoefficienten

$$\rho = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (11.15)$$

Endelig kan strålingens vejrlængde gennem dæklaget findes som

$$L = \frac{E}{\cos(b)} \quad (11.16)$$

hvor E er dæklagets tykkelse.

Ved passage af dæklaget absorberes en mindre del af strålingen. Dette medfører, at dæklagets temperatur øges. Ved beregning af absorberens varmetab, afsnit 11.3, tages der ikke hensyn hertil, hvorfor den beregnede varmetabskoefficient bliver lidt for stor. For at kompensere herfor forøges den absorberede energimængde med en vis del af den i dæklaget absorberede stråling. Denne fordeles i forhold til varmetabskoefficienterne for henholdsvis absorberen og de enkelte dæklag. Herved findes det såkaldte effektive transmissionsabsorptionsprodukt $(\tau\alpha)_e$:

$$(\tau\alpha)_e = (\tau\alpha) + (1-\tau_a) \cdot \sum_{i=1}^N a_i \tau^{i-1} \quad (11.17)$$

gældende for N identiske dæklag, hvor $(\tau\alpha)$ beregnes for N dæklag af formel (11.9), τ_a og τ beregnes for ét dæklag af ligningerne (11.11) og (11.12), mens a_i for de forskellige dæklag skal beregnes i afhængighed af vejrforholdene.

For henholdsvis ét og to ens dæklag af glas findes $(\tau\alpha)_e$ af ligning (11.17) således til:

$$1 \text{ glas: } (\tau\alpha)_e = (\tau\alpha) + (1 - \tau_a) \cdot a_1 \quad (11.18)$$

$$2 \text{ glas: } (\tau\alpha)_e = (\tau\alpha) + (1 - \tau_a) \cdot a_1 + (1 - \tau_a) \cdot a_2 \cdot \tau \quad (11.19)$$

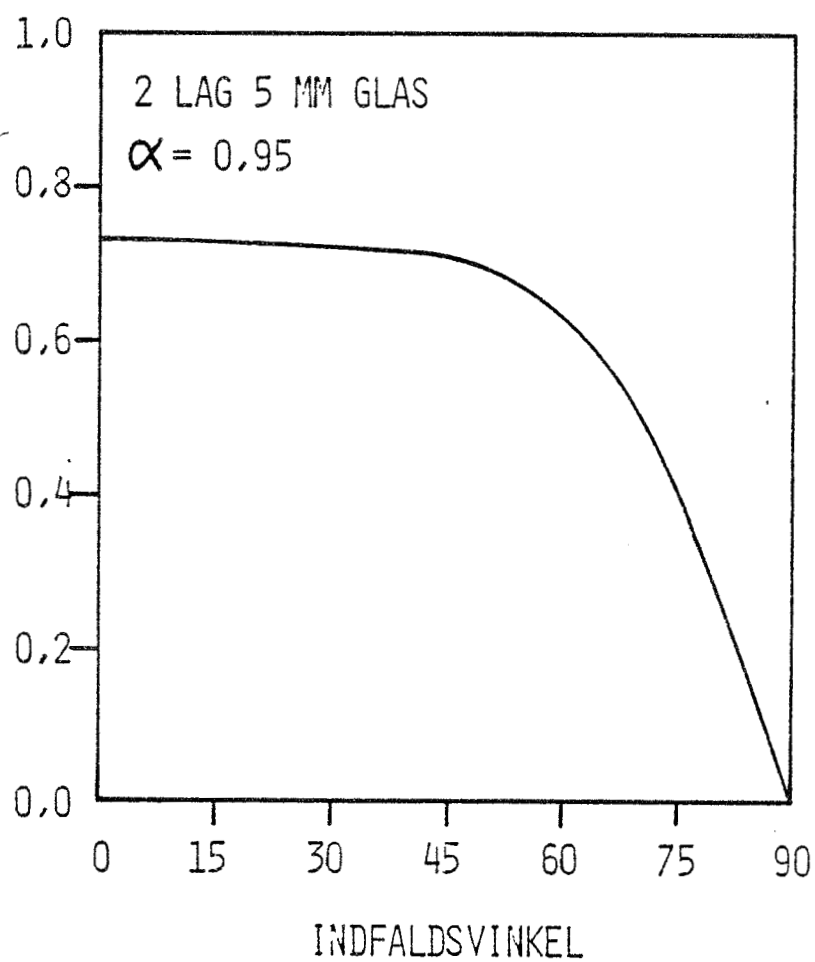
Værdierne for a_i afhænger af absorberens og dæklagenes varmetabskoefficienter. Disse varierer i afhængighed af vejrpåvirkninger og absorbertemperaturer. Selvom der er betydelige variationer i varmetabskoefficienterne og dermed i a_i , har det ikke den store indflydelse på $(\tau\alpha)_e$, da den i dæklaget absorberede stråling er beskeden. Man kan derfor tillade sig at regne a_i som konstante og bestemme dem ved typiske vejrforhold. I tabel 11.1 er således anført repræsentative værdier for a_i .

Tabel 11.1 Konstanter til brug i ligning (11.17), (11.18) og (11.19), bestemt ved en vindhastighed på 5 m/s, en absorbertemperatur på 100 °C og med omgivelsernes temperatur lig 10 °C. Ref. [28].				
Antal dæklag	a_i	Absorberens emissionskoefficient		
		0,95	0,50	0,10
1	a_1	0,27	0,21	0,13
2	a_1	0,15	0,12	0,09
	a_2	0,62	0,53	0,40
3	a_1	0,14	0,08	0,06
	a_2	0,45	0,40	0,31
	a_3	0,75	0,67	0,53

Det effektive transmissionsabsorptionsprodukt afhænger af strålingens indfaldsvinkel. På figur 11.3 er vist et eksempel herpå. Det er her antaget, at absorptionskoefficienten er uafhængig af indfaldsvinklen.

BEREGNET $(\beta\alpha)_e$ FOR 2 GLAS SOM FUNKTION AF
INDFALDSVINKLEN, REF. [30]

EFFEKTIV TRANSMISSION · ABSORPTION



Figur 11.3

En plan solfanger er normalt udsat for både direkte og diffus stråling. Den direkte strålings indfaldsvinkel kendes eller kan beregnes, hvorefter $(\tau\alpha)_{e,D}$ kan bestemmes. Den diffuse stråling er derimod ikke retningsbestemt. Under forudsætning af at fordelingen af den diffuse stråling solfangeren modtager er kendt, kan den absorberede, diffuse stråling beregnes ved at integrere produktet af $(\tau\alpha)_e$ og indstrålingen for alle indfaldsvinkler. Som tidligere anført kendes den diffuse strålings fordeling sjældent, og derfor benyttes en skønnet $(\tau\alpha)_e$ for den diffuse stråling. Under antagelse af en isotropisk fordeling findes en middelindfaldsvinkel til ca. 60 grader, og for denne vinkel kan det effektive transmissionsabsorptionsprodukt $(\tau\alpha)_{e,d}$ for diffus stråling beregnes.

Idet det antages, at dæklagets transparente areal er lig med absorberarealet, og der ses bort fra alle randfænomener, findes den absorberede solenergi pr. arealenhed til:

$$S = (\tau\alpha)_{e,D} \cdot I_D + (\tau\alpha)_{e,d} \cdot I_d \quad (11.20)$$

11.3 Varmetabskoefficienter

Når absorberen på grund af absorberet stråling bliver varmere end omgivelserne, vil der finde et varmetab sted. Varmetabet gennem dæklaget sker dels ved ledning og konvektion og dels ved stråling.

For en solfanger med 2 dæklag af glas kan varmetabskoefficienten U_t for varmetabet gennem dæklaget beregnes af:

$$U_t = \left(\frac{1}{k_{k,a1} + k_{s,a1}} + \frac{1}{k_{k,12} + k_{s,12}} + \frac{1}{k_v + k_{s,h}} \right)^{-1} \quad (11.21)$$

hvor første led er isolansen af hulrummet mellem absorber og 1. dæklag, andet led isolansen af hulrummet mellem dæklagene og tredje led overgangsisolansen til omgivelserne. Formlen kan let ændres til at omfatte solfangere med ét

dæklag eller flere end 2 dæklag ved at fjerne eller ind-sætte isolanser.

Isolanserne beregnes som den reciprokke værdi af summen af varmetransportkoefficienterne ved henholdsvis ledning og konvektion k_k og stråling k_s .

Varmetransportkoefficienten k_k ved ledning og konvektion mellem to parallelle planer med temperaturerne T_1 og T_2 og hældningen t kan ifølge [31] beregnes som

$$k_k = 6,57 \cdot (0,24 - t \cdot 0,001) \cdot (T_1 - T_2)^{0,25} \quad (11.22)$$

idet hældningen måles i grader og er mellem 0 og 90. Desuden skal varmetransporten ske opad fra den varmeste flade med temperaturen T_1 .

Varmetransportkoefficienten k_v fra det yderste dæklag til den omgivende luft kan som funktion af lufthastigheden v langs dæklaget ifølge [28] sættes til:

$$k_v = 5,7 + 3,8 \cdot v \quad (11.23)$$

hvor v måles i m/s.

I ligning (11.22) beregnes varmetransportkoefficienten alene ud fra hældningen og temperaturdifferensen. Der regnes alene med en lineær afhængighed af hældningen. Derved fremtræder formlen klart som en forenklet formel, idet der ikke indgår temperaturafhængighed for luftens stofværdier. På trods heraf opnås som anført i [31] en meget god overensstemmelse med andre formler for varme-transport i luftlag, hvor der tages hensyn hertil.

Ligeledes tages der i ligning (11.22) heller ikke hensyn til afstanden mellem planerne. Generelt gælder, at varmeoverføringen falder med stigende afstand, så længe planafstanden ikke er atypisk, hvilket vil sige større end 5-6 cm for almindelige solfangere. Faldet i varmeoverføringen er ret beskedent for afstande over 1-2 cm, som bl.a. anført i [32]. Da ligning (11.22) er angivet for en afstand på ca. 2,5 cm (1"), kan den benyttes til beregninger, hvor afstanden er større end ca. 2 cm. For

mindre planafstande må der henvises til mere detaljerede formler.

Varmetransportkoefficienten k_s ved strålingen mellem to parallelle, uendelig store planer med de absolutte temperaturer T_1 og T_2 beregnes af:

$$k_s = \frac{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1} \quad (11.24)$$

hvor

σ = Stefan-Boltzmann's konstant ($= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$)

og

ϵ_1 og ϵ_2 er planernes emissionskoefficienter.

Formlen gælder under forudsætning af, at den modtagne stråling absorberes og ikke helt eller delvis transmitteres. Dette kan for normale plane solfangere med glas som dæklag altid regnes at være tilfældet.

For det yderste dæklag med en absolut temperatur på T_2 sker varmetabet ved stråling til himlen og jorden. Antages disse at være absolut sorte, hvorved hele den udsendte stråling absorberes, og med en ensartet, absolut temperatur på T_h fås varmetransportkoefficienten $k_{s,h}$ angivet som en kvotient i forhold til den omgivende lufts temperatur i stedet for T_h :

$$k_{s,h} = \epsilon_2 \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_h^4) / (T_2 - T_a) \quad (11.25)$$

Bestemmelse af "himmelstrålingstemperaturen" T_h kan kun nogenlunde præcist finde sted ved måling. Da dette ikke er særlig let, er det ofte forsøgt at sætte den i relation til udelufttemperaturen. I [33] er det anført, at man på steder med ca. samme breddegrad som i Danmark i middel finder en temperatur, der er 5-8 grader lavere end udelufttemperaturen. Der er dog betydelig variation heri, og specielt i klart vejr findes betydelig lavere himmelstrålingstemperatur, ofte 20-30 grader under udelufttempera-

turen. I dette arbejde anvendes det i [30] anførte beregningsudtryk, hvor T_h også afhænger af solfangerens hældning:

$$T_h = 1,15 (T_a - 273) - 9 \cos(t) + 268 \quad (11.26)$$

Såfremt det inderste af 2 dæklag ikke består af glas men f.eks. af en plastfolie, der tillader en vis del τ_1 af den langbølgede udstråling fra absorbereren at passere, skal dæklagets varmetabskoefficient ikke beregnes efter ligning (11.21) men derimod som:

$$U_t = \left(\frac{1}{\tau_1 \cdot k_{s,a2} + \left(\frac{1}{k_{k,a1} + k_{s,a1}} + \frac{1}{k_{k,12} + k_{s,12}} \right)^{-1}} + \frac{1}{k_v + k_{s,h}} \right)^{-1} \quad (11.27)$$

På figur 11.4 er den på denne måde beregnede varmetabskoefficient illustreret for forskellige typer dæklag som funktion af absorbertemperaturen.

Når varmetabskoefficienten U_t gennem dæklaget er beregnet, findes den totale varmetabskoefficient U_L som summen af U_t og U_b , hvor U_b er varmetabskoefficienten for bagside- og kanttab. Når absorbereren er isoleret på bagsiden med et materiale med varmeledningsevnen λ og tykkelsen e , findes U_b i dette arbejde som:

$$U_b = 1,25 \cdot \lambda / e \quad (11.28)$$

Ved beregningen af U_b er der set bort fra overgangsisolanser. Til gengæld er U_b forhøjet med 25% for at tage hensyn til varmetabet langs kanterne. Denne forøgelse er et skøn baseret på en vurdering af forskellige konkrete udførelser af danske solfangere. For en given solfanger vil det være muligt at give en mere præcis værdi for kanttabet.

Samlet findes således ud fra de anførte formler en total varmetabskoefficient for absorbereren som

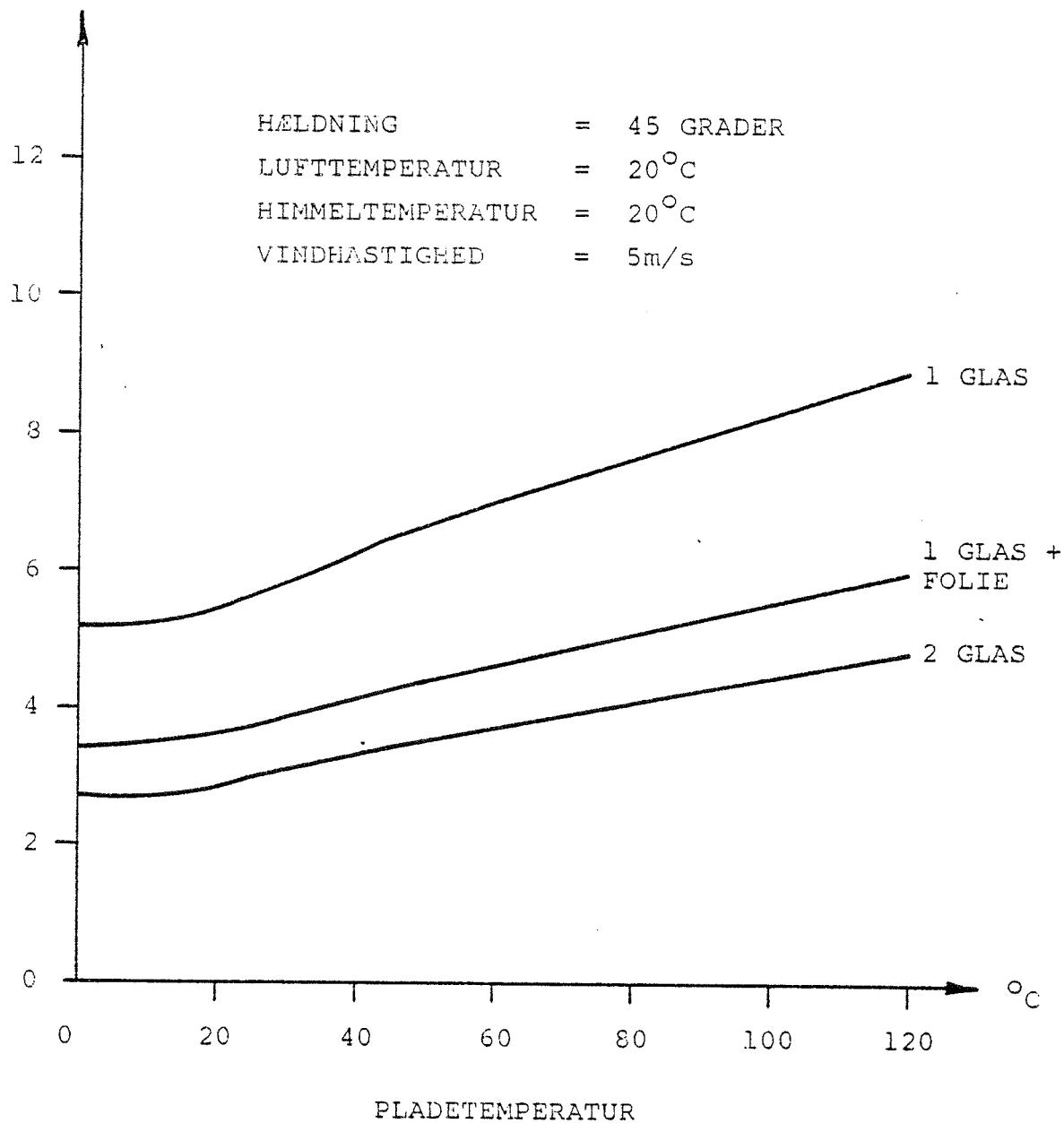
$$U_L = U_t + U_b \quad (11.29)$$

EKSEMPEL PÅ VARIATIONEN AF VARMETABSKOEFFICIENT
SOM FUNKTION AF ABSORBERTEMPERATUR OG DÆKLAGETS
OPBYGNING

DÆKLAGETS

VARMETABSKOEFFICIENT

$\text{W/m}^2/^{\circ}\text{C}$



Figur 11.4

Ved forskellige metoder kan absorberoverfladens emissionskoefficient gøres mindre end den man normalt finder for de fleste "sorte" overflader. En sådan overflade kaldes selektiv, og af ligning (11.24) ses, at lave emissionskoefficienter giver små varmetransportkoefficienter, hvorved U_L reduceres.

Sammenfattende findes således, at en solfangers varmetab kan reduceres enten ved at øge antallet af dæklag, hvorved transmissionen nedsættes, ved at øge bagside- og kantisoleringen eller ved at gøre overfladerne enten på absorberen eller på dæklaget selektive, således at varmetabet p.g.a. stråling nedsættes.

Det fremgår af en hel række af de anførte ligninger, at varmetabskoefficienterne først kan beregnes, når fladernes temperaturer er kendte. Disse kan almindeligvis først findes, når varmetabskoefficienterne er bestemt. Det er således nødvendigt at foretage en iterationsproces for rimelig præcist at bestemme varmetabet. Princippet i iterationen er, at først gættes temperaturerne, hvorefter varmetabskoefficienterne beregnes med disse. De fundne kvotienter benyttes til bestemmelse af nye temperaturer osv., indtil afvigelserne mellem to på hinanden følgende temperaturbestemmelser er tilstrækkelig små. I dette arbejde benyttes en absolut temperaturdifferens på 1°C , hvorved iterationsprocessen kan stoppe efter 2 til 3 gennemregninger for en solfanger med 2 dæklag under forudsætning af rimelige startgæt.

Specielt kan det være af interesse at kunne bestemme en absorbers middeltemperatur ud fra væskens indløbstemperatur. Af ligningerne (11.1) og (11.4) findes ved indsætning

$$T_p = F_R T_i + (1 - F_R) (S/U_L + T_a) \quad (11.30)$$

Ved at opstille energibalanceligninger for de enkelte dæklag kan deres temperaturer beregnes, når varmetabs-

koefficienterne er kendte. Iterationsprocessen til beregning af en given solfangers udbytte under kendte stationære vejrforhold kan herefter gennemføres som skitseret på figur 11.5.

11.4 Solfangereffektiviteter

Beregning af en given solfangers udbytte er noget kompliceret. Det er derfor forsøgt at finde en simpel og præcis angivelse af solfangeres ydeevne. Et forslag hertil er en angivelse af effektivitetskurver eller -ligninger.

En solfangers effektivitet er defineret som forholdet mellem udbytte og indstråling.

I et driftstilfælde med et solindfald på I pr. arealenhed bestående af direkte og diffus stråling kan den absorberede energi af ligning (11.20) beregnes som:

$$\begin{aligned} S &= (\tau\alpha)_{e,D} \cdot I_D + (\tau\alpha)_{e,d} \cdot I_d \\ &= (\tau\alpha)_e \cdot (I_D + I_d) = (\tau\alpha)_e \cdot I \end{aligned} \quad (11.31)$$

hvor $(\tau\alpha)_e$ skal opfattes som en vægtet værdi af $(\tau\alpha)_{e,D}$ og $(\tau\alpha)_{e,d}$. I driftstilfælde hovedsagelig bestående af direkte stråling vil $(\tau\alpha)_e$ være tæt på $(\tau\alpha)_{e,D}$, der for vinkelret strålingsindfald ofte ses angivet som $(\tau\alpha)_{e,N}$. Indsættes det angivne udtryk for S i ligningerne (11.1), (11.3) og (11.4) fås ved division med $(A \cdot I)$ tre effektivitetsligninger:

$$\eta = F_R \cdot (\tau\alpha)_e - U_L \cdot (T_i - T_a)/I \quad (11.32)$$

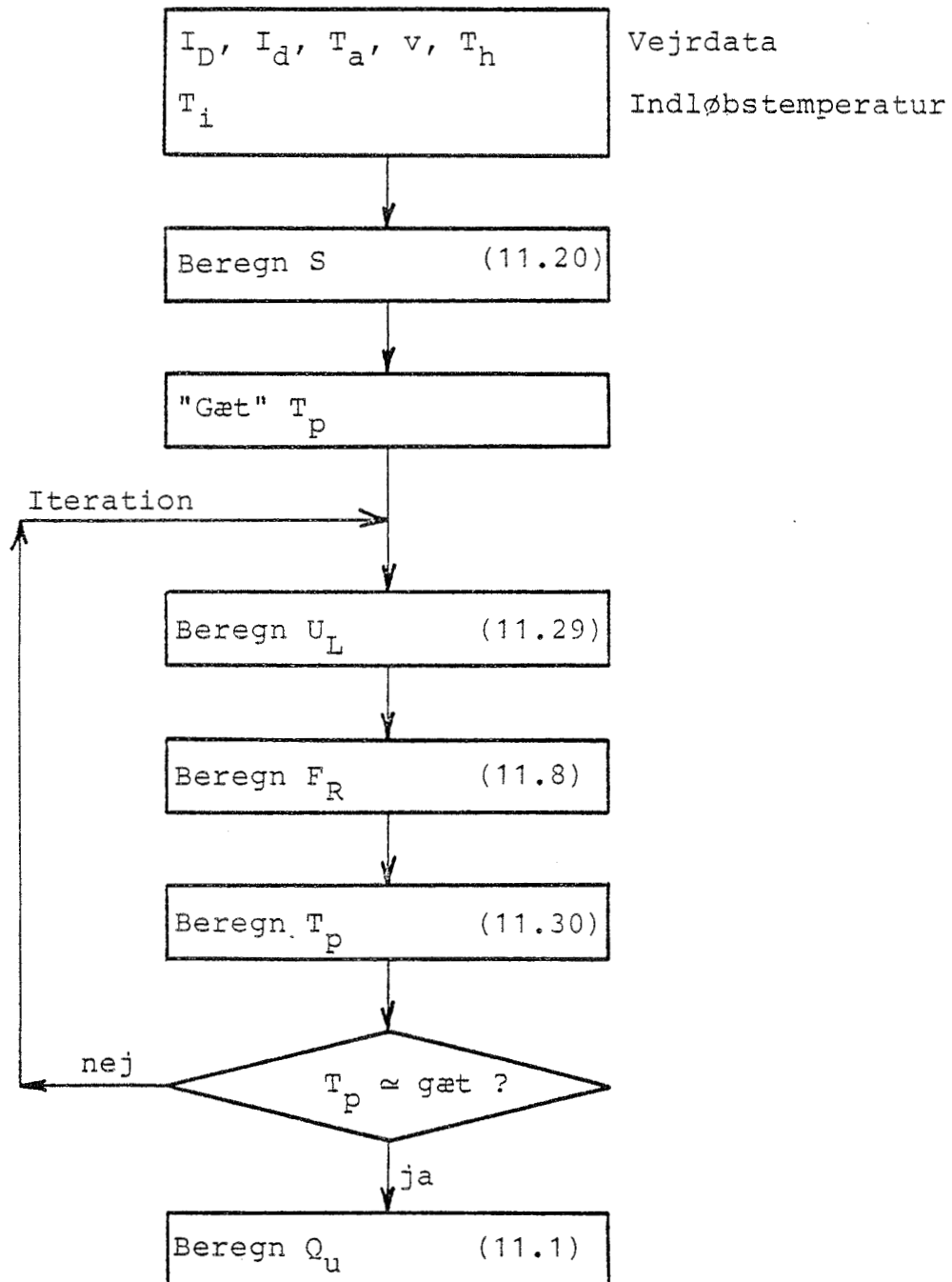
$$\eta = F'(\tau\alpha)_e - U_L \cdot (T_f - T_a)/I \quad (11.33)$$

$$\eta = (\tau\alpha)_e - U_L \cdot (T_p - T_a)/I \quad (11.34)$$

Under forudsætning af konstante værdier for F_R , F' og U_L ses effektivitetsligningerne at kunne optegnes som rette linier med hældningen $-U_L$ i et koordinatsystem med temperaturdifferensen divideret med indstrålingen som abscisse-værdier.

Solfangerudbytte

Beregningsgang i et tidsstep
(ligningsnummer i parentes)



Figur 11.5

Desværre er hverken F_R , F' eller U_L konstante. Især U_L er afhængig af temperaturniveauet, som det bl.a. er vist på figur 11.4. Man vil derfor med stigende temperatur-differens få voksende værdier af U_L , hvorved effektivitetslinierne vil krumme mere og mere.

Internationalt og nationalt er der udfoldet store bestræbelser for at definere en prøvningsmetode til bestemmelse af effektivitetsligning (11.33). Problemet har i høj grad været at fastlægge nogle prøvningsbetingelser, der med rimelig sikkerhed kan opfyldes overalt i verden.

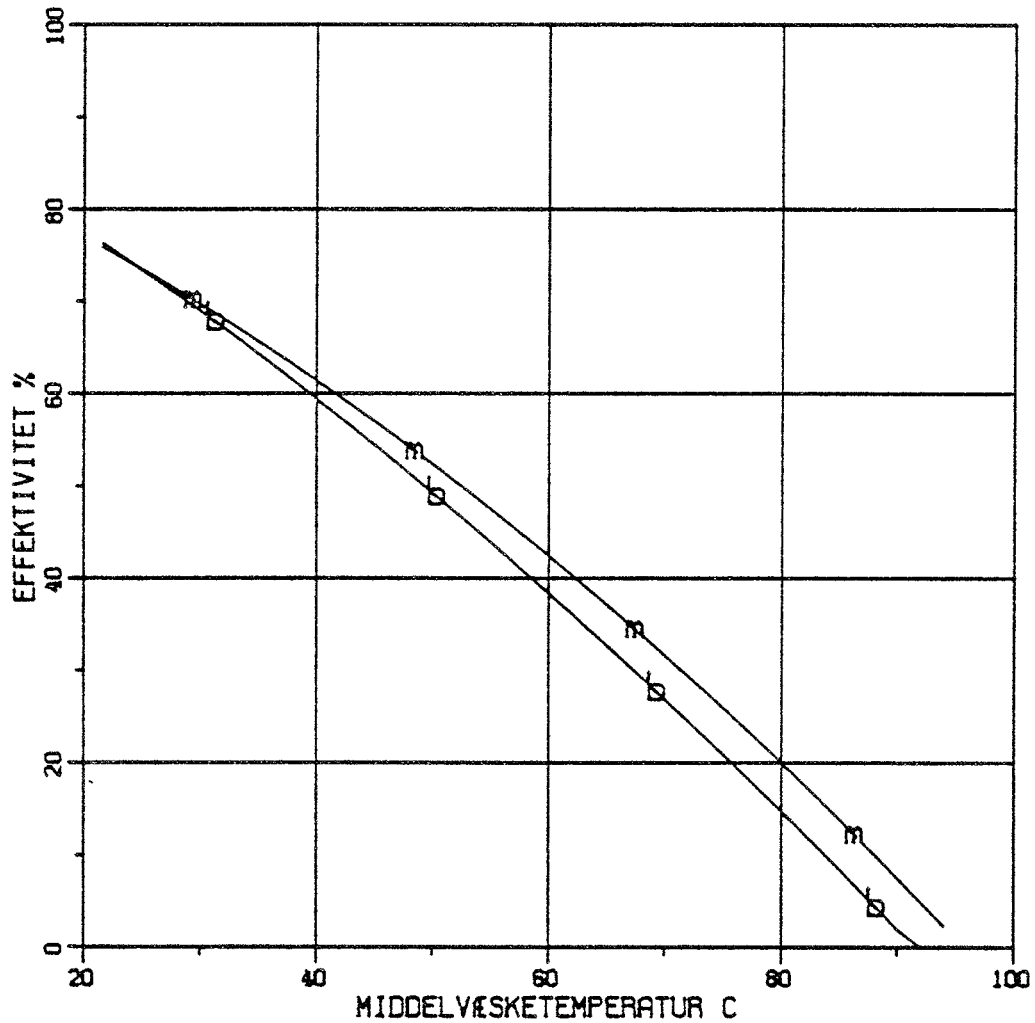
En sådan prøvningsmetode er beskrevet i [34]. Den består af en kombination af udendørs og indendørs afprøvning. I klart vejr bestemmes udendørs $F' \cdot (\tau\alpha)_e$, idet udbyttet måles under stationære forhold, hvor middelvasketemperaturen er lig med udelufttemperaturen. Indendørs bestemmes varmetabet som funktion af middelvasketemperaturen, og ved kombination af de to afprøvninger kan en effektivitetskurve angives.

Den beskrevne prøvningsmetode er benyttet til afprøvning af en lang række danske solfangere, og resultaterne er anført i [26] og [27]. En enkelt effektivitetskurve fra [27] er vist på figur 11.6 og her sammenlignet med en efter de anførte formler beregnet kurve.

Der ses at være god overensstemmelse mellem målt og beregnet værdi af $F'(\tau\alpha)_e$, mens varmetabet beregnes lidt større end det måles. Fejlen er dog ikke helt så stor som angivet på figuren, idet prøvningsmetoden som anført i [35] medfører en systematisk overvurdering af effektiviteten ved høje væsketemperaturer. Fejlen er dog for solfangere med høj absorber effektivitet F' af beskeden størrelse. For forskellige absorberudførelser er der i [36] nærmere angivet prøvningsmetodens fejlmåling af effektiviteterne.

MÅLT EFFEKTIVITETSKURVE FOR SOLFANGER ID-NR 11A
I [27] , KURVERNE OPTEGNET FOR EN INDSTRÅLING PÅ
800 W/M² OG MED OMGIVENDE LUFTTEMPERATUR PÅ 20 °C

BEREGNET OG MÅLT EFFEKTIVITET AF SOLFANGER
B=BEREGNET M=MÅLT



Figur 11.6

11.5 Solfangeres beregnede langtidsudbytte

Med de angivne formeludtryk er det muligt under stationære forhold at beregne udbyttet af forskellige solfangere, når vejrpåvirkningerne og indløbstemperaturerne kendes. Gøres dette med korte mellemrum gennem længere tid, hvor vejrparametrene ændres ved hver beregning, haves en såkaldt quasistationær simulering.

Med referenceårets vejrdata [24] og en konstant indløbstemperatur kan man for en given solfangerkonstruktion på denne måde beregne det årlige udbytte.

For en solfangerkonstruktion er der i [30] foretaget sammenligning af målte og beregnede ydelser på udvalgte dage, og der fandtes under hensyntagen til måleusikkerheden en rimelig god overensstemmelse. Med denne solfanger med henholdsvis 1 og 2 dæklag af glas er det årlige udbytte beregnet ved forskellige hældninger og konstante indløbstemperaturer. Resultaterne er angivet i tabel 11.2, idet der til sammenligning er anført de tilsvarende udbytter beregnet med en betydelig mere omfattende matematisk solfangermodel [37]. I denne er der f.eks. taget hensyn til solspektret og glassets varierende transmissionsevne som funktion af bølgelængden. Ligeledes er der taget hensyn til, at varmetabet p.g.a. ledning og konvektion i hulrummet mellem absorber og dæklag samt mellem dæklagene er afhængigt af temperaturen, hældningen og afstanden mellem fladerne.

Af tabellen ses, at der er god overensstemmelse mellem den forholdsvis enkle model og den mere komplicerede, idet forskellen i beregnet udbytte er under 6%.

Beregning af en solfangers udbytte under stationære forhold behøver nødvendigvis ikke at foregå med brug af iterationer. Der kan foretages regressionsanalyser af komplicerede beregninger, hvorved formeludtryk, der explicit angiver udbyttet, kan udledes.

Med modellen beskrevet i [37] er der gennemført en række udbytteberegninger, og en explicit udbyttefunktion er anført i [38].

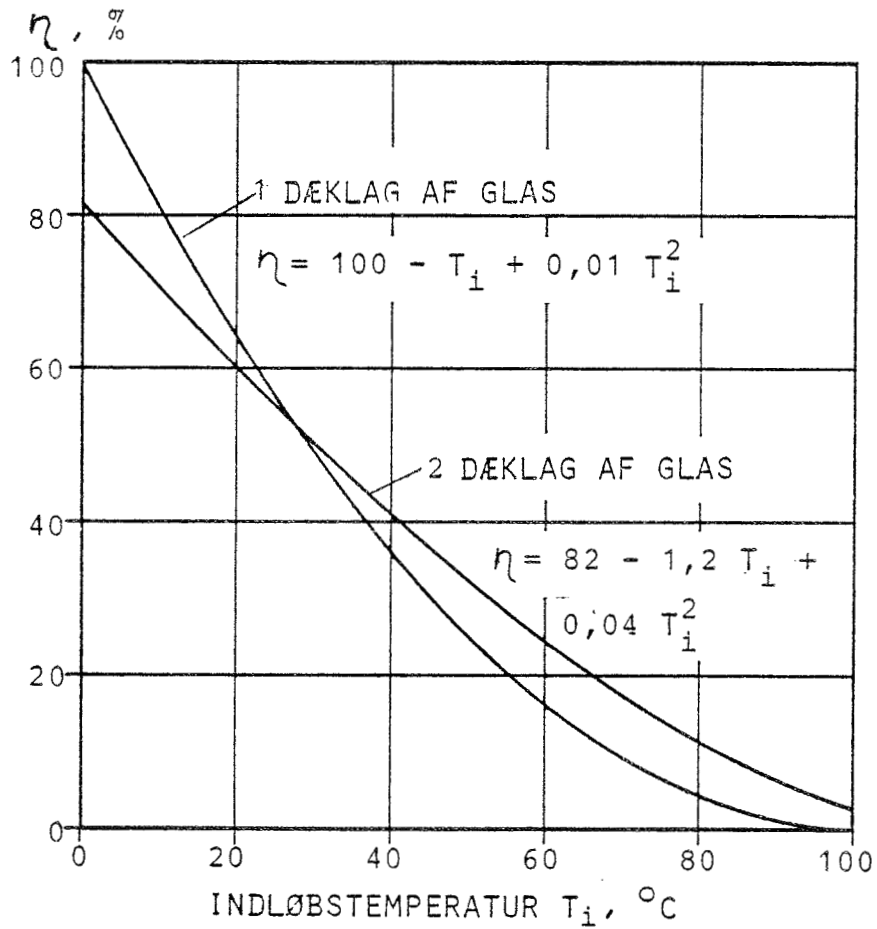
Tabel 11.2 Udbytte i kWh/m²/år for en given solfanger [30] med referenceårets vejrdata og to forskellige beregningsmetoder: nr. 1 ref. [37], nr. 2 afsnit 11.1 - 11.3.

Antal dæklag af glas	Solfangerhældning grader	Beregningsmetode	Konstant indløbstemperatur °C		
			10	50	90
1	45	1	943	293	19
		2	923	282	19
		2 i % af 1	98	96	100
	90	1	745	183	4
		2	722	177	4
		2 i % af 1	97	97	100
2	45	1	834	416	130
		2	811	407	133
		2 i % af 1	97	98	102
	90	1	650	282	69
		2	629	282	73
		2 i % af 1	97	100	106

Her er der samtidig angivet beregnet udbytte for forskellige solfangere som funktion af indløbstemperaturen med referenceårets klimadata.

Endnu enklere kan udbyttet af forskellige solfangere gennem længere perioder beregnes, når effektiviteten som funktion af indløbstemperaturen kendes. Et eksempel herpå er vist på figur 11.7. Her er "langtidseffektiviteten" for to solfangere angivet for sommerhalvåret, hvorved periodens udbytte kan beregnes som effektiviteten gange solindfaldet på vandret. For de fleste solvarmeanlæg er det vanskeligt at angive en repræsentativ indløbstemperatur. En undtagelse er dog solfangere i forbindelse med et sæsonvarmelager. Her svinger lagertemperaturen tilnærmelsesvis efter en sinuskurve igennem året, hvilket betyder, at lagrets middeltemperatur som anført i [39] og [40] bliver bestemmende for solfangerudbyttet.

SOLFANGERENS SOMMEREFFEKTIVITET η BEREGNET MED
GLOBALSTRÅLINGEN I PERIODEN APRIL - SEPTEMBER,
SYDVENDTE SOLFANGERE, HÆLDNING 15 - 45 GRADER,
REFERENCEÅRETS KLIMADATA. REF [39]



Figur 11.7

12. VARMEKAPACITET I SOLFANGERE

I det foregående kapitel er solfangerens udbytte beregnet under forudsætning af stationære forhold. Der kan således ses bort fra alle de indgående materialers varmekapacitet. Herved blev varmebalanceligningerne forholdsvis enkle.

Under normale driftsforhold vil en solfanger dog ikke være udsat for konstante påvirkninger gennem længere tid. Solindfaldet og omgivelsernes temperatur vil variere, ligesom indløbstemperaturen ikke er konstant over tiden.

12.1 Effektiv varmekapacitet

Da alle materialer i en solfanger har en vis varmekapacitet vil hensyntagen hertil give nogle komplicerede varmebalanceligninger. Det er dog muligt at forenkle problemet og derved gøre beregningerne lettere.

Ses der bort fra alle randfænomener og den ringe varmekapacitet i bagsideisoleringen, skal der kun tages hensyn til varmekapaciteten i absorber inklusive indhold og i dæklag.

Forenkles det yderligere ved at henføre dæklagenes varmekapacitet til absorberen, fås kun én varmekapacitet, $(mC)_e$, at tage hensyn til. Denne kaldes den effektive varmekapacitet, og som angivet i [28] bestemmes den pr. arealenhed som:

$$(mC)_e = (mC)_a + (mC)_v + \sum_{i=1}^N a_i (mC)_{d,i} \quad (12.1)$$

hvor

$(mC)_a$ er absorberens varmekapacitet

$(mC)_v$ er væskeindholdets varmekapacitet

$(mC)_{d,i}$ er det i'te dæklags varmekapacitet

a_i er en "vægtningskonstant" for de i'te dæklag
(tabel 11.1)

idet m er de pågældende materialers masser pr. arealenhed og C deres varmekapacitet.

Konstanten a_i er den samme som tidligere blev benyttet til beregning af det effektive transmissionsabsorptionsprodukt og kan for forskellige solfangere findes i tabel 11.1.

12.2 Varmekapacitet uden solfangerdrift

Når solfangeren ikke er i drift, er udbyttet lig med nul. Den generelle varmebalance, jævnfør ligning (11.4), kan da opstilles for absorberpladen med middeltemperaturen T_p og varmekapaciteten henregnet hertil:

$$(mC)_e \cdot \frac{dT_p}{d\tau} = S - U_L(T_p - T_a) \quad (12.2)$$

hvor τ er tiden.

Med antagelse af, at S , U_L og T_a ikke ændrer sig med tiden og T_p kan absorbertemperaturen bestemmes til tidspunktet τ ved løsning af ligning (12.2) som:

$$T_{p,\tau} = T_a + \frac{S}{U_L} - \left(T_a + \frac{S}{U_L} - T_{p,0} \right) \cdot e^{-\frac{U_L \tau}{(mC)_e}} \quad (12.3)$$

hvor $T_{p,0}$ er absorbertemperaturen for $\tau = 0$.

Ved brug af referenceårets klimadata til quasistationær simulering er det naturligt at anvende et tidsstep på 1 time, svarende til intervallet mellem 2 vejrobservationer. For typiske danske solfangere kan den effektive varmekapacitet ud fra angivelserne i [41] beregnes at være mellem 9 og 25 kJ/°C/m². Med en U_L -værdi på 8 W/m²/°C findes for et tidsstep på 1 time og en typisk varmekapacitet på 15 kJ/°C/m², at hensyntagen til varmekapaciteten giver en absorbertemperaturændring på ca. 85% af den værdi, der beregnes uden hensyntagen hertil.

Quasistationære simuleringer af solfangere uden hensyntagen til varmekapacitet vil således ikke helt give samme absorbertemperaturer, som man finder under hensyntagen hertil. Specielt findes, at med stadig voksende solindfald fås for høj absorbertemperatur. Herved beregnes f.eks. at en solfanger starter på at give udbytte tidligere end den burde.

Tilsvarende findes, at stadig aftagende solindfald medfører, at absorbertemperaturen beregnes for lav uden hensyntagen til varmekapaciteten, se figur 12.1. Over en periode med skiftende solindfald ophæver de to typer fejl i nogen grad hinanden, således at solfangerens beregnede udbytte uden varmekapacitet kun er en anelse større end med. Dette belyses nærmere i afsnit 16.4.

12.3 Varmekapacitet med solfangerdrift

Når solfangeren er i drift, er den gennemstrømmende væskes temperatur afgørende for absorbertemperaturen. Med en konstant indløbstemperatur vil der kun forekomme små ændringer af absorbertemperaturen, selvom solindfaldet varierer meget.

Ved at benytte samme forenklede beregningsmetode som tidligere kan man beregne den effektive varmekapacitet under drift,

$$(mC)_{ed} = (mC)_a + \sum_{i=1}^N a_i (mC)_{d,i} \quad (12.4)$$

og derved opstille den generelle varmebalanceligning under drift:

$$(mC)_{ed} \frac{dT_p}{d\tau} = S - q_u - U_L (T_p - T_a) \quad (12.5)$$

hvor q_u er solfangerudbyttet pr. arealenhed.

Under antagelse af at S , q_u , U_L og T_a er konstante i det betragtede tidsrum, er løsningen af varmebalanceligningen analogt til (12.3):

$$T_{p,\tau} = T_a + \frac{S - q_u}{U_L} - \left(T_a + \frac{S - q_u}{U_L} - T_{p,0} \right) \cdot e^{-\frac{U_L \cdot \tau}{(mC)_{ed}}} \quad (12.6)$$

Indsættes udtrykket for q_u (ligning (11.1)), fås

$$T_{p,\tau} = F_R \cdot T_i + (1 - F_R) \left(\frac{S}{U_L} + T_a \right) - \left(F_R \cdot T_i + (1 - F_R) \left(\frac{S}{U_L} + T_a \right) - T_{p,0} \right) \cdot e^{-\frac{U_L \tau}{(mC)_{ed}}} \quad (12.7)$$

Som det fremgår af ligningen for $T_{p,\tau}$ ændres absorbertemperaturen med tiden og dermed ændres også U_L . Varmetabskoefficienten er dog ikke særlig afhængig af absorbertemperaturen, jævnfør figur 11.4, men såfremt man vil tage hensyn hertil, kan det gøres ved at beregnes U_L for middelabsorbertemperaturen T_{pm} i tidssteppet bestemt ved ligningen:

$$T_{pm} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} T_{p,\tau} \cdot d\tau \quad (12.8)$$

Indsættes udtrykket for $T_{p,\tau}$ som funktion af indløbstemperaturen og tiden (ligning (12.7)), fås ved integrationen:

$$T_{pm} = F_R \cdot T_i + (1-F_R) \left(\frac{S}{U_L} + T_a \right) - \frac{(mC)_{ed}}{U_L \cdot \tau} \cdot \left(F_R \cdot T_i + (1-F_R) \left(\frac{S}{U_L} + T_a \right) - T_{p,0} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{U_L \cdot \tau}{(mC)_{ed}}} \right) \quad (12.9)$$

Bestemmelsen af T_{pm} nødvendiggør en iteration, idet U_L først kan findes når absorbertemperaturen er kendt, jævnfør afsnit 11.3. Under drift med konstant indløbstemperatur vil absorbertemperaturen som nævnt kun ændre sig lidt, og da varmetabskoefficienten kun er en svag funktion heraf, vil det til de fleste beregningsformål være tilladeligt at benytte absorbertemperaturen ved tidssteppets begyndelse, $T_{p,0}$.

Udbyttet fra solfangeren i et tidsstep kan herefter ifølge ligning (12.5) bestemmes som:

$$q_u = S - (mC)_{ed} \cdot \frac{T_{p,\tau} - T_{p,0}}{\tau} - U_L (T_{pm} - T_a) \quad (12.10)$$

eller ialt ud fra indløbstemperaturen:

$$Q_u = AF_R (S_c - U_L (T_i - T_a)) \quad (12.11)$$

hvor

$$S_c = S - (mC)_{ed} \cdot \frac{T_{p,\tau} - T_{p,0}}{\tau} \quad (12.12)$$

og $T_{p,\tau}$ bestemmes med ligning (12.6) eller (12.7).

Ved beregninger, hvor der benyttes tidsstep, der er væsentlig større end solfangerens tidskonstant $(mC)_{ed}/U_L$ vil det være tilladeligt at beregne absorbertemperaturændringen i tidsspringet uden hensyntagen til varmekapaciteten, hvorved der efter ligning (11.30) findes:

$$T_{p,\tau} - T_{p,0} = (1-F_R) \cdot \Delta S / U_L \quad (12.13)$$

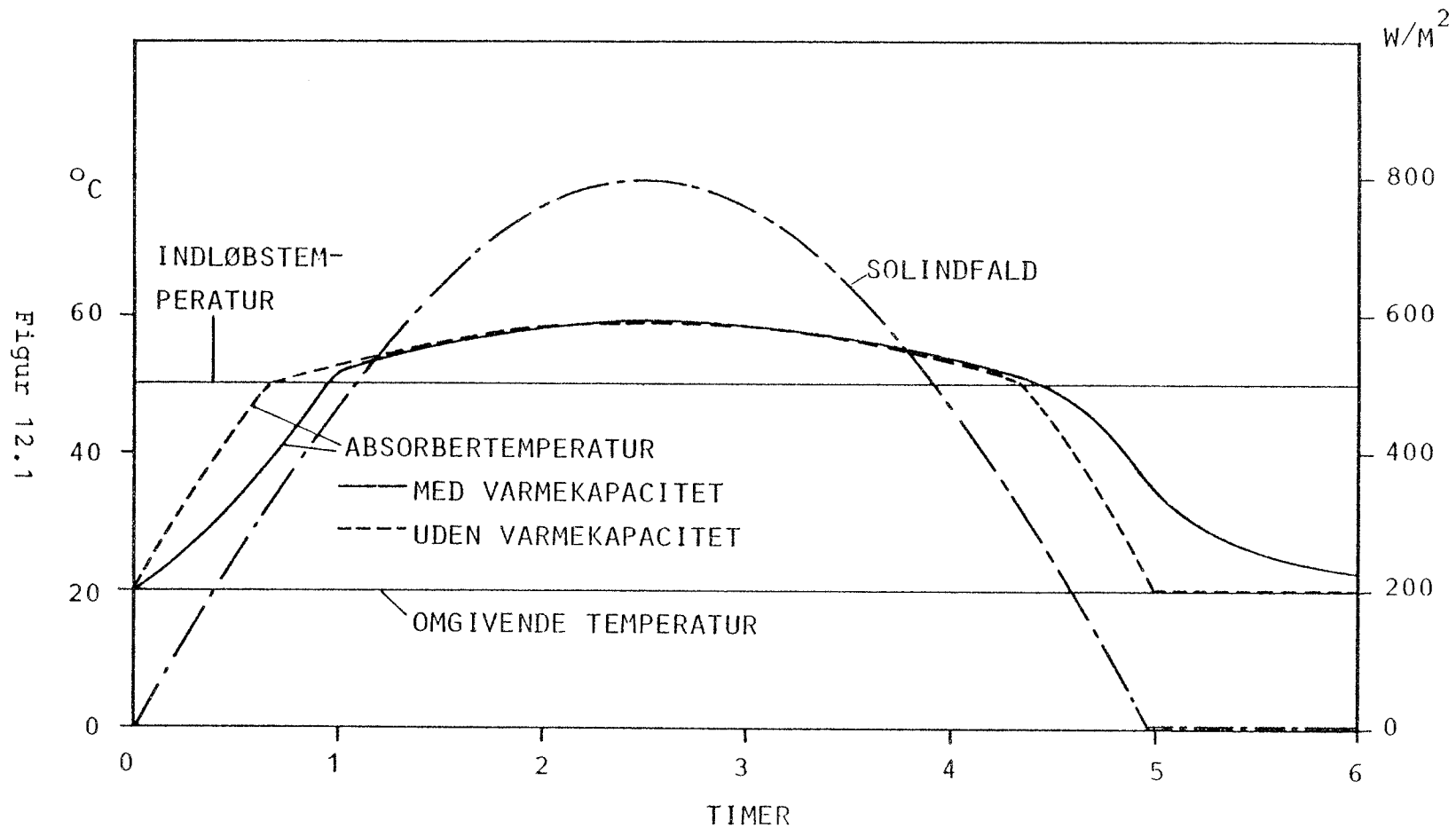
hvor ΔS er ændringen i den absorberede energimængde i forhold til det umiddelbart foregående tidsspring. Udbyttet under hensyntagen til varmekapacitet findes derefter som anført i ligning (12.11).

12.4 Beregningseksempel med varmekapacitet

På figur 12.1 er der for den tidligere angivne solfanger, figur 11.6, vist de beregnede absorbertemperaturer henholdsvis uden og med hensyntagen til varmekapaciteten, når solindfaldet har det på figuren viste forløb. Solfangerens varmekapacitet er beregnet ud fra oplysningerne anført i [41]. Den effektive absorbervarmekapacitet er fundet til $10,6 \text{ kJ}/^\circ\text{C}/\text{m}^2$ og væskeindholdets varmekapacitet til $2,6 \text{ kJ}/^\circ\text{C}/\text{m}^2$ under forudsætning af at der benyttes vand som varmetransporterende medium.

Med omgivelsernes temperatur konstant lig 20°C og en konstant indløbstemperatur på 50°C er beregningerne gennemført med tidsstep på 600 sek (10 min). Af figuren fremgår det, at beregnet uden varmekapacitet starter solfangeren ca. 20 min. før end med varmekapacitet. I

1 LAGS SOLFANGER BEREGNET MED OG UDEN VARMEKAPACITET
 EFFEKTIV ABSORBERVARMEKAPACITET = $10,6 \text{ kJ/}^{\circ}\text{C/M}^2$
 VÆSKENS VARMEKAPACITET = $2,6 \text{ kJ/}^{\circ}\text{C/M}^2$



driftstiden er absorbertemperaturen og dermed også udbyttet større uden varmekapacitet end med, sålænge solindfaldet er voksende, mens det omvendte er tilfældet med aftagende solindfald.

Over hele driftsperioden findes, at hensyntagen til varmekapaciteten i dette tilfælde reducerer udbyttet med ca. 3%.

13. SOLFANGERKREDSSEN

Solfangeren er med rør forbundet til varmelageret. Varmen fra solfangeren overføres således til varmelageret ved at den varmetransporterende væske cirkulerer gennem solfanger og varmelager. Almindeligvis er der tale om et lukket kredsløb, således at varmeoverførslen i lageret sker i en varmeveksler. Herved skal kun selve solfangerkredsen frostsikres. Man kan dog undgå varmeveksleren enten ved også at frostsikre hele varmelageret (der derfor ikke kan være brugsvand) eller ved at benytte et fylde/tømme-system, hvorved solfangeren tømmes for væske, når den er ude af drift.

I dette arbejde behandles kun en solfangerkreds som skitseret på figur 10.1, dvs. en lukket kreds, hvor varmen overføres til det varmeakkumulerende medium via en varmeveksler inde i varmelageret.

13.1 Varmetab i solfangerkredsen

Når solfangeren er i drift, vil temperaturen i solfangerkredsen normalt være højere end omgivelsernes temperatur. Dette betyder, at der forekommer et varmetab. Den varmetransporterende væske har fra lageret og op til solfangeren et temperaturfald, ligesom temperaturen ved tilgangen til lageret er lavere end afgangstemperaturen fra solfangeren.

Varmetabskoefficienten k_R for varmetabet gennem 1 m af et jernrør isoleret med et lag isoleringsmateriale beregnes efter formlen:

$$k_R = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_i \cdot d_i} + \frac{1}{2\lambda_j} \ln \frac{d_u}{d_i} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{D_u}{D_i} + \frac{1}{\alpha_u \cdot D_u}} \quad (13.1)$$

hvor

α_i = varmeoverføringskoefficient mellem væske og rør.

d_i og d_u = jernrørets indvendige og udvendige diameter

λ_j = jernets varmeledningsevne

D_i og D_u = isoleringens indvendige og udvendige diameter ($D_i = d_u$)

λ = isoleringens varmeledningsevne

α_u = varmeoverføringskoefficient mellem isolering og omgivelserne

På figur 13.1 er der for et rør med en nominel diameter på 20 mm ($d_u = 27$ mm) vist den beregnede varmetabskoefficient som funktion af isoleringstykkelsen. Det fremgår heraf, at isolering ud over en vis tykkelse kun medfører en beskednen reduktion i varmetabet.

Væskegennemstrømningen i solfangerkredsen vil for et givet solvarmeanlæg være AG, jævnfør ligning (11.7), hvorfor varmebalanceligningen for et væskeelement med længden dL og temperaturen T_R vil være:

$$AGC_p \cdot \frac{dT_R}{dL} + k_R(T_R - T_a) = 0 \quad (13.2)$$

hvor T_a er omgivelsernes temperatur.

Løses ovennævnte ligning og kendes temperaturen $T_{R,0}$ ved rørets begyndelse, fås temperaturen $T_{R,L}$ et sted L m derfra som:

$$T_{R,L} = T_a + (T_{R,0} - T_a) \cdot e^{-\frac{k_R \cdot L}{AGC_p}} \quad (13.3)$$

og dermed temperaturfaldet:

$$T_{R,0} - T_{R,L} = (T_{R,0} - T_a) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_R \cdot L}{AGC_p}}\right) \quad (13.4)$$

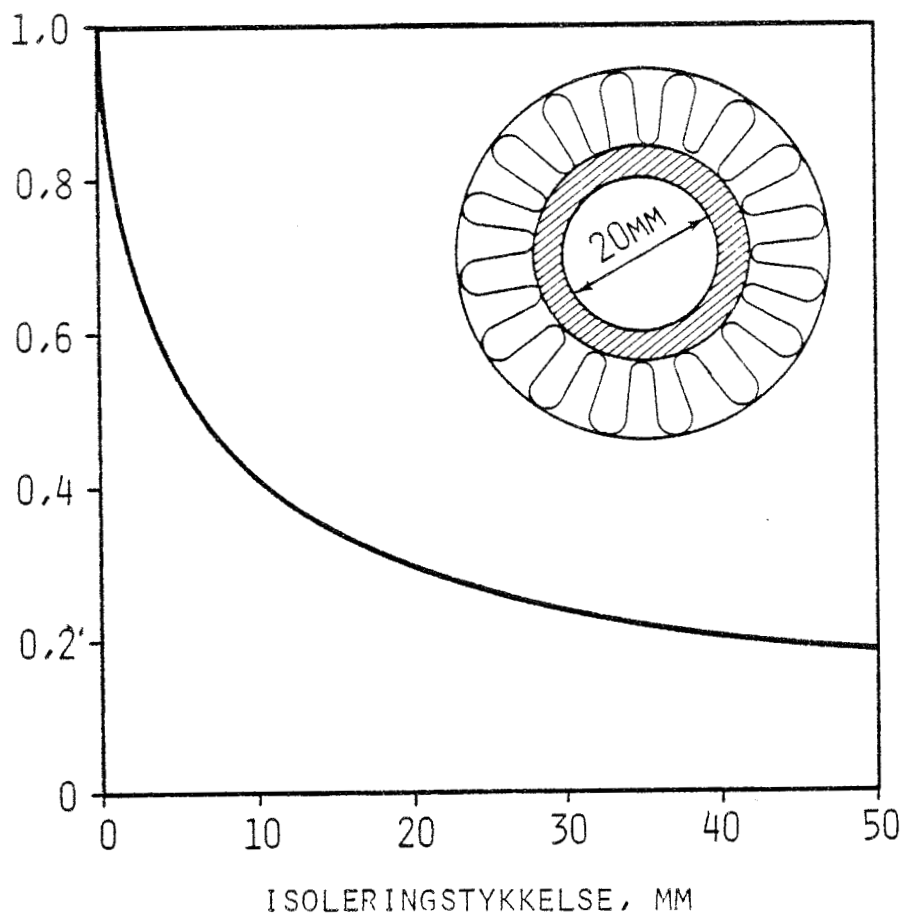
Almindeligvis vil temperaturfaldet være ret lille, hvorfor fejlen ved at gøre tilnærmelsen

$$T_{R,0} - T_{R,L} \approx k_R \cdot L (T_{R,0} - T_a) / AGC_p \quad (13.5)$$

er yderst beskednen. F.eks. findes for en rørlængde på 100 m med en k_R -værdi på $0,7 \text{ W/}^\circ\text{C/m}$ (M 20-rør isoleret med

VARMETAB FOR ET RØR MED NOMINEL DIAMETER
PÅ 20 MM ($d_u \approx 27$ MM) UNDER FORUDSÆTNING
AF $\alpha_i = 2000$ W/M²/°C, $\lambda_j = 50$ W/M/°C,
 $\lambda = 0,05$ W/M/°C, SAMT $\alpha_u = 10$ W/M²/°C

W/°C PR. M RØR



Figur 13.1

2 mm, jævnfør figur 13.3) og en kapacitetsstrøm på $700 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$ (10 m^2 solfanger med en vandgennemstrømning på $1 \text{ l/m}^2/\text{min}$) at fejlen på temperaturfaldet kun er ca. 5%.

13.2 Solfangerudbytte incl. varmetab fra solfangerkredsen

I de tidligere angivne formler for solfangerens udbytte indgik indløbstemperaturen T_i , dvs. temperaturen ved indløbet til selve solfangeren. Såfremt udbyttet ønskes beregnet ud fra temperaturerne ved ind- og udløb til varmeveksleren, dvs. under hensyntagen til varmetabet i solfangerkredsen, kan dette gøres ved at korrigere den opstillede solfangerligning som anført i [42].

Med de på figur 13.2 angivne betegnelser og skitserede temperaturforløb findes den solfangerydelse, der tilføres varmelageret som:

$$Q'_u = AGC_p(T_2 - T_1) \quad (13.6)$$

og

$$Q'_u = AF_R(S_c - U_L(T_1 - (T_1 - T_i) - T_a)) - Q_{RL} \quad (13.7)$$

hvor rørtabene Q_{RL} med tilnærmelse fås som:

$$Q_{RL} \approx k_R \cdot L_i(T_1 - T_a) + k_R \cdot L_u(T_2 - T_a) \quad (13.8)$$

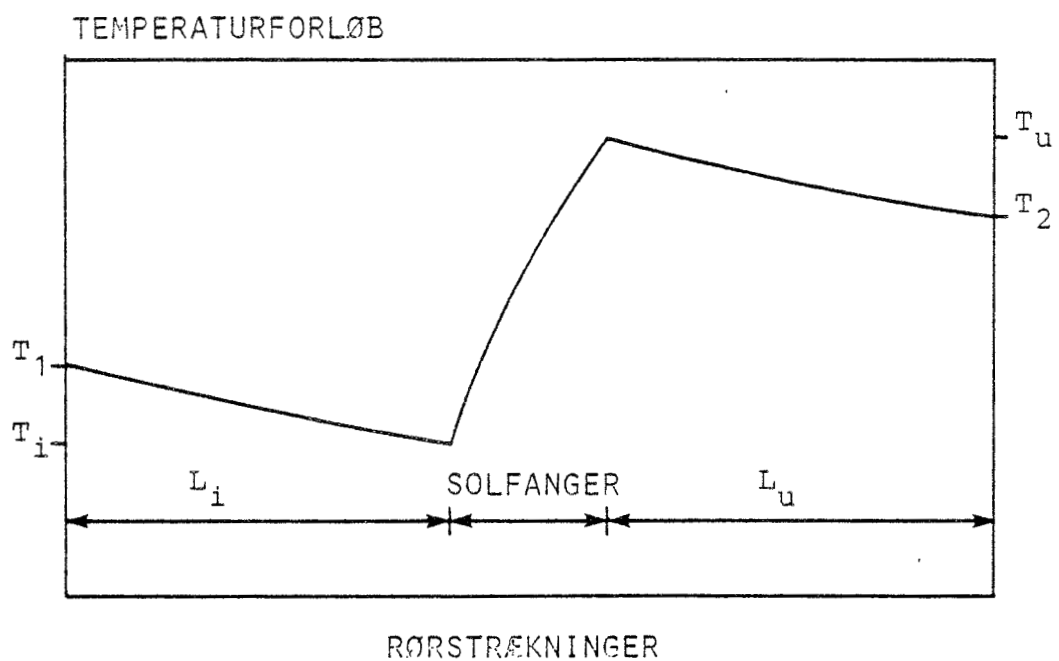
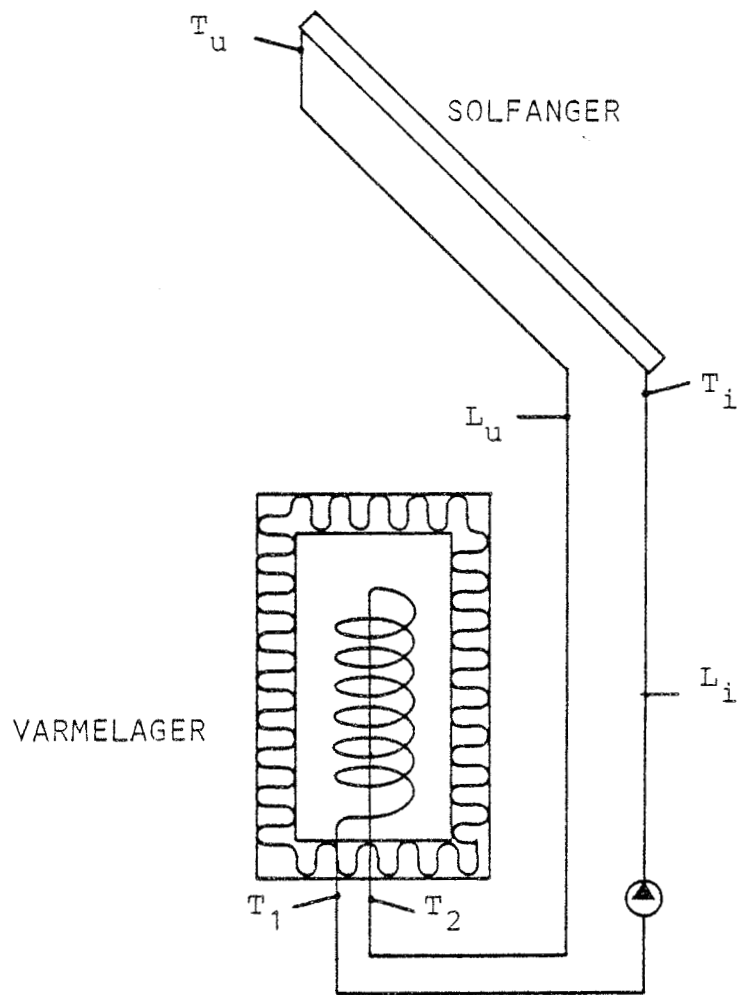
idet der forudsættes, at ind- og udløb til solfangeren er ens isoleret. Tilnærmelsen i ligning (13.8) består i, at der benyttes temperaturerne T_1 og T_2 i modsætning til at integrere tabet over rørlængderne. Som anført i afsnit 13.1 er temperaturfaldet over rørlængderne lille hvorfor fejlen ved brug af ligning (13.8) er ubetydelig.

Tilnærmes $T_1 - T_i$ efter formel (13.5)

$$T_1 - T_i = k_R \cdot L_i(T_1 - T_a) / AGC_p \quad (13.9)$$

kan T_i udtrykkes som funktion af T_1 , hvorved der efter indsættelse i solfangerligningen (12.11), fås et udbytte af selve solfangeren bestemt ved:

TEMPERATURER OG RØRLÆNGDER I SOLFANGERKREDSEN



Figur 13.2

$$Q_u = AF_R \left(S_c - U_L \left(1 - \frac{k_R \cdot L_i}{AGC_p} \right) (T_1 - T_a) \right) \quad (13.10)$$

Elimineres T_2 i (13.8) ved hjælp af (13.6) og indsættes i (13.7), fås efter nogen regning

$$Q'_u = AF_R (S' - U'_L (T_1 - T_a)) \quad (13.11)$$

hvor

$$S' = S_c \left(1 + \frac{k_R \cdot L_u}{AGC_p} \right)^{-1} \quad (13.12)$$

og

$$U'_L = U_L \cdot \left(1 - \frac{k_R \cdot L_i}{AGC_p} + \frac{k_R (L_i + L_u)}{AF_R U_L} \right) \cdot \left(1 + \frac{k_R \cdot L_u}{AGC_p} \right)^{-1} \quad (13.13)$$

I stedet for at benytte ligning (13.11) kan der gøres den tilnærmelse at beregne solfangerens udbytte ud fra T_1 uden korrektion for lavere indløbstemperatur (som i ligning (13.10)) og med rørenes varmetab bestemt ud fra T_1 findes der følgende:

$$Q'_u = AF_R (S_c - U_L (T_1 - T_a)) - k_R (L_i + L_u) (T_1 - T_a) \quad (13.14)$$

der kan omskrives til:

$$Q'_u = AF_R \left(S_c - U_L \left(1 + \frac{k_R (L_i + L_u)}{AF_R U_L} \right) (T_1 - T_a) \right) \quad (13.15)$$

Sammenlignes (13.15) med (13.13) ses, at de er næsten ens bortset fra ledene, hvori rørstrækningernes varmetab i forhold til kapacitetsstrømning indgår. Da disse forhold normalt er meget små ($\approx 0,01$), er forskellen mellem de to beregningsmetoder beskednen. F.eks. findes for et ekstremt solvarmeanlæg med 10 m rør pr. m^2 solfanger med $k_R = 0,7 \text{ W/}^\circ\text{C/m}$ og en lille kapacitetsstrømning på $\frac{1}{2} \text{ l vand/m}^2\text{/min}$, at U_L lig $7 \text{ W/m}^2\text{/}^\circ\text{C}$ og $T_1 - T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ afviger ligning (13.15) mindre end $\pm 5\%$ fra ligning (13.13), når den absorberede energimængde varierer mellem 400 og 600 W/m^2

Benyttelse af ligning (13.14) har desuden den fordel, at varmetabet fra solfangerkredsen ikke nødvendigvis beregningsmæssigt behøver at ske til den temperatur, der omgiver solfangeren. Det vil i praksis meget ofte forekomme, at rørene helt eller delvis er anbragt inde i bygningen, således at de gennem året vil være i omgivelser med næsten konstant temperatur.

13.3 Varmeveksleren

Varmeoverførslen fra solfangerkredsen til varmelageret sker ved hjælp af en varmeveksler. Er denne en almindelig modstrømsvarmeveksler, kan effektiviteten, ε , beregnes efter formlen [43]:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-\frac{k_v \cdot A_v}{(mC)_{\min}} \cdot \left(1 - \frac{(mC)_{\min}}{(mC)_{\max}}\right)}}{1 - \frac{(mC)_{\min}}{(mC)_{\max}} \cdot e^{-\frac{k_v \cdot A_v}{(mC)_{\min}} \cdot \left(1 - \frac{(mC)_{\min}}{(mC)_{\max}}\right)}} \quad (13.16)$$

hvor

k_v = varmevekslerens varmeoverføringskoefficient

A_v = varmevekslerens varmeoverføringsareal

$(mC)_{\min}$ = mindste kapacitetsstrøm

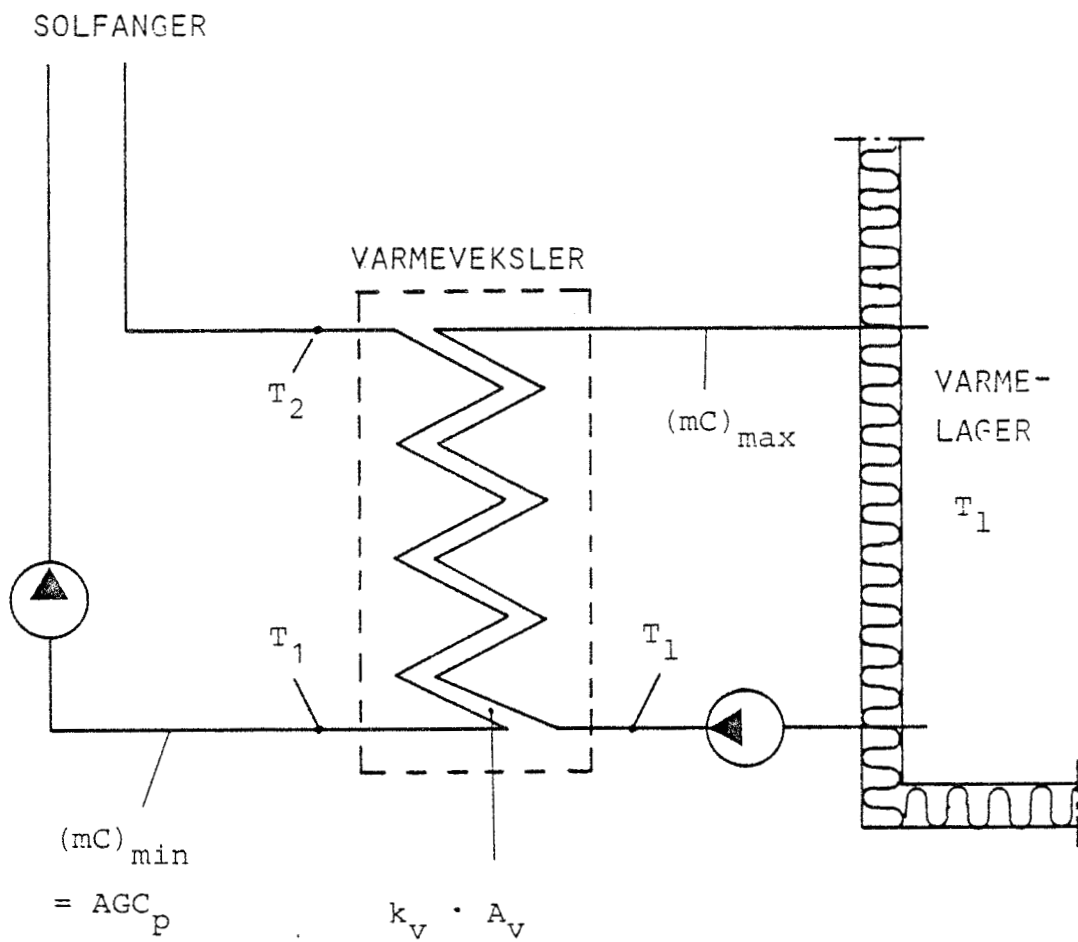
$(mC)_{\max}$ = største kapacitetsstrøm

Under forudsætning af af kapacitetsstrømmen i solfangerkredsen, $A \cdot G \cdot C_p$ er den mindste, kan effektiviteten også skrives som

$$\varepsilon = \frac{T_2 - T_1}{T_2 - T_1} \quad (13.17)$$

hvor T_2 og T_1 er væsketemperaturerne i solfangerkredsen ved ind- og udløb til varmeveksleren, og T_1 er varmelagerkredsens indløbstemperatur til varmeveksleren, der regnes at være lig med lagertemperaturen, jævnfør figur 13.3.

TEMPERATURER OG KAPACITETSSTRØMME VED VARME- OVERFØRSEL MELLEM SOLFANGER OG LAGER



$$\varepsilon = \frac{T_2 - T_1}{T_2 - T_1}$$

Figur 13.3

Specielt findes, at hvis varmelagerkredsen har meget større kapacitetsstrøm end solfangerkredsen, kan ligning (13.16) forenkles til:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{k_v \cdot A_v}{AGC_p}} \quad (13.18)$$

hvilket kan antages at gælde for rørspiraler placeret i varmelageret (som på figur 10.1) og for kappebeholdere.

Når solfangerudbyttet Q'_u , defineret som varmeoverførslen til varmelageret under hensyntagen til varmetab og varmeveksler skal bestemmes, kan det mest hensigtsmæssigt ske ud fra lagertemperaturen. Med varmebalanceligningen

$$Q'_u = AGC_p (T_2 - T_1) \quad (13.19)$$

samt ligning (13.17) kan T_1 i ligning (13.11) elimineres, og der findes ved nogen regning:

$$Q'_u = A \cdot F_R \cdot F''' \cdot (S' - U'_L (T_1 - T_a)) \quad (13.20)$$

idet der benyttes samme betegnelse for korrektionsfaktoren på grund af varmeveksleren, F''' , som anvendes i [44]. Almindeligvis angives produktet af F_R og F''' som F'_R , og dette findes at være:

$$F'_R = F_R \cdot F''' = \left(\frac{1}{F_R} + \frac{U'_L}{GC_p} \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right)^{-1} \quad (13.21)$$

Væsketemperaturerne T_1 og T_2 kan nu bestemmes af ligningerne (13.17) og (13.19) som

$$T_1 = T_1 + \frac{Q'_u}{AGC_p} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \quad (13.22)$$

$$T_2 = T_1 + \frac{Q'_u}{\varepsilon AGC_p} \quad (13.23)$$

Solvarmeoverførslen til lageret udtrykt ved ligning (13.20) forudsætter, at rørenes varmetab sker til solfangerens omgivende temperatur. Såfremt dette ikke er tilfældet, kan der benyttes samme tilnærmelse som tidligere (ligning (13.14)), idet varmeoverførslen først beregnes uden hensyntagen til varmetabene fra rørene og disse tab derefter fratrækkes:

$$Q_u' \approx AF_R' (S_c - U_L(T_1 - T_a)) - k_R(L_i + L_u)(T_1 - T_a) \quad (13.24)$$

hvor F_R' beregnes af ligning (13.21) med U_L og rørenes omgivende temperatur indsættes i stedet for T_a . Rørtemperaturen T_1 kan beregnes efter ligning (13.22). Dette kræver dog, at Q_u' er kendt, hvorfor en eksakt løsning kræver en iteration. Som tilnærmelse vil det dog i langt de fleste tilfælde være tilladeligt at benytte T_1 bestemt uden hensyn til rørtabene.

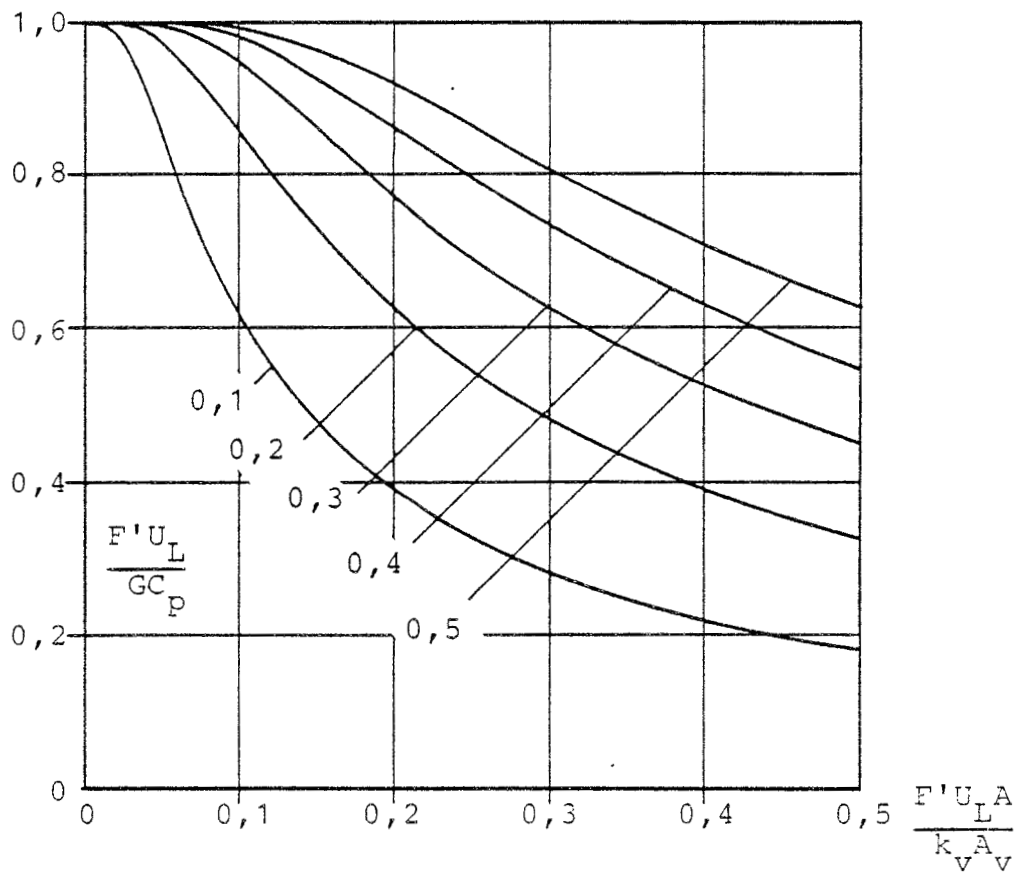
Benyttes den her angivne tilnærmelse, fås at F''' ved indsættelse af udtrykket for F_R efter ligning (11.8) kan skrives:

$$F''' = \left(1 + \left(1 - e^{-\frac{F'U_L}{GC_p}} \right) \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right)^{-1} \quad (13.25)$$

For en varmeveksler, hvor effektiviteten kan beregnes efter ligning (13.18) er der på figur 13.4 vist sammenhængen mellem ε og F''' . Det fremgår heraf, at selv betydelig variation i ε kun giver beskedne ændringer i varmevekslerkorrektionsfaktoren. Dette betyder, at det er tilladeligt at regne med en konstant F''' uanset temperaturniveauet. I praksis vil k_v selv med konstante kapacitetsstrømme udvise nogen variation med temperaturerne, idet væskerne ændrer egenskaber. I [45] er anført målinger af $k_v \cdot A_v$, der viser, at i forhold til en middelværdi ved et middeltemperaturniveau forekommer der ofte variationer på $\pm 20\%$ inden for et normalt driftstemperaturinterval.

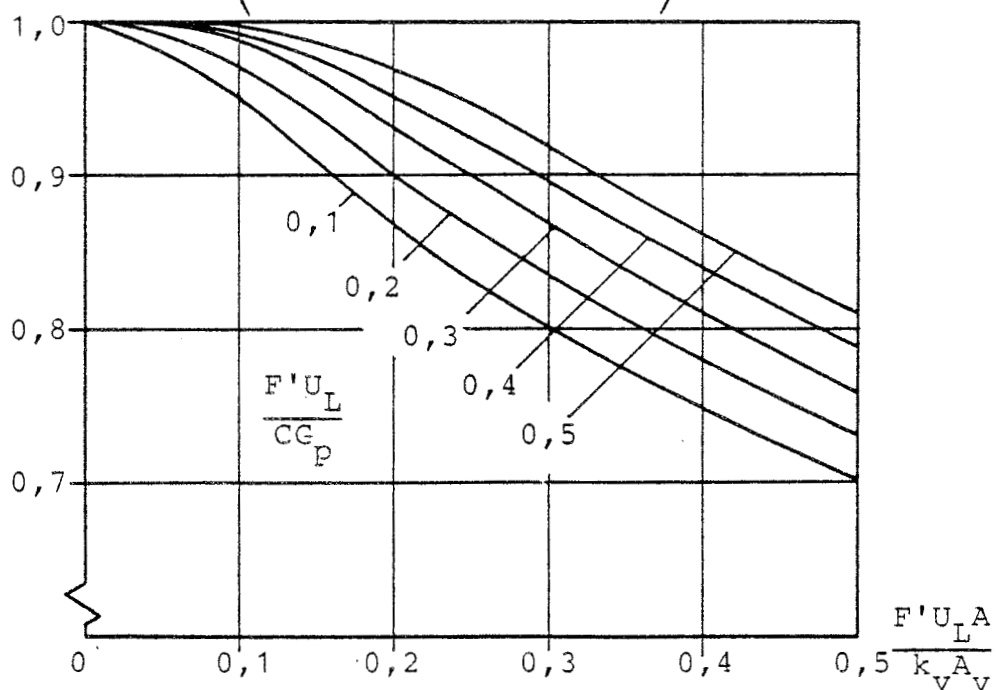
VARMEVEKSLEREFFEKTIVITET

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{k_v A_v}{AGC_p}} = 1 - e^{-\frac{k_v A_v}{F'U_L A} \cdot \frac{F'U_L}{GC_p}}$$



VARMEVEKSLERKORREKTIONSFAKTOR

$$F''' = \left(1 + (1 - e^{-\frac{F'U_L}{GC_p}}) \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^{-1}$$



Figur 13.4

For et solvarmeanlæg med $F'U_L = 7 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$, en $k_v \cdot A_v = 40 \text{ W/^{\circ}C}$ og en kapacitetsstrøm på $70 \text{ W/^{\circ}C}$ ($\approx 1 \text{ l/min}$) begge pr. m^2 solfanger findes, at denne variation medfører en variation i ϵ på knap $\pm 15\%$, men kun medfører ændringer i F''' på ca. $\pm 3\%$.

13.4 Kapacitetstab

Temperaturerne i solfangerkredsens rørsystem ændrer sig, når solfangeren er i drift. Da rørene med væskeindhold har en vis varmekapacitet, betyder det, at der under normale driftsforhold, hvor temperaturerne vokser gennem driftsperioden, sker en reduktion af varmeoverførslen til varmelageret. Denne reduktion kan kaldes kapacitetstab, Q_{RC} . Med betegnelserne som anført på figur 13.2 fås for rørsystemet uden for solfanger og varmeveksler, at kapacitetstab kan angives som:

$$Q_{RC} = L_i \cdot c_R \cdot \frac{dT_1}{d\tau} + L_u \cdot c_R \cdot \frac{dT_2}{d\tau} \quad (13.26)$$

hvor c_R er varmekapaciteten pr. meter rør, der antages at være ens for ind- og udløb. Rørtemperaturerne er her antaget at ændre sig ens med tiden langs frem- og returrøret, således at dT_1 og dT_2 er repræsentative værdier for temperaturændringerne i rørstrækningerne. Antages desuden, at $dT_2 = dT_1$ fås, at kapacitetstab i et tidsstep med indsættelse af udtrykket for T_1 efter ligning (13.23) bliver

$$Q_{RC} = \frac{c_R \cdot (L_i + L_u)}{\tau} \cdot \left(T_1 + \frac{Q_u''}{AGC_p} \cdot \frac{1-\epsilon}{\epsilon} - T_{1,0} \right) \quad (13.27)$$

hvor $T_{1,0}$ er rørtemperaturen i starten af tidssteppet, der er lig temperaturen i slutningen af det umiddelbart foregående tidsstep, og Q_u'' er varmeoverførslen til varmelageret.

Hensyntagen til kapacitetstab ved beregning af varmeoverførslen til varmelageret fås ved at fratrække tabet fra det tidligere fundne udbytte under hensyntagen til varmetab og varmeveksler (ligning (13.20)):

$$Q_u'' = AF_R' (S' - U_L' (T_1 - T_a)) - Q_{RC} \quad (13.28)$$

der ved indsættelse af ligningsudtrykket for Q_{RC} kan skrives:

$$Q_u'' = AF_R'' \cdot (S'' - U_L' (T_1 - T_a)) \quad (13.29)$$

hvor

$$F_R'' = F_R' \cdot F'''' = F_R' \left(1 + \frac{c_R (L_i + L_u) \cdot (1 - \epsilon)}{\tau \cdot AGC_p \cdot \epsilon} \right)^{-1} \quad (13.30)$$

og

$$S'' = S' - \frac{c_R \cdot (L_i + L_u)}{\tau \cdot AF_R'} \cdot (T_1 - T_{1,0}) \quad (13.31)$$

Ligning (13.29) er som det fremgår af udtrykkene for F'''' og S'' afhængig af tidssteppets længde og forholdene i det forrige tidsstep. Dette er ikke tilfældet med de tidligere angivne ligninger for hensyntagen til varmetab og varmeveksler.

På figur 13.5 er vist et eksempel på F'''' variation. Temperaturen T_1 kan under drift bestemmes af ligning (13.23). Uden for driftstiden findes den af varmebalanceligningen:

$$c_R \frac{dT_1}{d\tau} + k_R \cdot (T_1 - T_a) = 0 \quad (13.32)$$

der har løsningen:

$$T_{1,\tau} = T_a + (T_{1,0} - T_a) \cdot e^{-\frac{k_R}{c_R} \cdot \tau} \quad (13.33)$$

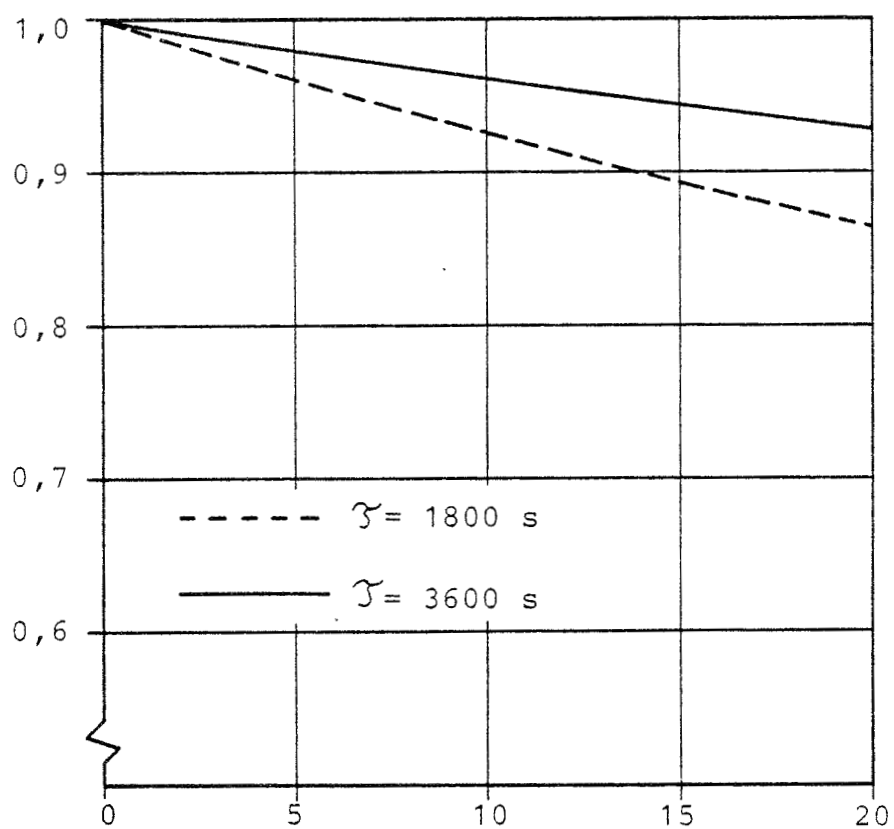
eller med tilnærmelse for små tidsstep i forhold til tidskonstanten c_R/k_R :

$$T_{1,\tau} \approx T_{1,0} - \frac{k_R}{c_R} \cdot (T_{1,0} - T_a) \cdot \tau \quad (13.34)$$

hvor $T_{1,\tau}$ er temperaturen efter tidsrummet τ , når udgangstemperaturen er $T_{1,0}$ og varmetabet sker til omgivelser med en temperatur på T_a .

KORREKTIONSFAKTOR FOR SOLFANGERKREDSSENS
 VARMEKAPACITET, F''' , BEREGNET MED $G \cdot C_p =$
 $70 \text{ W/}^\circ\text{C/M}^2$ OG $\varepsilon = 0,5$

$$F''' = \left(1 + \frac{c_R (L_i + L_u) \cdot (1 - \varepsilon)}{\tau \cdot A \cdot G \cdot C_p \cdot \varepsilon} \right)^{-1}$$



SOLFANGERKREDSSENS VARMEKAPACITET, $\text{KJ/}^\circ\text{C/M}^2$

Figur 13.5

14. VARMELAGERET

Varmelageret i solvarmeanlæg er her antaget at være en isoleret vandbeholder, jævnfør figur 10.1. Når solfangeren er i drift, tilføres solfangerydelse minus varme- og kapacitetstab lageret. Dette vil derfor ofte have en temperatur, der er højere end omgivelsernes, hvorved der sker et varmetab hertil.

Fra lageret kan man, når temperaturen i lageret er tilstrækkelig høj hertil, udtage en varmemængde til hel eller delvis dækning af et givet varmebehov.

I dette arbejde behandles kun solvarmeanlæg til brugsvand, hvor lageret antages at være fyldt med brugsvand. Såfremt der er tale om et anlæg til både rumopvarmning og varmt brugsvand, er lagerbeholderen normalt fyldt med kedelvand, der kan benyttes direkte i varmeafgifterne, mens brugsvandet opvarmes via en varmeveksler. De her angivne formeludtryk vil naturligvis også gælde for disse anlæg.

I dette arbejde regnes kun med én lagertemperatur. I praksis vil temperaturen i lageret dog ofte variere i afhængighed af stedet. Denne temperaturstratifikation vil sandsynligvis være særlig udpræget i anlæg udformet som vist på figur 10.1. Her vil det nemlig ofte forekomme, at der tappes vand uden at solfangeren samtidig er i drift. Derved løber der koldt vand ind i bunden af tanken, og da varmetransporten fra det varmere vand ovenover kun vil foregå ved ledning, fås en langsom temperaturudjævning. Først når solfangeren er i drift og temperaturen i bunden af lageret bliver højere end i toppen fås en hurtig temperaturudjævning p.g.a. konvektionsstrømme i vandet.

Selvom der således i praksis vil forekomme forskellige temperaturer i varmelageret, regnes det dog her altid opblandet, således at kun én temperatur, middeltemperaturen, benyttes til beregning af varmetab, forbrugs-

dækningen og solfangerydelser.

14.1 Varmelagerets varmetab

Beholdere til brugsvand skal kunne tåle et vist tryk.

De laves derfor normalt cylinderformede med buede endebunde.

For en cylinderformet beholder med plane endebunde og en længde (højde) lig to gange diameteren kan varmetabskoefficienten med tilnærmelse beregnes som funktion af volumenet V og isoleringstykkelsen d :

$$K_V \approx \left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{2V}{\pi}} + d \right)^2 + \pi \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{2V}{\pi}} + d \right) \left(2 \cdot \sqrt[3]{\frac{2V}{\pi}} + d \right) \right) \cdot \frac{\lambda}{d} \quad (14.1)$$

hvor λ er isoleringsmaterialets varmeledningsevne. Der er således set bort fra indvendig og udvendig varmeoverføringskoefficient, ligesom det er antaget, at isoleringstykkelsen er lille i forhold til diameteren. Endelig er der også helt set bort fra kuldebroer, der f.eks. vil forekomme ved understøtninger, rørgennemføringer m.v..

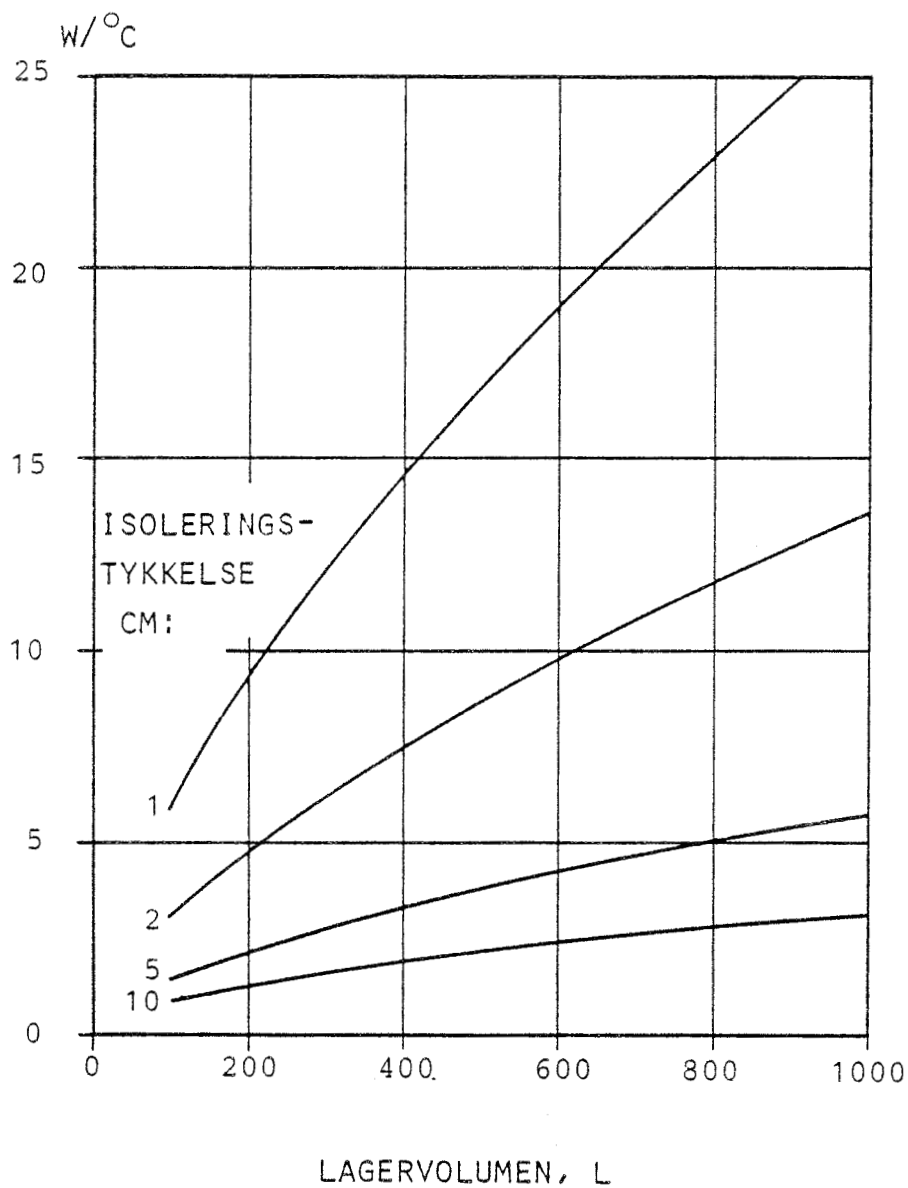
På figur 14.1 er vist varmetabet som funktion af volumenet, og isoleringstykkelsen beregnes efter ligning (14.1) for en perfekt isoleret beholder. I praksis vil man dog ofte finde, at varmetabet på grund af kuldebroer, dårligt udført isoleringsarbejde m.v. er større end beregnet, ofte 30 - 100% større, jævnfør målinger anført i [45].

Til sammenligning med kurverne på figuren kan anføres, at en moderne oliefyrsunit højst må have et varmetab (tomgangstab) ifølge [46] på 1½% af maximalydelsen. Dette svarer typisk til et tab på 3 - 400 W med en kedeltemperatur på 65 °C. Da volumenet uden isolering er ca. 400 l, fås at en oliefyrsunits varmetabskoefficient svarer til en isoleringstykkelse på ca. 2 cm på en 400 l perfekt isoleret beholder.

Varmetabet fra lageret kan findes efter formlen:

$$Q_V = K_V \cdot (T_1 - T_a) \quad (14.2)$$

VARMETABSKOEFFICIENT FOR PERFEKT ISOLERET
BEHOLDER MED LÆNGDE LIG 2 GANGE DIAMETER.
BEREGNET MED $\lambda = 0,045 \text{ W/M/}^\circ\text{C}$ UDEN HENSYN-
TAGEN TIL OVERGANGSISOLANSER.



Figur 14.1

Varmeledningsevnen for de almindeligvis benyttede isoleringsmaterialer, mineraluldsprodukter, er ikke helt uafhængig af temperaturniveauet. Den angives normalt ved en middeltemperatur på 10 °C, λ_{10} , og på baggrund af oplysninger i [47] kan det skønnes, at ved temperaturen T °C findes varmeledningsevnen at være λ_T bestemt ved:

$$\lambda_T \approx \lambda_{10} \cdot e^{0,003 \cdot T} \quad (14.3)$$

Antages λ i ligning (14.1) at være λ_{10} , findes varmetabet fra lageret at kunne beregnes som:

$$Q_V = K_V \cdot (T_1 - T_a) \cdot e^{0,003 \frac{T_1 + T_a}{2}} \quad (14.4)$$

Da lagertemperaturen normalt varierer mellem omgivelsernes temperatur ≈ 20 °C og op til 80 - 90 °C, findes, at man ved brug af en konstant middel λ -værdi maksimalt beregner varmetabet 6 - 7% forkert. Sammenholdt med de anførte i praksis forekommende afvigelser fra de beregnede varmetab, skønnes det tilladeligt at se bort fra varmeledningsevnen temperaturafhængighed.

14.2 Varmtvandsforbruget

Fra lageret tappes varmt brugsvand i toppen og koldt vand tilføres i bunden. For et givet tidsstep, hvor brugsvandsvolumet V_{BV} ved en given temperatur T_{BV} kendes, tappes lageret således for en varmemængde VVF, der i afhængighed af lagertemperaturen bestemmes som:

$$T_1 \geq T_{BV}: VVF = V_{BV} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{BV} - T_{BK}) \quad (14.5)$$

$$T_1 < T_{BV}: VVF = V_{BV} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_1 - T_{BK})$$

hvor T_{BK} er det kolde vands temperatur.

Når lagertemperaturen er lavere end den ønskede temperatur på brugsvandet, fås således kun en delvis opvarm-

ning heraf. Det er derfor nødvendigt at foretage en yderligere opvarmning, f.eks. som skitseret på figur 10.1 ved hjælp af et oliefyr.

I praksis afhænger den ønskede brugsvandstemperatur af hvad det varme vand skal bruges til. Det vil ofte være sådan at det formål, der kræver højst temperaturniveau, bliver bestemmende for T_{BV} . Til almindelig husholdningsbrug vil det normalt være ønsket om en given temperatur til opvask, der er dimensionerende. Der er her helt set bort fra, at vandopvarmningen ofte er sammenkoblet med rumopvarmningen, hvorved det krævede temperaturniveau hertil ofte bestemmer brugsvandstemperaturen. Endelig har man i moderne oliefyrsunit integreret varmtvandsbeholderen og kedlen, hvorved minimum kedeltemperatur bliver bestemmende for brugsvandstemperaturen.

Tapning af brugsvand foregår normalt ikke kontinuert i husholdninger, men sker i varierende mængde fordelt på forskellige tidspunkter. Ved beregningerne i dette arbejde regnes der derfor med højst én tapning i et tidsstep, og denne regnes i givet fald at ske ved tidsstepets afslutning.

14.3 Solfangerydelse og lagertemperatur

I de tidligere opstillede ligninger for solvarmeoverførslen indgår lagertemperaturen som en konstant. I løbet af et tidsstep vil man imidlertid finde, at lagertemperaturen ændrer sig p.g.a. solvarmetilførsel og varmetab. Inden for tidssteppet kan der derfor opstilles varmebalancen

$$(MC)_V \cdot \frac{dT_1}{d\tau} - Q_u'' + Q_V = 0 \quad (14.6)$$

hvor $(MC)_V$ er varmelagerets samlede varmekapacitet.

Under antagelse af at Q_u'' og Q_V er konstante inden for et tidsstep, er løsningen til ligningen:

$$T_{1,\tau} = T_{1,0} + (Q_u'' - Q_V) \cdot \frac{\tau}{(MC)_V} \quad (14.7)$$

hvor $T_{1,\tau}$ er lagertemperaturen efter tiden τ , når temperaturen for $\tau = 0$ er $T_{1,0}$.

Efter tapning af brugsvand bliver lagertemperaturen:

$$T_{1,\tau} = T_{1,0} + ((Q_u'' - Q_V) \cdot \tau - VVF) / (MC)_V \quad (14.8)$$

Da både Q_u'' og Q_V er afhængige af lagertemperaturen, er ligningerne (14.7) og (14.8) tilnærmelser. Specielt vil et stort solfangerudbytte kunne give betydelige temperaturstigninger i et lille lager i løbet af et tidsstep. Værdien af Q_u'' beregnet med lagertemperaturen i begyndelsen af tidssteppet vil derfor være noget for stor. Dette kan der tages hensyn til ved at benytte lagerets middeltemperatur, T_{lm} , i tidssteppet til beregning af Q_u'' . Med tilnærmelse findes:

$$T_{lm} \approx \frac{1}{2}(T_{1,\tau} + T_{1,0}) \quad (14.9)$$

Indsættes værdien for $T_{1,\tau}$ bestemt efter ligning (14.7) og regnes varmetabet konstant, fås middeltemperaturen:

$$T_{lm} \approx T_{1,0} + \frac{1}{2} \cdot (Q_u'' - K_V(T_{1,0} - T_a)) \cdot \frac{\tau}{(MC)_V} \quad (14.10)$$

Indsættes T_{lm} udtrykt ved den anførte ligning i udtrykket for solvarmeoverførslen til lageret, ligning (13.24), findes at varmeoverførslen beregnet med lagerets temperatur i tidssteppets begyndelse kan udtrykkes som:

$$Q_u'' = AF_{RV}'' \cdot (S'' - U_L''(T_{1,0} - T_a)) \quad (14.11)$$

hvor

$$F_{RV}'' = F_R'' \cdot F_V = F_R'' \cdot \left(1 + \frac{AF_R'' \cdot U_L' \cdot \tau}{2(MC)_V} \right)^{-1} \quad (14.12)$$

og

$$U_L'' = U_L' \left(1 - \frac{\tau K_V}{2(MC)_V} \right) \quad (14.13)$$

For enkelte eksempler er variationen af korrektionsfaktoren for stigende lagertemperatur i tidssteppet, F_V , vist på figur 14.2. Det fremgår heraf, at især for små varmelagre og lange tidsstep vil F_V være væsentlig mindre end 1.

Forskelle mellem U_L'' og U_L' udtrykt ved ligning (14.13) er selv for ekstreme forhold, stort tidsstep og lille varmelager, minimal. F.eks. findes med $\tau = 3600$ s og et varmelager på 200 l med en varmetabskoefficient på $5 \text{ W/}^\circ\text{C}$ (isoleringstykkelse ~ 2 cm, jævnfør figur 14.1) at $U_L'' = 0,99 \cdot U_L'$. Det vil derfor være fuldt tilladeligt at sætte $U_L'' = U_L'$ og således se bort fra varmetabets indflydelse på solfangerydelsen. Herved kan varmetabet desuden henregnes til andre temperaturer end T_a som angivet i ligning (14.2)

Når varmeoverførslen til lageret er bestemt efter ligning (14.11), kan temperaturerne i fremløbet til solfangeren bestemmes.

Ved varmevekslerafgangen vil middeltemperaturen T_{1m} kunne bestemmes af ligning (13.23):

$$T_{1m} = T_{1m} + \frac{Q_u'' (1-\varepsilon)}{AGC_p \cdot \varepsilon} \quad (14.14)$$

hvor middellagertemperaturen bestemmes af ligning (14.10). Hermed kan middelindløbstemperaturen til solfangeren T_{im} kunne bestemmes af ligning (13.9):

$$T_{im} = T_{1m} - \frac{k_R \cdot L_i (T_{1m} - T_a)}{AGC_p} \quad (14.15)$$

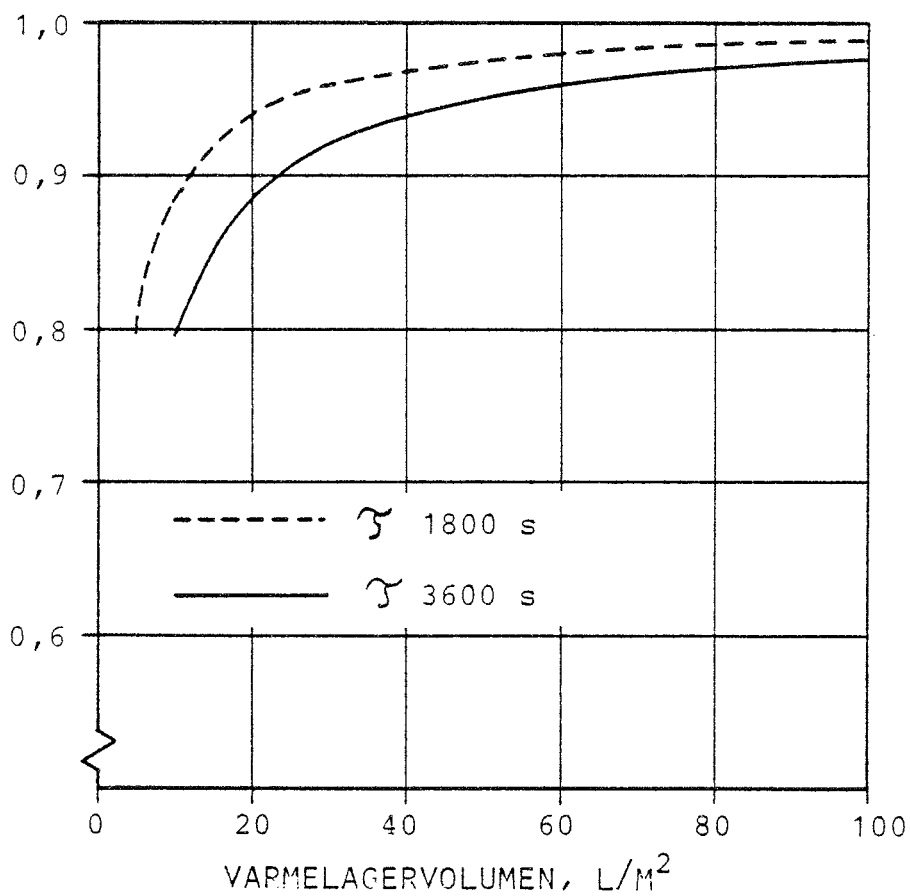
Denne temperatur benyttes til bestemmelse af absorbertemperaturerne T_{pm} og $T_{p,\tau}$.

Endelig kan temperaturen i fremløbet i slutningen af et tidstep bestemmes

$$T_{1,\tau} = T_{1,\tau} + \frac{Q_u'' (1-\varepsilon)}{ACG_p \cdot \varepsilon} \quad (14.16)$$

KORREKTIONSFAKTOR FOR STIGENDE VARMELAGER-
LAGERTEMPERATUR I TIDSSSTEP, F_V , BEREGNET
MED $F_R'' U_L' = 6 \text{ W/M}^2/\text{°C}$

$$F_V = \left(1 + \frac{AF_R'' U_L' \cdot \tau}{2 (MC)_V} \right)^{-1}$$



Figur 14.2

hvor $T_{1,\tau}$ bestemmes af ligning (14.7). Det er denne temperatur, der indgår i bestemmelsen af S'' i næste tidsstep.

Med de anførte ligninger er det nu muligt at simulere solvarmeoverførslen til varmelageret gennem længere perioder. Bestemmelsen af denne i et enkelt tidsstep er vist på figur 14.3, idet temperaturerne i absorbereren, i rørene og varmelageret er kendt ved tidssteppets begyndelse. Ud fra disse og de angivne ligninger kan varme-transporterne og temperaturerne ved tidssteppets slutning beregnes, hvorefter proceduren gentages i næste tidsstep osv..

Som vist på figuren er det med de angivne ligninger nu muligt at regne med tidssteppets middeltemperaturer i modsætning til traditionelle quasistationære beregninger, hvor temperaturerne i tidssteppets start regnes konstante i hele tidssteppet. For beregninger af anlæg med rimelig store varmelagre og med brug af små tidsstep vil der dog kun være ubetydelige forskelle mellem de to metoder.

14.4 Nettoydelse og effektivitet

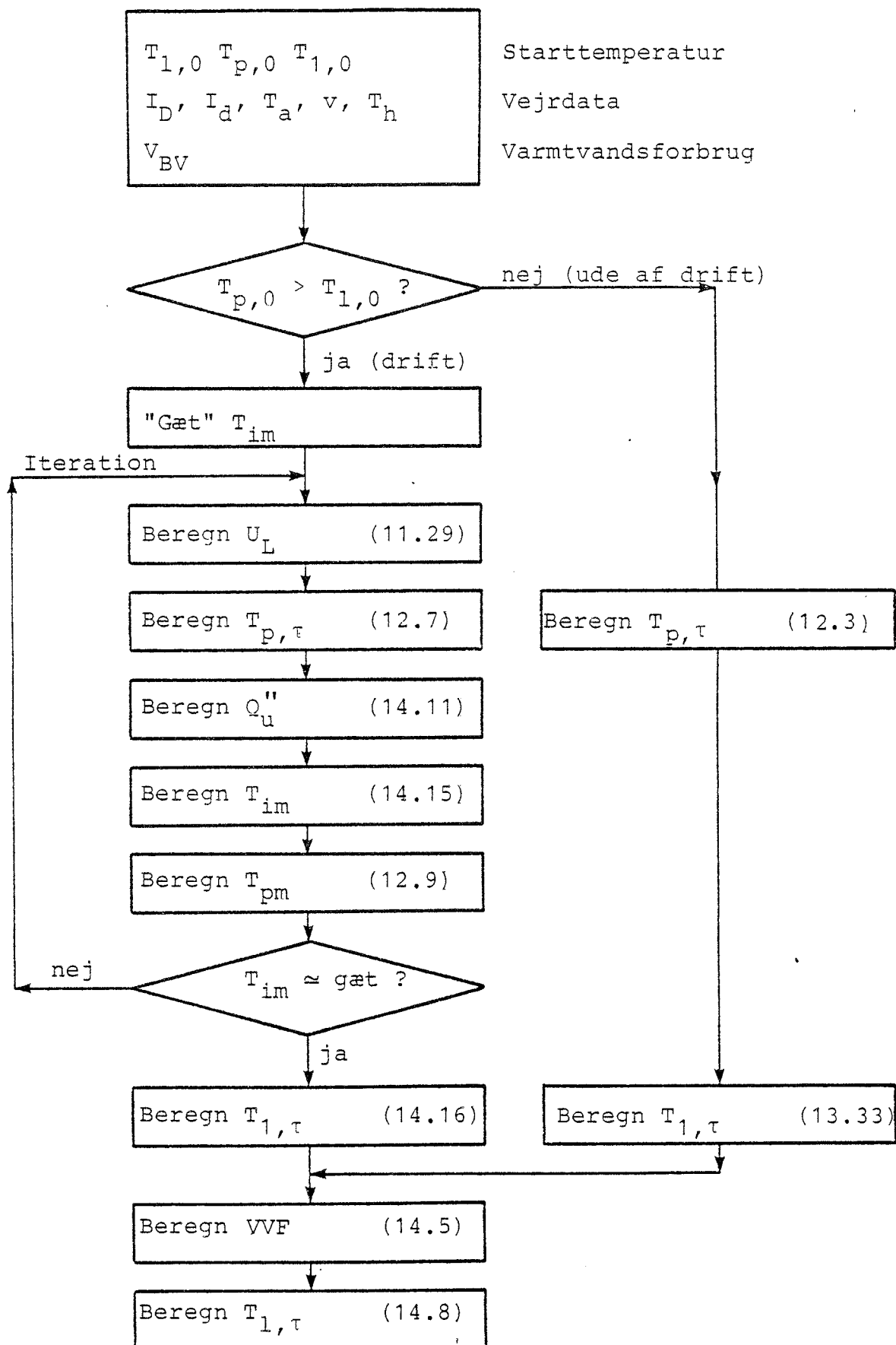
Med de gennemgåede ligninger kan et givet solvarmeanlæg til brugsvand beregnes. Nettoydelse NY gennem en længere periode defineres med den anførte beregningsmetode som:

$$NY = \sum VVF \quad (14.17)$$

hvor VVF beregnes som anført i ligning (14.5). Det forudsættes således, at varmetab fra rør og lager ikke nyttiggøres. Desuden fremgår det af (14.17), at såfremt der ikke finder et varmtvandsforbrug sted, så er nettoydelsen nul.

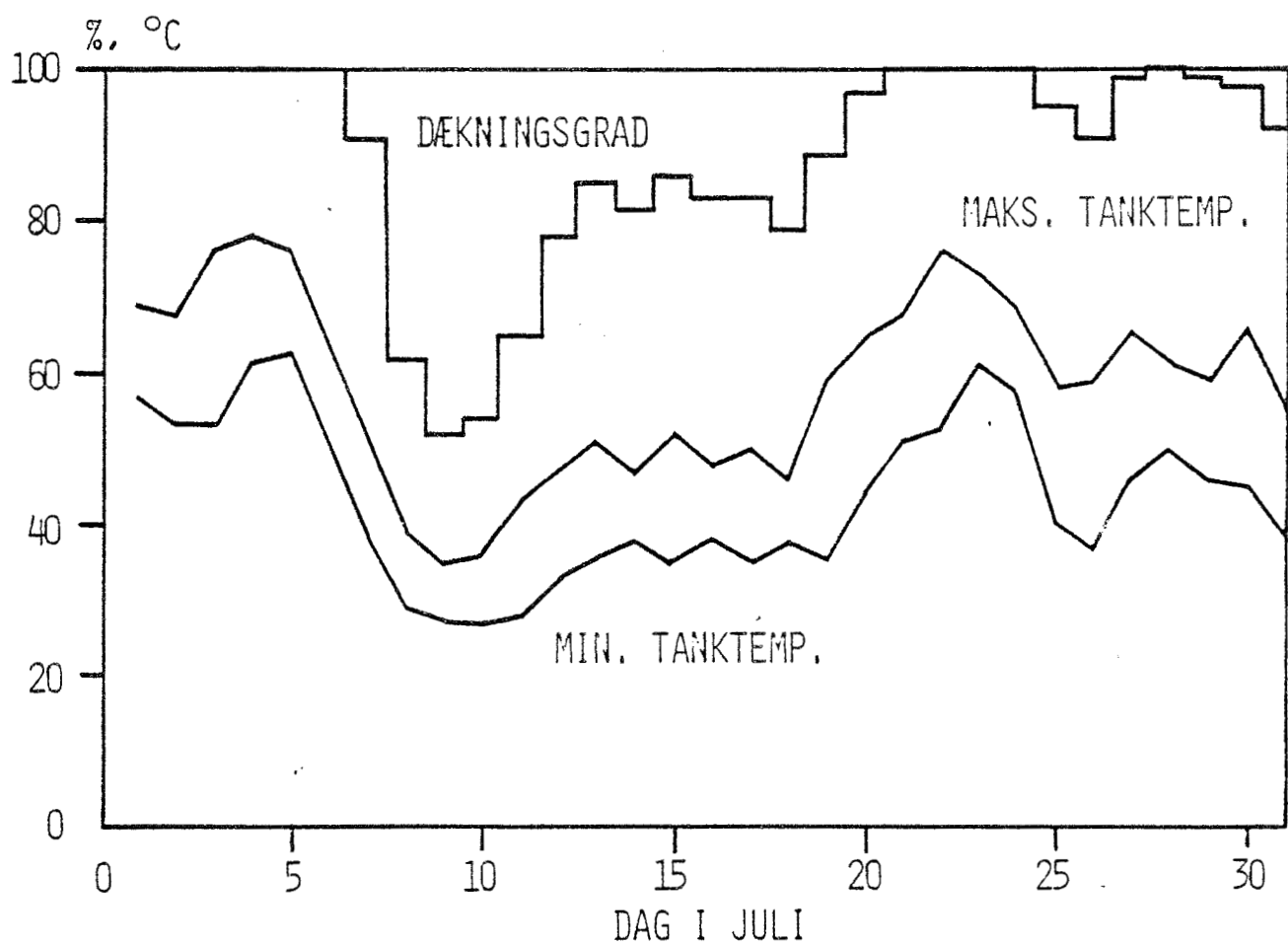
Bestemmelsen af nettoydelsen er således enkel, når varmtvandsforbruget og lagertemperaturen kendes. Lagertemperaturens variation med tiden i afhængighed af solindfaldet og øvrige vejrpåvirkninger kan beregnes som vist på figur 14.3, og et eksempel på temperaturvariationen er vist på figur 14.4.

Solvarmeanlæg til brugsvand
Beregningsgang i et tidsstep
(Ligningsnummer i parentes)



Figur 14.3

EKSEMPEL PÅ LAGERTEMPERATUREN OG DÆKNINGSGRADENS VARIATION
GENNEM JULI MÅNED I REFERENCEÅRET BEREGNET MED 10 M² SOL-
FANGER, REF. [48]



VARMTVANDSFORBRUG = 300 L/DØGN (10 - 50°C)

Figur 14.4

Kendes både et solvarmeanlægs nettoydelse og solindfaldet i en periode, kan anlæggets effektivitet, systemeffektiviteten, findes som forholdet mellem disse:

$$\eta_{\text{system}} = \frac{NY}{\int (I_D + I_d) \cdot A \cdot d\tau} \quad (14.18)$$

Solindfaldet er her regnet integreret over hele den periode som nettoydelsen er angivet for og ikke, som det sommetider ses anført, kun for de perioder, hvor solfangeren har været i drift.

Endelig benyttes ofte betegnelsen dækningsgraden som et mål for et givet anlægs ydelse. Dækningsgraden D er defineret som nettoydelsen i forhold til nettoforbruget, NF

$$D = \frac{NY}{NF} \quad (14.19)$$

hvor nettoforbruget ifølge ligning (14.5) kan findes som:

$$NF = \Sigma V_{BV} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{BV} - T_{BK}) \quad (14.20)$$

summeret over samme periode som nettoydelsen.

15. BEREGET OG MÅLT SOLVARMEYDELSE

I almindelighed er det vanskeligt at kontrollere om beregnede solvarmeydelser er "rigtige", dvs. om et solvarmesystem udformet præcist som det beregnede og udsat for samme påvirkninger rent faktisk ville yde det samme. Det skyldes hovedsageligt at det i praksis er vanskeligt at finde solvarmeanlæg, der dels er fuldt beskrevet i detaljer og dels er fulgt med præcise målinger gennem længere tid.

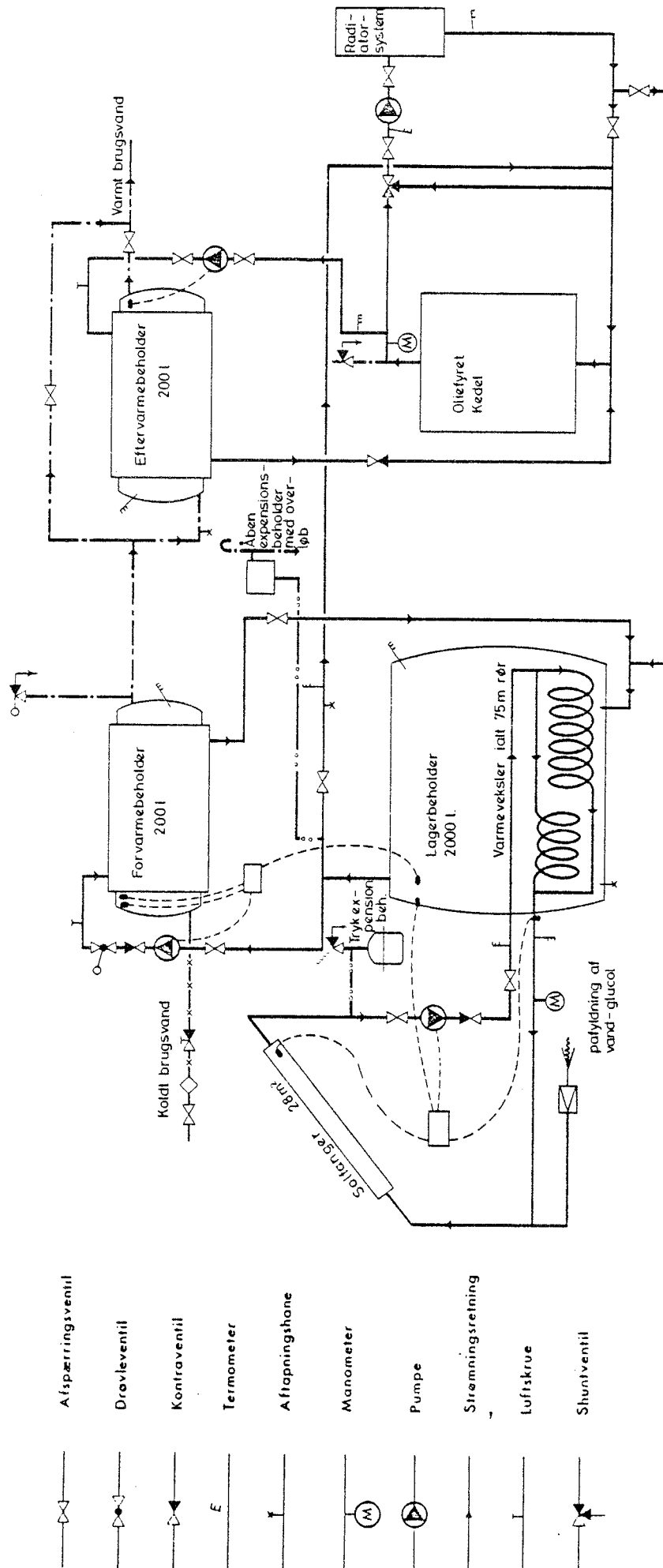
I Danmark findes kun enkelte solvarmeanlæg, der kan benyttes til sammenligning af målinger og beregninger. I Energiministeriets solvarmeprojekt indgår der nogle få solvarmeanlæg, der kan benyttes hertil, og et af disse er anlægget i Gentofte, der er nærmere beskrevet i [49] og skitseret på figur 15.1.

Da der ikke findes veldokumenterede brugsvandsanlæg, benyttes Gentofteanlægget til kontrol af de opstillede beregningsudtryk, selvom solvarmen benyttes til både rum- og brugsvandsopvarmning. Forskellen fra brugsvandsanlægget (figur 10.1) er dog ikke så stor, da der kun er ét varmeudtag fra lageret.

Anlægget er gennem længere tid fulgt ved hjælp af detaljerede målinger. Hver time er timens varmestrømme, drifttider, vejrpåvirkninger og en lang række temperaturer m.v. registreret. Det er herved muligt at sammenligne dele af anlæggets målte ydelser med de tilsvarende beregnede.

15.1 Solfangerens effektivitet

Ud fra målingerne er det forsøgt at beregne den benyttede solfangers effektivitet under stationære forhold. Det har været vanskeligt, da vejrforholdene kun i få tilfælde har været stabile gennem længere tid. Det er derfor blevet til en samling effektivitetspunkter, hvor man med en lineær regression har fundet en effektivitetslinie.



PRINCIPDIAGRAM AF SOLVARMEANLÆGGET I GENTOFTE. REF. [49]

Figur 15.1

Denne linie er for givne vejrforhold vist på figur 15.2. Her er desuden optegnet den effektivitetslinie man ud fra de i dette arbejde anførte formler kan beregne ved at indsætte værdierne for den aktuelle solfanger, som de er anført i [49] .

Da effektivitetskurven er fundet ud fra målinger med væske-temperaturer mellem ca. 40 og 80 °C og afstanden mellem målt og beregnet effektivitet netop i dette interval er mindst, må der, på trods af den lille forskel der rent faktisk findes, siges at være rimelig god overensstemmelse mellem de to kurver.

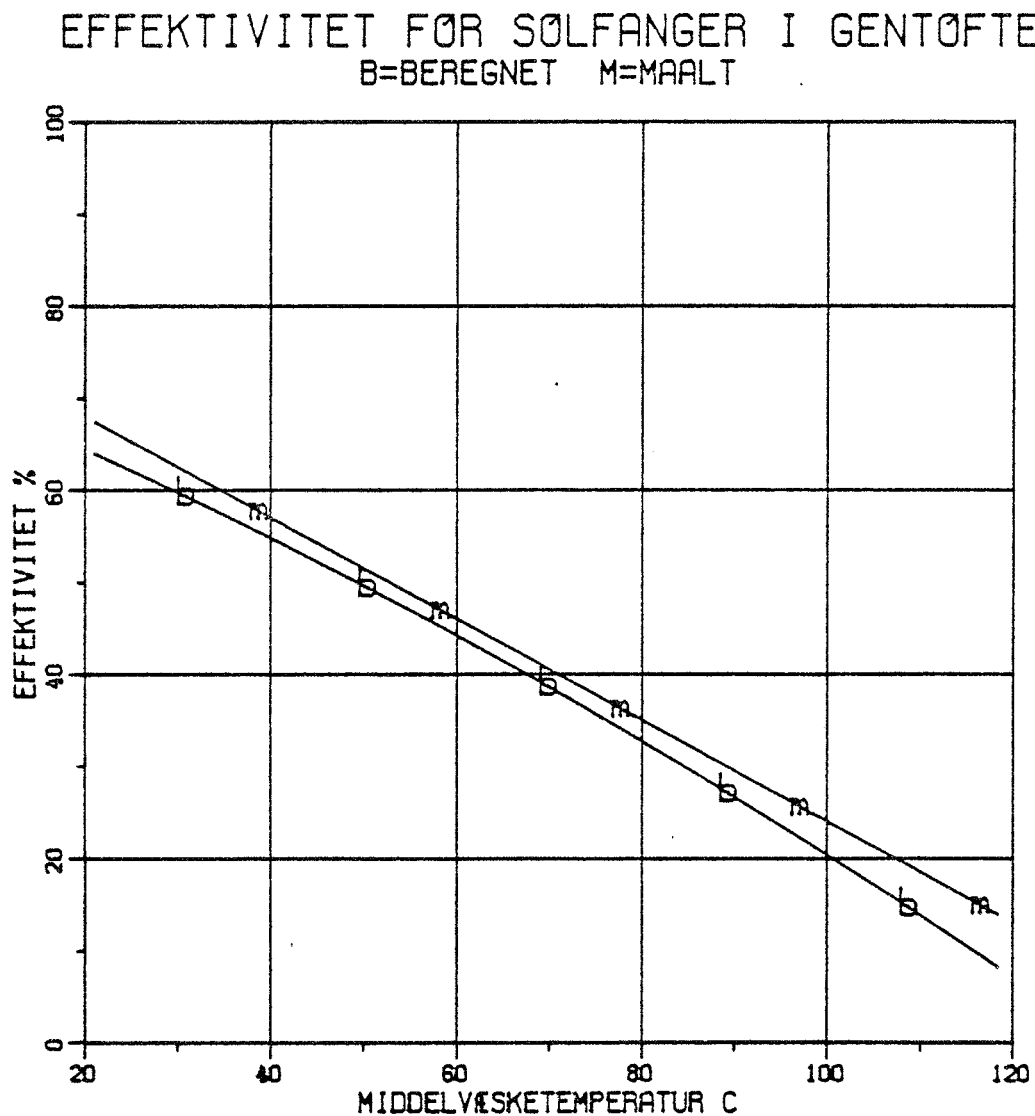
Det vil naturligvis være muligt at tilpasse den beregnede effektivitetskurve, så bedre overensstemmelse med den målte opnås. F.eks. ville en nøjere analyse sikkert vise, at solfangerens varmetab gennem kanterne nok ikke er 25% af varmetabet gennem bagsideisoleringen (ligning (11.28)), og at temperaturen bag solfangeren måske er væsentlig højere end udelufttemperaturen. Hertil kommer yderligere en række parametre, som ved beregningerne er skønnet udfra tegninger, hvorfor de i praksis kan vise sig at afvige fra det forudsatte. Endelig er der desuden en vis usikkerhed i målingerne af effektivitet, f.eks. i bestemmelsen af solindfaldet, jævnfør kapitel 2. Det er derfor valgt at regne videre med den i første omgang opstillede solfangermodel.

15.2 Solvarmeoverførslen til lagertanken

Solvarmen overføres til varmelageret ved hjælp af en rørs spiral i lagertankens nederste del, jævnfør figur 15.1. Denne varmevekslers effektivitet er angivet til 0,75, mens rørsystemet mellem lager og solfanger har en varmekapacitet på 10,6 kJ/°C og en varmetabskoefficient på 0,82 W/°C, begge angivet pr. m² solfanger.

Temperaturen i lageret måles 3 steder: nær toppen, i midten og nær bunden. Antages middelværdien af disse 3

BEREGNET OG MÅLT EFFEKTIVITET FOR GENTOFTE SOLFANGEREN
ANGIVET FOR INDSTRÅLINGEN 800 W/M^2 OG EN LUFTTEMPERATUR
PÅ 20°C . MÅLINGEN FORETAGET MED EN INDSTRÅLING PÅ
 $700\text{--}900 \text{ W/M}^2$, UDELUFTTEMPERATUR STØRRE END 10°C OG MIDDEL-
VÆSKETEMPERATUR PÅ $40\text{--}80^\circ\text{C}$, [49].



Figur 15.2

at være repræsentativ for middeltanktemperaturen og benyttes denne til beregning af solvarmeoverførslen, fås for 4 dage den på figur 15.3 viste solvarmeoverførsel. På figuren er også vist målt varmeoverførsel, og overensstemmelsen må usikkerhederne taget i betragtning siges at være forbavsende god.

Det fremgår af figuren, at man i opstartfasen har en mindre, negativ varmeoverførsel. Det er det såkaldte kapacitetstab, idet vandet i rørene og rørene selv skal opvarmes til driftstemperaturen.

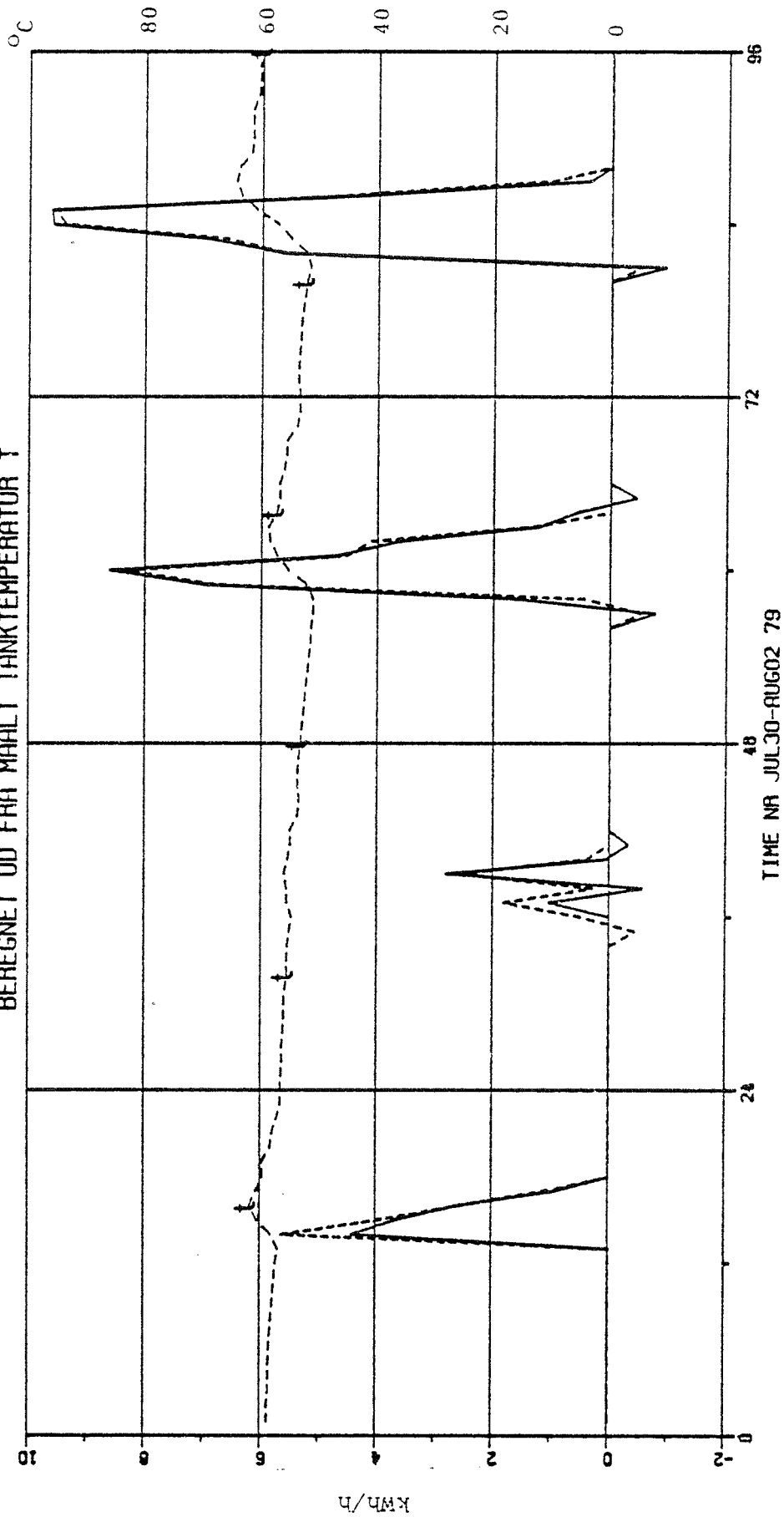
Beregningsmæssigt ses desuden at stopfasen kan give et negativt udbytte, dvs. solfangerdriften stopper for sent. Dette skyldes udelukkende simuleringsmåden, idet solfangeren regnes i drift i hele tidssteppet (1 time), hvis blot absorbertemperaturen er højere end lagertemperaturen i starten heraf. En mere korrekt fremgangsmåde ville være kun at regne solfangeren i drift i den del af tidssteppet, hvor absorberen har højere temperatur end lageret.

15.3 Anlæggets drift

Varmelageret har en varmekapacitet på $8,7 \text{ MJ}/^{\circ}\text{C}$ svarende til godt 2000 l vand. Varmetabet fra tanken er beregnet til godt $6 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$ men målt til $12\text{-}14 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$, altså ca. det dobbelte af det beregnede.

Fra lageret tappes varme ved at relativt koldt vand ledes ind i bunden, og varmt vand ledes væk fra toppen. Der opstår således let en temperaturstratificering i lageret. Denne udlignes dog ved solfangerdrift. Da tanktemperaturen som nævnt kun måles 3 steder, kan det være vanskeligt præcist at bestemme middellagertemperaturen, ligesom temperaturerne omkring varmeveksleren vil være behæftet med betydelig usikkerhed.

SOLVARMEANLÆG I GENTØFTE
 — BEREGNET OG --- MÅLT VARME TIL TANK
 BEREGNET UD FRA MÅLT TANKTEMPERATUR T

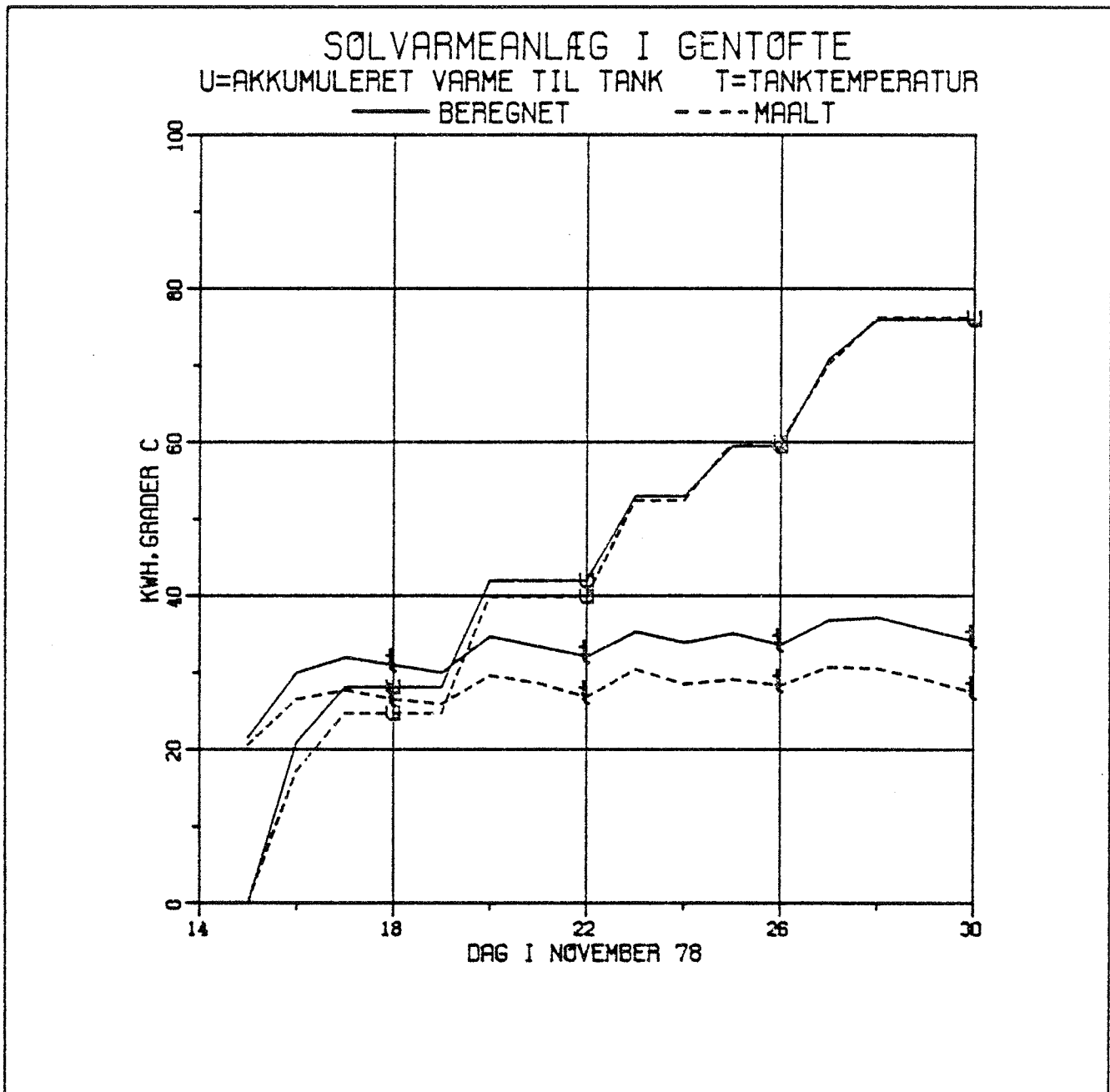


Figur 15.3

På figur 15.4 og 15.5 er der gennem 14-dages perioder beregnet solvarmeoverførslerne til lageret, og med denne samt den målte varmetabskoefficient og målt forbrug er middellagertemperaturen beregnet og sammenlignet med de tilsvarende målte. Det fremgår af figurerne, at der er meget fin overensstemmelse mellem beregnede og målte solvarmeoverførsler, dette til trods for at der er nogen uoverensstemmelse mellem lagertemperaturerne. Dette må nok i nogen grad tilskrives den omtalte store usikkerhed på den målte middellagertemperatur.

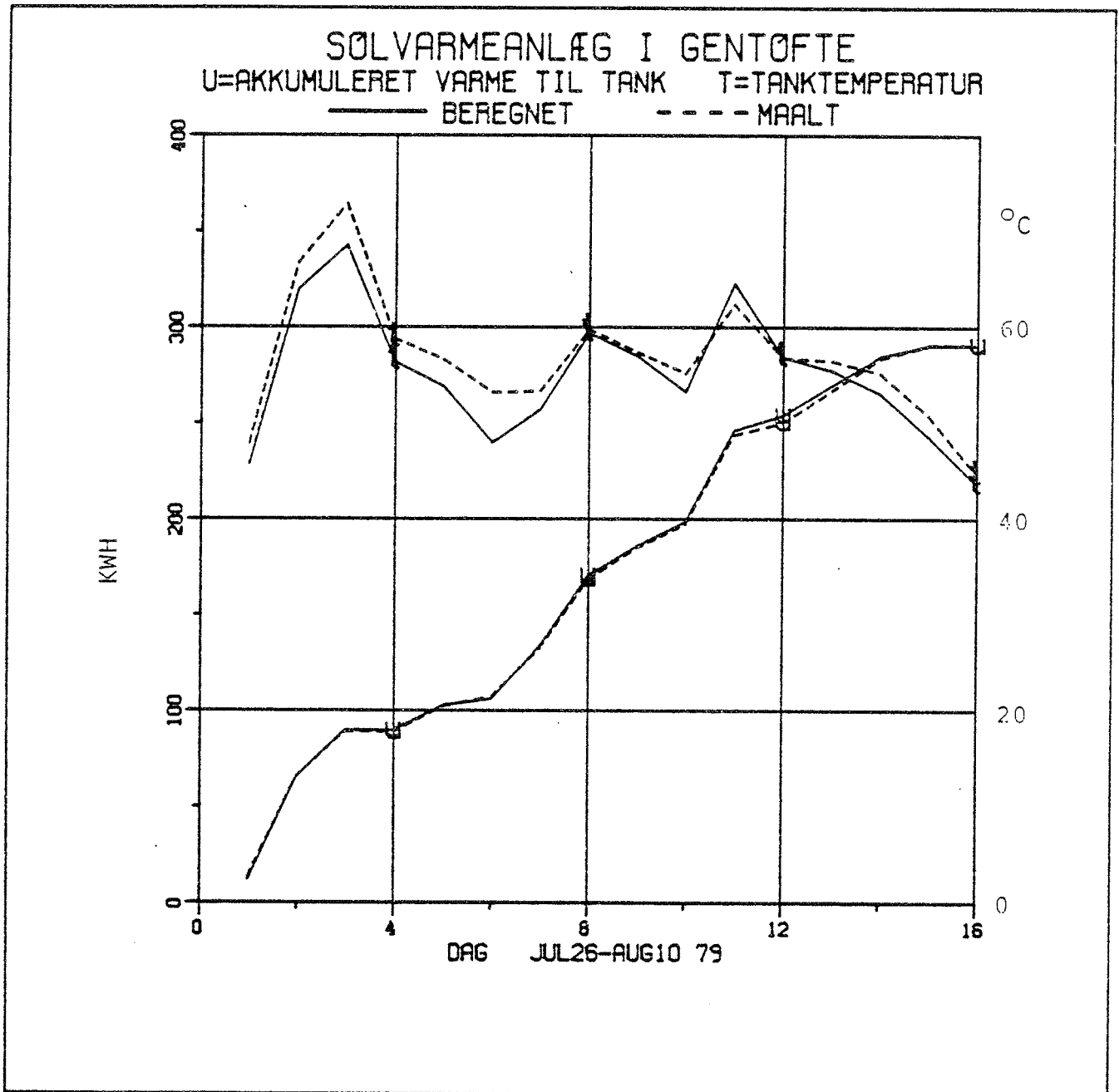
Sammenfattende kan det konstateres at den opstillede matematiske model af solvarmeanlægget giver en yderst tilfredsstillende beskrivelse af driftsforholdene i Gentofteanlægget. Det sluttet derfor at også for andre anlægsudformninger vil det være muligt på fuldt betryggende vis at simulere driften og således beregne den ydelse man faktisk ville få med et virkeligt anlæg med samme ydre driftsforhold.

BEREGNET OG MÅLT MIDDELTEMPERATUR I OG AKKUMULERET SOLVARMEOVERFØRSEL TIL VARMELAGERET



Figur 15.4

BEREGNET OG MÅLT MIDDELTEMPERATUR I OG AKKUMULERET SOLVARMEOVERFØRSEL TIL VARMELAGERET



Figur 15.5

16. BEREGNINGSFORUDSÆTNINGER FOR BRUGSVANDSANLÆG

I dette arbejde behandles som tidligere anført kun solvarmeanlæg til brugsvand. For at kunne udføre en række analyser af et sådant anlæg er det hensigtsmæssigt nærmere at præcisere forudsætninger og udvælge et referenceanlæg i forhold til hvilket parameteranalyser kan foretages.

16.1 Referenceanlæg

Som referenceanlæg vælges en anlægsudformning som vist på figur 10.1, 10 m² solfanger med en effektivitetskurve som beregnet på figur 11.6 og et varmelagervolumen (brugsvand) på 500 l.

Rørforbindelsen mellem lager og solfanger antages at bestå af rør med nominel diameter på 20 mm, hvorved varmekapaciteten bliver ca. 5 kJ/°C pr. m² solfanger og varmetabskoefficienten ca. 0,5 W/°C pr. m² solfanger, idet der regnes med 2 m rør pr. m² solfanger og en isoleringstykkelse på ca. 25 mm, jævnfør figur 13.1. Indløb og udløb antages at være ens.

Endelig er varmevekslerens varmeoverføringskoefficient sat til 40 W/°C pr. m² solfanger og isoleringstykkelsen af lageret valgt til 5 cm.

En oversigt over referenceanlæggets hoveddata er angivet i tabel 16.1.

Styresystemet antages at være ideelt virkende, således at forstå, at såsnart den beregnede absorbertemperatur i et tidssteps begyndelse er højere end lagertemperaturen, starter solfangerdriften, og den stoppes først når absorbertemperaturen ved et tidssteps start er lavere end lagertemperaturen. Dette sidste kan som tidligere anført betyde, at varmeoverførslen til lageret i sidste tidsstep bliver negativt.

Tabel 16.1 Referenceanlæggets hoveddata

Solfanger: (ID Nr. 11 i ref. [27] og [41]):

Areal (absorber)	10 m ²
Antal dæklag af glas	1
Glastykkelse	5 mm
Absorbertype	roll-bond kanalplade
Absorberbelægning	sort maling
Absorbermateriale	aluminium
Væskeindhold	0,6 l/m ²
Bagsideisolering, polyurethan	45 mm
Vægt ialt ca. ¹⁾	26 kg/m ²
Effektiv varmekapacitet ((mC) _e) ¹⁾	13,2 kJ/°C/m ²
Solfangerhældning og orientering	45° sydvendt

Solfangerkredsen:

Varmetabskoefficient ialt	5 W/°C
Varmevekslers varmeoverføring	400 W/°C
Varmekapacitet	50 kJ/°C
Kapacitetsstrøm (1 l/min/m ²) ca.	700 W/°C
Varmevekslers effektivitet ¹⁾	0,44
Omgivende temperatur	20 °C

Varmelageret

Volumen (længde = 2 x diameter)	0,5 m ³
Isoleringstykkelse, mineraluld	5 cm
Omgivende temperatur	20 °C

Varmtvandsforbrug

Volumen	240 l/døgn
Koldtvandstemperatur	10 °C
Varmtvandstemperatur	50 °C
Energiforbrug, netto ¹⁾	4050 kWh/år

1) Beregnede værdier ud fra forudsætningerne

16.2 Varmtvandsforbruget

Forbruget af varmt vand er meget individuelt og varierer betydeligt. Da referenceanlægget er tænkt installeret på et typisk enfamiliehus, skal forbruget svare til et almindeligt husholdningsforbrug. Det er dog ret dårligt undersøgt, hvad en almindelig husholdning i praksis bruger af varmt vand. En svensk undersøgelse [50] angiver et forbrug pr. person på mellem 37 og 62 liter/døgn, opvarmet ca. 50 °C, hvilket svarer til et årligt forbrug på ca. 800 - 1300 kWh/person.

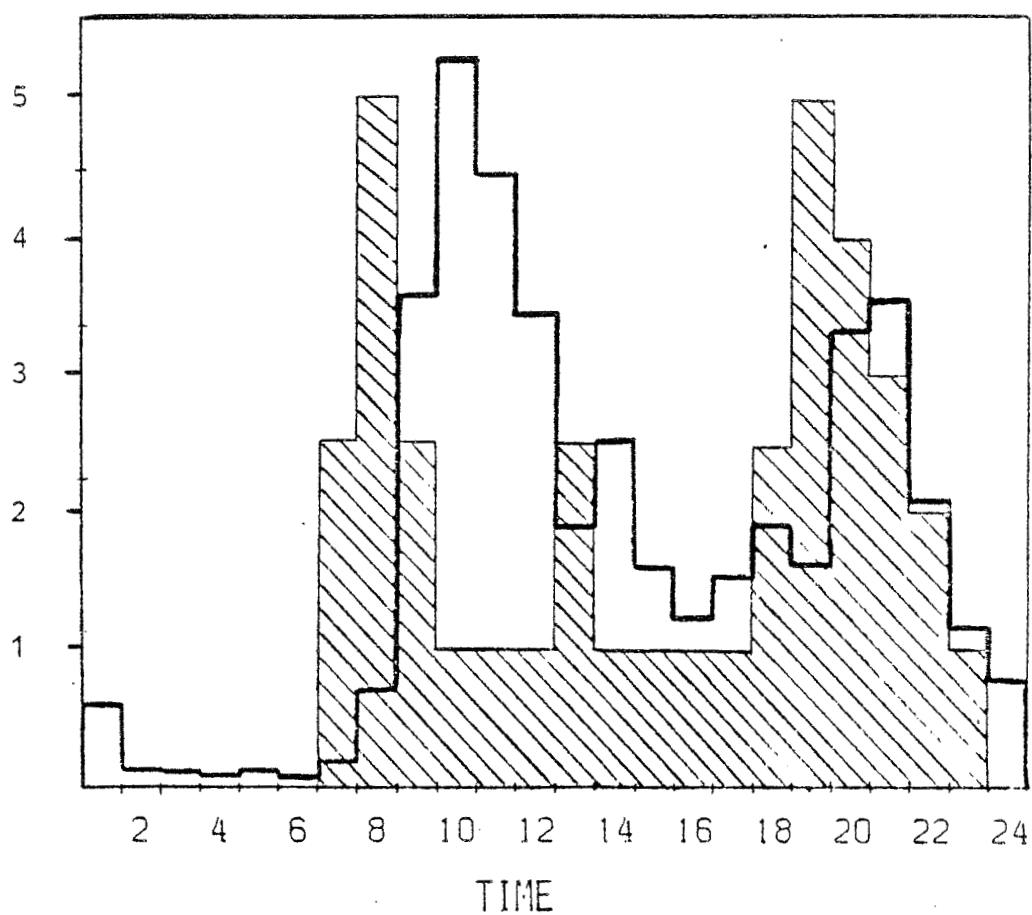
Antages det her at husstanden består af 4 personer, synes et totalt forbrug på omkring 4000 kWh/år at være repræsentativt. Dette svarer da også meget godt til den værdi, der i forbindelse med varmeplanlægningen anvendes som enhedsforbrug pr. bolig [51].

Med et konstant dagligt forbrug på 240 l opvarmet fra 10 til 50 °C fås et årsforbrug på 4050 kWh. Forbrugets fordeling over døgnet antages at være ens fra døgn til døgn, og der benyttes den "standard"-fordeling som er benyttet ved praktisk talt alle edb-beregninger i Danmark. Fordelingen er vist på figur 16.1, hvor der samtidig er optegnet en gennemsnitlig målt fordeling for Gentofte-anlægget, ref. [52]. Der ses at være rimelig god overensstemmelse, men iøvrigt har beregninger vist, at døgnfordelingen ikke er særlig betydende for nettoudbyttets størrelse.

Ved beregninger af anlæggets drift vil vejrpåvirkningerne, især solindfaldet, variere betydeligt fra dag til dag. Det skønnes derfor ikke nødvendigt også at lade forbruget variere, hvorfor der er benyttet samme forbrug hver dag. Derimod bør man nok, hvad der dog ikke gøres her, tage hensyn til en vis sæsonvariation. F.eks. viser undersøgelsen i [50], at forbruget er større i forårs- og efterårsperioderne end i sommerperioden. Dette skyldes sandsynligvis ferieophold og lignende, hvorved boligerne benyttes mindre. Som tidligere anført gælder det, at hvis der ikke er noget forbrug, så er nettoydelsen også lig med nul.

BRUGSVANDSFORBRUGET STANDARDFORDELING OVER DØGNET
SAMMENLIGNET MED EN MÅLT, REF, [51]

RELATIV FORDELING



- MALTE FORDELING (110 TIMER)
- ▨ STANDARDFORDELING I EDB-BEREGNINGER

Figur 16.1

Figur 16.2 viser solvarmeoverførslen til varmelageret og nettoydelsen, som den beregnes med referenceanlægget og de målte klimadata fra april 1978 i Værløse. Af figuren fremgår det tydeligt hvilken udjævnende virkning varmelageret har, idet solvarmetilførslen varierer mellem 0 og 20 kWh/dag, mens nettoydelsen svinger knap så meget mellem 3 og 10 kWh/dag, men ingen af dagene når helt at dække forbruget på ca. 11 kWh/dag.

16.3 Tidssteppets indflydelse

De hidtidige edb-simuleringer med Referenceårets vejrdata har været bundet af, at alle klimadatenes er timeværdier. Med målingerne i Værløse, hvor solindfaldet er målt hver 10.ende minut, er det nu muligt at vurdere, hvilken indflydelse det har at benytte simuleringstidsstep på 10 min. fremfor en time.

For april 1978 er forskellen mellem solfangerudbyttet beregnet med tidsstep på 10 min og 60 min. Denne forskel er sammen med solindfaldet optegnet på figur 16.3. Det ses heraf, at visse dage er det beregnede udbytte større, når der benyttes tidsstep på 10 min. end når der benyttes 1 time. Andre dage er det omvendt. Der er tilsyneladende heller ingen sammenhæng med solindfaldet. En lille tendens synes der dog at være til at det store tidsstep medfører lidt større udbytte. For måneden som helhed er det fundet at være godt 1% større.

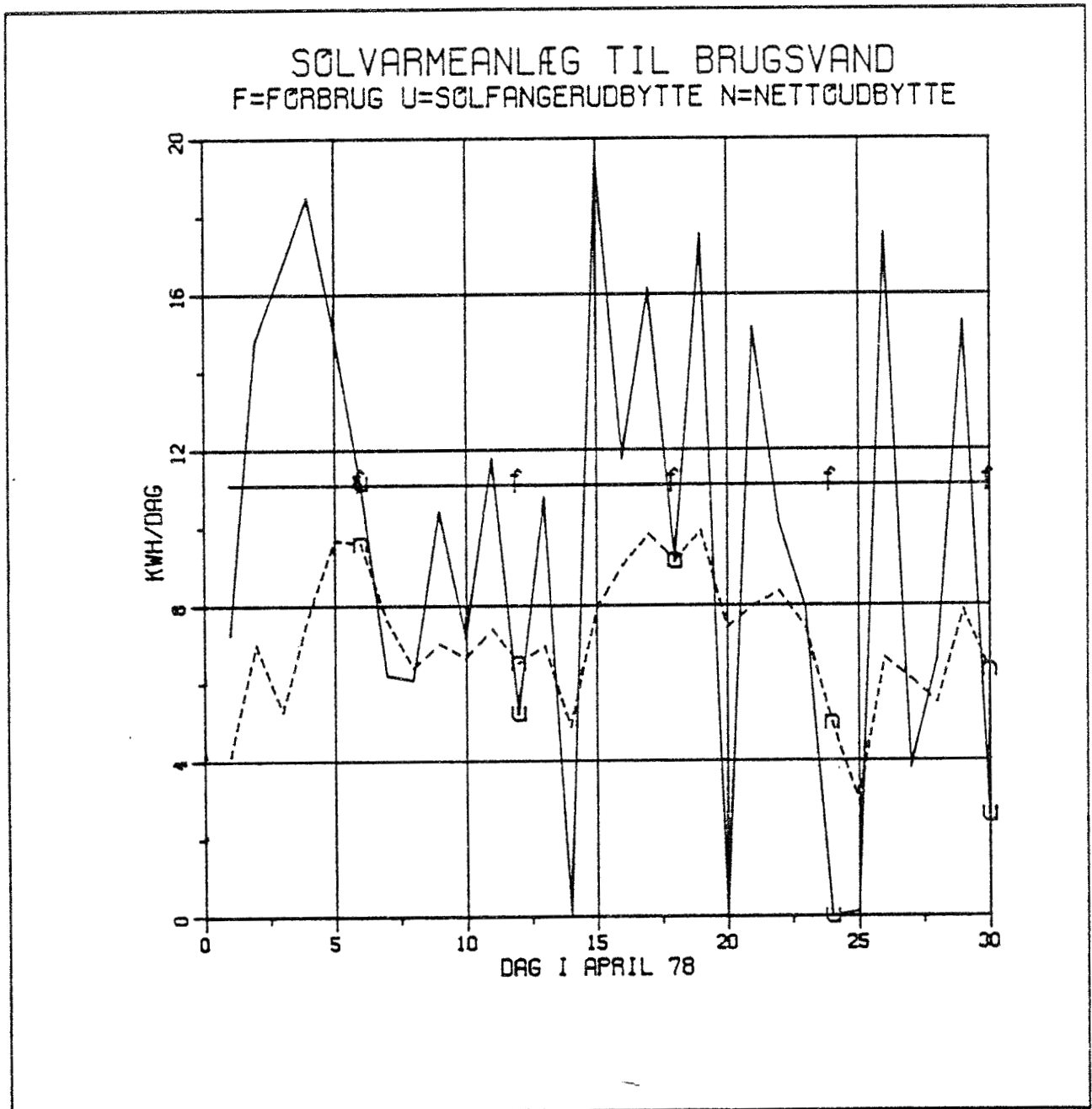
Det sluttet af de her gennemførte beregninger, at tidssteppets størrelse praktisk talt ingen indflydelse vil have på det beregnede udbytte, i hvert fald så længe det kun varierer mellem 10 og 60 minutter.

16.4 Solfangerens varmekapacitet

Ved tidligere beregninger af solfangerydelsen, f.eks. i [53], er der ikke taget hensyn til solfangerens varmekapacitet. Gøres der dette med de i dette arbejde angivne

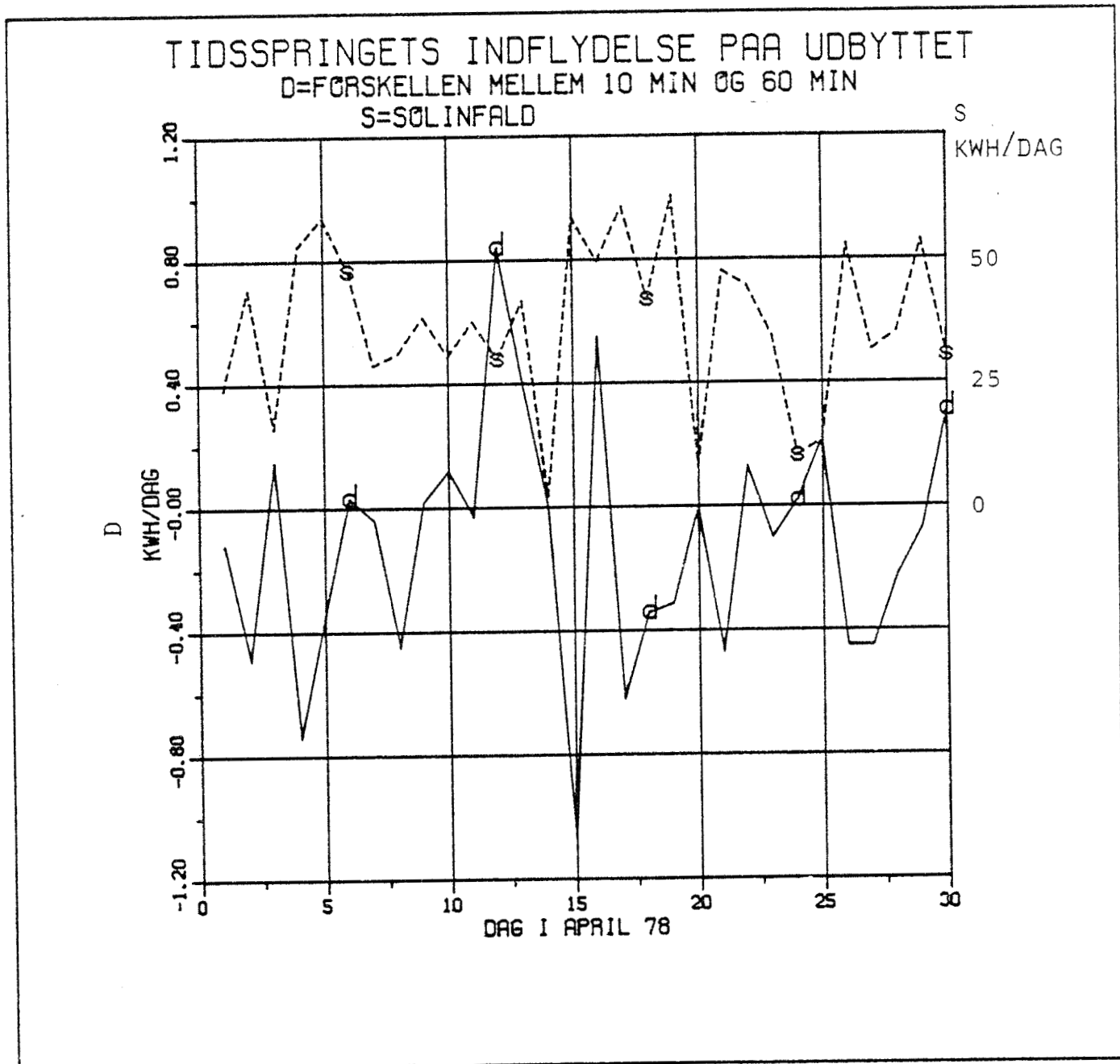
REFERENCEANLÆGGETS BEREGNEDE YDELSER I APRIL 1978

SOLFANGER = 10 M²
VARMELAGER = 0,5 M³
VARMTVANDSFORBRUG = 240 L/DØGN, 10-50 °C



Figur 16.2

FORSKELLEN MELLEM REFERENCEANLÆGGETS SOLFANGERUD-
BYTTE BEREGNET MED TIDSSSTEP PÅ HENHOLDSVIS 10 MIN,
OG 1 TIME UDEN HENSYNTAGEN TIL VARMEKAPACITET OG
RØRTAB



Figur 16.3

ligninger, findes forskellen fra referenceanlæggets solfangerudbytte ved beregninger henholdsvis uden varmekapacitet og med en mere end dobbelt så stor kapacitet ($(mC)_e = 40 \text{ kJ/}^\circ\text{C/m}^2$) som vist på figur 16.4. Uden varmekapacitet ses der at være dage, hvor udbyttet er større og dage hvor det er mindre end referenceanlæggets. Er der derimod tale om en solfanger med stor varmekapacitet, er der praktisk talt hver dag tale om et mindre udbytte, der summeret gennem måneden udgør godt 2% af referenceanlæggets solfangerydelse.

Det kan heraf sluttet, at fejlen ved at regne solfangerens ydelse uden hensyntagen til varmekapaciteten er beskeden. Selv med meget store varmekapaciteter findes højst en reduktion i solfangerudbyttet på nogle få procent, hvilket bekræftes af målinger i [54].

16.5 Klimadata m.v.

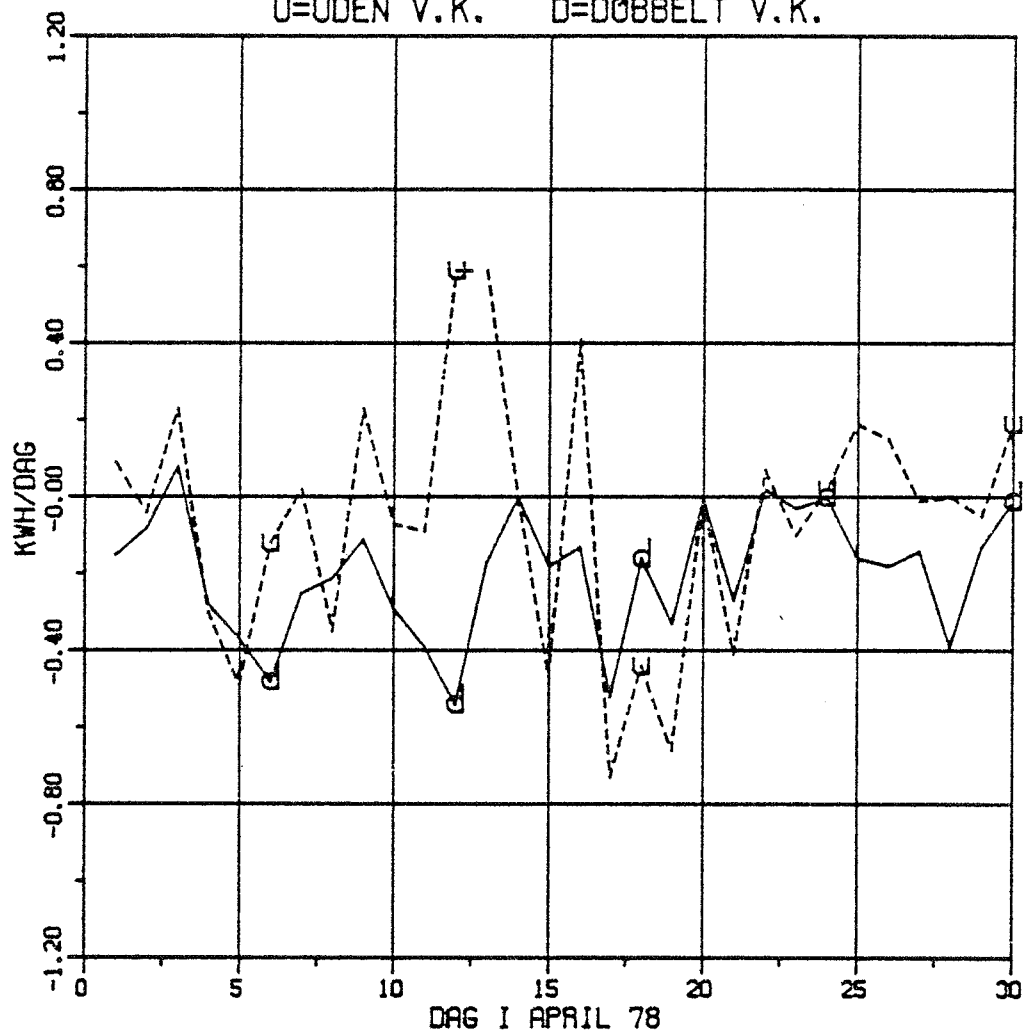
Ved edb-beregninger af solvarmeanlægs forventede gennemsnitlige årlige ydelser er Referenceåret hidtil benyttet. Som angivet i kap. 9 vil en anden udvælgelsesprocedure og en længere årrække medføre valg af et lidt anderledes sammensat referenceår, kaldet "nyt referenceår".

Dette nye referenceår vil i det følgende blive anvendt som et middelår, hvorved beregninger udført hermed antages at give solvarmeanlægs gennemsnitlige årsydelse.

For at antyde hvilke ændringer i nettoydelse og dækningsgrad der kan forventes i forhold til tidligere beregninger ved dels at tage hensyn til varmekapacitet og rørenes varmetab, dels at benytte det nye referenceår, er der med referenceanlæggets grunddata udført nogle beregninger, hvis resultater er angivet i tabel 16.2.

FORSKELLEN MELLEM REFERENCEANLÆGGETS SOLFANGERUDBYTTE OG
BEREGNINGER HENHOLDSVIS UDEN OG MED MEGET STOR VARMEKAPA-
CITET I SOLFANGER, TIDSSTEP 10 MIN, OG UDEN HENSYNTAGEN
TIL RØRTAB

SOLVARMEANLÆG SIMULERET MED VARMEKAPACITET
FØRSKEL I UDBYTTE FRA REFERENCEANLÆG
U=UDEN V.K. D=DØBBELT V.K.



Figur 16.4

Af tabellen fremgår det at anvendelse af den valgte solfanger (tabel 16.1) med en effektivitet som figur 11.6 i stedet for det i [38] angivne explicitte udtryk medfører et fald i dækningsgrad på ca. 1%. Tilsvarende reduktion fås ved hensyntagen til varmekapaciteten i solfangeren.

Tabel 16.2 Beregninger med brugsvandsanlæg

Solfangerareal = 10 m²
 Varmtvandsforbrug = 4050 kWh/år
 Varmelager = 0,5 m³

Beregning nr.	Solfanger	Varmekapacitet i solfanger	Rørtab (kapacitets- og varmetab)	Vejret	Dækningsgrad %
1	ref.[38]	nej	nej	Ref.år	59
2	fig.11.6	nej	nej	Ref.år	58
3	fig.11.6	ja	nej	Ref.år	57
4	fig.11.6	ja	ja	Ref.år	55
5	fig.11.6	ja	ja	Nyt ref.år	52

Solfanger: varmekapacitet = 132 kJ/°C
 Rørtab: varmekapacitet = 50 kJ/°C
 varmetab = 5 W/°C

Beregning nr. 5 = referenceanlæg

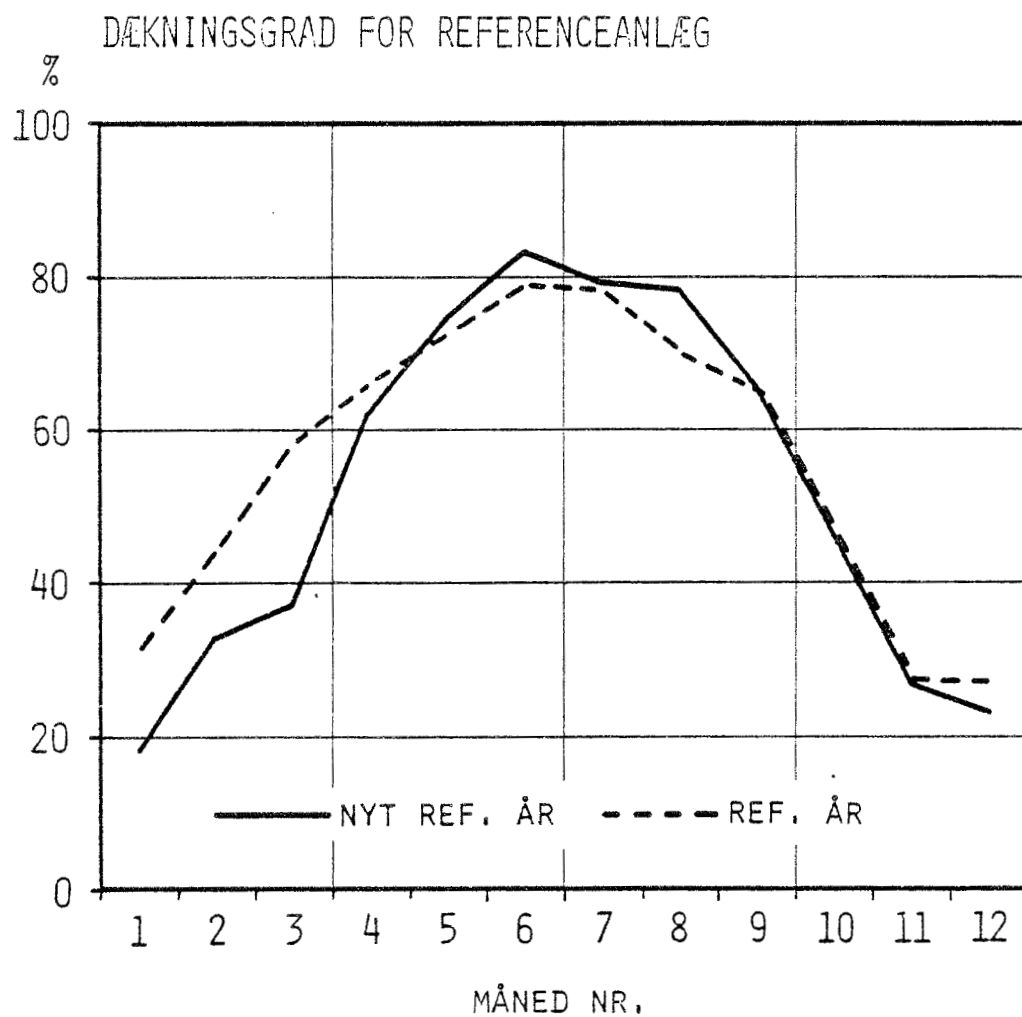
Hensyntagen til kapacitets- og varmetab i solfangerkredsen medfører yderligere en reduktion i ca. 2% i dækningsgraden, mens brug af nyt referenceår giver et fald på ca. 3%.

Alt i alt fås således at en beregning, hvor der tages videst muligt hensyn til varmekapaciteter, varmetab m.v. samt brug af klimadata med en lidt anden fordeling gennem året, medfører en reduktion i dækningsgraden på ca. 7%, hvilket svarer til en reduktion i nettoydelsen på ca. 12%, i forhold til tilsvarende tidligere angivne beregningsresultater, f.eks. i [21] og [53].

Der er i dette arbejde dog ikke taget hensyn til den temperaturstratificering, der helt naturligt vil opstå i den benyttede varmelagerkonstruktion. I praksis vil der derfor kunne opnås et højere nettoudbytte end her beregnet, da temperaturen omkring varmeveksleren i hvert fald i perioder vil være lavere end varmelagerets middeltemperatur, hvilket medfører et forøget udbytte. Hvor meget ydelsen forøges, er endnu ikke fuldt klarlagt. Foreløbige beregninger tyder på, at forøgelsen er omkring 10%, dvs. af samme størrelsesorden som den netop fundne reduktion. F.eks. er der i [55] i forhold til fuldstændig opblanding beregnet, at hensyntagen til optimal stratificering giver en stigning i ydelsen på 16-17%.

Referenceanlægget beregnet med henholdsvis gammelt og nyt referenceår (beregning nr. 4 og 5 i tabel 16.2) giver de på figur 16.5 viste månedlige dækningsgrader. Specielt ses det, at med det nye år fås væsentlig lavere dækningsgrader i begyndelsen af året, mens de til gengæld er lidt højere i sommerperioden.

SOLFANGERAREAL = 10 M²
VARMELAGER = 0,5 M³
VARMTVANDSFORBRUG = 4050 KWH/ÅR



Figur 16.5

17. PARAMETERANALYSER AF BRUGSVANDSANLÆGGET

Med udgangspunkt i det opstillede referenceanlæg og med brug af det nye referenceår kan der foretages en række analyser af de forskellige indgående komponenters indflydelse på anlæggets årlige nettoydelse. Sådanne analyser er tidligere med lidt andre forudsætninger gennemført f.eks. i [48] og [53]. En stor del af de der angivne resultater vil dog umiddelbart kunne overføres til også at gælde dette referenceanlæg. Dette gælder f.eks. varmevekslerens varmeoverføringsevne, den i solfangerkredsen cirkulerende vandmængde, temperaturen af det varme brugsvand osv.. I dette arbejde belyses derfor hovedsagelig de forhold der ikke indgår i de tidligere beregninger, nemlig varmekapacitet i solfanger, solfangerkredsens varme- og kapacitetstab, tankstørrelse og styresystemet.

17.1 Varmekapacitet i solfangeren

I afsnit 16.4 blev solfangerens udbytte i afhængighed af varmekapacitet kort behandlet. Fokuseres i stedet på anlæggets nettoydelse og beregnes denne i afhængighed af solfangerens effektive varmekapacitet, fås resultaterne som anført i tabel 17.1. Det fremgår heraf, at varmekapaciteten har ringe indflydelse på nettoydelsen. Derimod findes en vis indflydelse på driftstiden, der falder med stigende varmekapacitet. Med andre ord opnås altså, at en stor varmekapacitet medfører at anlægget undgår nogle driftsperioder, hvor solfangerydelsen er af samme størrelse som varme- og kapacitetstabene i solfangerkredsen.

17.2 Solfangerkredsens kapacitets- og varmetab

Behandlingen af solfangerkredsens varmekapacitet kan ikke ske uafhængigt af kredsens isolering, idet kapacitetstabet hovedsageligt skyldes, at rørene med indhold på grund af varmetabet til omgivelserne får et temperaturfald mellem to på hinanden følgende driftsperioder.

Tabel 17.1 Effektiv varmekapacitet i solfanger			
Solfangerareal = 10 m ² Varmtvandsforbrug = 4050 kWh/år Varmelager = 0,5 m ³			
Beregning nr.	Effektiv varmekapaci- tet (mC) _e kJ/°C/m ²	Antal driftstimer h/år	Nettoydelse kWh/m ²
1	3,6	1820	212
2	13,2	1790	211
3	22,6	1750	211
4	42,6	1710	209
Beregning nr 2 = referenceanlæg			

Tabel 17.2 Solfangerkredsens kapacitets- og varmetab			
Solfangerareal = 10 m ² Varmtvandsforbrug = 4050 kWh/år Varmelager = 0,5 m ³			
Beregning nr.	Rør- kapacitet kJ/°C/m ²	Varmetabs- koefficient W/°C/m ²	Nettoydelse kWh/m ²
1	0	0	218
2	0	0,5	213
3	1	0,5	212
4	5	0,5	211
5	10	0,5	210
6	20	0,5	209
7	5	1,0	206
8	5	2,0	195
9	20	2,0	189
Beregning nr. 4 = referenceanlæg			

I tabel 17.2 er sammenhængen mellem varmekapacitet, -tabskoefficient og nettoydelse angivet for en række beregninger. Det ses heraf, at stigende varmekapacitet medfører en faldende nettoydelse. Dette fald er dog relativt beskedent. F.eks. medfører en 4-dobling af varmekapaciteten i forhold til referenceanlæggets kun et fald på ca. 1%. Reduceres derimod rørenes isolering således at varmetabskoefficienten 4-dobles, falder ydelsen ca. 8%, og med denne store varmetabskoefficient vil en 4-dobling af kapaciteten i dette tilfælde reducere nettoydelsen med ca. 3%.

Det fremgår af ovennævnte, at kapacitetstabet har en indflydelse på nettoydelsen, der er beskedent og væsentlig mindre end varmetabets. Der er derfor udført en yderligere analyse af varmetabets indflydelse.

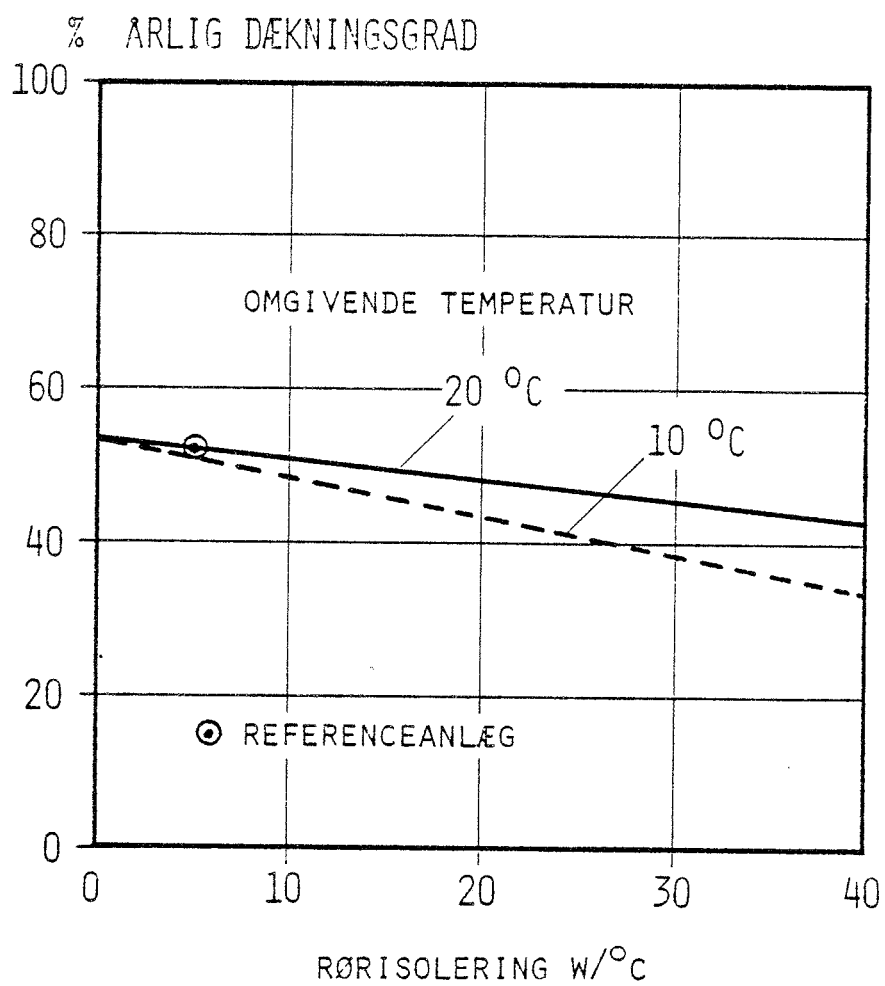
På figur 17.1 er den årlige dækningsgrad optegnet i afhængighed af varmetabskoefficient og rørenes omgivende temperatur. Det fremgår heraf at dækningsgraden og dermed nettoydelsen falder praktisk talt lineært med stigende varmetabskoefficient.

Man vil således finde en betydelig reduktion i nettoydelsen, såfremt rørisoleringen er mangelfuld. På figur 17.2 fremgår det tydeligere hvorledes varmetabet stiger i afhængighed af faldende isoleringstykkelser. Samtidig ses det at solfangerydelsen dog også stiger, men ikke i samme takt, hvorfor rørenes varmetab udgør en stærkt voksende andel af solfangerudbyttet. Fra at udgøre under 10% af referenceanlæggets solfangerydelser vokser varmetabet til over 50% for de dårligst isolerede rør anbragt i kølige omgivelser.

17.3 Varmelagerstørrelse og -isolering

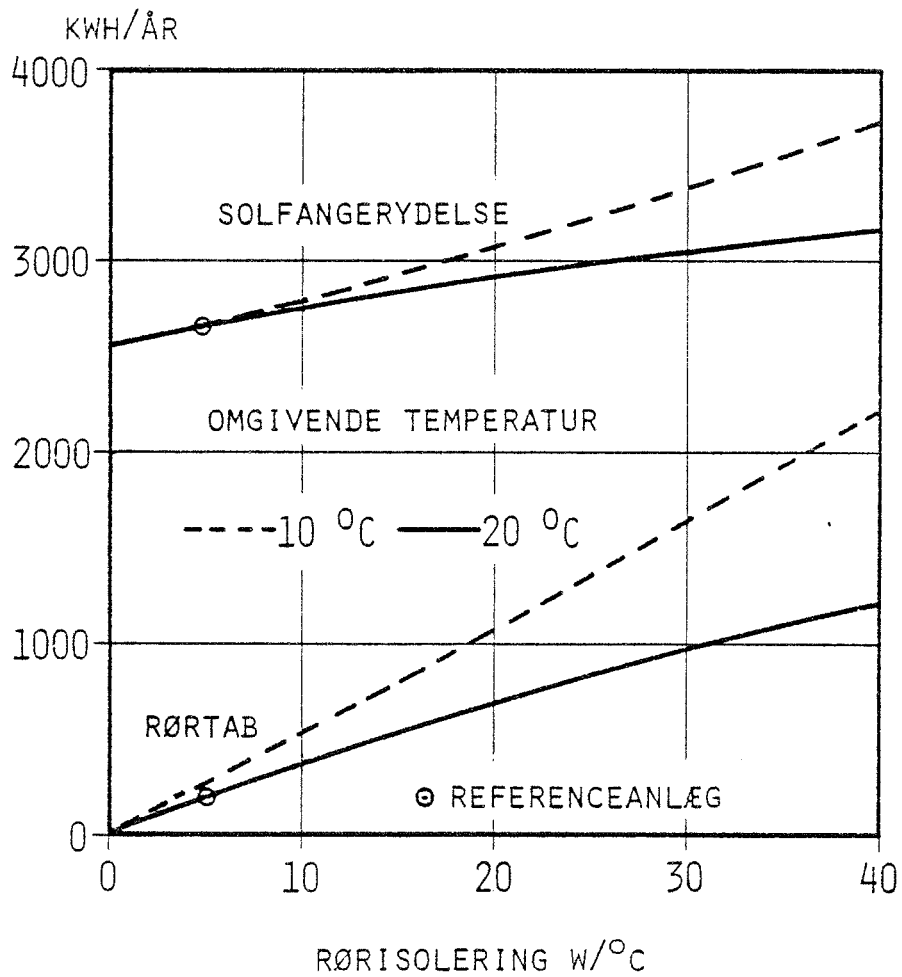
Størrelsen af varmelageret i forhold til solfangerarealet har været genstand for adskillige analyser. Almindeligvis antages at lagervolumener mellem 50 og 100 l/m² er det "optimale", når det drejer sig om vandlagre.

SOLFANGERAREAL = 10 M²
VARMELAGER = 0,5 M³
VARMTVANDSFORBRUG = 4050 KWH/ÅR



Figur 17.1

SOLFANGERAREAL = 10 M²
VARMELAGER = 0,5 M³
VARMTVANDSFORBRUG = 4050 KWH/ÅR



Figur 17.2

På figur 17.3 er med de heri angivne forudsætninger den beregnede sammenhæng mellem lagervolumen, isoleringstykkelse og nettoydelse optegnet. Det fremgår heraf at lagervolumener over $0,5 \text{ m}^3$ svarende til 50 l/m^2 solfanger ikke medfører mærkbare ændringer i nettoydelsen. Derimod fås kraftigt faldende ydelser, såfremt lagervolumenet bliver væsentlig mindre. Lagerstørrelsen skal dog ikke alene vurderes i forhold til solfangerarealet, men også i forhold til det daglige vandforbrug. Lagerstørrelser mindre end dette synes at medføre betydelig reduktioner i nettoydelse, specielt i sommermånederne.

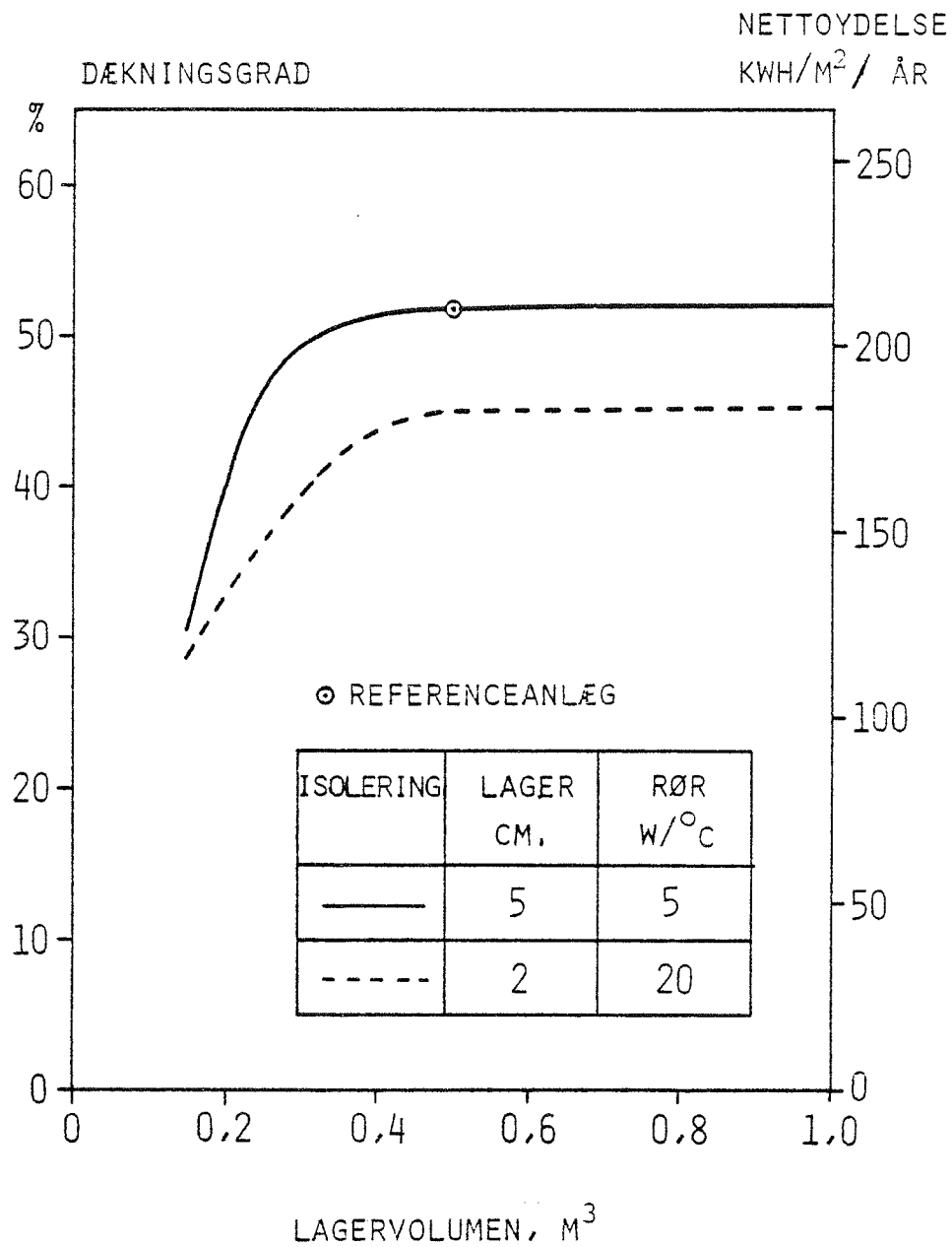
Af figuren ses desuden at med faldende isoleringstykkelse reduceres ydelsen. Det største fald skyldes dog reduktionen i rørenes isolering, hvorfor dækningsgrad og varmetab fra lageret alene i afhængighed af lagerets isolering er optegnet på figur 17.4.

På figur 17.5 er angivet dækningsgradens variation gennem året for 2 isoleringstykkelser. Reduktionen i dækningsgrad på grund af en lille isoleringstykkelse sker hovedsagelig i sommerperioden, hvor lageret er varmest. I vinterperioden er omgivelsernes temperatur sommetider højere end lagertemperaturen, da der kan forekomme lange tidsrum uden solfangerdrift. Herved bliver lagertemperaturen bestemt af det kolde vands temperatur og der sker en varmetilførsel fra omgivelserne, således at det dårligt isolerede lager får højere dækningsgrad end det velisolerede.

17.4 Styresystemet

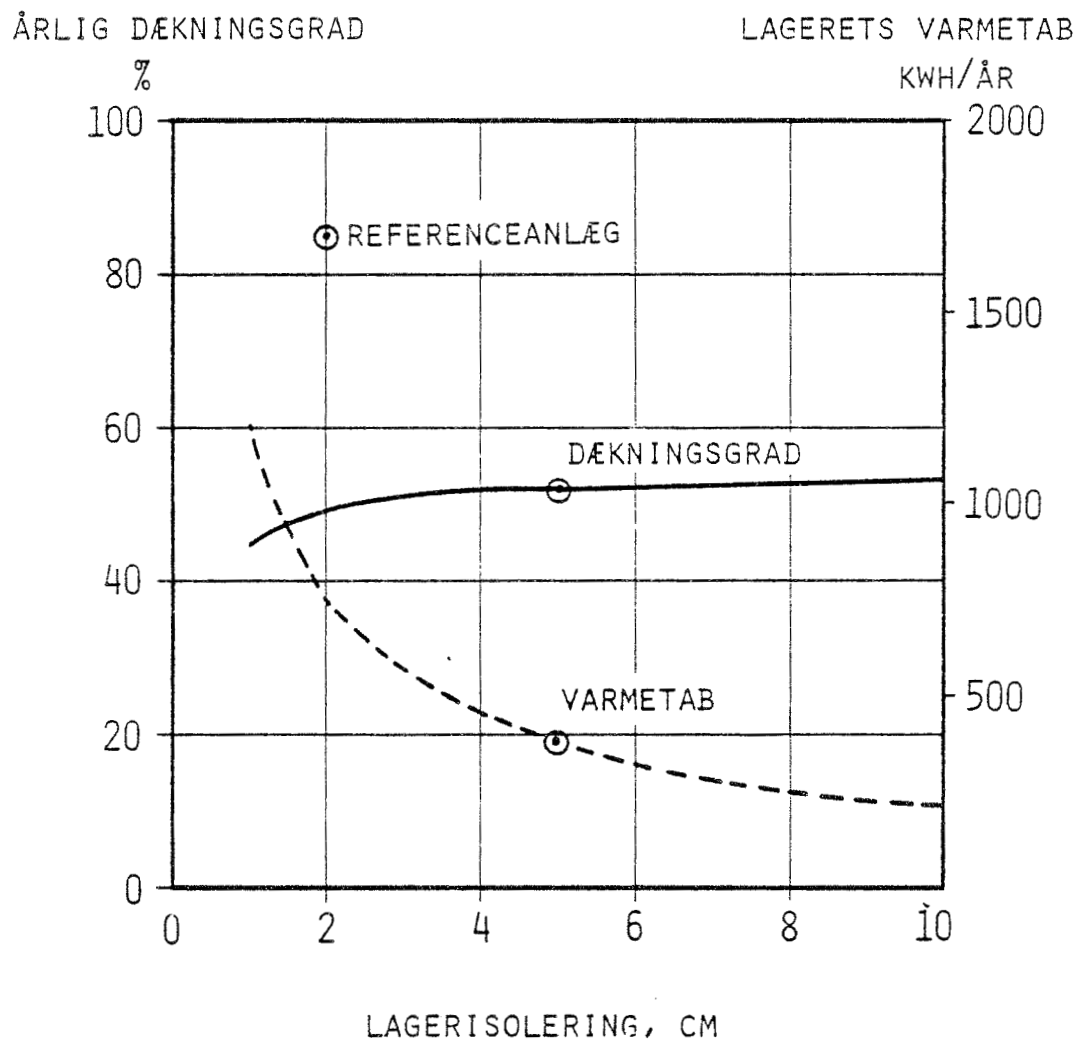
I referenceanlægget er styresystemet regnet at virke ideelt, dvs. solfangerdriften starter, når middeltemperaturen i absorberen bliver højere end lagerets middeltemperatur og stopper når det modsatte er tilfældet. At det er en ideel styring ud fra de to temperaturer, er vist på figur 17.6, hvor nettoydelsen er anført i afhængighed af

SOLFANGERAREAL = 10 M²
 VARMTVANDSFORBRUG = 4050 KWH/ÅR



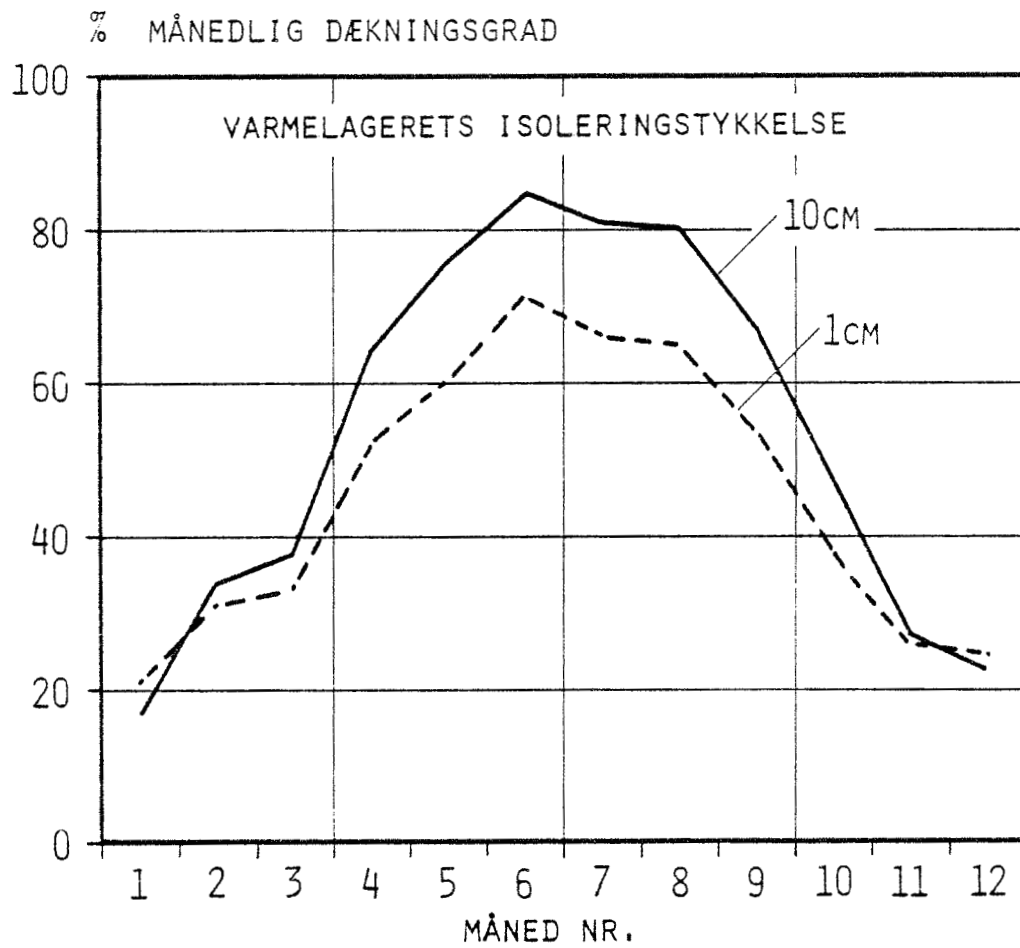
Figur 17.3

SOLFANGERAREAL = 10 M²
VARMELAGER = 0,5 M³
VARMTVANDSFORBRUG = 4050 KWH/ÅR



Figur 17.4

SOLFANGERAREAL = 10 M²
VARMELAGER = 0,5 M³
VARMTVANDSFORBRUG = 4050 KWH/ÅR

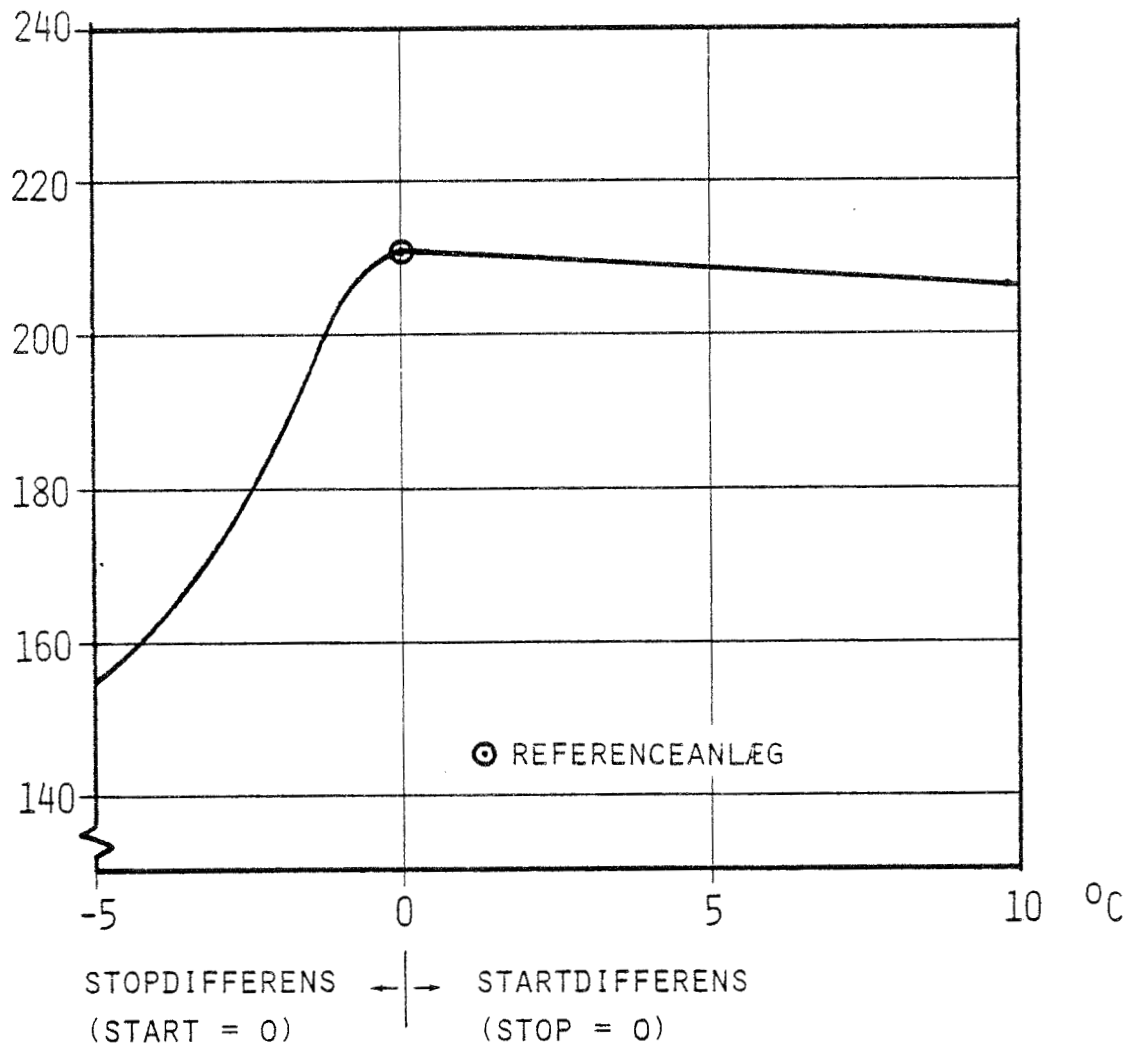


Figur 17.5

START- OG STOPTEMPERATURENS INDFLYDELSE PÅ SOLVARME-
ANLÆGGETS NETTOYDELSE, DIFFERENCE MELLEM ABSORBER-
OG TANKTEMPERATUR,

NETTOYDELSE

kWh/m²/ÅR



Figur 17.6

start- og stoptemperaturdifferenserne, dvs. de over- og undertemperaturer man ønsker før solfangerdriften henholdsvis starter og stopper.

Af figuren fremgår det at stigende startdifferenser, under forudsætning af en stopdifferens på 0 °C, kun medfører et svagt fald i nettoydelsen, hvorimod negative stopdifferenser, under forudsætning af startdifferens på 0 °C, kan medføre betydelige reduktioner heraf. Det er med andre ord ikke særlig kritisk, om temperaturføleren ved opstart helt præcist måler middel absorberttemperaturen eller en der er lidt lavere. Derimod er det kritisk, at absorberttemperaturen måles korrekt når differenstermostaten skal stoppe pumpedriften. I den forbindelse kunne en anden styreform, nemlig måling af temperaturdifferensen over ind- og udløb til varmeveksleren måske vise sig at være mere hensigtsmæssig til afbrydelse af solfangerdriften.

18. DIMENSIONERING AF SOLVARMEANLÆG

De gennemførte parameteranalyser viser enkelte elementers indflydelse på det samlede anlægs ydelser. Derimod kan analyserne ikke alene benyttes til at fastlægge de absolutte størrelser af f.eks. solfanger og varmelager, når varmekonsumet er kendt. En fastlæggelse heraf kræver som regel som minimum at ydelserne sættes i forhold til anlægsinvesteringerne. Det "optimale" anlæg vil med denne simple metode således være anlægget med størst ydelse i forhold til investeringerne. Metoden kan også benyttes til at afstemme de enkelte (hoved)komponenters størrelse i forhold til hinanden, og et eksempel herpå er givet i [56], hvor størrelserne af solfanger og varmelager er fastlagt.

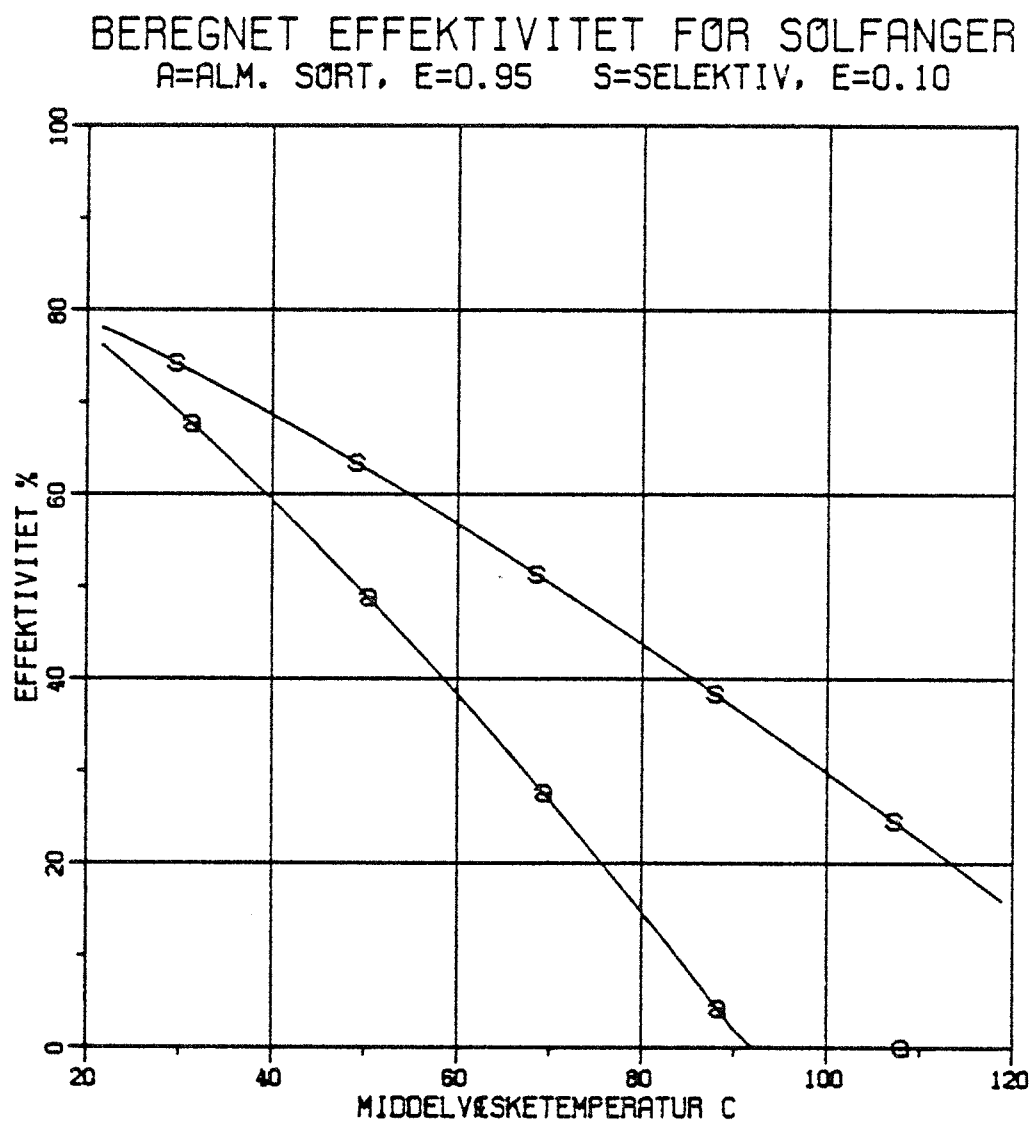
Skal størrelsen af det valgte referenceanlæg vurderes nærmere i forhold til varmtvandsforbruget, er det nødvendigt nærmere at vurdere dels nettoydelserne i afhængighed af størrelsen og dels omkostningerne forbundet med installation og drift af anlægget.

18.1 Solfangertype og -areal

Hidtil er beregningerne af referenceanlægget foretaget med en almindelig sortmalet absorber. Det er imidlertid også muligt at forsyne absorberen med en selektiv overflade, dvs. en overflade der absorberer solindfaldet lige så godt som den sorte, og som desuden har en lav emissionskoefficient, hvorved varmetabet p.g.a. strålingen mellem absorber og dæklag nedsættes væsentligt.

Med overfladens emissionskoefficient som eneste ændrede parameter er på figur 18.1 optegnet en beregnet effektivitetskurve for solfangeren med selektiv absorber. Til sammenligning er anført den tidligere beregnede (figur 11.6) effektivitetskurve. Det fremgår af figuren, at effektiviteten er forøget ganske væsentligt.

BEREGNEDE EFFEKTIVITETSKURVER FOR SOLFANGER
ID-NR 11A I [27] MED ALMINDELIG SORT OG SE-
LEKTIV ABSORBEROVERFLADE MED INDSTRÅLING
800 W/M² OG OMGIVENDE TEMPERATUR 20 °C.



Figur 18.1

Forsynes referenceanlægget med de to typer solfangere, findes dækningsgrad og nettoydelse i afhængighed af solfangerarealet som vist på figur 18.2. Med stigende solfangerareal fås stigende dækningsgrad, men faldende nettoydelse pr. m^2 solfanger.

Afbildes dækningsgradens afhængighed af nettoydelse, fås kurverne på figur 18.3. Der er for samme dækningsgrad en betydelig merydelse pr. m^2 solfanger med den selektive absorber.

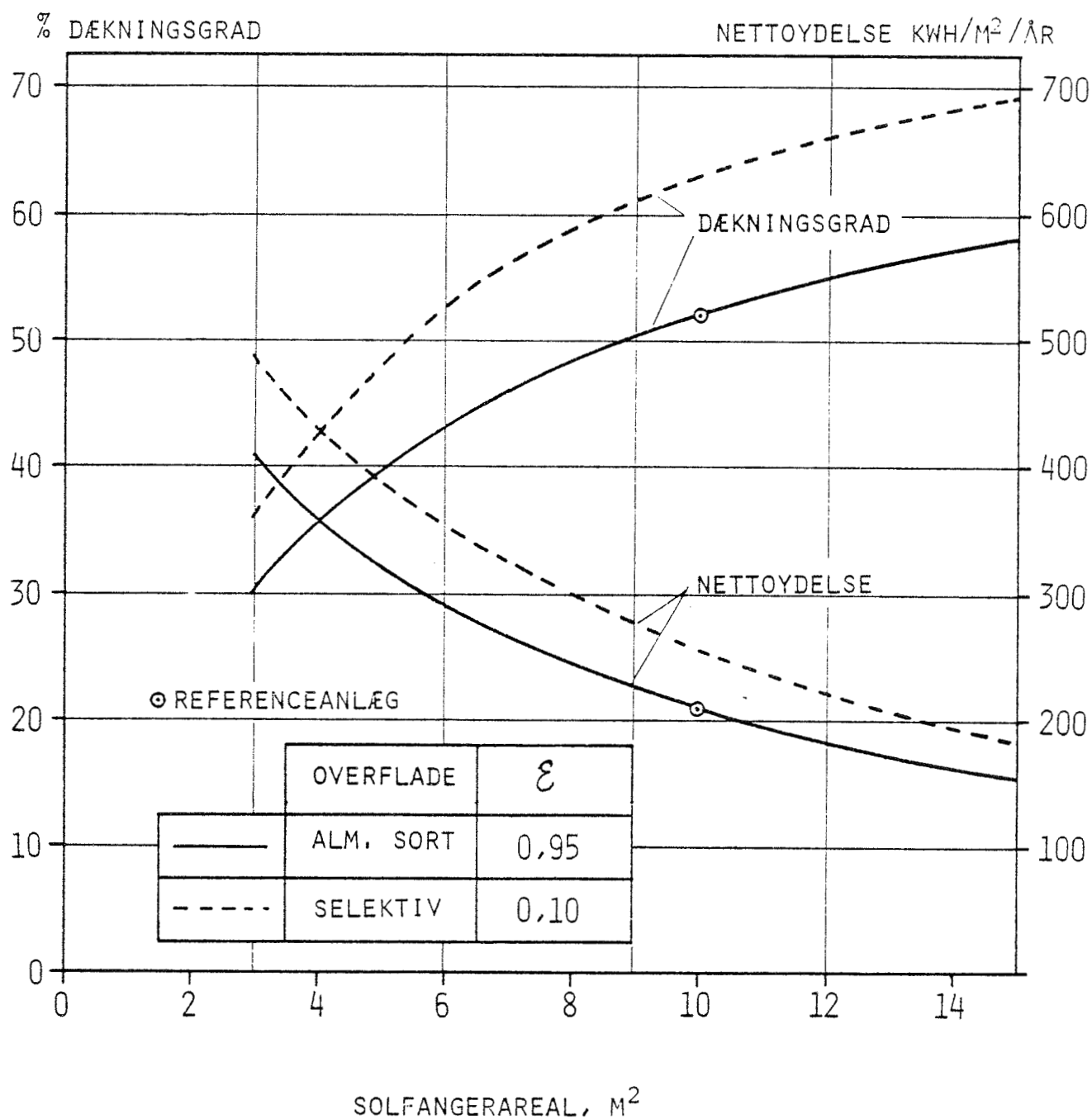
Hvor kurverne på figur 18.2 er afhængige af brugsvandsforbruget, har det vist sig at kurverne på figur 18.3 i stor udstrækning er uafhængige af forbrugets størrelse og således kan benyttes til at bestemme det nødvendige solfangerareal, der kræves for at en given dækningsgrad opnås. Omvendt kan man også beregne dækningsgraden, når varmtvandsforbruget i forhold til solfangerarealet er kendt. Dette er vist på figur 18.4 gældende for de to solfangertyper. Denne figur vil sammen med figur 18.3 med rimelig nøjagtighed kunne anvendes til at bestemme nettoydelsen i afhængighed af solfangerstørrelse og -type for brugsvandsanlæg med forskellige forbrug.

18.2 Sparet varmetab fra oliefyret

Ingen af de gennemregnede brugsvandsanlæg med små varmelagre er i stand til at dække en husholdnings årlige forbrug af varmt vand. Anlægget skal som tidligere nævnt sammenkobles med en traditionel varmekilde, hvor der i dette arbejde er valgt den i dag mest almindelige: en gasoliefyret kedel. En sådan sammenbygges ofte med en varmtvandsbeholder og kaldes en oliefyrsunit. Der stilles som nævnt krav om at varmetabet, det såkaldte tomgangstab, fra en sådan unit ikke må overstige $1\frac{1}{2}\%$ af maximalydelsen [46]. Dette svarer til at en typisk unit har et tomgangstab på ca. 350 W. Såfremt solvarmeanlægget er af en vis størrelse, vil det i perioder kunne dække varmtvandsforbruget alene, hvorfor varmetabet fra

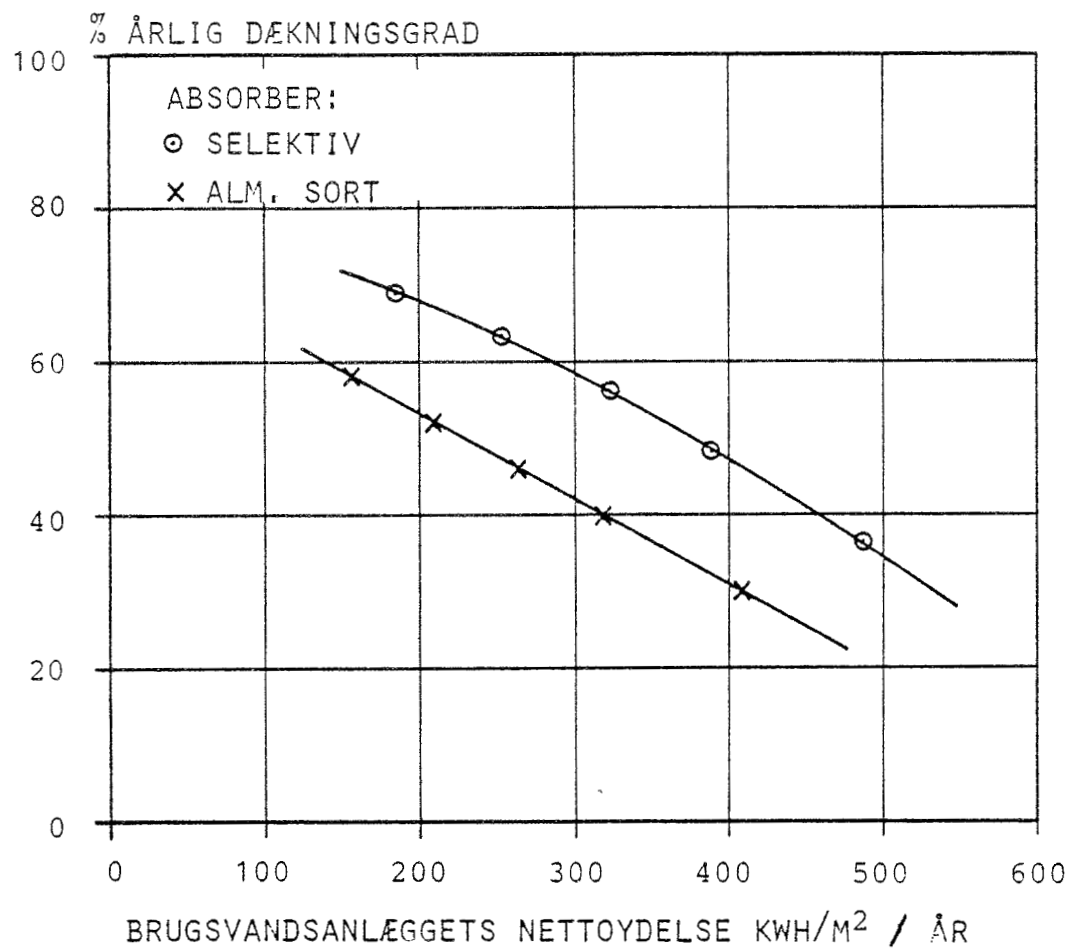
DÆKNINGSGRAD OG NETTOYDELSER FOR SOLVARMEANLÆG
MED 2 FORSKELLIGE ABSORBEROVERFLADER.

VARMELAGER = 0,5 M³
VARMTVANDSFORBRUG = 4050 KWH/ÅR

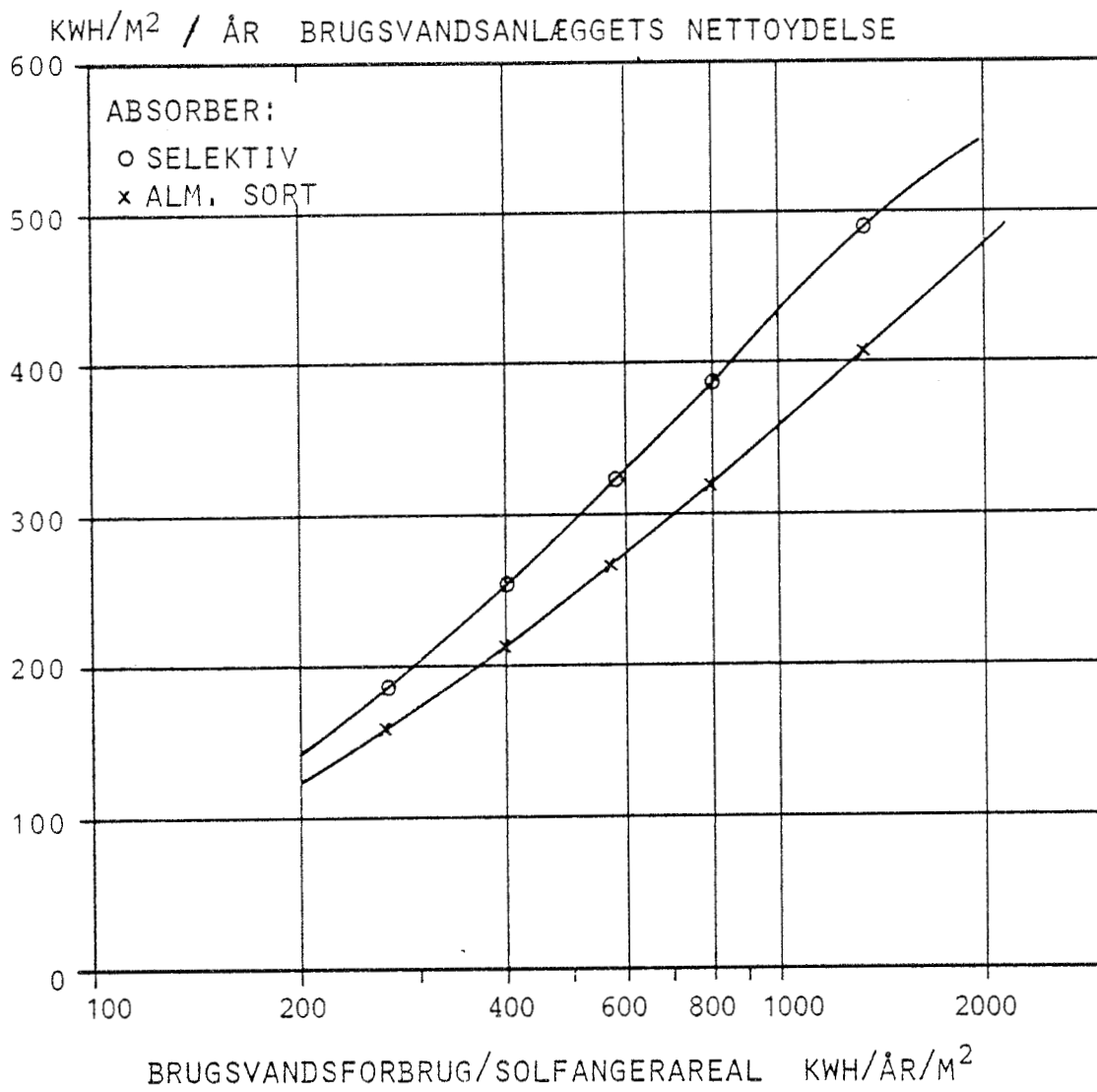


Figur 18.2

SAMMENHÆNG MELLEM NETTOYDELSE OG ÅRLIG DÆKNINGS-
GRAD FOR SOLVARMEANLÆG MED 1 DÆKLAG OG EN BRUGS-
VANDSTEMPERATUR PÅ 50 °C



Figur 18.3



Figur 18.4

oliefyrsunit'en kan undgås ved at fyret stoppes. Dette forudsætter dog, at der ikke er et andet varmebehov som skal dækkes af oliefyret.

Sammenhængen mellem årlig dækningsgrad og dækningsgraden i sommerperioden maj-september er afbildet på figur 18.5. Denne kurve er kun afhængig af vejret i det valgte klimadatasæt, sålænge der regnes med et konstant dagligt forbrug.

Antages det at en dagligt beregnet dækningsgrad på over 95% i praksis medfører, at oliefyret kan stoppes denne dag, findes ved at optælle antallet af disse dage i sommerperioden med tilnærmelse de på figur 18.6 viste sammenhænge mellem dækningsgraderne, antal dage, hvor oliefyret kan stoppes, og det derved sparede tomgangstab. Det er herved forudsat at der i hele sommerperioden ikke er et andet varmebehov, f.eks. et rumopvarmningsbehov, som forhindrer at fyret stoppes.

Henregnes det sparede tomgangstab til solfangerarealet, findes med den selektive absorber en (netto)besparelse i afhængighed af forbruget som skitseret på figur 18.7.

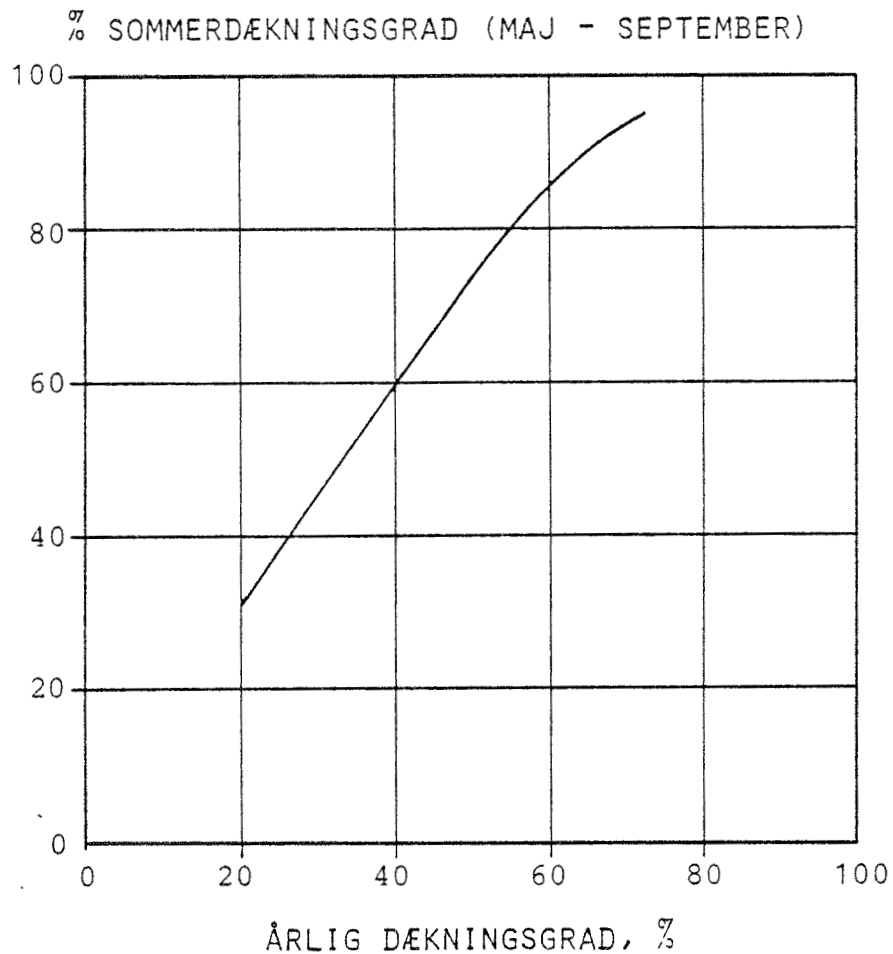
Det sparede tomgangstab er beregnet under forudsætning af at varmelageret er fuldstændig opblandet. I praksis fås der på grund af temperaturstratificeringen sandsynligvis lidt større besparelser for de små solfangerarealer, end figuren viser.

Den fundne besparelse ved stop af oliefyret skal på linie med de beregnede nettoydelse indgå i dimensioneringen af solvarmeanlæggene.

18.3 Økonomiske optimering

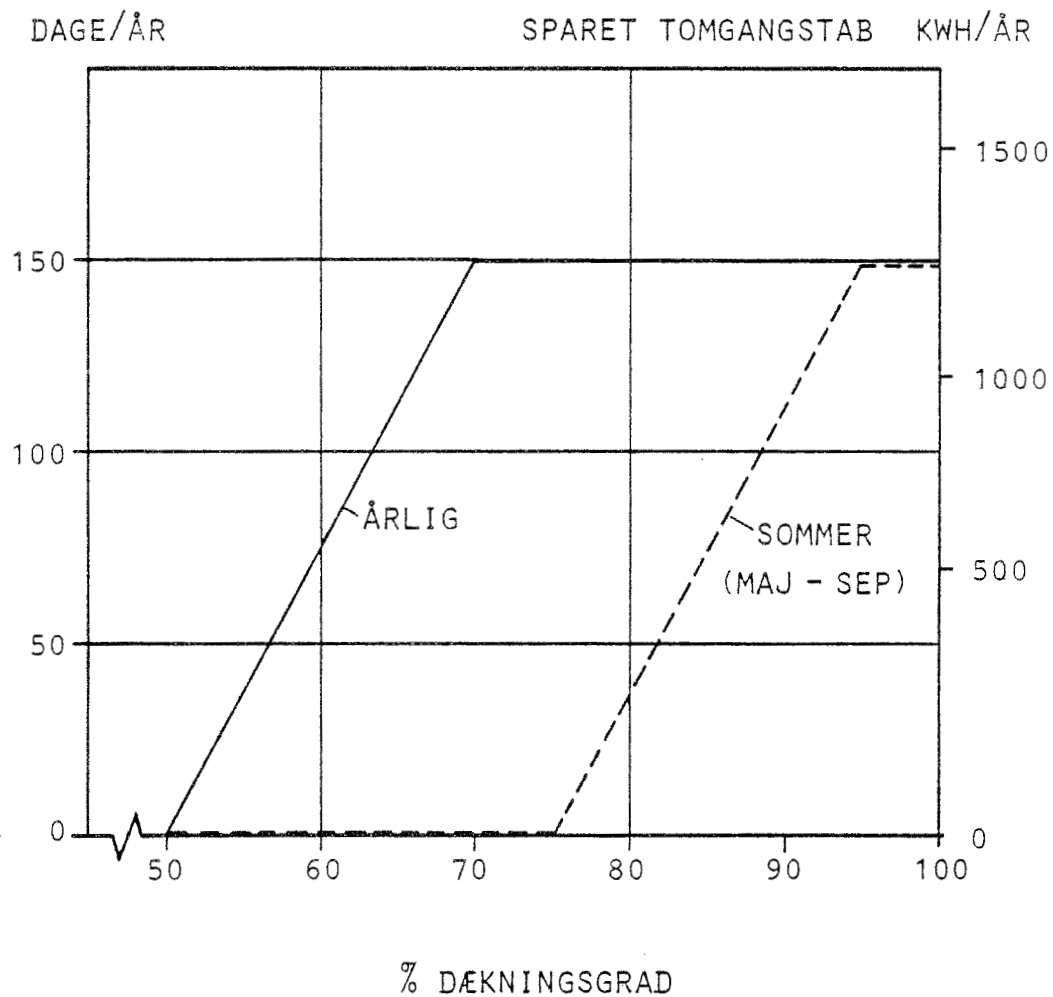
Det er relativt let med brug af forskellige økonomiske beregningsmetoder at fastlægge den økonomisk set optimale anlægsstørrelse, når nettoydelse kendes som funktion heraf. Forskellige metoder vil dog kunne give forskellige optimale størrelser, og langt de fleste teknikker forudsætter, at de fremtidige forhold er fuldt klarlagte. Resultatet af optimeringen vil således i nogen grad være af-

OMSÆTNING FRA ÅRLIG DÆKNINGSGRAD TIL DÆKNINGS-
GRAD AF FORBRUGET I SOMMERPERIODEN MAJ - SEP-
TEMBER (5 MDR.) GÆLDENDE FOR SOLVARMEANLÆG TIL
BRUGSVAND MED EN TEMPERATUR PÅ 50 °C



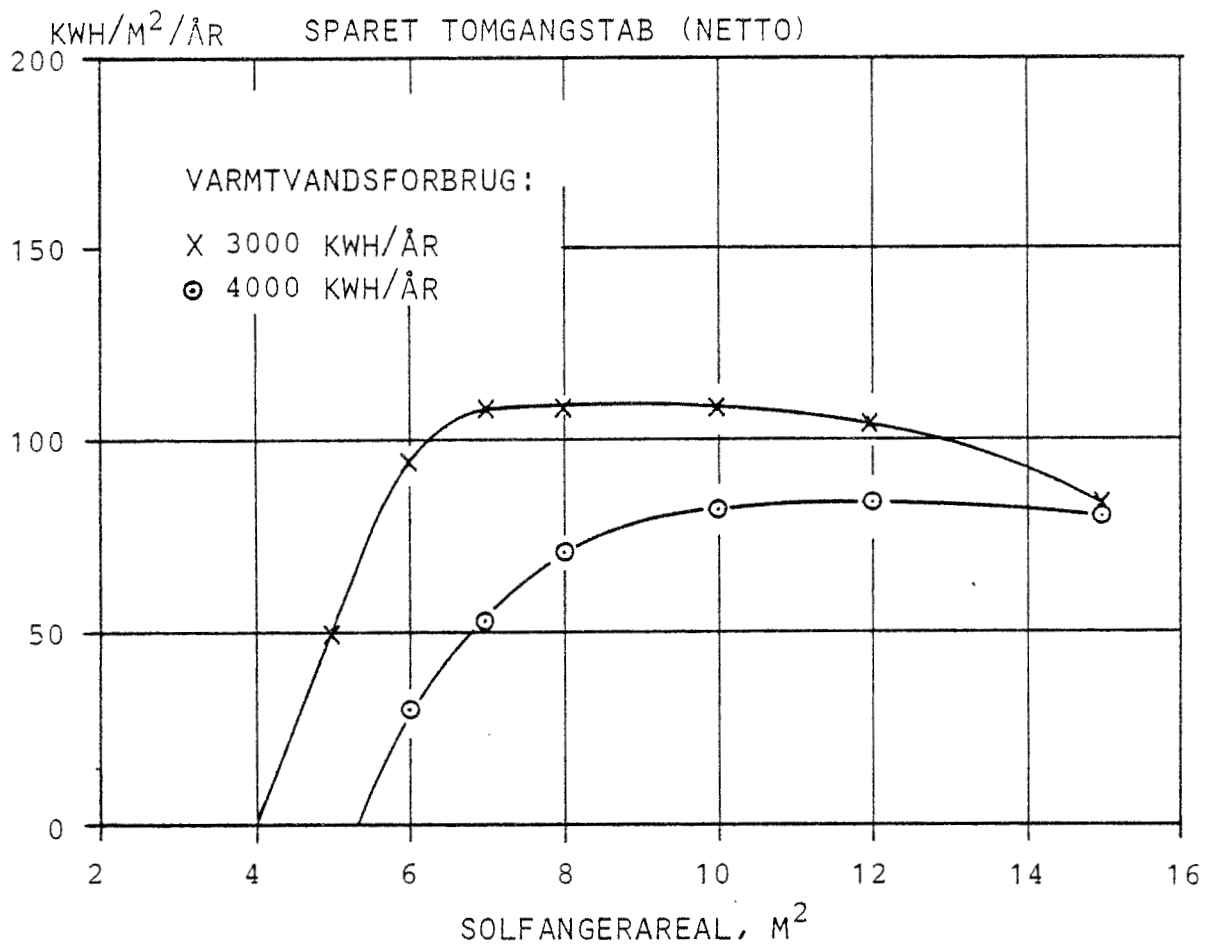
Figur 18.5

ANTAL DAGE/ÅR MED SLUKKET OLIEFYR OG DERVED SPARET
TOMGANGSTAB (NETTO) SOM FUNKTION AF DÆKNINGSGRADEN
PÅ ÅRSBASIS OG I SOMMERPERIODEN FOR BRUGSVANDSANLÆG
I KOMBINATION MED ET OLIEFYR MED TOMGANGSTAB = 350 W



Figur 18.6

SPARET TOMGANGSTAB FOR OLIEFYR I KOMBINATION MED
SOLVARMEANLÆG TIL BRUGSVAND, SOLFANGER MED 1
DÆKLAG OG SELEKTIV ABSORBER, OLIEFYRETS TOM-
GANGSTAB = 350 W



Figur 18.7

hængig af valget af metode og tro på den fremtidige udvikling.

Forskellige økonomiske analysemetoder er anført i [57] og i [52] er en af disse, nu-værdimetoden, benyttet til en samfundsmæssig vurdering af solvarmeanlæg.

Afslutningsvis vil det blive vurderet hvilken størrelse et brugsvandsanlæg med selektiv absorber skal have for privatøkonomisk set at være bedst muligt, de aktuelle forhold taget i betragtning.

Det antages på baggrund af indhentede fabrikantpriser, at solvarmeanlæggets anlægspris er som vist på figur 18.8 i afhængighed af størrelsen, karakteriseret af solfangerarealet.

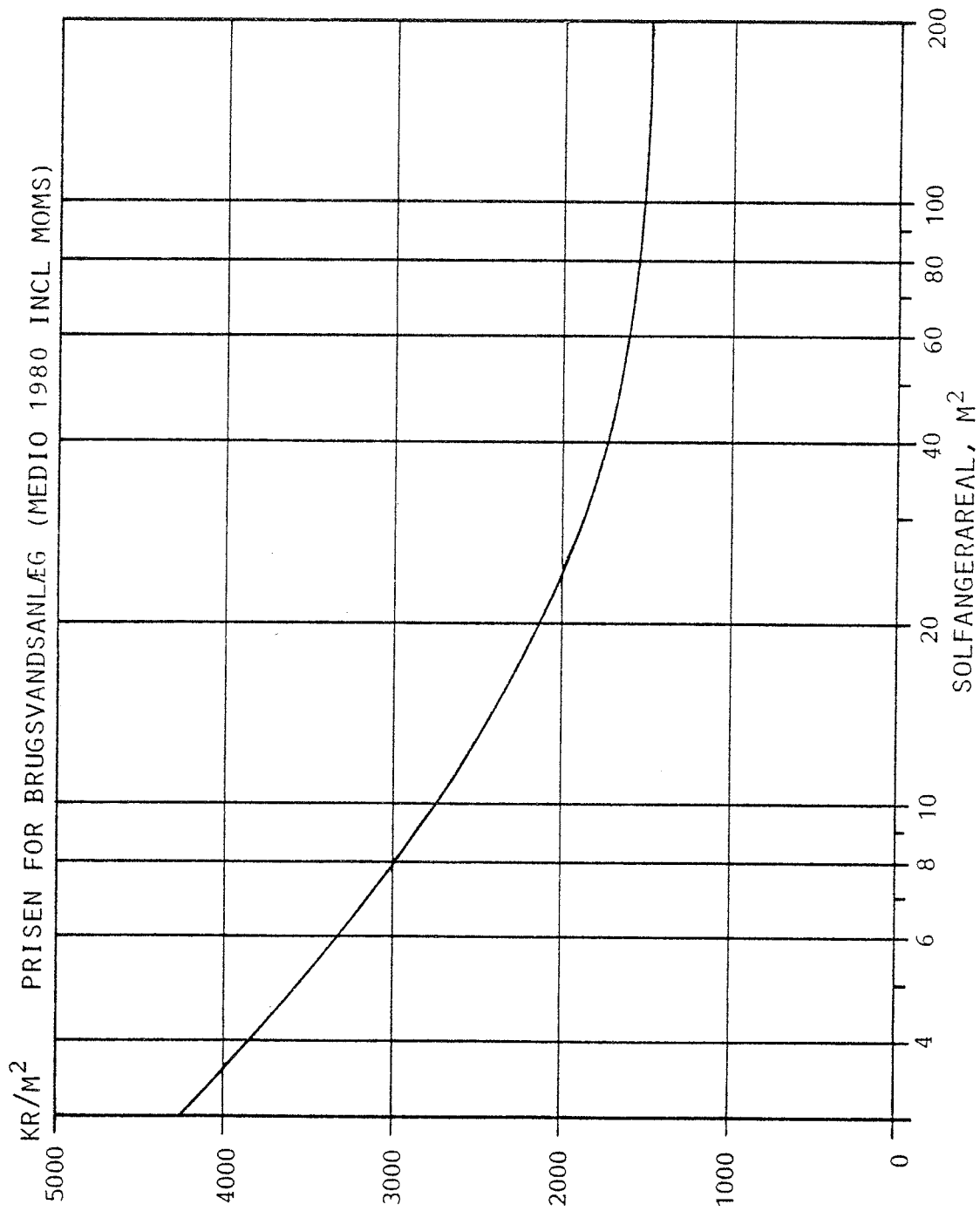
Solvarmeanlægget antages finansieret ved optagelse af kontantlån i en kreditforening. Lånet forrentes med 19% p.a. og afdrages over 20 år med fast årlig ydelse.

Anlæggets driftsomkostning det første år sættes til 200 kr. uanset størrelsen.

Med en oliepris på 2,5 kr/l og et oliefyr med en fyringsnyttevirkning på 0,87 fås for forskellige anlægsstørrelser og forbrug det første års omkostninger (udgifter) for ejeren i forhold til værdien af brændselsbesparelsen som vist på figur 18.9, når ejerens marginale skattetræk er 55%.

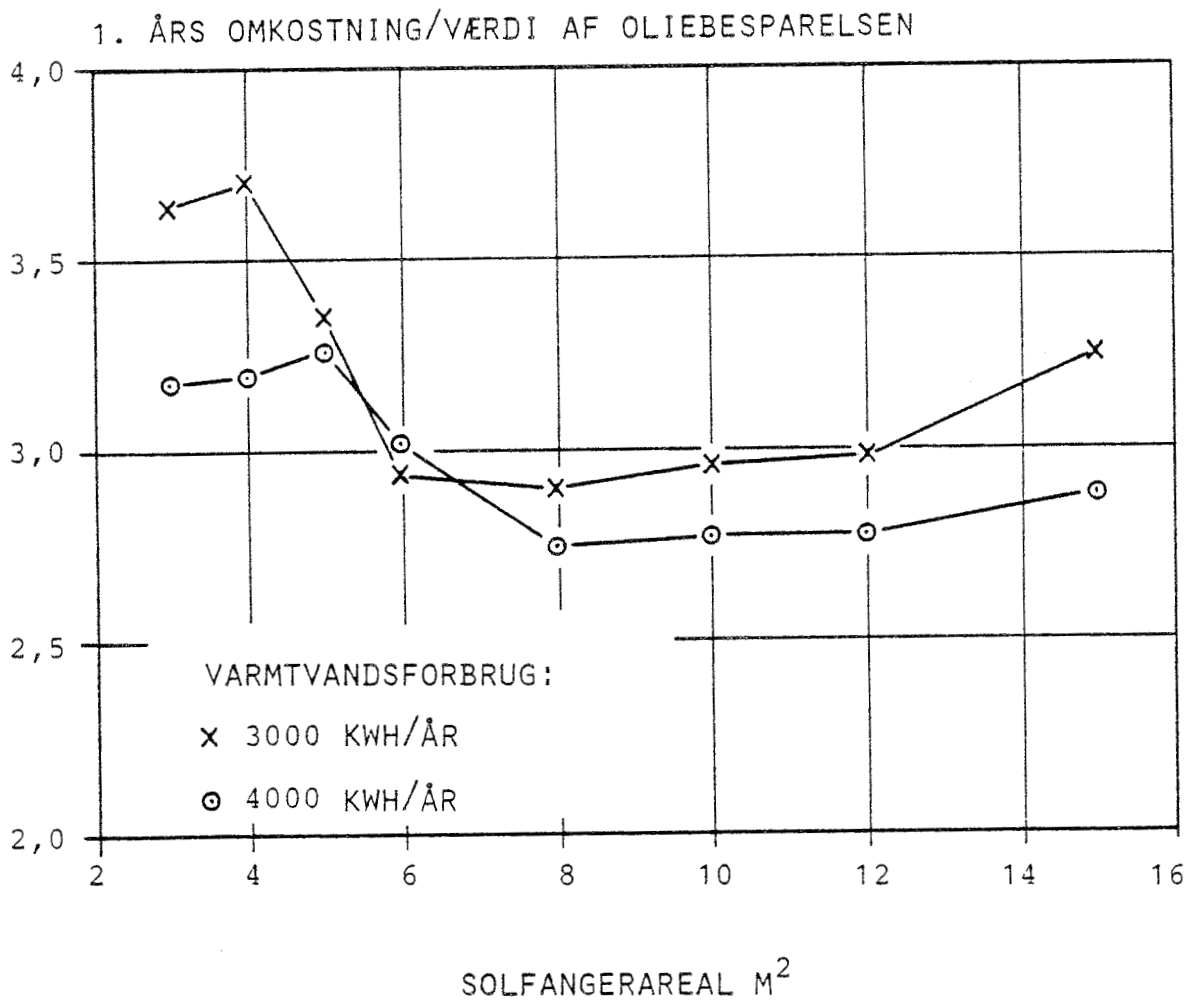
Det "bedste" anlæg er det der har de mindste omkostninger i forhold til besparelsen, og det ses at være et anlæg med et solfangerareal på ca. 8 m². Samtidig ses det dog, at det første år er udgiften ved at have anlægget knap 3 gange større end besparelsen.

Hvis ejeren kun vil investere, hvis det ikke umiddelbart medfører ekstraudgifter, ja, så kan det "ikke betale" sig med solvarme. Finder man derimod, at investeringen skal anskues over en længere tidsperiode og skønnes det at oliepriserne i denne vil stige kraftigt, ja, så er anlægget



Figur 18.8

KAPITAL- OG DRIFTSOMKOSTNINGER I FORHOLD TIL OLIE-
BESPARELSEN DET 1. ÅR FOR BRUGSVANDSANLÆG MED SE-
LEKTIV ABSORBER. FINANSIERINGEN REGNES AT SKE MED
20 ÅRIGT LÅN MED EN FORRENTNING PÅ 19% P.A., EJE-
RENS MARGINALSKATTETRÆK ER 55% OG OLIEPRISEN LIG
2,50 KR/L



Figur 18.9

"privatøkonomisk rentabelt". Som anført i [58] vil olieprisstigninger på f.eks. 15% p.a. i løbende priser, hvilket med en inflation på 10% p.a. svarer til en realprisstigning på ca. 5% p.a., i løbet af 7-8 år medføre, at de årlige besparelser vil være større end udgifterne og at anlægget vil være tilbagebetalt i løbet af 17-18 år.

19. REFERENCER

- [1] Thekaekara, M. (ed): The energy crisis and energy from the sun. Institute of environmental sciences. Illinois 1974.
- [2] Coulson, K.L.: Solar and Terrestrial Radiation. Academic Press. London 1975.
- [3] Eppley Ångström pyrheliometer model ANG No. 16843, Control Box No. 5425.
- [4] Compte-rendu final de la comparaison des pyrhéliomètres des états de la communauté économique européenne. Direction de la météorologie. Janvier 1979, Carpentras.
- [5] Eppley precision spectral pyranometer No 16692 F3.
- [6] Norris, D.J.: Calibration of pyranometers in inclined and inverted positions. Solar Energy. Vol. 16, p. 53-55, 1974.
- [7] Lawaetz, H. & C. Nielsen: Sammenlignende målinger af solindfald. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole, April 1978.
- [8] Skrive- og rejsekalender. Udgives hvert år af J.H. Schultz A/S, Universitets-Bogtrykkeri, København.
- [9] Lawaetz, H.: Beregning af solindfaldet på en væg og gennem et vindue. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. April 1978.
- [10] Lund, H.: Program BA4 til beregning af rumtemperaturer og varme- og kølebehov. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole. Meddelelse nr. 46. 1976.

- [11] Petersen, E.: Måling af dagslysets variationer. Lysteknisk Laboratorium. Udkommer medio 1981.
- [12] Lawaetz, H.: Solarimetres vinkelforhold til skærm. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. April 1976.
- [13] Temps, R.C. & K.L. Coulson: Solar radiation incident upon slopes of different orientations. Solar Energy. Vol. 19, p. 179-184, 1977.
- [14] An introduction to meteorological measurements and data handling for solar energy applications. IEA-handbook, Final draft, May 1979.
- [15] Robinson, N.: Solar radiation. Elsevier Publishing Company. Amsterdam 1966.
- [16] Atwater, M.A. & J.T. Ball: A numerical solar radiation model based on standard meteorological observations. Solar Energy. Vol. 21, p. 163-170. 1978.
- [17] Lie, B.Y.H. & R.C. Jordan: The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy. Vol. 4, nr. 3, p. 1-19. 1960.
- [18] Orgill, I.F. & K.G.T. Hollands: Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. Solar Energy. Vol. 19, p. 357-359. 1977.
- [19] Bøhm, B.: K_T -metoden til beregning af solindfald. Teknologisk Institut. 1978.
- [20] Klein, S.A.: Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. Solar Energy. Vol. 19, p. 325-329. 1977.
- [21] Solvarme - vejledning i projektering og udførelse af anlæg. Teknologisk Instituts forlag. April 1978.

- [22] Lawaetz, H: Beregning af solindfald. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Meddelelse nr. 42. December 1975.
- [23] Esbensen, T.V. & H. Lawaetz: Bogen om solenergi. Clausen bøger, Aschehoug. 1978.
- [24] Referenceåret, Vejrdata for VVS-beregninger. SBI rapport nr. 89. 1974.
- [25] Lund, H. & S. Eidorff: Selection methods for production of test reference years. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Marts 1980.
- [26] Kristensen, P.E. et al.: Rapport vedrørende prøvning af solfangere. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Meddelelse nr. 74. Januar 1978.
- [27] Nielsen, C. et al.: Rapport vedrørende prøvning af solfangere. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Meddelelse nr. 86. Juli 1979.
- [28] Duffie, J.A. & W.A.Beckman: Solar Energy Thermal Processes. John Wiley & Sons. New York 1974.
- [29] Lawaetz, H.: Optimering af solfangerkonstruktion. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Januar 1977.
- [30] Lawaetz, H. & S. Svendsen: Termisk effektivitet af en solfanger - beregnet og målt. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Meddelelse nr. 57. April 1977.
- [31] Whillier, A.: Design factors influencing solar collector performance. Low temperature engineering application of solar energy. ASHRAE 1967.

- [32] Grallert, H.: Solarthermische Heizungssysteme. Oldenburg Verlag, München 1977.
- [33] Atwater, M.A. & J.T. Ball: Computation of IR sky temperature and comparison with surface temperature. Solar Energy. Vol. 21, p. 211-216. 1978.
- [34] Guidelines and directions for determining the usability of solar collectors. Solar collector efficiency test. Bundesverband Solarenergie (BSE). May 1978.
- [35] Lawaetz, H.: Diskussion af prøvningsprocedure til bestemmelse af en solfangers effektivitetskurve. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Marts 1978.
- [36] Svendsen, S.: Theoretical investigation of the methodical errors of the BSE-procedure for testing solar collectors. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Report nr. 78-27. November 1978.
- [37] Krægpøth, K.: Plane stationære vandgennemstrømmede solfangeres effektivitet under danske klimaforhold. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. 1976.
- [38] Krægpøth, K.: Explicit udbyttefunktion for solfangere. Udbytte af solfangere under danske klimaforhold. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Meddelelse nr. 52. Januar 1977.
- [39] Lawaetz, H. & P.N. Hansen: Solvarmesystem med sæsonlagring - et projektforslag. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Rapport 78-39. December 1978.
- [40] Lawaetz, H.: Nærmere fastlæggelse af solvarmeanlæg med sæsonlagring. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Rapport 79-5. April 1979.

- [41] Lawaetz, H. & S. Furbo: Energiforbrug til fremstilling af solvarmeanlæg. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Meddelelse nr. 87. August 1979.
- [42] Beckman, W.A.: Duct and pipe losses in solar energy systems. Solar Energy. Vol. 21, p. 531-532. 1978.
- [43] Eckert, E.R.G. & Drake, R.M.: Heat and Mass Transfer. McGraw Hill. London. 1959.
- [44] Paulsen, O.: Solvarmeanlæg med varmevekslere. Varme nr. 4. 1977.
- [45] Furbo, S.: Prøvning af varmelagerunits til solvarmeanlæg. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Meddelelse nr. 97. April 1980.
- [46] Bygningsreglement 1977, (BR-77). Boligministeriet 1978.
- [47] Rockwool isoleringshåndbog. Teoretisk grundlag. København 1971.
- [48] Lawaetz, H.: Eksempel på dimensionering af et solvarmesystem til varmt brugsvand. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Meddelelse nr. 62. Maj 1977.
- [49] Mikkelsen, S.E. et al.: Solvarmeanlæg i Greve. Energiministeriets solvarmeprogram. Rapport nr. 3. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Februar 1980.
- [50] Nilsson, S.: Varmvattenmätning i bostadsområden. Svensk VVS nr. 2, p. 39-52. 1979.
- [51] Kristensen, P.E. & L.S. Jørgensen: Gentofte - kvartalsrapport, HM-Sol 79-4. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Maj 1979.

- [52] Lawaetz, H.: Samfundsøkonomisk analyse af individuelle solvarmeanlæg. Bilagsrapport nr. 2 i Varmeplanudvalgets 3. delbetænkning. Energiministeriet. April 1980.
- [53] Jørgensen, L.S. & H. Lawaetz: Dimensionering af solvarmeanlæg. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tekniske Højskole. Meddelelse nr. 71. November 1977.
- [54] MacGregor, A.W.K.: An experimental investigation into the effect of plate thermal capacity on the performance of solar water heating systems. SUN II, proceedings of ISES congress, May 1979, p. 278-282.
- [55] van Koppen, C.W.J. et al.: The actual benefits of thermally stratified storage in a small and a medium size solar system. SUN II, proceedings of ISES congress, May 1979, p. 576-580.
- [56] Lawaetz, H. & L.S. Jørgensen: Dimensionering af et solvarmeanlæg til et typehus. Varme. Oktober 1977.
- [57] Lawaetz, H.: Privatøkonomisk analyse af solvarmeanlæg. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole. Rapport 79-18. Oktober 1979.
- [58] Lawaetz, H.: Solvarmeanlægs økonomi. VVS, Januar 1981.

20. SYMBOLLISTE

Symbol	Beskrivelse	Enhed
A	areal	m^2
$\bar{A}$	middelværdi af strømstryke	A
A_v	varmeoverførende areal i varmeveksler	m^2
af	fladeazimuth	grader
az	solazimuth	grader
a_i	faktor	
BK	koldt brugsvand	
BV	varmt brugsvand	
b	brydningsvinkel, breddegrad	grader
C_b	varmeoverførselsevne ved rørfastgørelse	$W/m/^{\circ}C$
C_p	varmefylde	$J/kg/^{\circ}C$
C_R	varmekapacitet pr. m rør	$J/^{\circ}C/m$
D	dækningsgrad, differenstermostat	
D	diameter	m
D_i	diameter, indvendig	m
D_u	diameter, udvendig	m
d	isoleringstykkelse	m
d_i	diameter, indvendig	m
d_u	diameter, udvendig	m
E	tidsekvation	min
E	dæklagstykkelse	m
e	isoleringstykkelse	m

F	pladeeffektivitet	
F_H	H_d/H	
$\bar{F}_H$	$\bar{H}_d/\bar{H}$	
F_i	korrektionsfaktor, indfaldsvinkel	
F_N	korrektionsfaktor, skydække	
F_R	solfangereffektivitet	
F_S	soltimetall pr. dag/daglængde	
$\bar{F}_S$	soltimer pr. md./daglængde pr. md.	
F_V	korrektionsfaktor, lagervolumen	
F'	absorbereffektivitet	
F''	flowfaktor	
F'''	korrektionsfaktor, varmeveksler	
F''''	korrektionsfaktor, rørvarmekapacitet	
F'_R	$F_R \cdot F'''$	
F''_R	$F'_R \cdot F''''$	
F''_{RV}	$F''_R \cdot F_V$	
G	massestrøm pr. arealenhed	kg/s/m ²
H	globalstråling, døgnværdi	Wh/m ² /døgn
$\bar{H}$	globalstråling, månedsværdi	Wh/m ² /md
H_d	himmelstråling på vandret, døgnværdi	Wh/m ² /døgn
$\bar{H}_d$	himmelstråling på vandret, månedsværdi	Wh/m ² /md
H_o	extraterrestræling, døgnværdi	Wh/m ² /døgn
$\bar{H}_o$	extraterrestræling, månedsværdi	Wh/m ² /md
$\bar{H}_t$	solindfald, fladehældning t, månedsværdi	Wh/m ² /md
h	solhøjde	grader

I_D	direkte stråling	W/m^2
I_{DN}	normalstråling ved jordoverfladen	W/m^2
I_{Dv}	direkte stråling på vandret	W/m^2
I_G	globalstråling	W/m^2
I_N	normalstråling uden for atmosfæren	W/m^2
I_{sc}	solkonstanten (= 1353)	W/m^2
I_d	diffus stråling	W/m^2
I_{dh}	diffus himmelstråling	W/m^2
I_λ	strålingsintensitet med bølge- længde λ	$W/m^2/\mu m$
i	indfaldsvinkel	grader
K	kalibreringskonstant	
K	ekstinktionskoefficient	m^{-1}
K_T	H/H_O	
$\bar{K}_T$	$\bar{H}/\bar{H}_O$	
K_V	varmetabskoefficient for varmelager	$W/^\circ C$
k_R	varmetabskoefficient pr. m rør	$W/^\circ C/m$
k_k	varmeoverføringskoefficient, led- ning og konvektion	$W/m^2/^\circ C$
k_s	varmeoverføringskoefficient, stråling	$W/m^2/^\circ C$
k_v	varmeoverføringskoefficient, vind, varmeveksler	$W/m^2/^\circ C$
k_λ	ekstinktionskoefficient for bølge- længde λ	m^{-1}
L	strålevejtlængde i dæklag, rørlængde	m
L_i	rørlængde, indløb til solfanger	m
L_u	rørlængde, udløb fra solfanger	m
l_N	normal længdegrad	grader
l_{ob}	observationsstedet, længdegrad	grader

$(MC)_V$	varmelagerets varmekapacitet	$J/^{\circ}C$
$(mC)_a$	absorberens varmekapacitet	$J/^{\circ}C/m^2$
$(mC)_{d,i}$	i'te dæklags varmekapacitet	$J/^{\circ}C/m^2$
$(mC)_e$	effektiv varmekapacitet	$J/^{\circ}C/m^2$
$(mC)_{ed}$	effektiv varmekapacitet under drift	$J/^{\circ}C/m^2$
$(mC)_{max}$	største kapacitetsstrøm	$J/^{\circ}C$
$(mC)_{min}$	mindste kapacitetsstrøm	$J/^{\circ}C$
$(mC)_V$	absorbervæskens varmekapacitet	$J/^{\circ}C/m^2$
N	skydække	oktas
N	antal dæklag	
ND	døgnnummer i året	
NF	brugsvandsforbrug (netto)	kWh, J
NY	nettoydelse af solvarmeanlæg	kWh, J
n	brydningsindeks	
Q_{RC}	kapacitetstab fra rør	W
Q_{RL}	varmetab fra rør	W
Q_V	varmetab fra varmelager	W
Q_u	solfangerudbytte	W
Q'_u	Q_u korrigeret for Q_{RL}	W
Q''_u	Q'_u korrigeret for Q_{RC}	W
q_u	solfangerudbytte pr. arealenhed	W/m^2
R_b	direkte stråling/direkte vandret, døgnbasis	
$\bar{R}_b$	direkte stråling/direkte vandret, månedsbasis	
R_d	diffus stråling/diffus vandret	

S	absorberet stråling	W/m^2
S_c	S korrigeret for $(mC)_{ed}$	W/m^2
ΔS	forskel i absorberet stråling i 2 tidsstep	W/m^2
S'	S_c korrigeret for Q_{RL}	W/m^2
S''	S' korrigeret for Q_{RC}	W/m^2
T_{BV}	temperatur af BV	K, °C
T_{BK}	temperatur af BK	K, °C
T_a	udelufttemperatur	K, °C
T_f	vasketemperatur	K, °C
T_h	himmelstrålingstemperatur	K, °C
T_i	indløbstemperatur	K, °C
T_{im}	middel T_i	K, °C
T_l	varmelagertemperatur	K, °C
T_{lm}	middel T_l	K, °C
$T_{l,0}$	T_l til tiden 0	K, °C
$T_{l,\tau}$	T_l til tiden τ	K, °C
T_p	absorbertemperatur	K, °C
T_{pm}	middel T_p	K, °C
$T_{p,0}$	T_p til tiden 0	K, °C
$T_{p,\tau}$	T_p til tiden τ	K, °C
$T_{R,0}$	rørtemperatur ved afstanden 0	K, °C
$T_{R,L}$	rørtemperatur ved afstanden L	K, °C
T_u	udløbstemperatur	K, °C
T_1	rørtemperatur ved udløb af varmeveksler, temperatur i 1. dæklag	K, °C
T_{1m}	middel T_1	K, °C

$T_{1,0}$	T_1 til tiden 0	K, °C
$T_{1,\tau}$	T_1 til tiden τ	K, °C
T_2	rørtemperatur ved indløb til varmeveksler, temperatur i 2. dæklag	K, °C
t	fladehældning med vandret	grader
U_b	bagside- og kanttab	W/°C/m ²
U_L	solfangers varmetabskoefficient	W/°C/m ²
U'_L	U_L korrigeret for Q_{RL}	W/°C/m ²
U''_L	U'_L korrigeret for Q_V	W/°C/m ²
U_t	dæklagets varmetabskoefficient	W/°C/m ²
V	lagervolumen	m ³
V_{BV}	brugsvandsforbrug	m ³
VVF	varmeudtab fra varmelager	kWh, J
v	vindhastighed	m/s
W	rørafstand	m
α	absorptionskoefficient	
α_i	indvendig varmeoverføringskoefficient	W/m ² /°C
α_u	udvendig varmeoverføringskoefficient	W/m ² /°C
δ	absorberpladetykkelse	m
δ	solens deklination	grader
ε	varmevekslereffektivitet	
ε_1	emissionskoefficient for 1. dæklag	
ε_2	emissionskoefficient for 2. dæklag	
η	effektivitet	
λ	varmeledningsevne, isoleringsmaterialer	W/m/°C
λ	bølgelængde	µm

λ_j	jerns varmeledningsevne	W/m/°C
λ_p	absorberpladens varmeledningsevne	W/m/°C
λ_T	λ ved T °C	W/m/°C
λ_{10}	λ ved 10 °C	W/m/°C
ρ	refleksionskoefficient	
ρ	massefylde	kg/m ³
ρ_d	refleksionskoefficient, diffus stråling	
σ	Stefan-Boltzmann's konstant (5,67 · 10 ⁻⁸)	W/m ² /K ⁴
τ	tidsstep	s
τ	$\tau_a \cdot \tau_r$	
τ_N	normaltid	h
τ_a	transmissionskoefficient m.h.t. absorption	
τ_l	transmissionskoefficient for langbølget stråling	
τ_r	transmissionskoefficient m.h.t. refleksion	
τ_s	sandsoltid	
$(\tau\alpha)$	transmissionsabsorptionsprodukt	
$(\tau\alpha)_e$	effektiv transmissionsabsorptionsprodukt	
$(\tau\alpha)_{e,D}$	$(\tau\alpha)_e$ for direkte stråling	
$(\tau\alpha)_{e,d}$	$(\tau\alpha)_e$ for diffus stråling	
ω	timevinkel	grader
ω_s	timevinkel for solopgang	grader

21. SUMMARY

Based on the physical properties of the solar radiation, various methods for measuring the solar gain at the surface of the earth are described and evaluated. With our knowledge of the sun's movements on the sky, formula expressions to calculate the incident angle of the direct solar radiation on a given surface are developed.

A measuring equipment for continuous measurements of the solar radiation on seven surfaces is briefly described. The treatment and possible corrections to the measurement results are commented. The measuring equipment was installed in Værløse, and for a selected period of one year an account is made of the solar gain on a monthly base which with the use of the developed formula expressions was divided into direct and diffuse radiation.

When comparing with a corresponding measurement in Tåstrup, the measured solar gains were found to differ somewhat. Also comparison with a frequently used calculation method for determination of the solar gain, the K_T -method, showed some discrepancy.

From the measurements of the solar radiation and from the other meteorological weather observations taken at the same place, a new calculation method for the determination of the diffuse sky radiation on arbitrary surfaces from horizontally measured radiation has been made. Compared to an earlier often used method, this one corresponds better with the measurements, especially for north faced surfaces.

The yearly solar gain in Denmark is discussed, and with the use of a new method for selecting a reference year such one is selected from 15 year's meteorological weather observations, and the distribution of the solar gain during the year is drawn.

A mathematical model of a solar collector is examined. Here formulas for the calculation of absorbed energy, heat loss and solar collector output are reproduced. For some given solar collector designs and weather conditions it is demonstrated that the solar collector output calculated with the described model is in accordance with more complicated models.

Formulas for calculating the collector output are set up taking into consideration the heat capacity of the solar collector. These formulas are supplied with developed expressions which permit us to take into consideration the heat capacity in and the heat loss from the pipings between the solar collectors and the heat storage.

The developed calculation expressions are used to built up a computer simulation model of a solar heating system. From measured weather data and actual heat draws from the heat storage of an existing system, the system is simulated during some periods. The calculated performance is compared to the measured and a good agreement is found. It is thus assumed that with the developed model and with the selected reference year it is possible to calculate the output we actually would get from a system correspondingly designed and under the same conditions. Therefore a series of parameter analyses of a domestic hot water system consisting of a 10 m^2 solar collector and a heat storage of 0.5 m^3 have been carried out. These analyses show that the heat capacity of the solar collector has only a modest influence on the output. On the other hand, badly insulated pipes and wrongly installed control systems may result in a considerable reduction of the output of the system.

Finally, there were made calculations of the net output of the solar heating system in dependence of the solar collector area and type. From these calculations graphs for dimensioning domestic hot water system were drawn, and at the end a single economic optimisation of the size of the system was made.

Recordformat for måleårets dataset

Observation	Enhed	Interval 1)	Synop- kode 2)	Position	Fortran format
År, måned, dag, time 3)		h		1-16	4I4
Global stråling, timemiddel	W/m ²	h		17-21	I5
Solindfald på lodret, timemiddel:					
Syd, vest, nord, øst	W/m ²	h		22-41	4I5
Diffus himmelstråling, timemiddel:					
Vandret, 60 gr. sydvendt	W/m ²	h		42-51	2I5
Global stråling, 10 min. værdier	W/m ²	h		52-81	6I5
Solindfald på lodret, 10 min. værdier:					
Syd, vest, nord, øst	W/m ²	h		82-201	4(6I5)
Diffus himmelstråling, 10 min. værdier:					
Vandret, 60 gr. sydvendt	W/m ²	h		202-261	2(6I5)
Lufttryk - 900,0	mb	h	ppp	262-266	F5.1
Lufttemperatur	°C	h	TT	267-271	F5.1
Vådtemperatur	°C	h	TdTd	272-276	F5.1
Relativ fugtighed	%	h		277-281	I5
Minimum temperatur	°C	12h	TnTn	282-286	F5.1
Maximum temperatur	°C	12h	TxTx	287-291	F5.1
Minimum temperatur i græshøjde	°C	24h	TgTg	292-296	F5.1
Nedbørsmængde	mm	6h	RR	297-301	F5.1
Snedybde	cm	24h	s	302-306	I5
Snelagets udbredelse (af jordoverfladen)	1/4	24h		307-311	I5
Totale skymængde	1/8	h	N	312-316	I5
Vindretning	grader	h	dd	317-321	I5
Vindhastighed 4)	m/s	h	ff	322-325	F5.1
Sigtbarhed	kode	h	VV	327-331	I5
Vejret	kode	h	ww	332-336	I5
Vejret siden sidste observation	kode	h	W	337-341	I5
Skydække med C _L -skyer (eller C _M)	1/8	3h	N _h	342-346	I5
Skyart, lav højde	kode	3h	C _L	347-351	I5
Højde af laveste C _L -skyer	m	3h	h	352-356	I5
Skyart, mellemhøjde	kode	3h	C _M	357-361	I5
Skyart, stor højde	kode	3h	C _H	362-366	I5

Trykændringens karakter	kode	3h	a	367-371	I5
Trykændringens størrelse	mb	3h	pp	372-376	F5.1
Jordoverfladens tilstand	kode	24h	E	377-381	I5
Mængden af skyart angivet ved C	1/8	3h	N _S	382-386	I5
Skyart	kode	3h	C	387-391	I5
Højde til skyer angivet ved C	m	3h	h _S h _S	392-396	I5
Mængde af skyart angivet ved C	1/8	3h	N _S	397-401	I5
Skyart	kode	3h	C	402-406	I5
Højde til skyer angivet ved C	m	3h	h _S h _S	407-411	I5
Solskinstimer	h	h		412-414	F3.1

1) h betyder at observationen er angivet for hver time (dvs. i hver record)

2h betyder angivelse hver 3. time, dvs. synoptimerne 1, 4, 722.

6h betyder angivelse hver 6. time, dvs. synoptimerne 1, 7, 13, 19.

12h betyder angivelse hver 12. time, dvs. synoptimerne 7 og 19.

24h betyder angivelse én gang i døgnet, kl. 13.

2) For en nærmere beskrivelse af koderne og de dertil hørende observationer henvises til "Meteorologiske Koder", Meteorologisk Institut/Forsvarets Vejrtjeneste 1967.

3) Klokkeslettet er anført i centraleuropæisk tid, CET, (dansk tid) svarende til GMT + 1.

4) Oprindelig angivet i knob, men her omregnet til m/s.

Strålingsværdierne er de målte (og korrigerede) værdier i timen før det angivne klokkeslet. Dette gælder også solskinstimetallet.

Manglende værdier i måleperioden er for alle observationer tillagt værdien - 9999, mens værdier uden for måletiden (strålings- og solskinstimemålinger om natten) er tillagt værdien -1.

For måleåret, 1/12-1977 til 30/11-1978, findes 8760 records, én pr. time med 414 karakterer.