

SOLFANGERES EFFEKTIVITET målt og beregnet

S. SVENDSEN



**MEDDELELSE NR.109 MAJ 1981
LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE**

Rettelsesblad til "Solfangeres effektivitet - målt og beregnet"

S. Svendsen

Side 22

Udtryk 2.3.13 skal være: $t_k = t_m + q_{o4} b / A_k h_m$

Udtryk 2.3.15 skal være:

$$q_{o4} = \frac{(k_{ta1} + k_{tab})(-F(b-d)t_m - d t_m + b t_a) - (k_{ta1} t_{11} + k_{tab} t_{11} + q_a)(1-F)(b-d)}{(k_{ta1} + k_{tab})(+F(b-d)b / A_k h_m + F(b-d)^2 / h_f + db / A_k h_m)}$$

FORORD

Denne rapport markerer afslutningen af mit licentiatstudium ved Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole, med professor Vagn Korsgaard som faglærer.

Licentiatstudiet blev påbegyndt i sommeren 1974 og har i hele perioden været udført som en aktivitet, der måtte indpasses efter arbejdet på de forskellige fondsprojekter jeg var ansat på indtil begyndelsen af 1978, og derefter med arbejdet som adjunkt.

Det omfattende eksperimentelle udstyr, der er omtalt i afhandlingen har det kun været muligt at opbygge og drive, fordi Undervisningsministeriet gav en ekstraordinær bevilling til forskning og undervisning i solvarme ved Laboratoriet.

For det eksperimentelle og beregningsmæssige arbejde har jeg god grund til at takke maskinarbejder Michael Ramskov og civ.ing. Ole Ravn, som med interesse, flid og omhyggelighed har hjulpet mig med henholdsvis målingerne og beregningerne. For renskrivningen af afhandlingen kan jeg takke assistent Bodil Fauerskov, som med stor dygtighed og utrættelighed har udført dette arbejde. Desuden har jeg haft et udbytterigt samarbejde med adskillige af Laboratoriets øvrige medarbejdere.

Endelig vil jeg takke Karen og Jakob for deres forståelse og støtte.

S. Svendsen

Maj 1981

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD	1
SAMMENFATNING	4
1. SOLFANGERE	6
2. BEREGNINGSMODELLER FOR SOLFANGERES EFFEKTIVITET	8
2.1 Transmission og absorption af solstråling	8
2.2 Varmetab	14
2.3 Varmeoverføring i absorber	18
2.4 Opstilling af varmembalancer	23
2.5 Program til beregning af solfangeres effektivitet . . .	25
2.6 Forenklede beregningsmodeller for solfangeres effektivitet	26
3. EFFEKTIVITETEN AF SOLFANGERE VED FORSKELLIGE FORHOLD .	28
3.1 Vejrforholdenes indflydelse på effektiviteten	28
3.2 Monterings- og driftsforholdenes indflydelse på effektiviteten	35
4. METODER TIL PRØVNING AF SOLFANGERES EFFEKTIVITET . . .	39
4.1 Udendørs prøvning af solfangere	39
4.2 Kombineret udendørs og indendørs prøvning af solfangere	43
4.3 Indendørs prøvning af solfangere	47
5. OPSTILLING TIL PRØVNING AF SOLFANGERES EFFEKTIVITET .	48
5.1 Solsimulator	50
5.2 Prøvebord	61
5.3 Måleudstyr	64
6. PRØVNINGERNES NØJAGTIGHED	68
6.1 Nøjagtigheden af de enkelte målinger	68
6.2 Samlet målenøjagtighed og reproducerbarhed	71
6.3 Sammenligning med andre laboratorier	72
7. PRØVNINGERNES OVERENSSTEMMELSE MED VIRKELIGE FORHOLD .	76
8. PRØVNING AF SOLFANGERES EFFEKTIVITET	81

8.1 Prøvningens udførelse	81
8.2 Sammenligning af resultaterne	82
9. MÅLING AF SOLFANGERES EGENSKABER I DETALJER	89
10. SAMMENLIGNING AF BEREGNET OG MÅLT EFFEKTIVITET	92
11. BEREGNING AF SOLFANGERES EFFEKTIVITET	96
12. SOLVARMEANLÆG	105
13. BEREGNINGSMODEL FOR SOLVARMEANLÆGS YDELSE	107
13.1 Solfanger	107
13.2 Solfangerkreds	111
13.3 Varmelager	112
14. SIMULERINGSPROGRAM TIL BEREGNING AF SOLVARMEANLÆG	119
15. SAMMENLIGNING AF BEREGNEDE OG MÅLTE YDELSER	122
16. BEREGNING AF SOLVARMEANLÆGS YDELSE	126
17. AFSLUTNING	132
SUMMARY	133
SYMBOLLISTE	135
REFERENCELISTE	142

SAMMENFATNING

I rapporten omtales plane solfangere og solvarmeanlæg til vandopvarmning. Det er kun effektiviteten og ydelsen af h.h.v. solfangerne og solvarmeanlæggene, der behandles.

Der opstilles en detaljeret beregningsmodel for solfangere, og et tilhørende beregningsprogram omtales. Ved hjælp af programmet foretages der en analyse af vejr-, drifts- og monteringsforholdenes indflydelse på effektiviteten af typiske solfangere.

Forskellige metoder til prøvning og præsentation af solfangeres effektivitet omtales og vurderes. Prøveforholdenes indflydelse på resultaterne undersøges ved hjælp af det nævnte beregningsprogram.

En solsimulatoropstilling til effektivitetsprøvning af solfangere beskrives detaljeret. De opnåede egenskaber og erfaringer med solsimulatoren omtales.

Nøjagtigheden og reproducerbarheden af prøvninger udført ved hjælp af solsimulatoropstillingen omtales, idet der også udføres sammenligninger med prøvninger ved andre laboratorier. De indendørs prøvnings overensstemmelse med virkelige forhold belyses ved beregninger og målinger. Både med hensyn til prøvningernes nøjagtighed og overensstemmelse med udendørs prøvninger er der opnået tilfredsstillende resultater.

Prøvningsresultaterne for et større antal markedsførte solfangere omtales og analyseres på grundlag af maksimaleffektivitet og varmetabskoefficient. Derved vises det, at prøvningerne både kan anvendes ved en forbrugerorienteret vurdering og ved produktudvikling af solfangere.

Det tidligere nævnte program til detaljeret beregning af solfangeres effektivitet sammenlignes med målte effektiviteter, og der findes en god overensstemmelse. Derefter benyttes programmet til beregning af forskellige solfangeres effektivitet, idet solfangerkonstruktionens udformning varieres. Herved vises det, at programmet bl.a. kan være anvendeligt ved udvikling af solfangere.

Solvarmeanlæg til vandopvarmning omtales, og der opstilles en beregningsmodel for én anlægsudformning. Modellen baseres på resultater fra prøvning af solfangeres effektivitet og varmelagres termiske egenskaber. Et simuleringsprogram baseret på den opstillede model omtales. Programmet, der køres på en bordregnemaskine, benytter normalt et koncentreret referenceår på 36 døgn som vejrdatagrundlag. Til den konkrete anvendelse er der god overensstemmelse mellem det koncentrerede og det komplette referenceår.

Simuleringsprogrammets nøjagtighed er undersøgt ved sammenligning mellem målte og beregnede ydelser for forskellige anlæg. Der er herved konstateret en rimelig god overensstemmelse. Programmet er herefter benyttet ved en parameteranalyse af solvarmeanlæg med hovedvægt på solfangerens indflydelse på ydelsen. Herved er det vist, at programmet kan benyttes ved udvikling og dimensionering af solvarmeanlæg.

1. SOLFANGERE

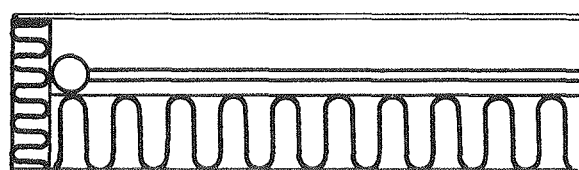
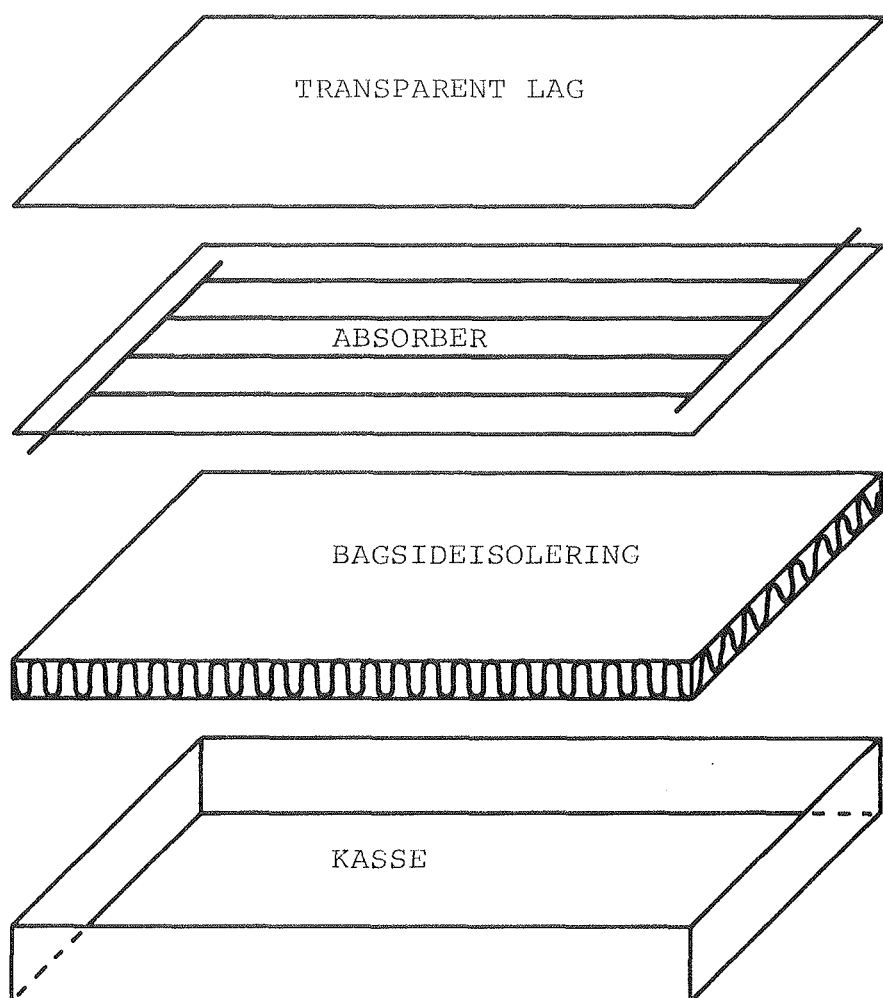
En solfanger er en bygningsdel, der omdanner solstråling til varme og afleverer den til et varmetransporterende medium. En solfanger er således den varmeproducerende del af et solvarmeanlæg.

Solfangere findes i mange forskellige udformninger og er f.eks. omtalt i (1). Man opdeler normalt i koncentrerende og ikke-koncentrerende solfangere. Den sidstnævnte type omfatter både plane solfangere og rørformede solfangere. I denne rapport behandles kun plane solfangere med hovedvægt på solfangerelementer med væske som varmetransporterende medium.

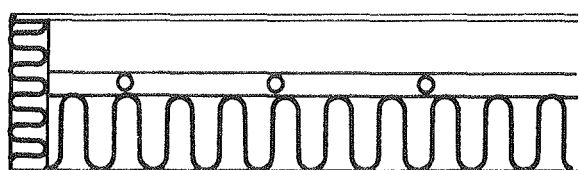
De solfangere, der især behandles i rapporten, består af en kasse eller en ramme med et eller to transparente lag, en absorber og en bagsideisolering, se fig. 1.1. Det transparente lag er oftest en plan glas- eller plastplade men findes også som hvælvede plastkupler. Absorberen består af en kanalplade eller en rør-plade konstruktion. Absorberen er oftest af metal men fremstilles også af plast. Det varmetransporterende medium er vand, vand-glykol blandinger, olier eller luft. Endnu anvendes luft dog sjældent her i landet. Isoleringen består af mineraluld eller plastskum. Solfangerelementernes areal er typisk 1-2 m². En detaljeret beskrivelse af plane solfangere findes i (2), (3) og (4).

Solfangerelementerne anbringes normalt på taget af huset, idet de enten ligger uden på tagbeklædningen eller indbygges i denne. Solfangerne forbindes med et rørsystem til et varmelager, hvorfra der kan leveres en del af den varme, der er brug for til vandopvarmning og rumopvarmning.

I rapporten behandles effektiviteten af solfangere som komponent og som del af et solvarmeanlæg. Driftssikkerheden og holdbarheden samt økonomien, som alle er vigtige elementer i en samlet vurdering af solfangere og solvarmeanlæg, er endnu ikke undersøgt så detaljeret som effektiviteten og er derfor og af begrænsningsmæssige årsager udeladt.



LÆNGDESNIT



TVÆRSNIT

Fig. 1.1 Hoveddelene i en solfanger med ét transparent lag.

2. BEREGNINGSMODELLER FOR SOLFANGERES EFFEKTIVITET

Solstrålingen, der rammer solfangeren, går med et vist tab igennem det transparente lag og absorberes på nær et vist tab i absorberens overflade. Den derved tilførte varmeeffekt vil under stationære forhold dels tabes til omgivelserne og dels overføres til det varmetransporterende medium.

Forholdet mellem den varmeeffekt solfangeren har tilført det varmetransporterende medium og den strålingseffekt solfangeren har modtaget i form af solindfaldet kaldes solfangerens effektivitet.

Da solindfaldet er produktet af solintensiteten og solfangerens areal, må dette fastlægges. Der kan argumenteres for at bruge tre forskellige arealer: udvendigt areal, transparent areal eller absorberareal. De to sidste er normalt næsten ens, men det er nemmere og nøjagtigere at bestemme det transparente areal. Ved at anvende det udvendige areal tilgodeser man kun delvist ønsket om direkte at kunne overføre effektiviteten for et solfangerelement til også at gælde for den til rådighed værende tagflade. Til fordelerrør og ikke-modulære totalmål medgår der et vist areal, som ikke kan medtages i solfangerens udvendige areal, da det afhænger af det enkelte anlæg. Anvendelsen af det transparente areal ligger tættest ved den i modelmæssig henseende ideelle solfanger uden randeffekter. Derfor anvendes i det følgende solfangerens transparente areal som referenceareal.

Effektiviteten afhænger af solfangerkonstruktionen, monterings- og driftsforholdene samt vejrforholdene. I det følgende skal først en detaljeret og senere nogle forenkede modeller til beskrivelse af solfangeres effektivitet nærmere omtales.

2.1 Transmission og absorption af solstråling

Ifølge (5) kan man for transparente lags brydningsindeks, n , og absorptionskoefficient eller ekstinktionskoefficient, k , anvende middelværdier svarende til solstrålingens spektralfordeling.

Refleksionen i det transparente lags grænseflade kan for indfaldsvinkler, i , forskellig fra nul beregnes af følgende udtryk svarende til de to hovedpolarisationsretninger.

$$r_x = \frac{\sin^2(i-b)}{\sin^2(i+b)} \quad (2.1.1)$$

$$r_y = \frac{\tan^2(i-b)}{\tan^2(i+b)} \quad (2.1.2)$$

hvor i brydningsvinklen, b, bestemmes af udtrykket

$$b = \arcsin(\sin(i)/n) \quad (2.1.3)$$

den samlede refleksion i grænsefladen bestemmes af udtrykket

$$r = (r_x + r_y)/2 \quad (2.1.4)$$

Refleksionen i grænsefladen ved en indfaldsvinkel på nul bestemmes af udtrykket

$$r = (1-n)^2/(1+n)^2 \quad (2.1.5)$$

Absorptionen i det transparente lag medfører, at kun en del af solstrålingen når igennem materialet. Denne del kan udtrykkes ved gennemgangstallet, der beregnes af udtrykket

$$g = \exp(-kb_1/\cos(b)) \quad (2.1.6)$$

hvor k er ekstinktionskoefficienten og b₁ er tykkelsen af det transparente lag.

For et transparent lag sker der gentagne refleksioner i de to grænseflader, og den resulterende refleksions-, absorptions- og transmissionskoefficient må derfor bestemmes ved anvendelse af pilediagrammer og uendelige kvotientrækker. Ifølge (6) fås følgende udtryk for et transparent lag gældende for hver af hovedpolarisationsretningerne.

$$R = \frac{r(1+g^2(1-2r))}{1-g^2r^2} \quad (2.1.7)$$

$$A = \frac{(1-r)(1-g)}{1-gr} \quad (2.1.8)$$

$$T = \frac{(1-r)^2 g}{1-r^2 g^2} \quad (2.1.9)$$

De resulterende koefficienter bestemmes som middeltallet af koefficienterne for de to hovedpolarisationsretninger, der fås ved indsættelse af r_x og r_y fra (2.1.1.-2)

For to transparente lag fås tilsvarende for hver af hovedpolarisationsretningerne, idet man betegner lagene med 1 og 2 regnet fra forsiden, d.v.s. strålingen går fra 1 til 2.

$$R_{12} = R_1 + \frac{R_2 T_1^2}{1-R_1 R_2} \quad (2.1.10)$$

$$A_{11} = A_1 + \frac{T_1 R_2 A_1}{1-R_1 R_2} \quad (2.1.11)$$

$$A_{22} = \frac{T_1 A_2}{1-R_1 R_2} \quad (2.1.12)$$

$$T_{12} = T_{21} = \frac{T_1 T_2}{1-R_1 R_2} \quad (2.1.13)$$

hvor i dobbeltindices angiver, at det er koefficienten for den sammensatte konstruktion.

På grundlag af de opstillede koefficienter kan man opstille udtryk til bestemmelse af den solstråling, der absorberes i solfangerens absorber og transparente lag. Der ses bort fra randproblemer i form af skygge og forskelle i areal af absorber og transparent areal. Udledningen er foretaget i (6), hvorfor kun resultaterne skal omtales.

For en solfanger, se fig. 2.1.1, med ét transparent lag og en absorber med en absorptionskoefficient, der betegnes a fås følgende udtryk.

$$A_{sla} = \frac{T_1 a}{1 - (1-a)R_{1d}} \quad (2.1.14)$$

$$A_{s11} = A_1 + \frac{T_1(1-a)A_{1d}}{1 - (1-a)R_{1d}} \quad (2.1.15)$$

hvor A_{s11} og A_{sla} h.h.v. betegner den resulterende absorptionskoefficient for solfangerens transparente lag og for solfangerens absorber. Desuden angives med indices $1d$, at der er tale om diffus stråling. Denne behandles som direkte stråling med en indfaldsvinkel på 60° , hvilket ifølge (7) er en rimelig god middelværdi. Det skal bemærkes, at udtrykkene gælder for hver af hovedpolarisationsretningerne, og de resulterende koefficienter må beregnes som middeltal af koefficienterne for hver af disse.

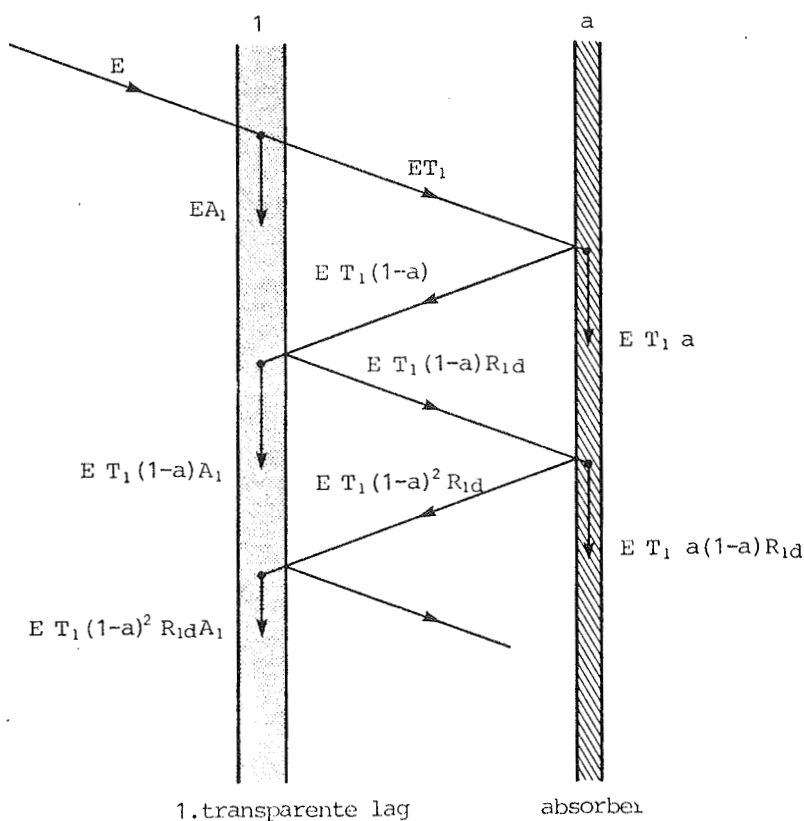


Fig. 2.1.1 Pilediagram for solstrålingen i en solfanger med ét transparent lag.

For en solfanger, se fig. 2.1.2, med to transparente lag fås tilsvarende

$$A_{s2a} = \frac{T_{21}a}{1-(1-a)R_{12d}} \quad (2.1.16)$$

$$A_{s21} = \frac{T_2 A_1}{1-R_1 R_2} + \frac{T_{21}(1-a)A_{11d}}{1-(1-a)R_{12d}} \quad (2.1.17)$$

$$A_{s22} = A_2 + \frac{T_2 R_1 A_2}{1-R_1 R_2} + \frac{T_{21}(1-a)A_{22d}}{1-(1-a)R_{12d}} \quad (2.1.18)$$

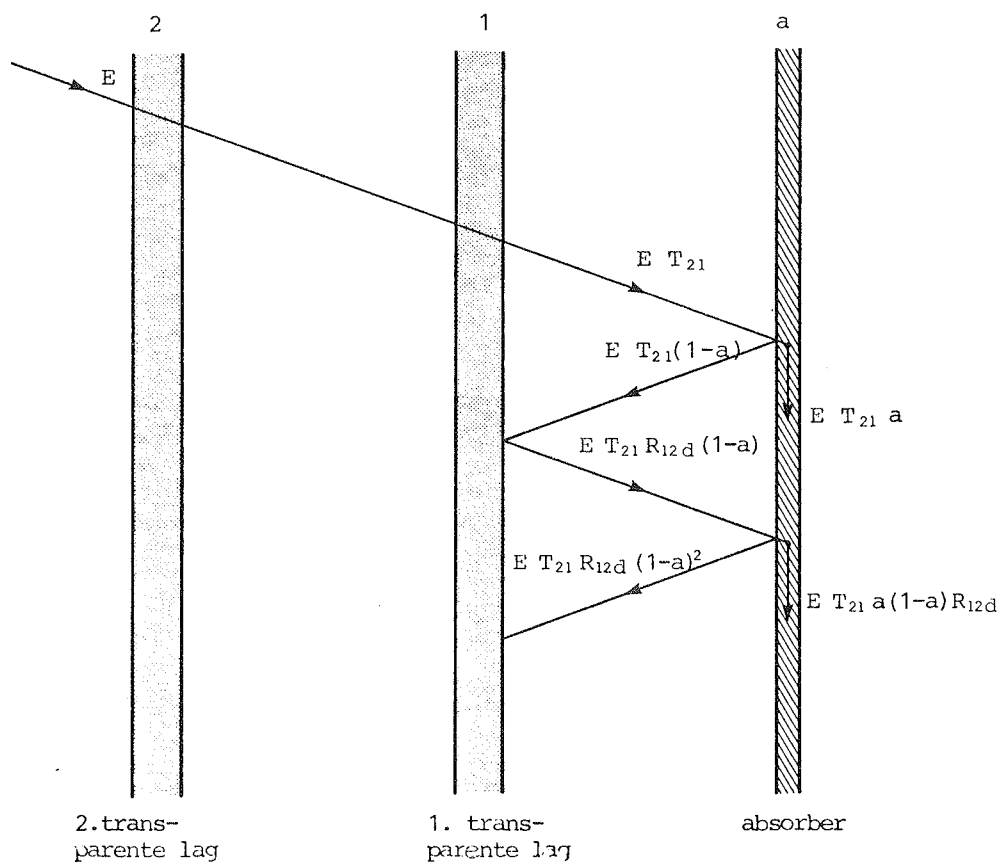


Fig. 2.1.2 Pilediagram for solstrålingen i en solfanger med to transparente lag.

For absorberens absorptionskoefficient, a , har man også en afhængighed af indfaldsvinklen. Et eksempel herpå fra (8) er vist på fig. 2.1.3. På grundlag heraf anvendes følgende udtryk til beregning af a for indfaldsvinkler mindre end 80° .

$$a = a_n (1 - 0,078(1/\cos(i) - 1)) \quad (2.1.19)$$

For indfaldsvinkler større end 80° interpoleres der lineært til 0 ved 90° .

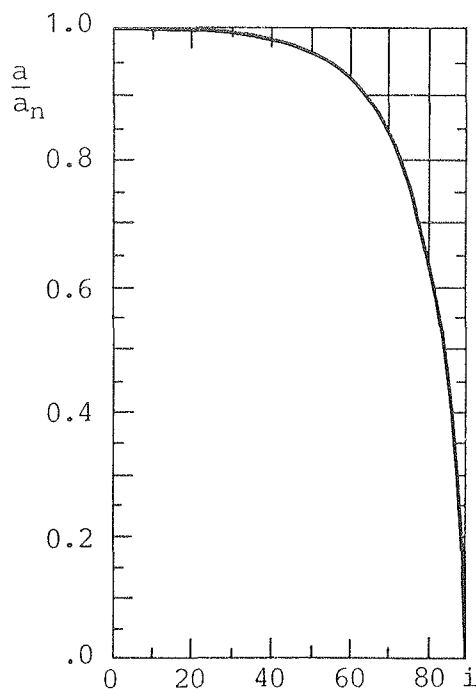


Fig. 2.1.3 Forholdet mellem absorptionskoefficienten ved forskellige indfaldsvinkler og ved normal indstråling for en absorberbelægning af sort maling.

Der tages ikke hensyn til skyggevirkningen af siderne, idet betydningen heraf skønsmæssigt ikke er særlig stor under normale driftsforhold og iøvrigt kun kan beregnes på grundlag af den aktuelle solfangers detaljerede udformning.

De opstillede udtryk for absorptionskoefficienterne anvendes til beregning af tilført effekt, idet man opdeler solstrålingen i en direkte og en diffus strålingsdel. Absorptionskoefficienten for den direkte stråling beregnes for den givne indfaldsvinkel, og for den diffuse stråling beregnes en middelværdi svarende til en indfaldsvinkel på 60° . Man har således for en ét-lags solfanger

$$q_{as1a} = A_{s1a}(1-p_d)E + A_{s1ad}p_dE \quad (2.1.20)$$

$$q_{as1l} = A_{s1l}(1-p_d)E + A_{s1ld}p_dE \quad (2.1.21)$$

og for en to-lags solfanger

$$q_{as2a} = A_{s2a}(1-p_d)E + A_{s2ad}p_dE \quad (2.1.22)$$

$$q_{as21} = A_{s22}(1-p_d)E + A_{s21d}p_dE \quad (2.1.23)$$

$$q_{as22} = A_{s22}(1-p_d)E + A_{s22d}p_dE \quad (2.1.24)$$

hvor i indeks d på absorptionskoefficienterne angiver, at de gælder for diffus stråling. E er den samlede solintensitet på solfangeren, og p_d er den diffuse del af strålingen.

Hermed er den del af modellen, der beskriver den tilførte effekt fra solstråling, opstillet, og i det følgende skal varmetabet fra solfangeren beskrives.

2.2 Varmetab

Når solfangeren er varmere end omgivelserne, vil der ske et varmetab til omgivelserne. Da solstrålingen både tilfører absorber og transparente lag varmeeffekt, må man bestemme varmetabet ved at opstille varmembalancer for absorber og transparente lag og løse disse.

Modeller for varmetab ved ledning, konvektion og varmestråling samt ved ventilation opstilles i det følgende. Det forudsættes, at der er stationære forhold. Hvor udtrykkene for ét-lags og to-lags solfangere er ens på nær indices, opstilles der kun udtryk svarende til en ét-lags solfanger.

Varmetabet ved konvektion fra det transparente lag til den omgivende luft beregnes ifølge (8) af udtrykket, som er anbefalet for solfangere monteret på taget af et hus

$$q_{ku} = \max(5; 8,6v^{0,6}/L_h^{0,4})(t_{lu}-t_l) \quad (2.2.1)$$

hvor v er lufthastigheden i m/s, og L_h er kubikroden af volumenet af huset, hvorpå solfangeren ligger i m. Da volumenet således ikke har større indflydelse på resultatet, antager man, at formlen også gælder for enkelte solfangere og sætter i beregningerne nævneren lig med 1. Temperaturen af det yderste

transparente lags yderside betegnes t_{1u} , og lufttemperaturen kaldes t_l .

Varmetabet ved stråling fra det transparente lag sker for hældende solfangere både til himlen og jorden. Varmetabet beregnes af udtrykket

$$q_{su} = 0,5(1+\cos(s))e_{1u}c_s(T_{1u}^4 - T_h^4) + 0,5(1-\cos(s))e_{1u}c_s(T_{1u}^4 - T_j^4) \quad (2.2.2)$$

hvor s er solfangerens vinkel med vandret, e_{1u} er emissionstallet for det yderste transparente lags yderside, c_s er Stefan Boltzmann-konstanten, T_{1u} og T_j er den absolutte temperatur af det transparente lag og jorden. T_h er den formelle absolutte himmelstrålingstemperatur.

I hulrummet mellem det transparente lag og absorberen sker der en varmeoverførsel ved stråling. Idet man ser bort fra randforholdene, kan man benytte udtrykket

$$q_{shl} = \frac{c_s(T_a^4 - T_{li}^4)}{1/e_a + 1/e_{li} - 1} \quad (2.2.3)$$

hvor e_a og T_a er emissionstallet og den absolutte temperatur af absorberens overside, e_{li} og T_{li} er emissionstallet og den absolutte temperatur af det transparente lags inderside.

I hulrummet sker der også en varmeoverførsel ved konvektion, idet det forudsættes, at den indre flade altid er varmere end den ydre. For forskellige hældninger, s , kan varmeoverførslen ifølge (8) og (9) beregnes af udtrykkene.

$$Gr_b = \frac{g u (t_a - t_{li}) b_{hl}^3}{n^2} \quad (2.2.4)$$

$$Ra_b = Gr_b Pr \quad (2.2.5)$$

hvor g er tyngdeaccelerationen, u er luftens udvidelseskoefficient, n er luftens kinematiske viskositet, b_{hl} er bredden af luftspalten mellem absorberen og det transparente lag. Pr er

luftens Prandtl-tal. Gr_b og Ra_b er Grashof-tallet og Rayleigh-tallet.

For hældninger mindre end 75° med vandret anvendes:

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{Ra_b \cos(s)} \right]^+ \left(1 - \frac{1708 (\sin(1,8s))^{1,6}}{Ra_b \cos(s)} \right)^+ \left[\left(\frac{Ra_b \cos(s)}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (2.2.6)$$

hvor $+$ eksponenten betyder, at parentesens sættes til 0, hvis den antager negative værdier:

For lodrette solfangere anvendes:

$$Nu = \max(1; 0,75 C_L (Ra_b/A)^{1/4}; 0,29 C_t Ra_b^{1/3}) \quad (2.2.7)$$

hvor A er forholdet mellem spaltens højde og tykkelse. C_L og C_t beregnes af udtrykkene

$$C_L = 0,50 / (1 + (0,49/Pr)^{9/16})^{4/9} \quad (2.2.8)$$

$$C_t = \min(0,15; 0,14 Pr^{0,084}) \quad (2.2.9)$$

For hældninger mellem 75° og 90° med vandret interpoleres der lineært.

$$q_{khl} = Nu (k_h/b_{hl})(t_a - t_{li}) \quad (2.2.10)$$

hvor Nu er Nusselt-tallet og k_h er varmeledningstallet for luften i spalten.

Varmestrømmen gennem det transparente lag kan beregnes af udtrykket

$$q_{liu} = (k_l/b_l)(t_{li} - t_{lu}) \quad (2.2.11)$$

hvor k_l er varmeledningstallet for det transparente lag, og b_l er tykkelsen af laget.

Gennem solfangerens bagside sker der et varmetab, der kan beregnes af følgende udtryk, idet overgangsisolansen betegnes m_b

$$q_{1b} = k_{tab}(t_a - t_1), \quad k_{tab} = 1/(b_{ib}/k_{ib} + m_b) \quad (2.2.12)$$

hvor b_{ib} og k_{ib} er bagsideisoleringens tykkelse og varmeledningstal betegnes b_{ib} og k_{ib} . Der ses bort fra eventuelle hulrum mellem absorbereren og isoleringen.

Varmetabet gennem solfangerens rand beregnes på tilsvarende måde, idet man dog må indføre en arealfaktor

$$q_{1r} = \frac{(A_r/A_t)(t_a - t_1)}{b_{ir}/k_{ir} + m_r} \quad (2.2.13)$$

hvor A_r og A_t er arealet af randen og det transparente lag. Randarealet kan beregnes som solfangerens højde (tykkelse) gange dens omkreds. Udtrykket er baseret på én-dimensional varmetransmission igennem et isoleringslag, hvilket er en meget forenklet model, idet randtabet ofte vil være kraftigt påvirket af varmeledning i flere dimensioner og især af kuldebroer. Da randtabet normalt er beskedent, skal der ikke gøres mere ud af modellen på dette punkt.

Varmetab kan også ske ved ventilation, d.v.s. udskiftning af luft i hulrummet med udeluft. Under forudsætning af at ventilationstabet er mindre end varmeoverførslen ved konvektion, i hulrummet kan ventilationstabet beregnes af udtrykket

$$q_{vhl} = (V_1/A_t)r_1c_1 \left(\frac{t_a + t_{11}}{2} - t_1 \right) \quad (2.2.14)$$

hvor V_1 er luftstrømmen ind i solfangeren, r_1 og c_1 er luftens massefylde og varmekapacitet ved lufttemperaturen. Udtrykket er baseret på, at luften i spalten mellem absorbereren og det transparente lag har en middeltemperatur svarende til fladernes middeltemperatur

For solfangere med to transparente lag kan de opstillede udtryk anvendes for det inderste hulrum og tilsvarende kan opstilles for det yderste hulrum ved ændring i indices.

Det skal bemærkes, at man i de opstillede udtryk benytter absorbertemperaturen, t_a , som er middeltemperaturen af den absorberende overflade, medens man som inddata til beregningsmodellen ønsker at benytte middeltemperaturen af det varmetransporterende medium. Forskellen mellem disse to temperaturer skal der i det følgende opstilles en detaljeret model for.

2.3 Varmeroverføring i absorber

Der behandles i det følgende kun absorbere, hvori det varmetransporterende medium er en væske. På fig. 2.3.1 er der vist fire typiske absorberudformninger. I type 1 sker varmeoverføringen fra absorberoverfladen til væsken ved ledning vinkelret igennem absorberens øverste plade og ved konvektion i væsken. Den effekt, der overføres fra absorberens øverste plade til væsken består af den nettoeffekt, der er overført til væsken og bagsidetabet. Man har således

$$q_{01} + q_{1b} = (t_a - t_m) / (b_{a\phi} / k_{a\phi} + 1 / h_m) \quad (2.3.1)$$

hvor h_m er varmeoverføringskoefficienten for væsken. Udtryk til beregning af denne opstilles senere. Den øverste plade i absorberen har en tykkelse og et varmeledningstal, der h.h.v. betegnes $b_{a\phi}$ og $k_{a\phi}$. Middeltemperaturen af væsken betegnes t_m . Bagsidetabet bør egentlig for denne absorbertype beregnes på grundlag af væsketemperaturen i stedet for absorbertemperaturen, som benyttes i udtrykket 2.2.12, men fejlen vil normalt være forsvindende.

I absorbere af type 2 sker varmeoverføringen ved ledning i absorberpladen hen mod kanalen, hvor den overføres til væsken. Der er således ikke samme temperaturer hen over absorberoverfladen i det viste tværsnit, og man må derfor fastlægge en middeltemperatur, der kan benyttes i udtrykkene for varmetabet. Idet man forudsætter, at kanalen har samme temperatur overalt, er problemet især at bestemme middeltemperaturen af pladen mellem kanalerne. Temperaturfordelingen i absorberpladen afhænger bl.a. af koefficienterne for varmetab fra dens overside og underside. Den første kan bestemmes af udtrykket

$$k_{tal} = (q_{shl} + q_{khl}) / (t_a - t_{li}) \quad (2.3.2)$$

medens den anden, k_{tab} , fås direkte af udtrykket 2.2.12. Idet man antager, at begge disse varmetabskoefficienter er konstante overalt på absorberpladen kan man, som det er gjort i (5, 10), bestemme pladetemperaturen ved at opstille en differentiaalligning. Løsningen giver følgende udtryk for temperaturfordelingen over pladen

$$t_{px} = \frac{k_{tal} t_{li} + k_{tab} t_l + q_a}{k_{tal} + k_{tab}} + \frac{t_k \cosh(mx)}{\cosh(m(b-d)/2)} - \quad (2.3.3)$$

$$\frac{(k_{tal} t_{li} + k_{tab} t_l + q_a) \cosh(mx)}{(k_{tal} + k_{tab}) \cosh(m(b-d)/2)}$$

hvor x er afstanden fra midt mellem rørene. Temperaturen af kanalen betegnes t_k . Bredden af den del af absorberen, der er knyttet til kanalen betegnes b , og kanalens bredde betegnes d . Hjælpestørrelsen m er bestemt ved udtrykket

$$m = ((k_{tal} + k_{tab}) / (k_p b_p))^{1/2} \quad (2.3.4)$$

hvor b_p og k_p henholdsvis er absorberpladens tykkelse og varmeledningsevne. Det skal bemærkes, at man ser bort fra varmeledning i absorberens længderetning, selvom der som følge af væskens opvarmning, vil være temperaturforskelle i længderetningen.

Ved at integrere temperaturen over hele pladen mellem kanalerne kan middeltemperaturen af denne bestemmes til

$$t_{pm} = \frac{k_{tal} t_{li} + k_{tab} t_l + q_a}{k_{tal} + k_{tab}} (1-F) + t_k F \quad (2.3.5)$$

hvor F er pladens finnefaktor, der bestemmes ved

$$F = \frac{\tanh(m(b-d)/2)}{m(b-d)/2} \quad (2.3.6)$$

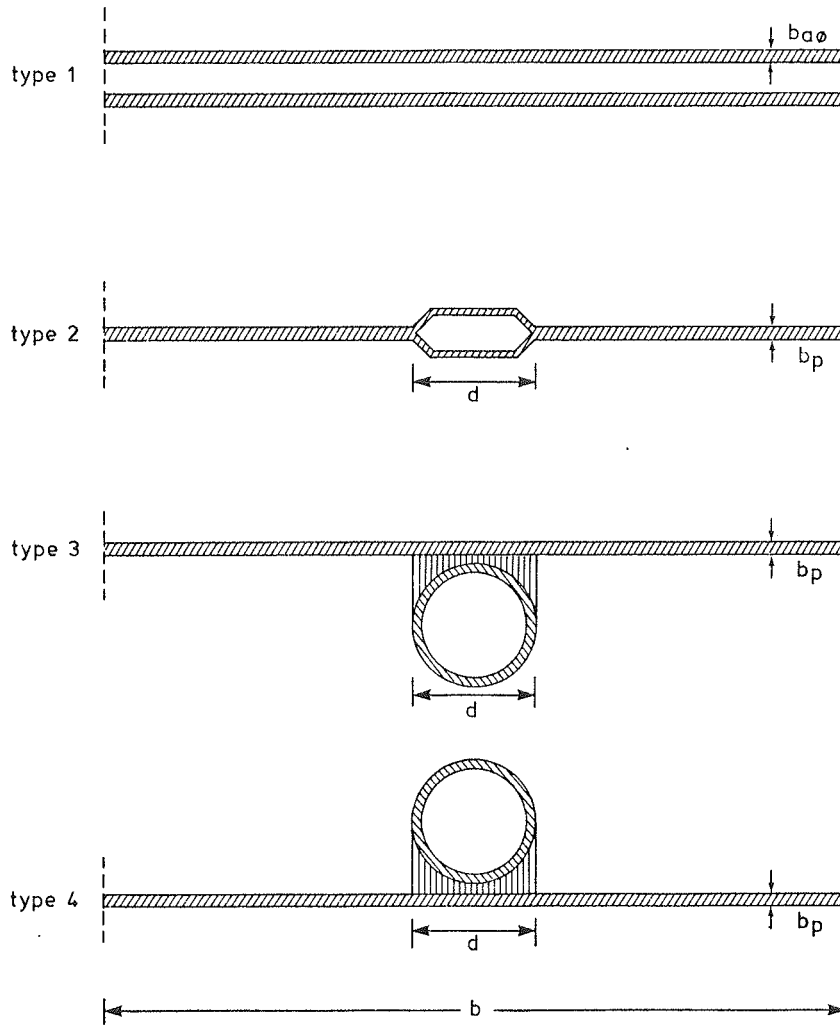


Fig. 2.3.1. Tværsnit i fire typiske absorberudformninger.

For hele absorberen kan man herefter bestemme en middeltemperatur ved at vægte middelpladetemperaturen og kanaltemperaturen i forhold til pladebredden og kanalbredden

$$t_a = t_{pm}(b-d)/b + t_k d/b \quad (2.3.7)$$

Af udtrykkene 2.3.5 og 7 kan man få følgende sammenhæng mellem middeltemperaturen af absorberen og temperaturen af kanalen

$$t_k = \frac{(k_{tal}t_{li} + k_{tab}t_l + q_a)(F-1)(b-d) + (k_{tal} + k_{tab})t_a b}{(k_{tal} + k_{tab})(F(b-d) + d)} \quad (2.3.8)$$

Dernæst kan man udtrykke sammenhængen mellem temperaturen af kanalen og af væsken ved

$$q_{02} = (A_k/b)h_m(t_k - t_m) \quad (2.3.9)$$

hvor A_k er det indvendige areal af kanalen pr. længdeenhed. Der ses bort fra varmeledningsmodstanden i selve kanalvæggen.

Af udtrykkene 2.3.8 og 9 har man således den søgte sammenhæng mellem den overførte effekt, absorberens middeltemperatur og temperaturen af væsken.

For absorbere af type 3 kan man ved at antage, at pladen svarende til bredden af kanal-pladeforbindelsen overalt har samme temperatur, t_f , direkte benytte udtrykket 2.3.8 for sammenhængen mellem t_a og t_f ved at erstatte t_k med t_f i 2.3.8.

Derimod må man for sammenhængen mellem t_f og t_m benytte udtrykket

$$q_{03} = \frac{t_f - t_m}{b/h_f + b/(A_k h_m)} \quad (2.3.10)$$

svarende til, at der ses bort fra varmeledningsmodstanden i selve kanalvæggen.

Af udtrykkene 2.3.8 med t_f istedet for t_k og 2.3.10 har man således den søgte sammenhæng mellem q_{03} , t_a og t_m .

For absorbere af type 4 kan middeltemperaturen af pladen bestemmes af et udtryk, der svarer til 2.3.5

$$t_{pm} = \frac{k_{tal}t_{li} + k_{tab}t_l + q_a}{k_{tal} + k_{tab}} (1-F) + t_f F \quad (2.3.11)$$

Middeltemperaturen af hele absorberen kan bestemmes af udtrykket 2.3.7. Herved kan man få følgende sammenhæng mellem t_a , t_f og t_k

$$t_a = \frac{(k_{tal}t_{li} + k_{tab}t_l + q_a)(1-F)(b-d)}{(k_{tal} + k_{tab})b} + \frac{t_f F(b-d)}{b} + t_k d/b \quad (2.3.12)$$

Idet man regner med, at selve kanalen har samme temperatur overalt, og at den ikke har nogen varmeledningsmodstand kan følgende sammenhænge opstilles

$$t_k = t_m - q_{o4} b / A_k h_m \quad (2.3.13)$$

$$t_f = t_k + q_{o4} (b-d) / h_f \quad (2.3.14)$$

Ved indsættelse i 2.3.12 fås den ønskede sammenhæng mellem den overførte effekt, middeltemperaturen af absorberen og temperaturen af væsken.

$$q_{o4} = \frac{(k_{tal} + k_{tab})(-F(b-d)t_m - dt_m + bt_a) - (k_{tal}t_{li} + k_{tab}t_l + q_a)(1-F)(b-d)}{(k_{tal} + k_{tab})(-F(b-d)b/A_k h_m + F(b-d)^2/h_f - db/A_k h_m)} \quad (2.3.15)$$

Herefter skal der opstilles udtryk til beregning af varmeoverføringskoefficienten for væskestrømningen i kanalerne.

Varmeoverføringskoefficienten for væsken kan ifølge (11) for laminar strømning bestemmes af følgende udtryk, hvori man benytter kanalens hydrauliske diameter

$$d_h = 4T/P \quad (2.3.16)$$

$$Re_d = vd_h/n_m < 2320 \quad 0,1 < Re_d Prd_h/L < 10000 \quad (2.3.17)$$

$$h_m = \left(3,65 + \frac{0,0668 Re_d Prd_h/L}{1 + 0,045 (Re_d Prd_h/L)^{2/3}} \right) (m_m/m_o)^{0,14} (k_m/d_h) \quad (2.3.18)$$

hvor T og P er kanalens tværsnitsareal og indvendig omkreds. Væskens strømningshastighed betegnes med v , og væskens kinematiske viskositet betegnes med n_m . Væskens dynamiske viskositet ved middeltemperaturen af væsken og overfladetemperaturen af kanalen betegnes m_m og m_o . Længden af kanalen betegnes L . Pr er Prandtl-tallet for væsken, og k_m er varmeledningstallet for væsken.

Tilsvarende kan varmeoverføringskoefficienten ifølge (11) for turbulent strømning beregnes af udtrykkene

$$2320 < Re < 1000\ 000 \quad 0,6 < Pr < 500$$

$$h_m = 0,116(Re_d^{2/3} - 125)Pr^{1/3}(1 + (d_h/L))^{2/3}(m_m/m_o)^{0,14}(k_m/d_h) \quad (2.3.19)$$

For udtrykkene gælder det, at alle data for væsken skal indsættes svarende til middeltemperaturen af denne, dog skal m_o indsættes ved kanalvæggens temperatur.

2.4 Opstilling af varmebalancer

På grundlag af de opstillede udtryk for beregning af absorberet solstråling, varmetab fra solfangeren og varmeoverføring i absorberen kan man opstille varmebalancer for hvert lag i solfangeren. Som vist på figur 2.4.1 har man for en ét-lags solfanger følgende tre lag: absorberens overflade, det transparente lags indvendige og udvendige overflade. Svarende hertil kan der opstilles følgende tre varmebalancer, idet man deler den absorberende solstråling i det transparente lag ligeligt ud mellem dets to overflader.

$$q_{as1a} - q_{sh1} - q_{kh1} - q_{lb} - q_{lr} = q_o \quad (2.4.1)$$

$$0,5q_{as1l} + q_{sh1} + q_{kh1} - q_{vh1} = q_{liu} \quad (2.4.2)$$

$$q_{liu} + 0,5q_{as1l} = q_{su} + q_{ku} \quad (2.4.3)$$

Det skal bemærkes, at man lader både bagsidetabet og randtabet ske fra absorberen. Ventilationstabet fratrækkes konvektionsvarmestrømmen således, at den effekt, der afgives ved konvektion fra et lag, ikke påvirkes direkte, men den effekt, der tilføres det næste lag ved konvektion, reduceres.

Tilsvarende kan man for en to-lags solfanger, som er vist på fig. 2.4.2, opstille fem varmebalancer

$$q_{as2a} - q_{sh1} - q_{kh1} - q_{lb} - q_{lr} = q_o \quad (2.4.4)$$

$$0,5q_{as2l} + q_{sh1} + q_{kh1} - q_{vh1} = q_{liu} \quad (2.4.5)$$

$$q_{1iu} + 0,5q_{as21} = q_{sh2} + q_{kh2} \quad (2.4.6)$$

$$0,5q_{as22} + q_{sh2} + q_{kh2} - q_{vh2} = q_{2iu} \quad (2.4.7)$$

$$q_{2iu} + 0,5q_{as22} = q_{su} + q_{ku} \quad (2.4.8)$$

Hermed er der i hvert tilfælde opstillet lige så mange varmembalancer, som der er ubekendte temperaturer. Da udtrykkene, der indgår i varmembalancerne, imidlertid ikke er lineære funktioner af de ubekendte temperaturer, må ligningssystemerne løses ved iteration.

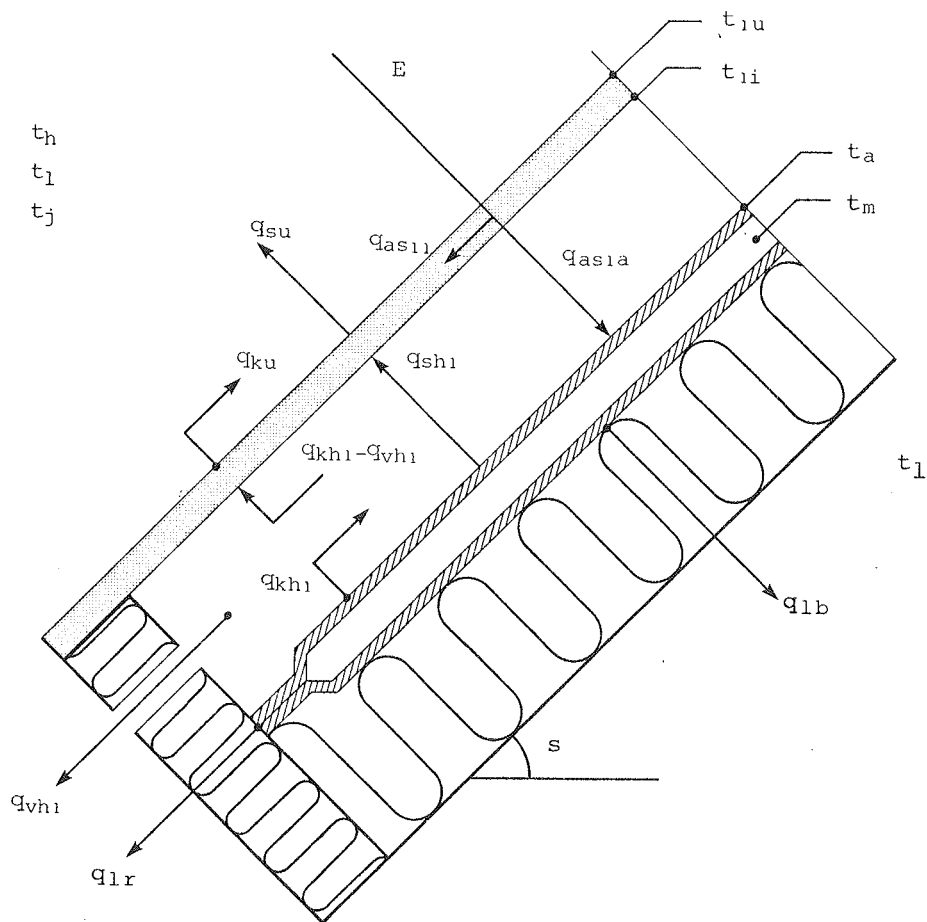


Fig. 2.4.1 Bidrag til varmembalancerne for solfanger med ét transparent lag.

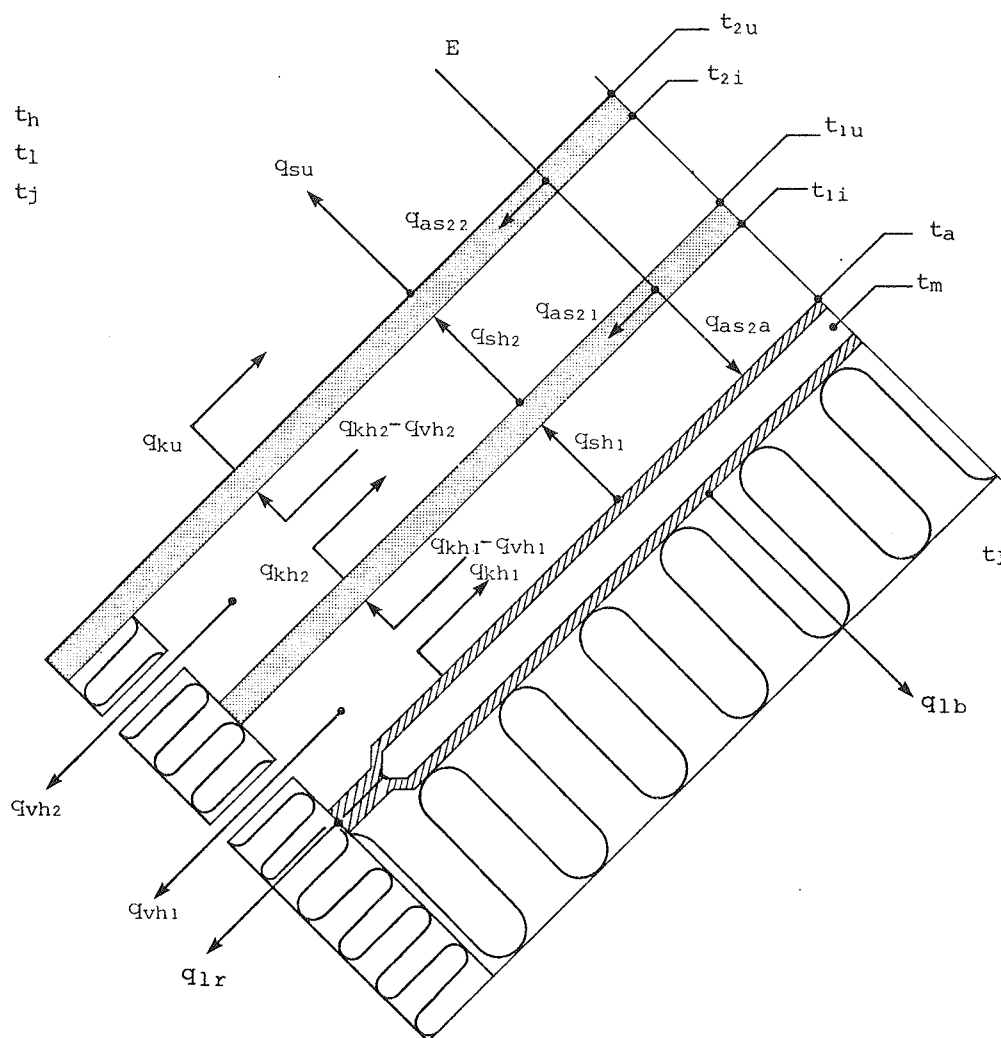


Fig. 2.4.2 Bidrag til varmebalancerne for solfanger med to transparente lag.

2.5 Program til beregning af solfangeres effektivitet

Da de opstillede ligningssystemer må løses iterativt, og da der skal udføres en del beregninger på grundlag af den detaljerede model er der udarbejdet et program på en mindre bordregnemaskine (HP-85), der kan benyttes hertil.

Ved at indsætte de forskellige udtryk for absorberet solstråling, varmetab fra solfangeren og varmeoverføring i absorberen i de opstillede varmebalancer samt foretage visse omskrivninger kan disse udtrykkes ved følgende matrixligning

$$\bar{A}T = \bar{B}$$

(2.5.1)

hvor vektoren T består af de ubekendte temperaturer. Elementerne i $\bar{A}$ og $\bar{B}$ er imidlertid afhængige af temperaturer, og derfor kan matrixligningen ikke løses direkte. Løsningen udføres ved, at man starter med at skønne de søgte temperaturer. Med disse indsat i $\bar{A}$ og $\bar{B}$ beregnes ved løsning af 2.5.1 nye temperaturer, som benyttes til at bestemme nye værdier for $\bar{A}$ og $\bar{B}$. Man fortsætter på denne måde, indtil et stopkriterium for iterationen er opfyldt. Stopkriteriet er baseret på ændringen i varmeoverføringssevnerne, der fås ved at dividere de forskellige varmestrømme med den drivende temperaturforskelle. Når ændringen i alle varmeoverføringssevnerne er mindre end 1% af deres værdi, stoppes iterationen. Normalt gennemføres der kun et par iterationer før stopkriteriet er opfyldt.

Efter at temperaturerne er bestemt, beregnes svarende hertil solfangerens effektivitet. Programmet er desuden forsynet med passende rutiner, så flere tilfælde automatisk gennemregnes og tegnes ud. Herved er man i stand til at lave parametervariationer uden større besvær.

En detaljeret beskrivelse af og vejledning i brug af programmet findes i (12), og det skal derfor ikke nærmere omtales her. Programmet anvendes i det følgende bl.a. til teoretisk at undersøge indflydelsen af vejr- og driftsforhold på solfangeres effektivitet med henblik på vurdering af metoder til prøvning af solfangeres effektivitet. Programmet vil senere blive sammenlignet med målinger og derefter anvendt til en parameteranalyse af typiske solfangerkonstruktioner.

2.6 Forenklede beregningsmodeller for solfangeres effektivitet

Efter opstillingen af den detaljerede model skal der omtales nogle meget forenklede modeller, som benyttes i procedurer for prøvning af solfangere

Den første model kan udtrykkes på følgende måde

$$n = n_o - k_o(t_m - t_1)/E \quad (2.6.1)$$

hvor n_0 og k_0 er solfangerens maksimaleffektivitet og varmetabskoefficient, som bestemmes ved prøvning. Modellens anvendelsesområde er af prøveproceduren begrænset, idet indfaldsvinklen skal være mindre end 30° , og solintensiteten skal være højere end 630 W/m^2 .

Den anden model er en udvidelse af den første og kan udtrykkes på følgende måde

$$n = n_0 - k_0(t_m - t_l)/E - k_1((t_m - t_l)/E)^2 \quad (2.6.2)$$

hvor n_0 , k_0 og k_1 bestemmes ved prøvning. Modellens begrænsninger er som for den første model.

Den tredje model er baseret på, at varmetabskoefficienten udtrykkes således

$$k = k_0 + k_1(t_m - t_l) \quad (2.6.3)$$

Herved bliver udtrykket for effektiviteten

$$n = n_0 - k_0(t_m - t_l)/E - k_1(t_m - t_l)^2/E \quad (2.6.4)$$

med samme gyldighedsområde som for de andre modeller.

Det skal bemærkes, at koefficienterne k_0 og k_1 ikke passer sammen for de tre modeller.

Disse forenklede modeller skal senere vurderes ved hjælp af den detaljerede beregningsmodel.

3. EFFEKTIVITETEN AF SOLFANGERE VED FORSKELLIGE FORHOLD

Effektiviteten af en solfanger afhænger foruden af solfangerens konstruktion også af monterings-, drifts- og vejrforholdene. For at kunne vurdere indflydelsen af de forskellige parametre skal effektiviteten for nogle typiske solfangere beregnes ved varierende forhold.

På grundlag af resultaterne kan man bedømme, hvor store tilnærmelser man gør ved at benytte de forenkledte modeller ved præsentation af prøvningsresultaterne. Man kan ligeledes vurdere betydningen af prøveforholdene. Indflydelsen af solfangerens konstruktion skal undersøges senere.

3.1 Vejrforholdenes indflydelse på effektiviteten

I de modeller man benytter ved præsentation af resultaterne af effektivitetsprøvningen indgår væske- og lufttemperaturen samt solintensiteten på forenklet vis som parametre. Der tages ikke hensyn til, at effektiviteten også afhænger af de øvrige vejrparametre. Betydningen heraf undersøges ved hjælp af de opstillede beregningsmodeller og det tilhørende beregningsprogram.

Sammenligningen er udført ved, at man for nogle typiske monterings- og driftsforhold samt vejrforhold har beregnet effektiviteten med den detaljerede model af nogle typiske solfangere ved forskellige væsketemperaturniveauer svarende til en effektivitetsprøvning. De beregnede effektiviteter er ved regressionsanalyse benyttet til bestemmelse af konstanterne i de forenkledte modeller. Herefter er den relative ændring i effektiviteten ved variation af de forskellige vejrparametre beregnet med den detaljerede og de forenkledte modeller. Resultaterne er angivet i diagrammer.

De benyttede solfangeres data fremgår af skema 3.1.1. Type 25 og 26 er begge ét-lags solfangere med en almindelig absorberbelægningstype men med henholdsvis en absorber af dobbeltpladetyper og rør-pladetyper.

Solfanger-typenr.		25	26	27	28
Antal transparente lag		1	1	1	2
Absorberbelægningstype		alm.	alm.	sel.	alm.
Absorberudformning		dob-pl.	rør-pl.	dob-pl.	dob-pl.
Transparente lag					
Tykkelse	mm	4	4	4	4
Brydningsindeks		1,53	1,53	1,53	1,53
Ekstinktionskoefficient	l/m	20	20	20	20
Emissionskoefficient		0,88	0,88	0,88	0,88
Varmeledningsevne	W/mC	0,8	0,8	0,8	0,8
Absorber					
Absorptionskoeff.(normal)		0,95	0,95	0,95	0,95
Absorptionskoeff.(vinkel)		0,078	0,078	0,078	0,078
Emissionskoefficient		0,95	0,95	0,10	0,95
Antal kanaler		1	10	1	1
Kanallængde	m	2	2	2	2
Kanalafstand	m		0,10		
Kanalens tværsnitsareal	mm ²	2000	78,5	2000	2000
Kanalens perimeter	mm	2000	31,4	2000	2000
Tykkelse af absorberplade	mm	1	1	1	1
Pladens varmeledningsevne	W/mC	50	200	50	50
Plade-kanal-forbindelse	W/mC		15		
Isolering					
Tykkelse af bagsideisol.	m	0,050	0,050	0,050	0,050
Varmeledn.af bagsideisol.	W/mC	0,045	0,045	0,045	0,045
Tykkelse af randisolering	m	0,025	0,025	0,025	0,025
Varmeledn.af randisol.	W/mC	0,045	0,045	0,045	0,045
Transparent areal					
Randareal	m ²	2,00	2,00	2,00	2,00
Tykkelse af luftlag	mm	50	50	50	25
Ventilation af luftlag	m ³ /h	0	0	0	0

Type 27 er en ét-lags solfanger med selektiv absorberbelægning, og type 28 er en to-lags solfanger med almindelig absorberbelægningstype. Begge har absorbere af dobbeltpladetyper.

Monterings- og driftsforholdene er vist i skema 3.1.2, og vejrforholdenes referenceværdier fremgår af skema 3.1.3.

Mont.- og driftsforhold typenr.		45
Solfangerens vinkel med vandret	grader	45
Varmeovergangstal for bagside	W/°Cm ²	25
Varmeovergangstal for rand	W/°Cm ²	25
Væsketype (PG=propylenglykol)		PG
Glykolkoncentration (vægt pct.)	%	50
Massestrøm pr transparent areal	g/sm ²	20
Vasketemperatur	°C	60

Skema 3.1.2 Monterings- og driftsforhold

Vejrforhold typenr.		5	20
Lufttemperatur	°C	20	20
Himmelstrålingstemperatur	°C	0	0
Jordstrålingstemperatur	°C	20	20
Solintensitet	W/m ²	1000	1000
Diffus strålingsandel	%	20	20
Indfaldsvinkel	grader	0	0
Vindhastighed	m/s	5	0

Skema 3.1.3 Vejrforhold

Effektiviteten af solfangerne ved varierende vasketemperaturer er vist på fig. 3.1.1 sammen med de forenkede modeller. Det ses, at den retlinjede model afviger lidt fra de andre.

Da indflydelsen af en parameter ofte er lille og næsten den samme uafhængigt af solfangerkonstruktionen, er der i det følgende kun medtaget de solfangere, hvor konstruktionen har en vis indflydelse.

På fig. 3.1.2 kan man se, hvor godt de forenklede modeller præsenterer effektiviteten ved varierende lufttemperatur. Især for solfangeren med almindelig absorberbelægning passer de forenklede modeller ikke særlig godt, fordi de ikke er afhængige af lufttemperaturen men af forskellen mellem væsketemperaturen og lufttemperaturen. Afvigelsen kan mindskes ved at benytte lufttemperaturens referenceværdi, d.v.s. den lufttemperatur man har ved prøvningen som vist i den ekstra version af den tredje model. For den selektive solfanger har varmetabet og dermed lufttemperaturen mindre indflydelse.

På fig. 3.1.3 kan man tilsvarende se solintensitetens indflydelse. De to første forenklede modeller afviger meget fra den detaljerede model, hvorimod den tredje forenklede model for solfangeren med dobbeltpladeabsorberen ligger næsten oven i den detaljerede model. For solfangeren med rør-plade absorberen er der en lille afvigelse, som skyldes overtemperaturen, der opstår som følge af varmemodstanden især i rør-plade forbindelsen.

På fig. 3.1.4 kan man se indflydelsen af indfaldsvinklen og den diffuse stråling. Det ses, at for indfaldsvinkler under 30° er effektiviteten konstant. Den diffuse stråling nedsætter effektiviteten en hel del, idet en ændring i diffus stråling på 20%, som nemt kan forekomme, medfører en 5% lavere effektivitet.

På fig. 3.1.5 kan man se indflydelsen af vindhastigheden for en almindelig og en selektiv solfanger. Det ses, at indflydelsen er stor for den almindelige solfanger og især ved de lave vindhastigheder. Derimod betyder det ikke særligt meget, om der er en vindhastighed på 4 m/s eller 8 m/s.

På fig. 3.1.6 kan man se indflydelsen af strålingstemperaturen af jord og himmel. Specielt er indflydelsen ved en lav vindhastighed medtaget. Indflydelsen ved vindpåvirkning er beskeden, selv om strålingstemperaturerne varierer over et stort område. Men når der ikke er nogen vindpåvirkning, er der en forøget indflydelse af varmestrålingen.

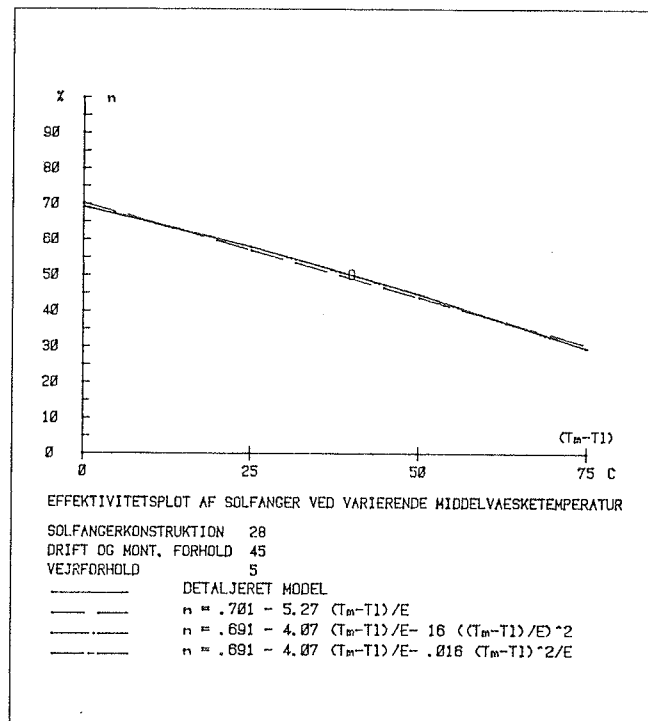
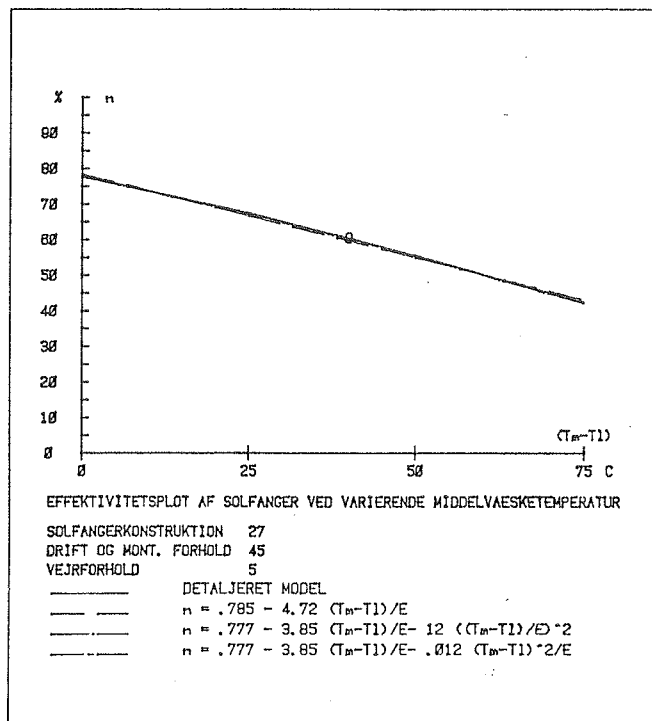
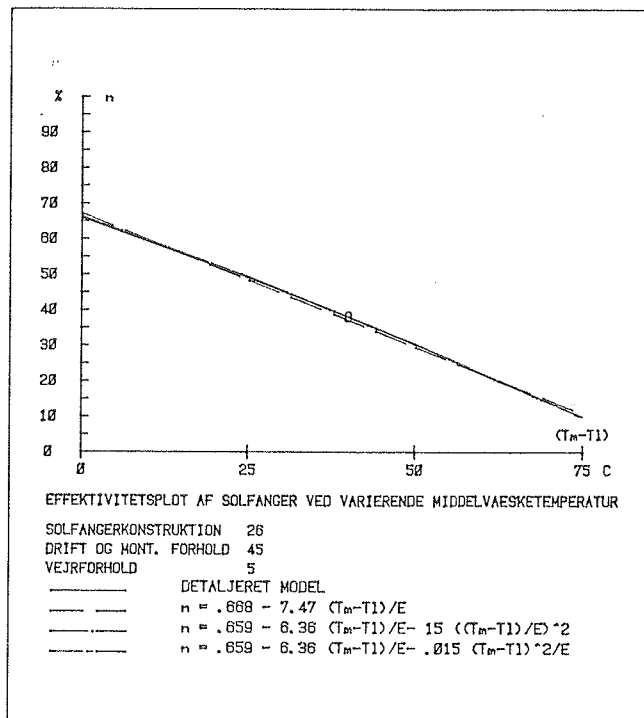
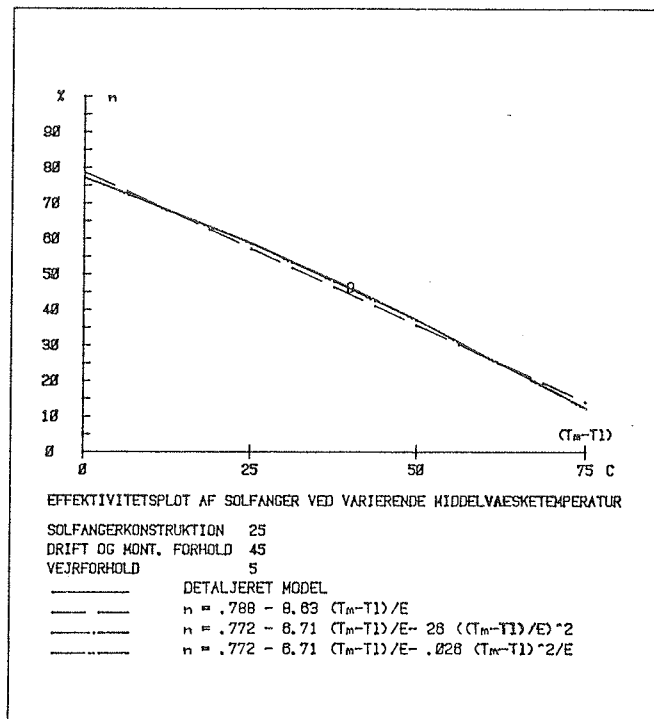


Fig. 3.1.1 Effektivitet ved varierende middelvæsketemperatur

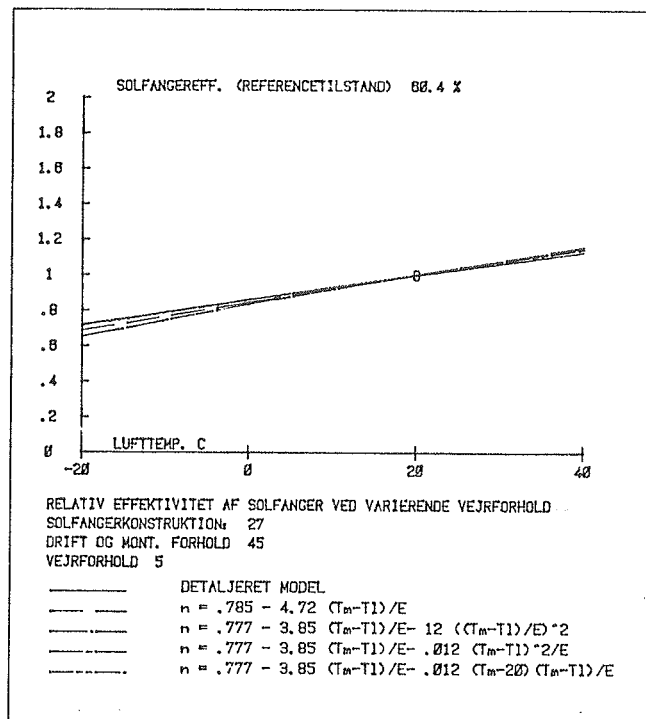
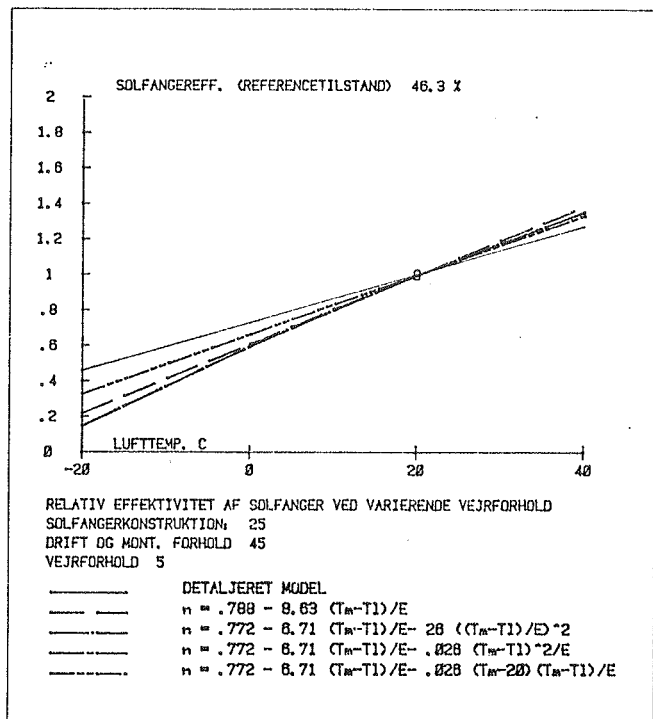


Fig. 3.1.2 Relativ effektivitet ved varierende lufttemperatur

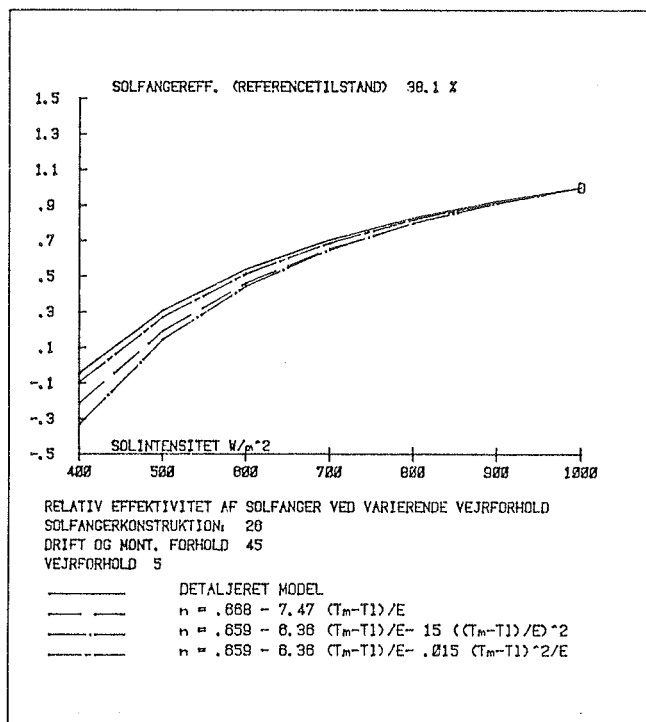
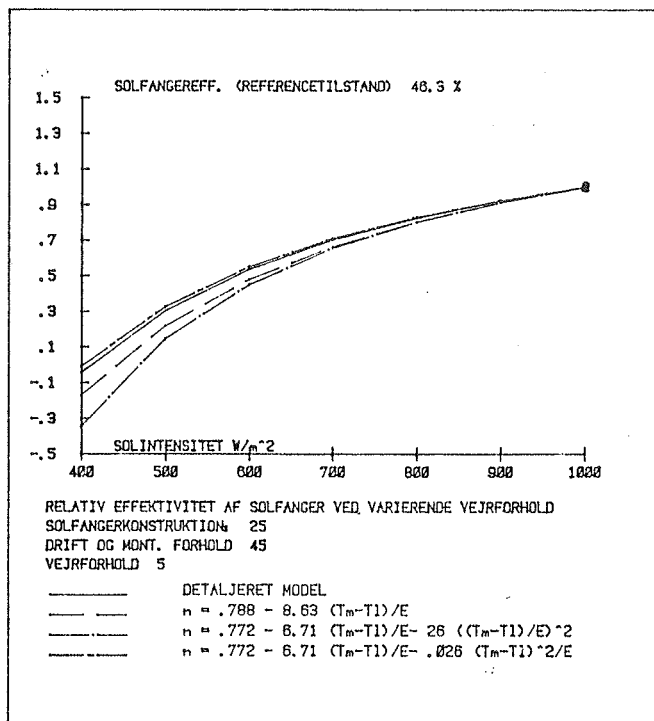


Fig. 3.1.3 Relativ effektivitet ved varierende solintensitet.

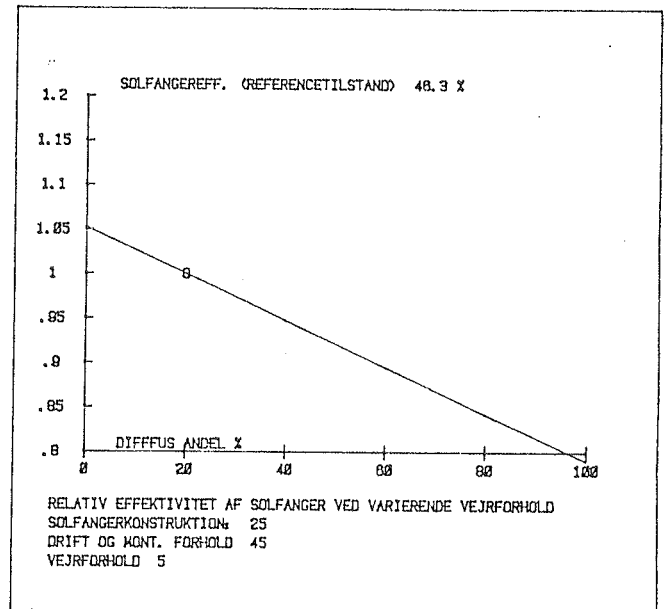
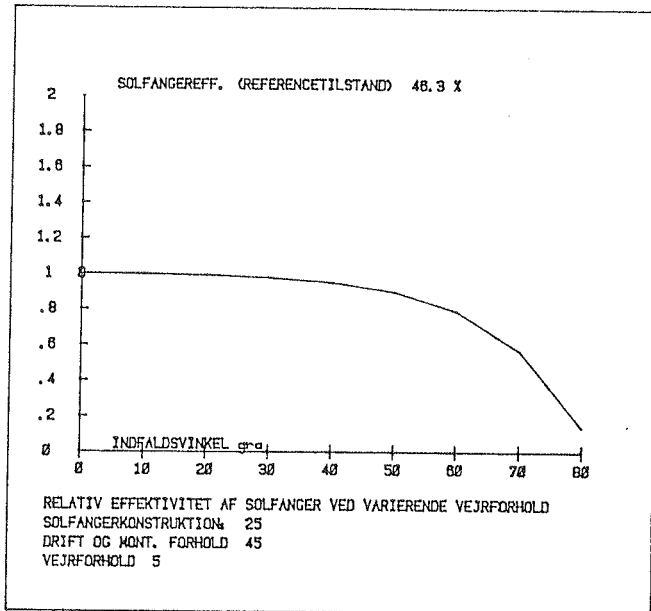


Fig. 3.1.4 Relativ effektivitet ved varierende indfaldsvinkel og diffus stråling

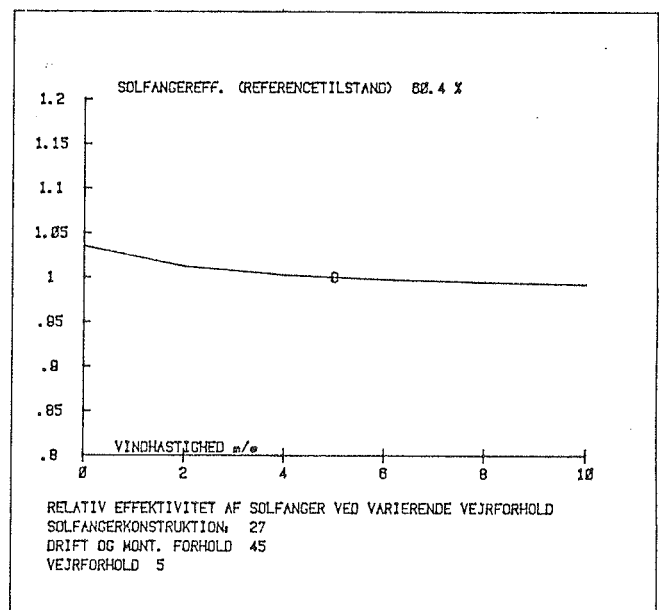
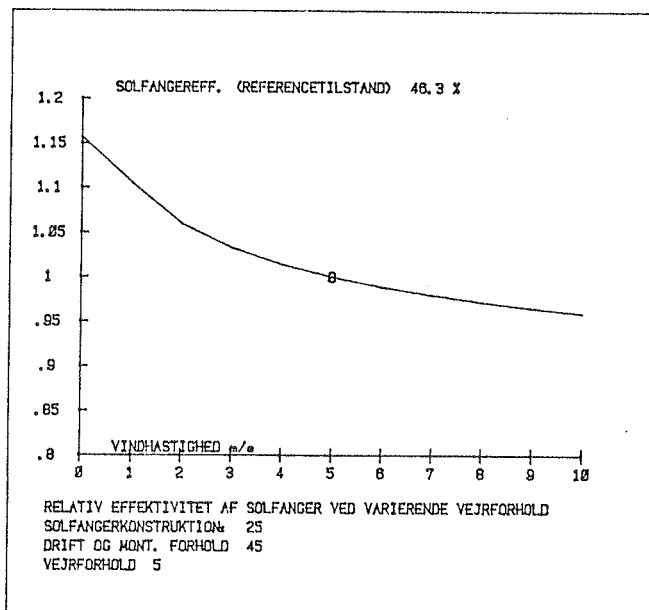


Fig. 3.1.5 Relativ effektivitet ved varierende vindhastighed.

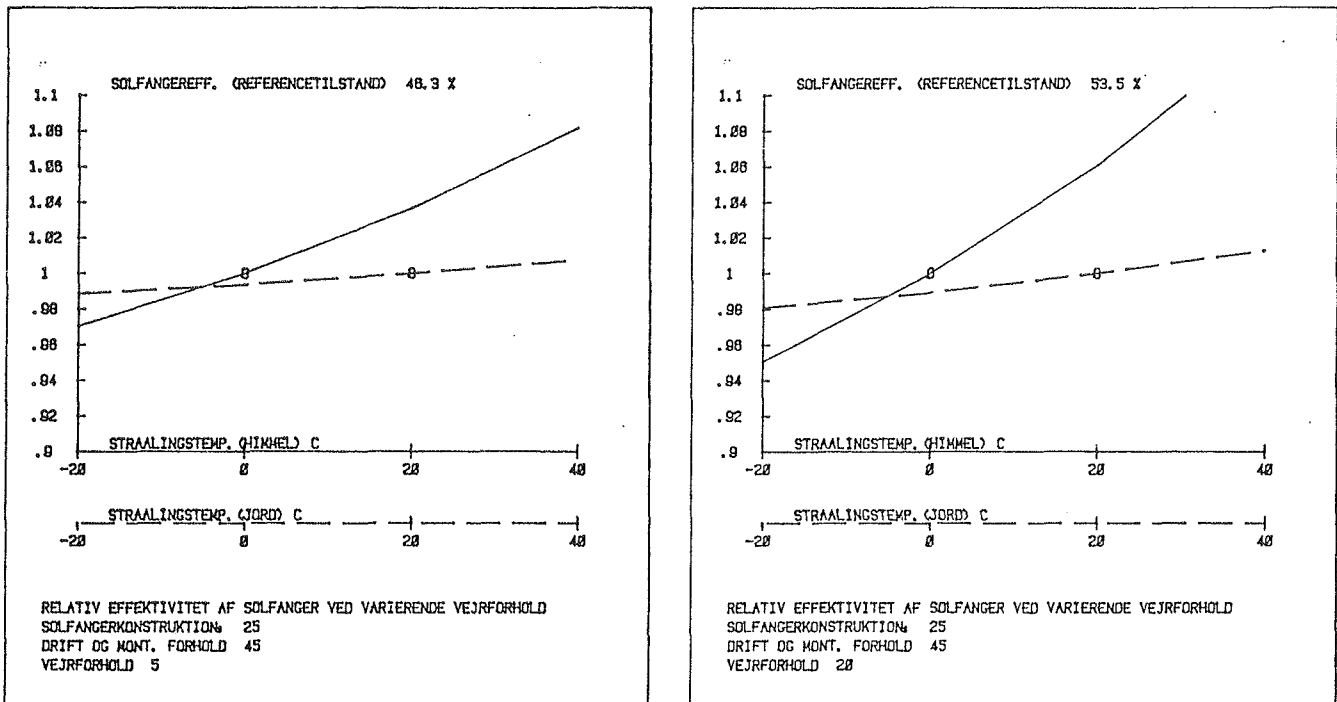


Fig. 3.1.6 Relativ effektivitet ved varierende strålingstemperatur for jord og himmel.

3.2 Monterings- og driftsforholdenes indflydelse på effektiviteten

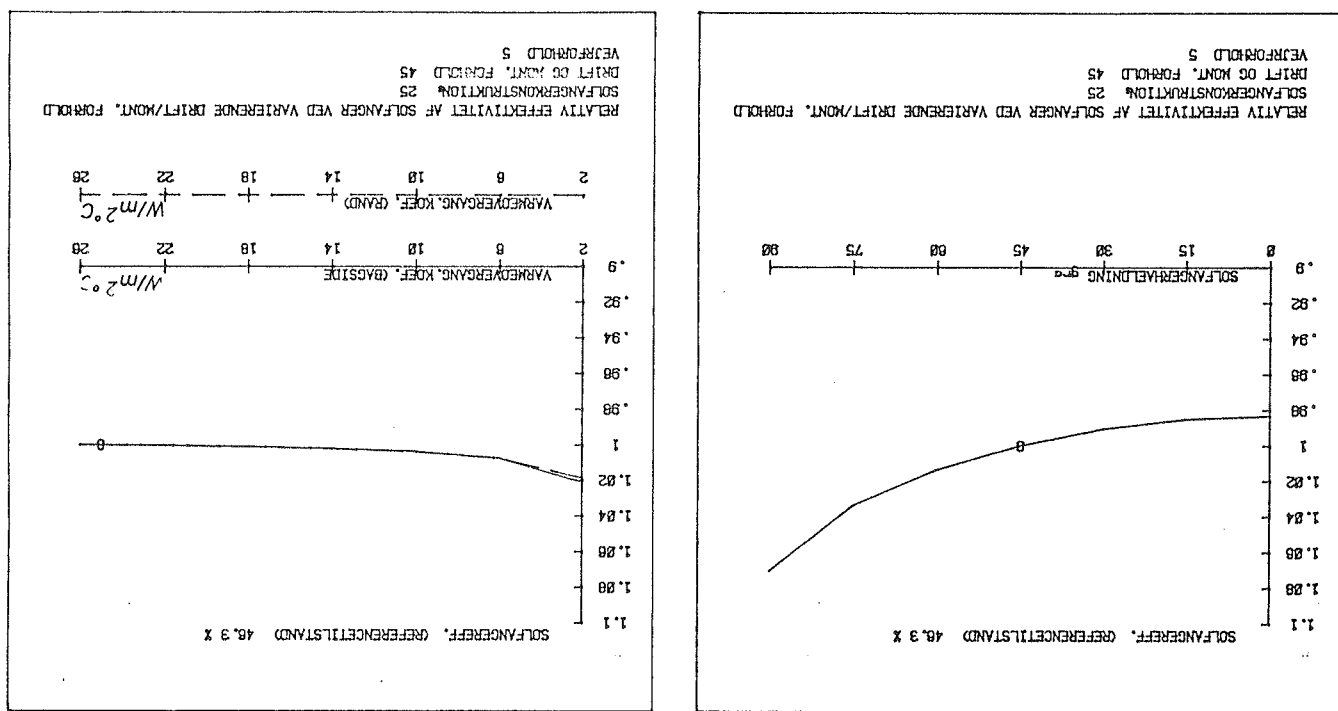
Ved at benytte den detaljerede model og de samme solfangere og referenceforhold er betydningen af monterings- og driftsforholdene beregnet, idet man har varieret disse enkeltvis. Resultaterne er angivet som den relative ændring i effektiviteten undtagen ved variationerne i væsketype, hvor man benytter effektivitetskurven direkte.

På fig. 3.2.1 kan man se indflydelsen af hældningen samt af varmeovergangstallet ved bagsiden og randen. Det ses, at der er en stigende effektivitet med stigende hældning. Dette skyldes, at varmeoverførslen ved konvektion i hulrummet mellem absorberen og det transparente lag aftager, når hældningen øges. Det skal bemærkes, at beregningerne er udført med en indfaldsvinkel af solstrålingen på nul uafhængigt af hældningen. Med hensyn til varmeovergangskoefficienten er der kun en indflydelse ved de lave værdier, som svarer til, at man anbringer solfangeren på en

Isolerende plade. Det er således uden betydning, om der er vindpåvirkning på bagsiden eller ej.

På fig. 3.2.2 - 4 kan man se indflydelsen af væske og væskestrøm. Der er både vist solfangere med rør-plade absorbere og dobbeltpladeabsorbere, da deres afhængighed af væske og væskestrøm er forskellige. Det ses, at der ikke for dobbeltpladeabsorbere er større forskel på, om der benyttes vand eller blandinger af vand og ethylen- eller propylenlykol. Derimod falder effektiviteten lidt, når der benyttes silikoneolie eller mineralolie. Det ses også, at både væsketype, koncentration og væskestrøm har en vis indflydelse på solfangere med rør-pladeabsorbere. For typiske variationer i koncentration og væskestrøm er ændringen i effektivitet dog beskednen.

Fig. 3.2.1 Relativ effektivitet ved varierende hældning og varmeovergangstal ved bagside og vand



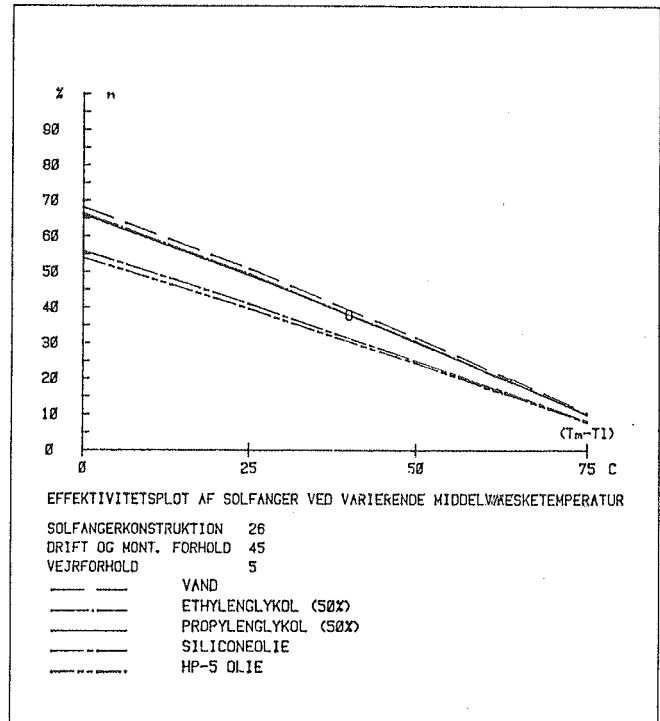
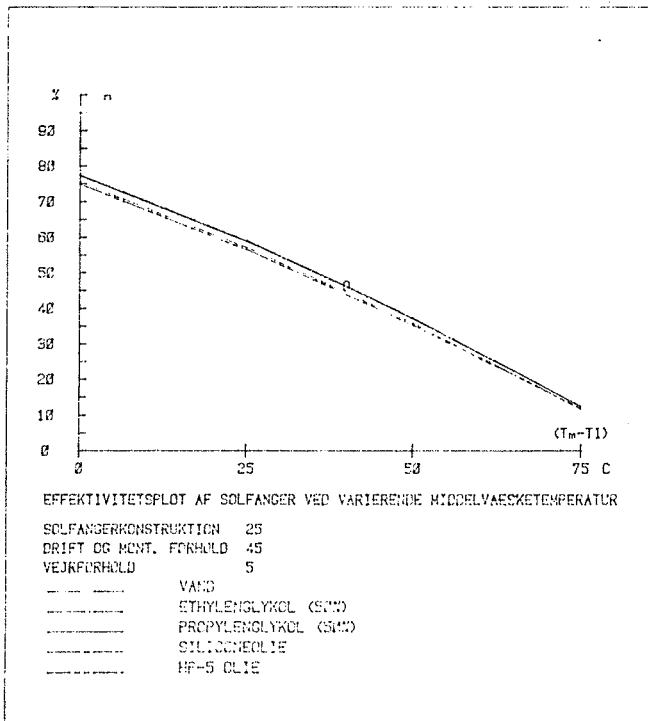


Fig. 3.2.2 Effektivitet med forskellige væsker som varmetransporterende medium

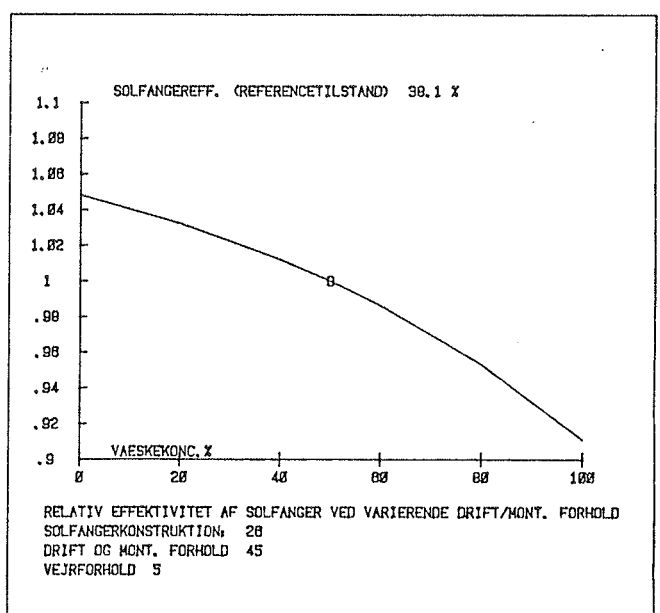
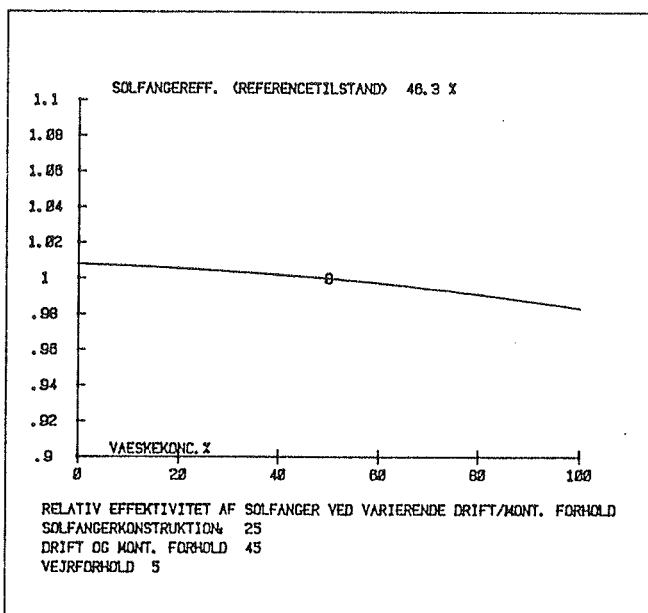


Fig. 3.2.3 Relativ effektivitet ved varierende koncentration af propylenglykol

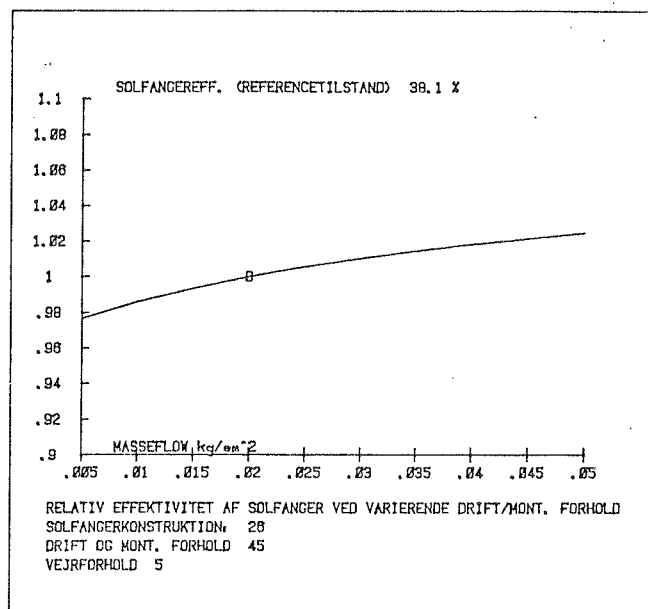
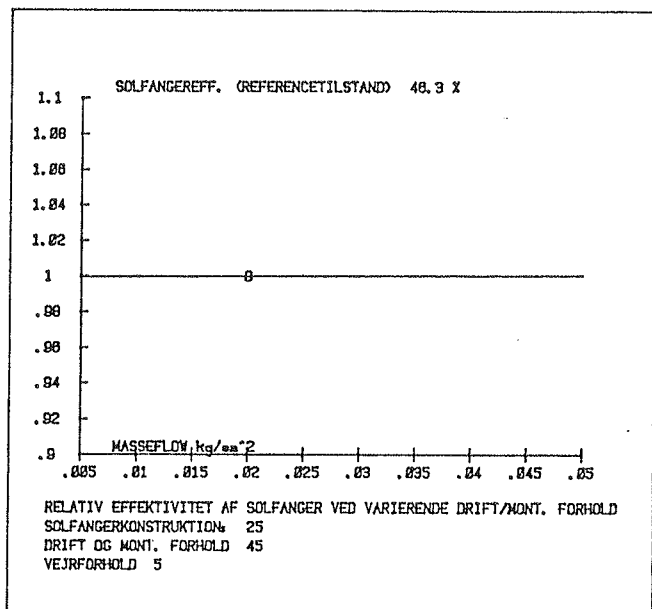


Fig. 3.2.4 Relativ effektivitet ved varierende væskestrøm.

4. METODER TIL PRØVNING AF SOLFANGERES EFFEKTIVITET

Formålet med at foretage en prøvning af solfangeres effektivitet er at skaffe nøjagtige og sammenlignelige oplysninger til brug for producenterne produktudvikling og til brug for forbrugernes valg af fabrikat og dimensionering af solvarmeanlæg. Kravet til nøjagtige og sammenlignelige målinger medfører, at man udelukkende benytter den øjeblikkelige effektivitet under ideelle vejr- og driftsforhold. Denne effektivitet giver under ét oplysninger om solfangerens egenskaber med hensyn til transmission og absorption af solstråling, varmetab til omgivelserne og varmeoverføring i absorberen. Ved at benytte teoretiske eller målte data for variationen af de ovennævnte størrelser under varierende drifts- og vejrforhold kan man beregne solfangerens langtidseffektivitet i et givet solvarmeanlæg.

I det følgende skal prøvemethoder baseret på tre forskellige principper omtales og vurderes. Vurderingen baseres på metodernes usikkerhed som følge af variationer i prøveforholdene eller atypiske prøveforhold. Prøvemethodernes anvendelighed under danske klimaforhold indgår også i vurderingen. Derimod indgår selve målenøjagtigheden ikke i vurderingen, idet denne stort set er ens for de forskellige metoder. Målenøjagtigheden vil derimod senere blive omtalt udførligt for en konkret prøvestand.

4.1 Udendørs prøvning af solfangere

Der findes adskillige prøvemethoder, hvori der udelukkende anvendes udendørs målinger. Dominerende blandt disse er imidlertid den amerikanske ASHRAE Standard 93.77 (13), som derfor danner grundlag for den følgende omtale af udendørs prøvning af solfangere.

Effektiviteten måles direkte ved mindst fire temperaturniveauer, der ligger passende spredt. For hvert temperaturniveau anvendes der fire datapunkter, som hver er middelværdien over en periode på mindst fem minutter. Datapunkterne skal ligge symmetrisk med hensyn til solens indfaldsvinkel d.v.s. lige mange før og efter klokken tolv sand soltid. Datapunkterne sammensættes til et udtryk af formen

$$n = n_0 - k(t_i - t_l)/E \quad (4.1.1)$$

Man benytter det udvendige areal og indløbstemperaturen af det varmetransporterende medium som referencer. Varmetabet udtrykkes normalt som en konstant svarende til en retlinjet effektivitet, men man kan også anvende et andenordens udtryk

$$n = n_0 - k_0(t_i - t_l)/E - k_1((t_i - t_l)/E)^2 \quad (4.1.2)$$

Effektiviteten afbildes som vist på fig. 4.1.1.

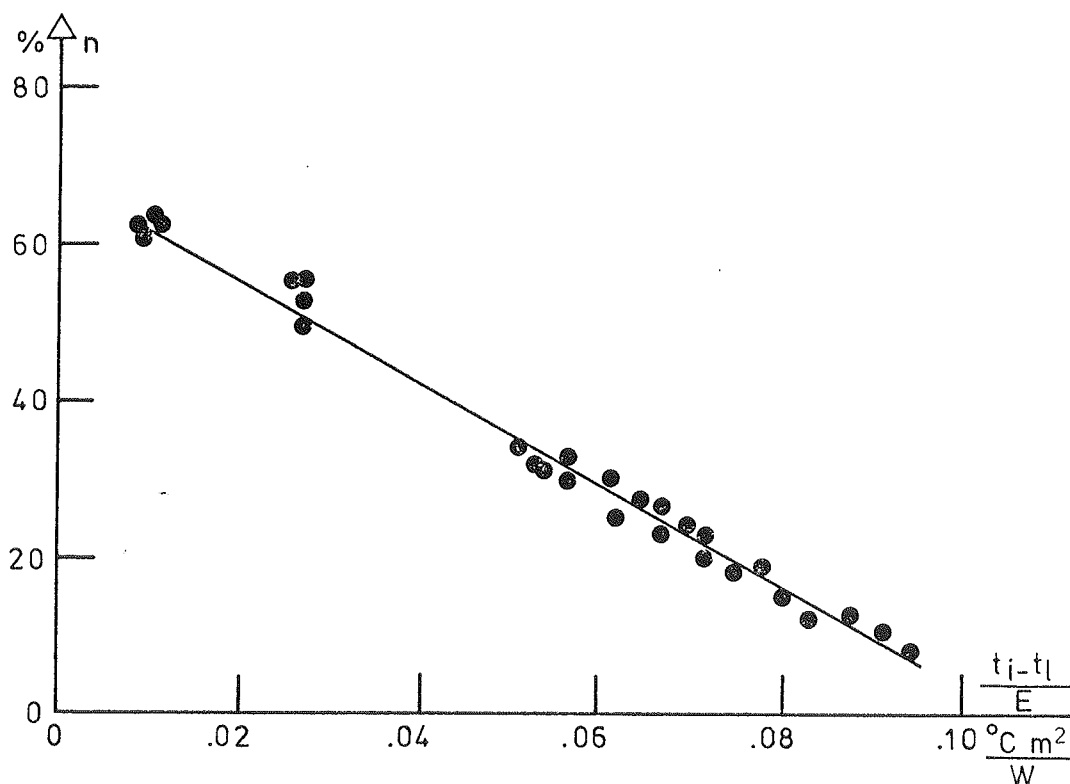


Fig. 4.1.1 Eksempel på effektivitetskurve ifølge den amerikanske prøvemethode (13).

Der stilles følgende krav til vejr- og driftsforholdene. Solintensiteten skal være mindst 630 W/m^2 og passende stabil. Indfaldsvinklen skal være mindre end 30° . Lufttemperaturen skal for alle datapunkter ligge inden for 30°C for den enkelte solfanger. Vindhastigheden skal være mindre end $4,5 \text{ m/s}$. Væskestrømmen skal normalt være $0,02 \text{ kg/sm}^2$ baseret på det transparente areal og den må ikke variere mere end $\pm 1\%$. Indløbstemperaturen må ikke variere mere end $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Det er klart, at man ved måling under forskellige vejrforhold vil få forskellige effektiviteter. Hvor store afvigelserne maksimalt kan være er beregnet ved hjælp af den i afsnit to omtalte detaljerede model. Der er benyttet de samme solfangere og de samme monterings- og driftsforhold som i afsnit tre. Derimod er der benyttet de to sæt vejrforhold, som er vist i skema 4.1.1. Beregningerne af effektiviteten ved de ekstreme vejrforhold er benyttet til at fastlægge udtryk for effektiviteten. På grundlag af disse udtryk optegnes effektiviteten under samme vejrforhold. Resultatet af beregningen af effektiviteten i de to tilfælde er vist i fig. 4.1.2. Det ses, at der for alle solfangerne er temmeligt store afvigelser over hele temperaturområdet. Det ses, at der især for solfangeren med ét transparent lag og almindelig absorberbelægning samt rør-plade absorber er stor variation i effektiviteten. Det vil være nødvendigt at udvide eller skærpe kravene til prøveforholdene for at nedbringe denne afvigelse.

Vejrforhold typenr.		6	7
Lufttemperatur	°C	0	30
Himmelstrålingstemperatur	°C	0	-10
Jordstrålingstemperatur	°C	0	30
Solintensitet	W/m ²	630	1000
Diffus strålingsandel	%	0	40
Indfaldsvinkel	grader	0	30
Vindhastighed	m/s	0	4,5

Skema 4.1.1 Ekstreme vejrforhold ved udendørs prøvning
ifølge den amerikanske metode

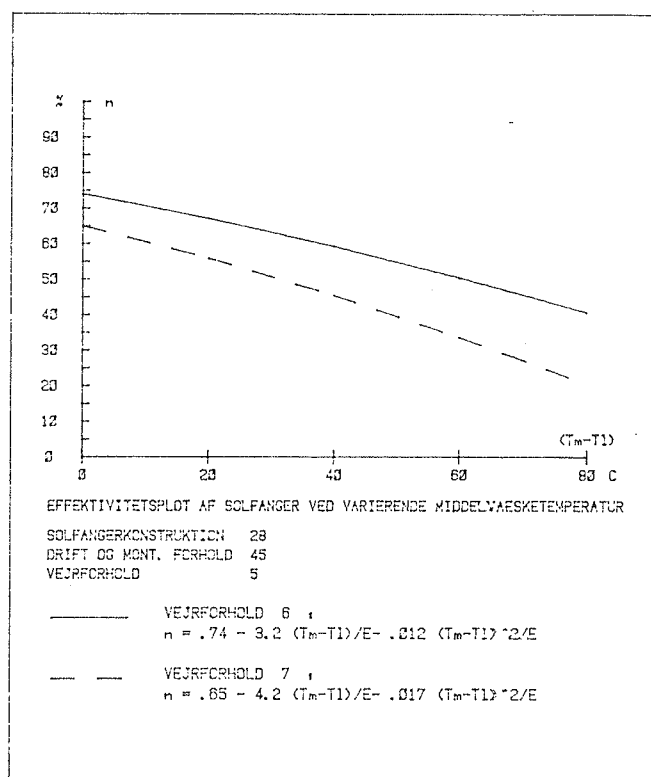
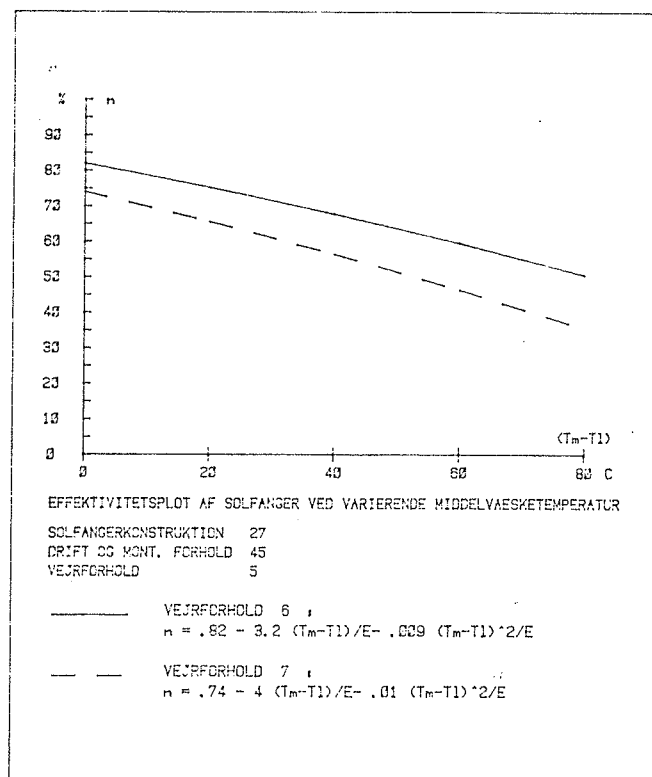
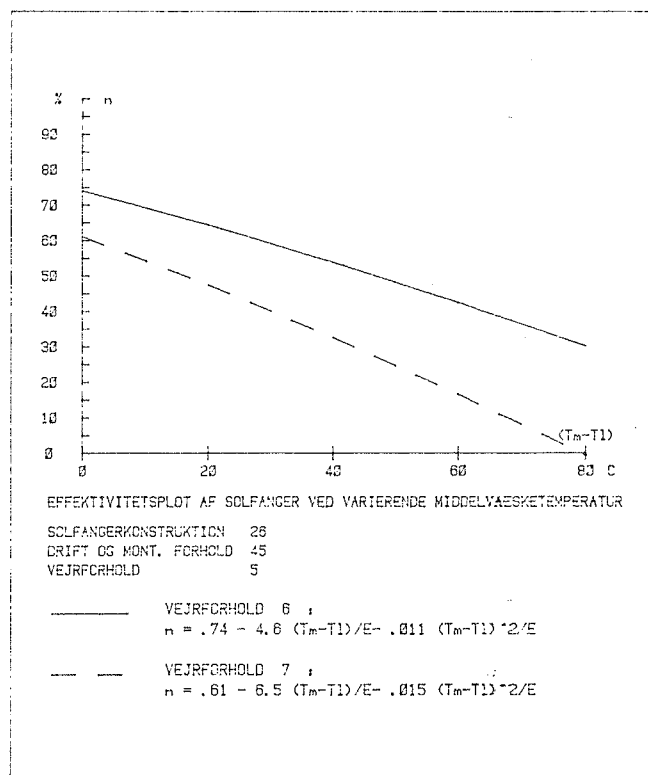
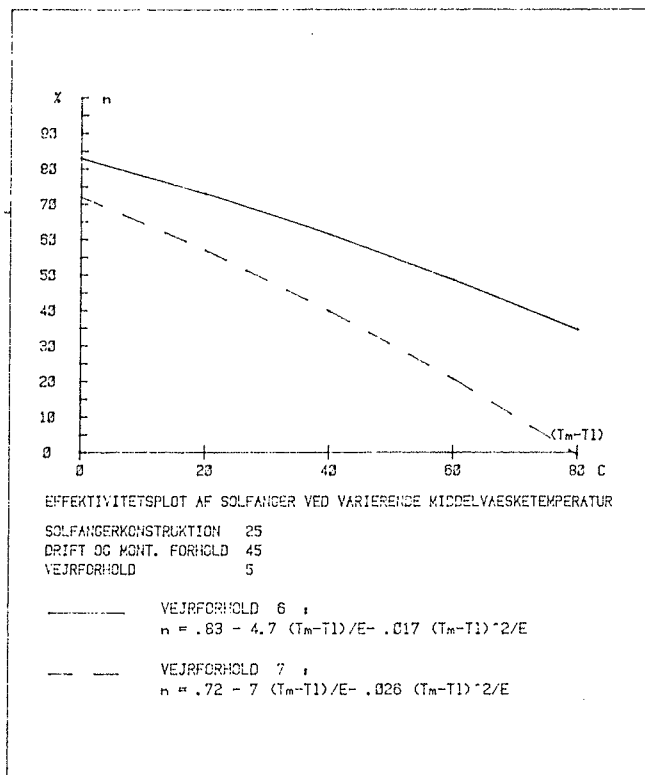


Fig. 4.1.2 Maksimale afvigelser på effektiviteten bestemt ifølge den amerikanske prøvemethode

Prøvemethodens anvendelighed under danske vejrforhold er ikke særlig god, hovedsageligt fordi man har meget få helt skyfri dage. Denne vurdering er baseret på erfaringer med brug af metoden i udendørs opstillinger. Vurderingen underbygges af en beregning af solintensiteten på en sydvendt flade med en hældning på 45° baseret på referenceåret. Resultatet heraf var, at man i 40 dage i tidsrummet fra klokken 10 til 14 havde en intensitet i hver af timerne, der var højere end 630 W/m^2 . Hertil kommer, at man eventuelt ikke har tilstrækkeligt stabile forhold, selvom middelsolintensiteten har været høj nok.

Konkluderende må det nok om den amerikanske prøvemethode siges, at den under forskellige vejrforhold kan give relativt store afvigelser, samt at dens anvendelighed under danske vejrforhold ikke er særlig god.

4.2 Kombineret udendørs og indendørs prøvning af solfangere

Den grundlæggende prøvemethode, hvori man anvender både udendørs og indendørs målinger på solfangere er den tyske DIN 4757 (14). Princippet i metoden er, at man bestemmer maksimaleffektiviteten n_0 , ved udendørs målinger, medens resten af effektivitetskurven bestemmes indirekte ved indendørs måling af varmetabet. Herved reduceres problemerne med at få tilstrækkeligt mange udendørs målinger væsentligt. Varmetabskoefficienten bestemmes ved fire temperaturniveauer og tilnærmes udtrykket

$$k = k_0 + k_1(t_m - t_1) \quad (4.2.1)$$

Effektiviteten sammensættes af n_0 og k til følgende udtryk

$$n = n_0 - k_0(t_m - t_1)/E - k_1(t_m - t_1)^2/E \quad (4.2.2)$$

Det bemærkes, at udtrykket er forskelligt fra 4.1.2, idet solintensiteten, E , ikke indgår i anden grad. Effektiviteten er baseret på det transparente areal og middeltemperaturen af det varmetransporterende medium. Effektiviteten afbildes som vist på figur 4.2.1.

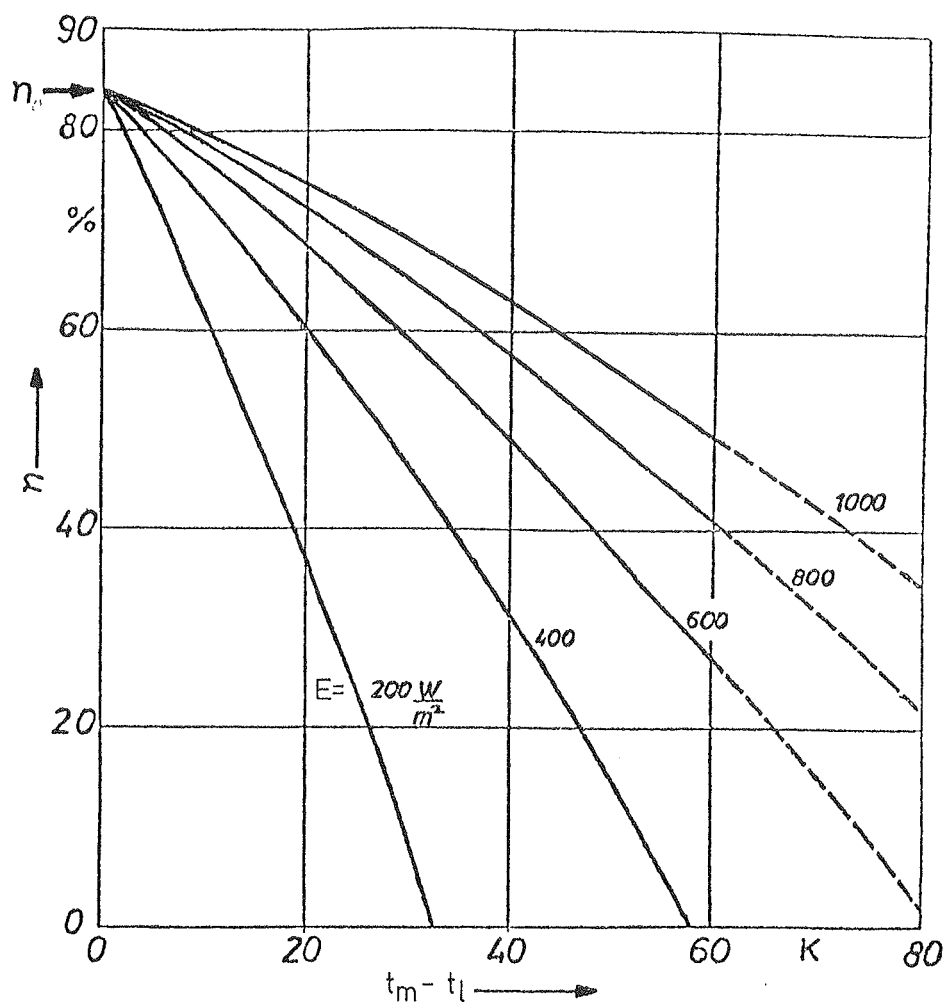


Fig. 4.2.1 Eksempel på effektivitetskurver ifølge den tyske prøvemethode (14)

Der stilles følgende krav til vejr- og driftsforholdene. Ved måling af n_0 skal indfaldsvinklen være mindre end 30° . Lufthastigheden langs det yderste transparente lag skal både ved de udendørs og de indendørs målinger være mindst 4 m/s. Kravet opfyldes v.h.j.a. en blæser. Ved varmetabsmålingerne skal lufttemperaturen være mellem 15°C og 25°C og dens variation under målingen af et datapunkt, der varer 15 minutter, må ikke være større end $\pm 0,5^\circ\text{C}$. De omgivende fladers temperatur skal ligge inden for 3°C fra lufttemperaturen. Intensiteten af kortbølget stråling stammende fra rummets belysning skal være mindre end 1W/m^2 . Desuden skal indløbstemperaturen og væskestrømmen opfylde samme krav som ved den udendørs prøvemethode.

Prøveforholdenes indflydelse på denne metode er også undersøgt, og de benyttede ekstreme forhold under de udendørs og indendørs målinger er vist på skema 4.2.1. Resultaterne af beregningerne

af n_0 , k_0 og k_1 er vist på fig. 4.2.2. Det ses, at man for denne metode får mindre afvigelser især ved de højere temperaturer. Dette skyldes, at prøveforholdene ved måling af varmetab er begrænset til et ret snævert område.

Vejrforhold typenr.		12	13	14	15
Lufttemperatur	°C	0	30	15	25
Himmelstrålingstemperatur	°C	0	-10	18	22
Jordstrålingstemperatur	°C	0	30	18	22
Solintensitet	W/m ²	630	1000	1	0
Difrus strålingsandel	%	0	40	0	0
Indfaldsvinkel	grader	0	30	0	0
Vindhastighed	m/s	4	10	4	10

Skema 4.2.1 Ekstreme vejrforhold ved udendørs (12/13) og indendørs (14/15) prøvning ifølge den tyske metode

Da den fundne effektivitetskurve er sammensat af en maksimaleffektivitet og et udtryk for varmetabskoefficienten kan der opstå en metodisk fejl. Denne skyldes, at man ved varmetabsmålingen har en varmestrøm fra væsken til absorberen og derfra til omgivelserne, medens man under normal drift har en varmetransport fra absorberen til vandet. Problemet er beskrevet og vurderet i (16), og det kan nævnes, at fejlen giver for høje effektiviteter, samt at den er størst for relativt dårlige solfangere. Fejlen kan i uheldige situationer udgøre maksimalt ca. 10%.

Metodens anvendelighed er som følge af reduktion af de udendørs målinger bedre end for den foregående metode. Den kan imidlertid slet ikke anvendes for specielle solfangere, f.eks. solfangere med intern naturlig cirkulation som kun kan føre varme ud af solfangeren, idet man så ikke kan bestemme varmetabet.

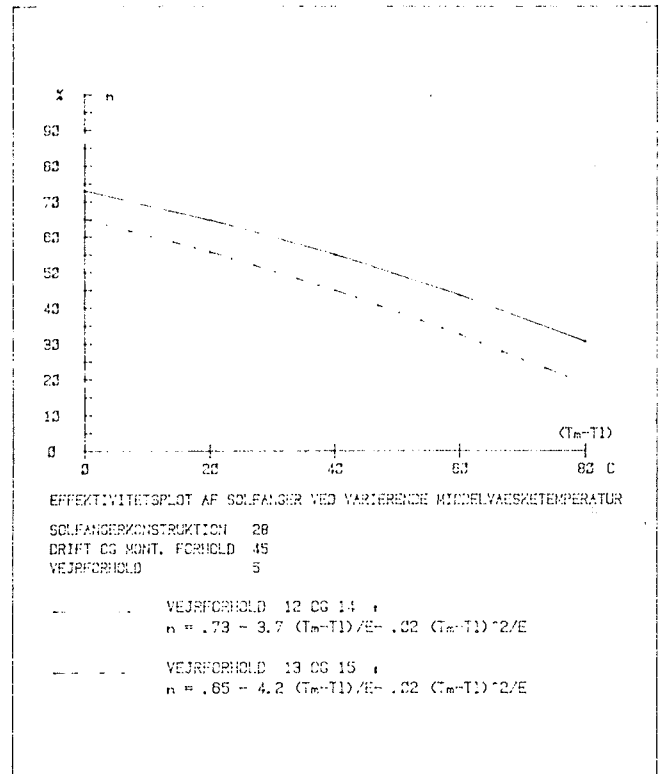
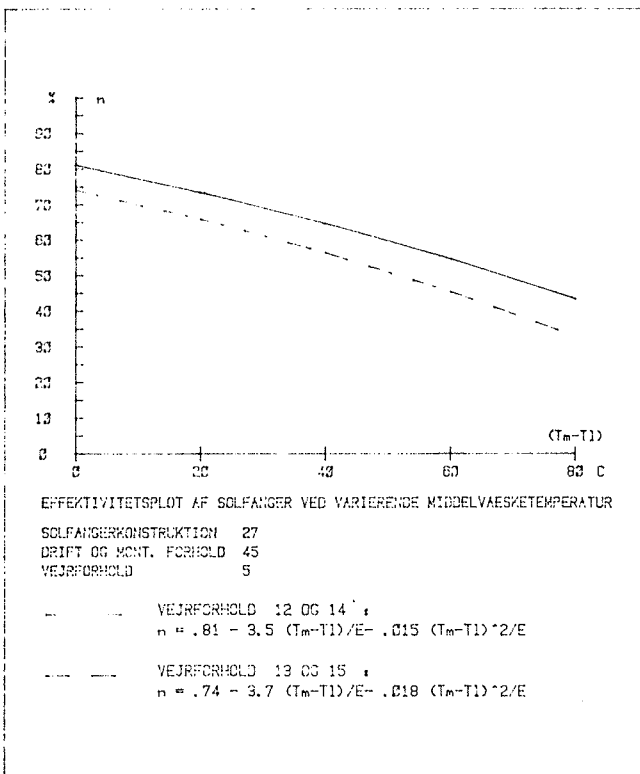
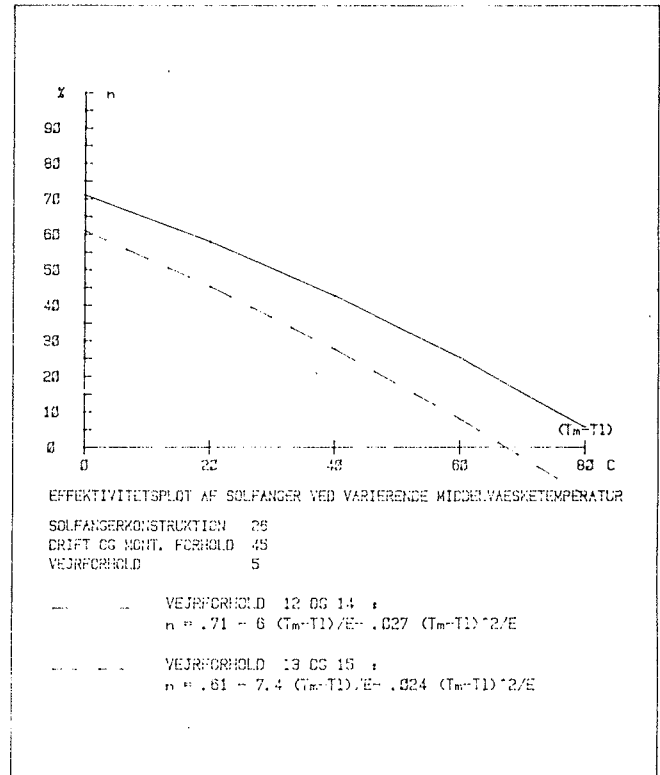
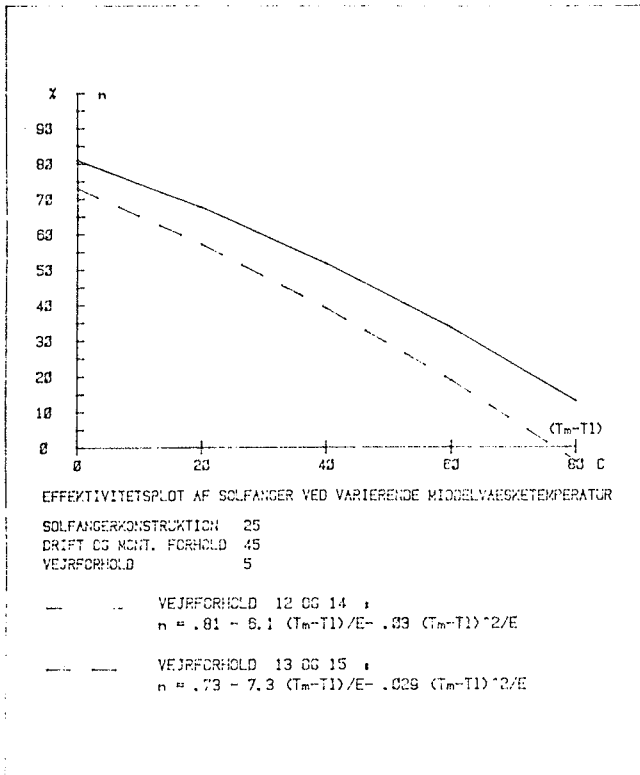


Fig. 4.2.2 Maksimal afvigelse på effektiviteten bestemt ifølge den tyske prøvemetode

4.3 Indendørs prøvning af solfangere

Ved at benytte en solsimulator kan hele prøvningen af en solfanger udføres indendørs. Der findes ikke nogen udbredt prøvemethode alene baseret på brug af solsimulatorer. Man har i ASHRAE 93-77 nævnt, at prøvningen kan udføres v.hj.a. en solsimulator, og der er stillet visse krav til dens egenskaber. Bestemmelsen af n_0 i DIN 4757 kan selvfølgelig også udføres v.hj.a. en solsimulator, det er imidlertid oplagt at udføre hele prøvningen med solsimulatoren, når en sådan er til rådighed. I den svenske standardprøvemethode SS 1782 (15), der er udviklet i samarbejde med Laboratoriet for Varmeisolering, er der lagt vægt på anvendelsen af solsimulatorer.

Ifølge denne skal solintensiteten fra solsimulatoren være mellem 800 og 1100 W/m², og vindhastigheden langs det transparente lag skal være mindst 4 m/s. Resultaterne baseres på transparent areal og middeltemperatur af det varmetransporterende medium. Resultaterne angives på same måde som i den tyske metode dog kun for en solintensitet på 800 W/m². Det er muligt at gøre dette, da solintensiteten ved prøvningen stort set er konstant, netop fordi der benyttes en solsimulator.

Metodens nøjagtighed afhænger af den aktuelle solsimulatoropstilling og skal derfor omtales i forbindelse med omtalen af denne senere. Det er imidlertid klart, at hovedfordelene ved en ren indendørs prøvemethode og -opstilling er at prøveforholdene stort set er ens, og at prøvninger kan udføres året rundt uden vejrmæssige begrænsninger.

5. OPSTILLING TIL PRØVNING AF SOLFANGERES EFFEKTIVITET

Et omfattende arbejde med prøvning af solfangeres effektivitet i udendørs opstillinger (17, 18) og i kombinerede udendørs og indendørs opstillinger (2, 3) viste, at prøvningen stort set kun kunne udføres i sommerhalvåret, og at prøvningen af en solfanger i gennemsnit varede flere uger. Hovedårsagen hertil er, at der er relativt få dage om året med en fuldstændig skyfri himmel, som er nødvendig af hensyn til målenøjagtigheden.

For at øge prøvekapaciteten, nedsætte prøvetiden og muliggøre en planlægning af arbejdet var det oplagt at forsøge at benytte en ren indendørs prøvning baseret på en solsimulator. Den første solsimulator ved laboratoriet blev opbygget i 1976 med en ca. 2 m lang Xenon lampe på 20kW indbygget i en reflektor og med vandkølede forsideglas til frafiltrering af varmestrålingen (19). Det viste sig imidlertid, at man ikke med denne solsimulator kunne opnå en rimelig høj strålingsintensitet. Derfor blev det pågældende lyskilde-reflektorarrangement opgivet til effektivitetsprøvning men blev iøvrigt indbygget i en opstilling til driftssikkerhedsprøvning af solfangere, hvor man ved at placere solfangeren tæt på lyskilden kunne opnå en passende høj middelintensitet på ca. 1000 W/m^2 dog med en meget ujævn fordeling.

På grundlag af en undersøgelse af egnede lyskilder på markedet og lovende resultater med en ny kompakt lyskilde ved Universitetet i Cardiff (20) besluttede man at opbygge en ny solsimulator baseret på et antal kviksølv-jod lamper på 1 kW med indbygget reflektor. Stativet og prøvebordet fra den første solsimulatoropstilling blev genanvendt i den nye, hvilket medførte en række fysiske begrænsninger.

Der blev opstillet følgende krav og ønsker til solsimulatoropstillingens egenskaber som grundlag specielt for valg af antal lamper og iøvrigt for udformning af hele opstillingen herunder også måleudstyr.

Intensiteten skulle være ca. 1000 W/m^2 svarende til klart solskin. Ujævnheden af intensiteten over prøvefeltet skulle være mindre end $\pm 10\%$ og iøvrigt så lille som mulig af hensyn

til målingen af middelintensiteten. Instabiliteten af intensiteten skulle være mindre end 1 - 2% af målingstekniske hensyn. Strålingen skulle være vinkelret på prøvefladen med højeste afvigelser i indfaldsvinklen på $\pm 30^\circ$. Varmestrålingen fra lamperne skulle være så lille, at den ikke påvirkede prøvningen nævneværdigt.

Prøvefeltet skulle være stort nok til, at man kunne måle på alle solfangere på markedet d.v.s. ca. 1,2 m i bredden og 2,4 m i længden. Solfangerne skulle kunne monteres, så man ikke påvirkede deres egenskaber, specielt tabet gennem bagsiden, nævneværdigt. Desuden skulle monteringen kunne udføres rimeligt nemt og hurtigt. Solfangerne skulle under prøvningen kunne udsættes for en lufthastighed langs det transparente lag på mindst 5 m/s. Prøvningen skulle kunne udføres med forskellige væsketyper omfattende vand, glykol-vand blandinger og olier.

Væskestrømmen skulle være indstillelig i området fra 1 - 10 l/min og konstant med en højeste afvigelse på $\pm 1\%$. Indløbstemperaturen skulle være indstillelig i området fra 0 - 100°C og konstant med en højeste afvigelse på $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Målesystemet skulle være automatisk, så det både kunne styre flytningen af pyranometret ved måling af middelsolintensiteten og foretage en behandling af de målte størrelser. Måleunøjagtigheden skulle være mindre end $\pm 1\%$ på væskestrømmen, $\pm 0,1^\circ\text{C}$ på temperaturstigningen og $\pm 0,5^\circ\text{C}$ på temperaturer samt $\pm 1\%$ på strålingsintensiteten.

På grundlag af disse krav og ønsker blev der opbygget en solsimulatoropstilling, som har vist sig at opfylde disse tilstrækkeligt godt. Efter indkøring af opstillingen og prøvemethoden i foråret 1979 er den blevet anvendt til prøvning af en lang række solfangere.

I det følgende skal de enkelte hoveddele af solsimulatoropstillingen beskrives sammen med en omtale af deres egenskaber og erfaringer med brugen af opstillingen.

5.1 Solsimulator

Lampen, der anvendes i solsimulatoren, består af en højtryks udladningslampe indbygget i en lukket reflektor (sealed beam) som vist på fig. 5.1.1 og 5.1.2. Selve udladningslampen består af en kvartsomfatning, hvori udladningen sker mellem elektroder af tungsten i en atmosfære af kviksølvdampe med tilsætninger af metal-jod forbindelser. Lampen anbringes i et lampehus af aluminium med buet, klart frontglas, som vist på fig. 5.1.3. Den forventede levetid er 1000 timer. Lampens betegnelse er CSI (Compact Source Iodide) og den fremstilles af Thorn Lighting.

Lampens spektralfordeling er målt af Statens Provningsanstalt (21), og resultatet er vist på fig. 5.1.4 sammen med en typisk spektralfordeling for solstråling. Det ses, at der er rimelig god overensstemmelse.

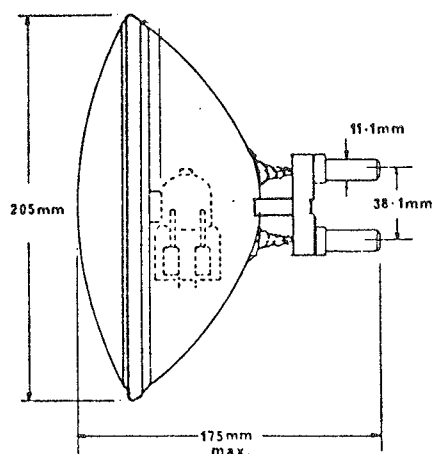


Fig. 5.1.1 Tegning af CSI-lampen (fra Thorn-katalog)

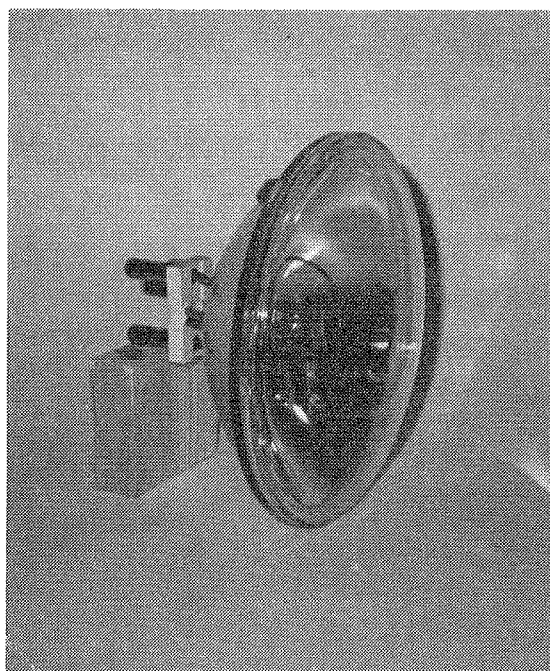


Fig. 5.1.2 Foto af CSI-lampen

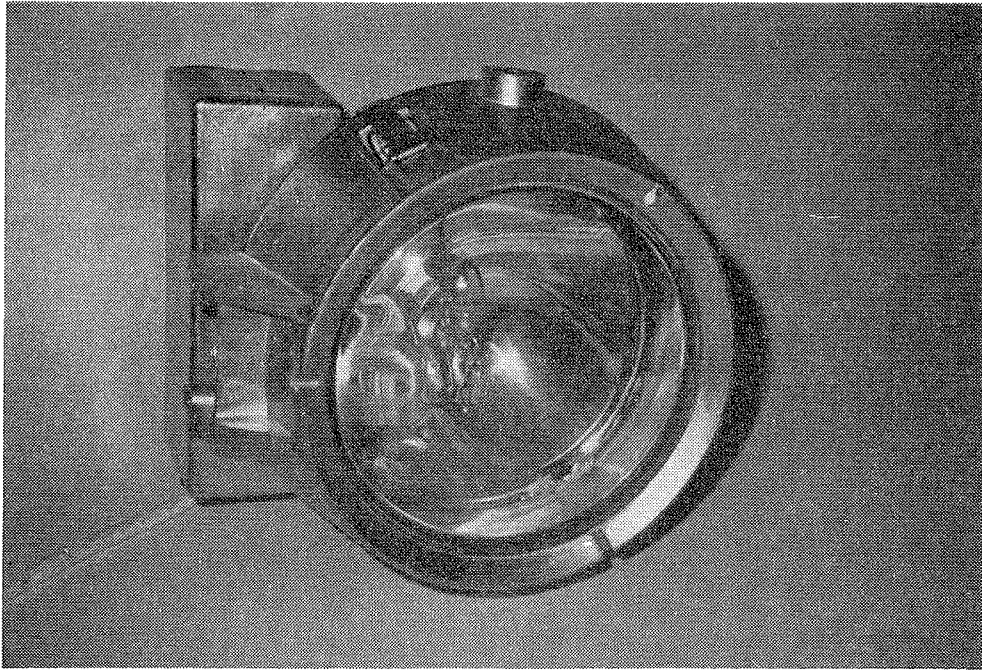


Fig. 5.1.3 Foto af lampehus med klart frontglas

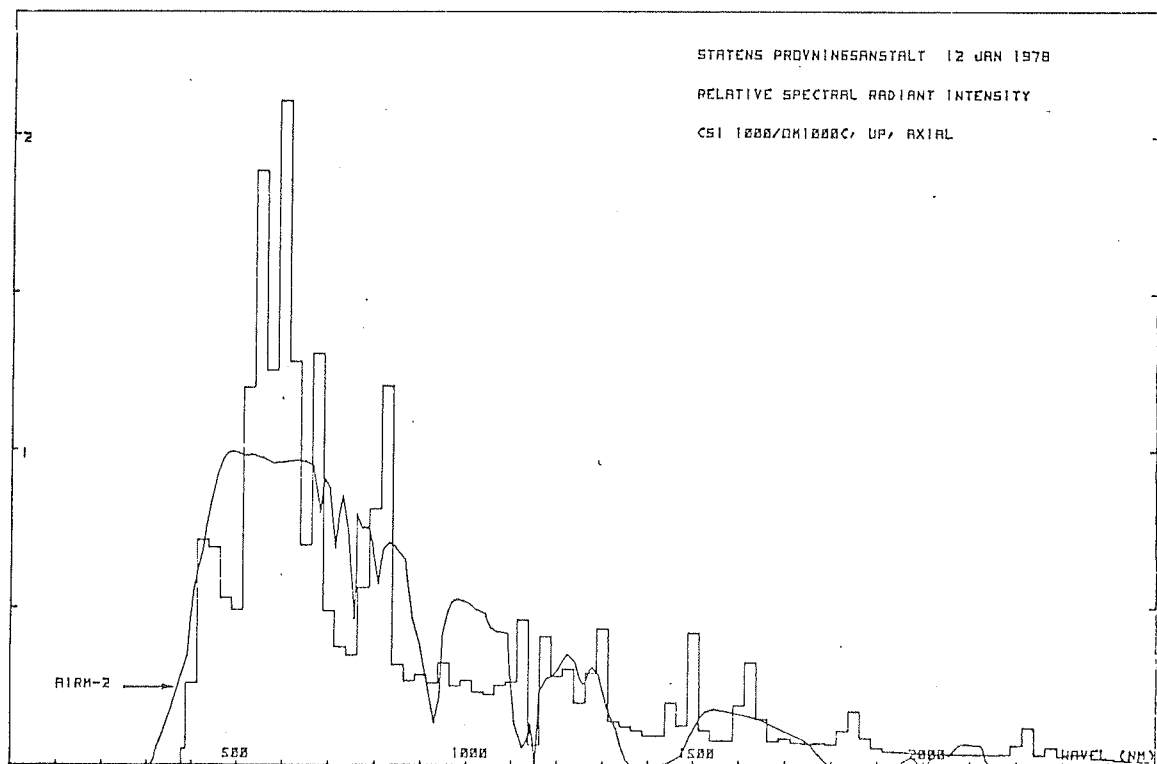


Fig. 5.1.4 Spektralfordeling af stråling fra CSI-lampen, som den anvendes i opstillingen sammenlignet med en typisk spektralfordeling for solstråling (ifølge Statens Provningsanstalt)

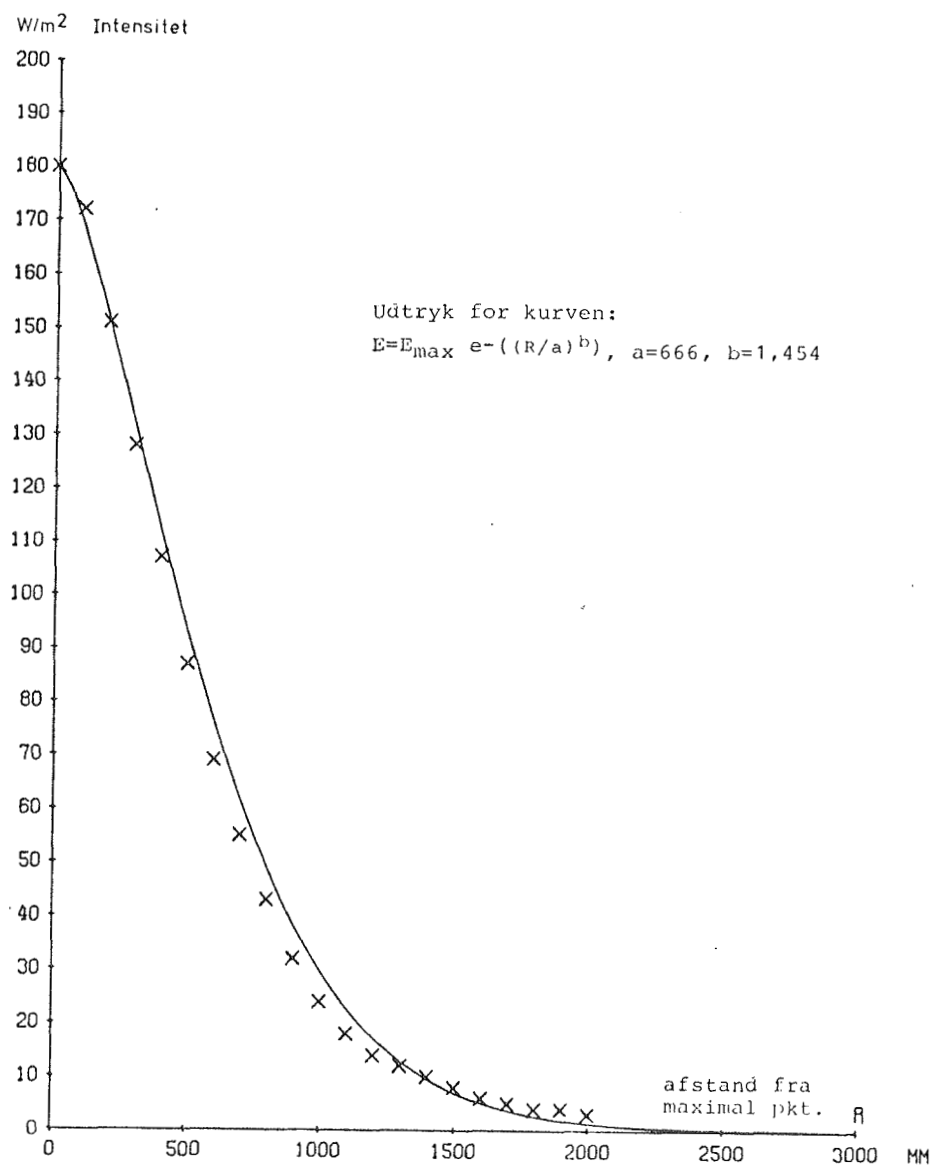


Fig. 5.1.5 Fordelingen af strålingen fra én lampe målt i den aktuelle solsimulatoropstilling.

Fordelingen af strålingen fra en lampe er målt og tilnærmet en kurve som vist på fig. 5.1.5. Det bemærkes, at fordelingen er så spids, at strålingsintensiteten falder til det halve i en afstand på 0,5 m fra maksimalpunktet. Målinger foretaget af Statens Provninganstalt (21) har vist, at for afstande mellem 5 og 8 m følger lampen afstandsloven, d.v.s. at fordelingen som funktion af rumvinklen er konstant og intensiteten aftager derfor omvendt proportionalt med kvadratet på afstanden.

På grundlag af fordelingen af strålingsintensiteten er det klart, at man må indstille lamperne, så de hver især bestråler en del af prøvefeltet. Derfor er jævnheden af intensiteten

hovedproblemet i hele problemstillingen vedrørende valg af antal lamper, afstand mellem lamperne og prøvefeltet og indstilling af lamperne, så man opnår den ønskede middelværdi og jævnhed af intensiteten. Ved at øge afstanden til prøvefeltet falder maksimalintensiteten for den enkelte lampe, men det belyste felt øges, og derved vil intensitetens jævnhed over prøvefeltet blive bedre. Ved at øge afstanden falder middelintensiteten, men det kan man kompensere for ved at anvende flere lamper.

På grundlag af de fysiske rammer og indledende beregninger udført af Lysteknisk Laboratorium med forskellige antal lamper valgte man at konstruere solsimulatoren baseret på 36 lamper og med en afstand mellem lamper og prøvefelt på ca. 7,5 m. På grund af begrænsninger i højden kunne solsimulatoropstillingen ikke konstrueres, så solfangeren kunne anbringes med en vinkel på 45° med vandret som normalt anvendes. Derfor valgte man at anvende en vinkel på $67,5^{\circ}$. Solsimulatoropstillingen er vist på figur 5.1.6-7. Lamperne blev anbragt i stativet, som vist på fig. 5.1.8-9. De enkelte lamper blev anbragt i beslag, som vist på fig. 5.1.10, så de kunne vippe og drejes tilstrækkeligt med henblik på indstillingen, hvor hver lampe rettes mod et bestemt punkt på prøvefeltet.

Den elektriske udrustning er samlet i tavlen, som er vist på fig. 5.1.9. Ud over den elektriske ballast indeholder tavlen afbrydere og starttimere for hver lampe samt en spændingsstabilisator for hver fase. Spændingsstabilisatorerne består af automatisk styrede variotransformere, som holder spændingsafvigelserne inden for 0,5%, og de kan desuden benyttes til at nedsætte spændingen med.

Lamperne køles ved hjælp af seks tværstrømsblæsere, som sender en kraftig luftstrøm op langs deres frontglas og bagside. Dette gøres af hensyn til lampernes driftssikkerhed, da de er beregnet til montering udendørs og med en større indbyrdes afstand end den anvendte. Herved nedsættes varmestrålingen fra frontglassene også, hvilket er ønskeligt af hensyn til prøvningerne.

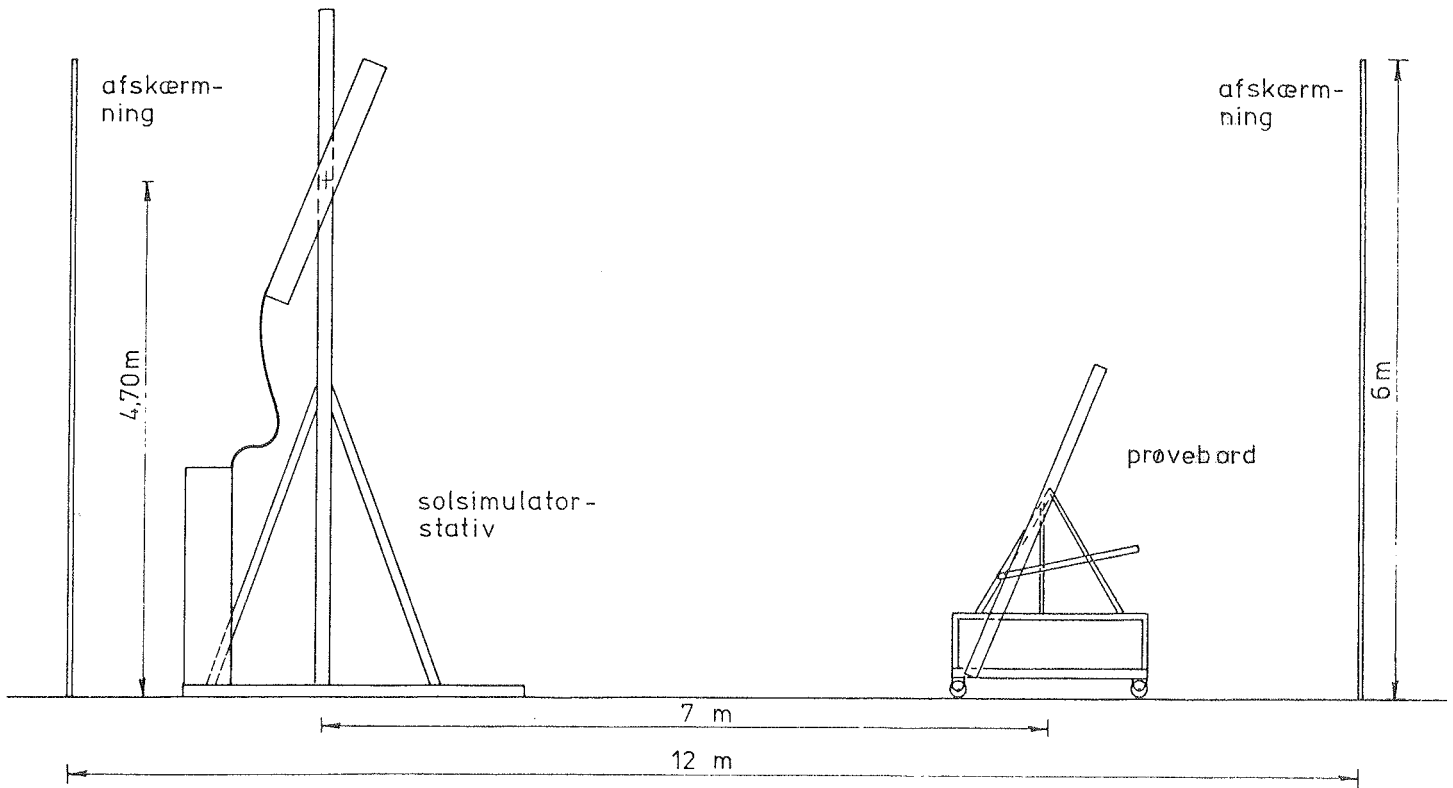


Fig. 5.1.6 Opstalt af solsimulatoropstillingen

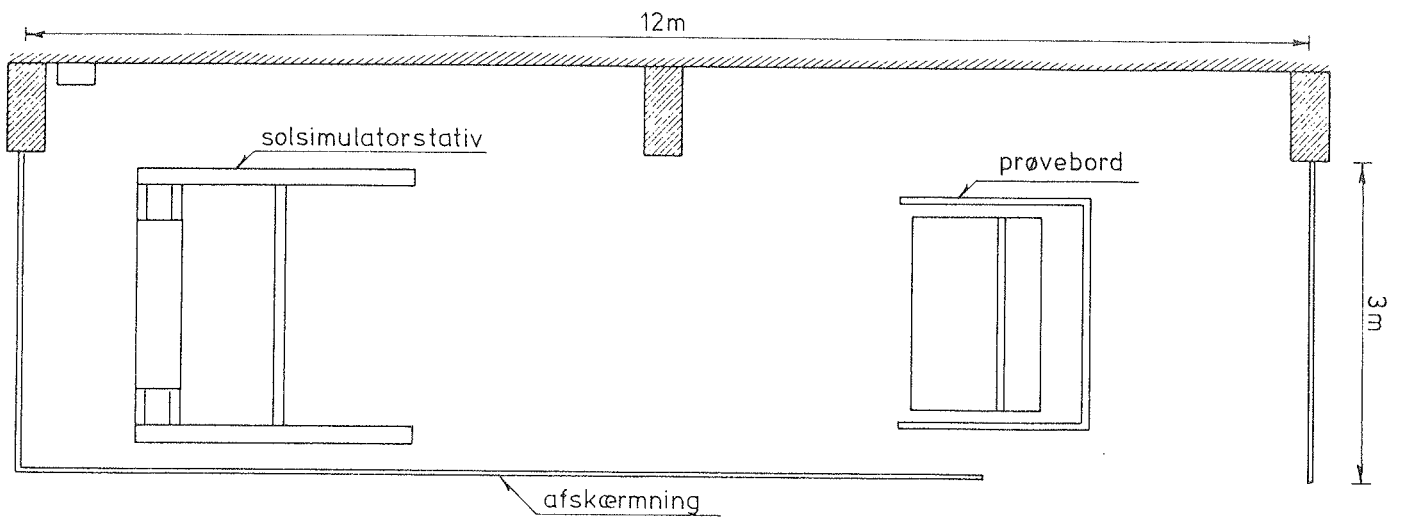


Fig. 5.1.7 Plan af solsimulatoropstillingen

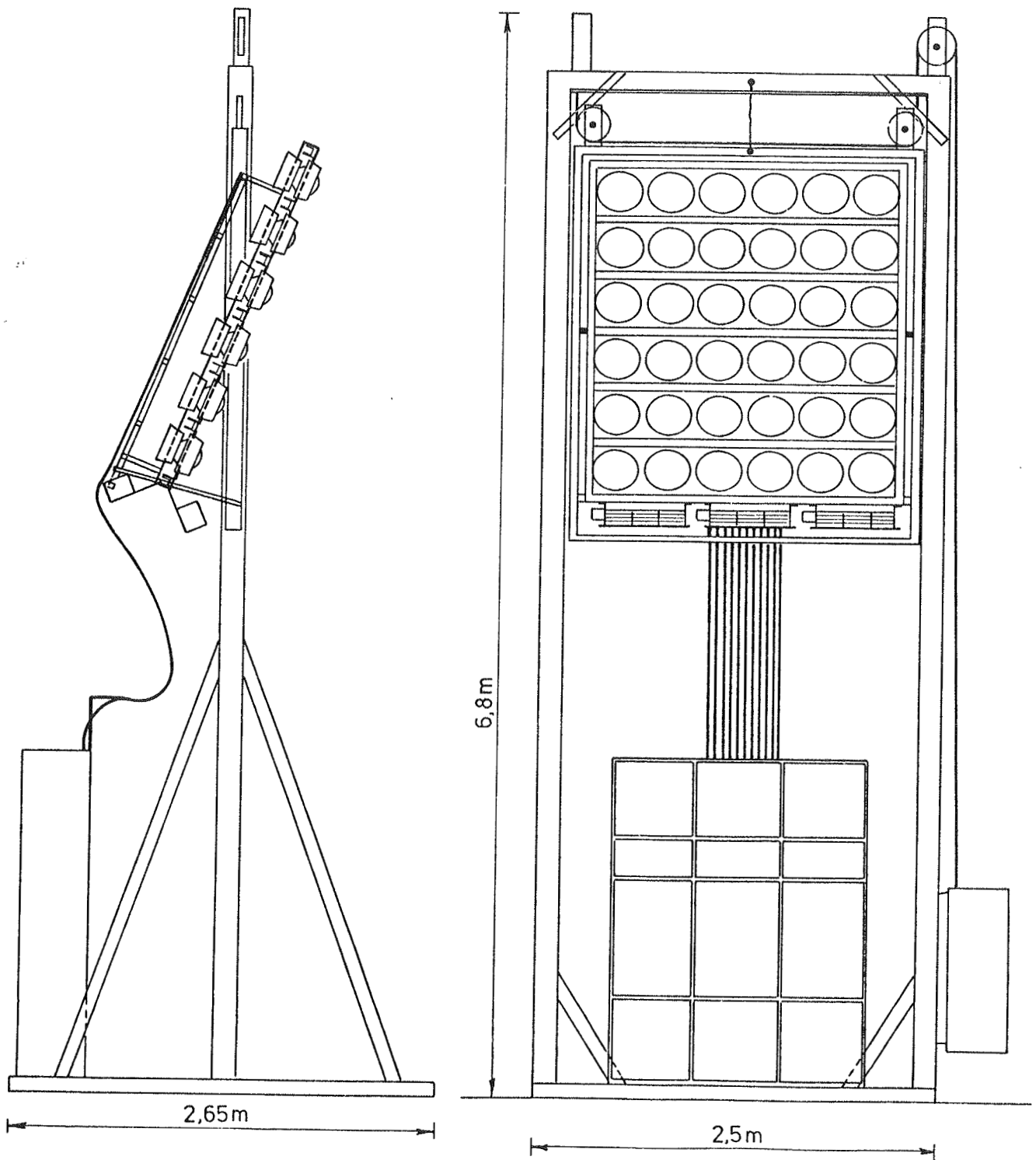


Fig. 5.1.8 Solsimulatorstativ

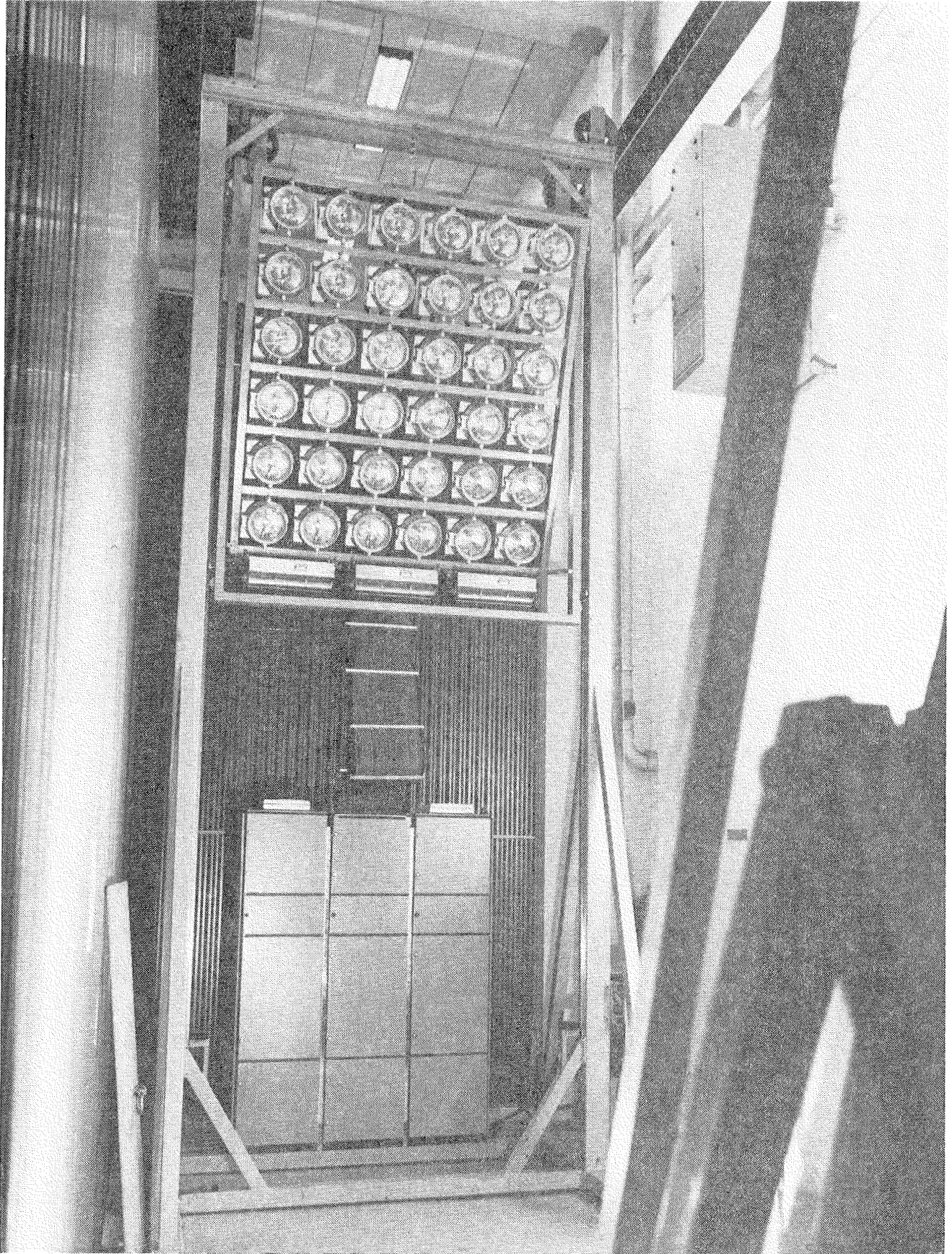


Fig. 5.1.9 Foto af solsimulatoren

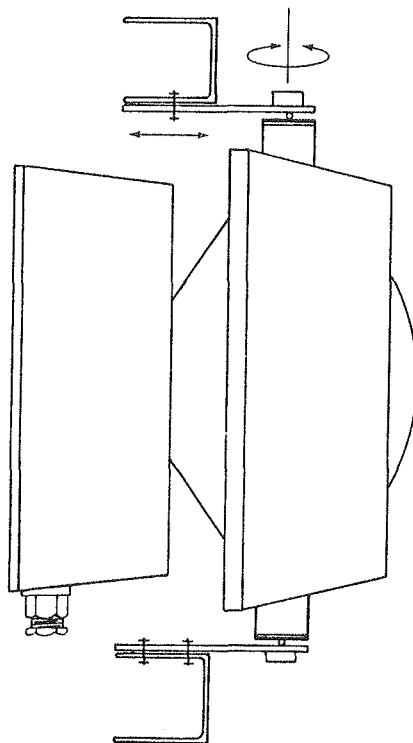
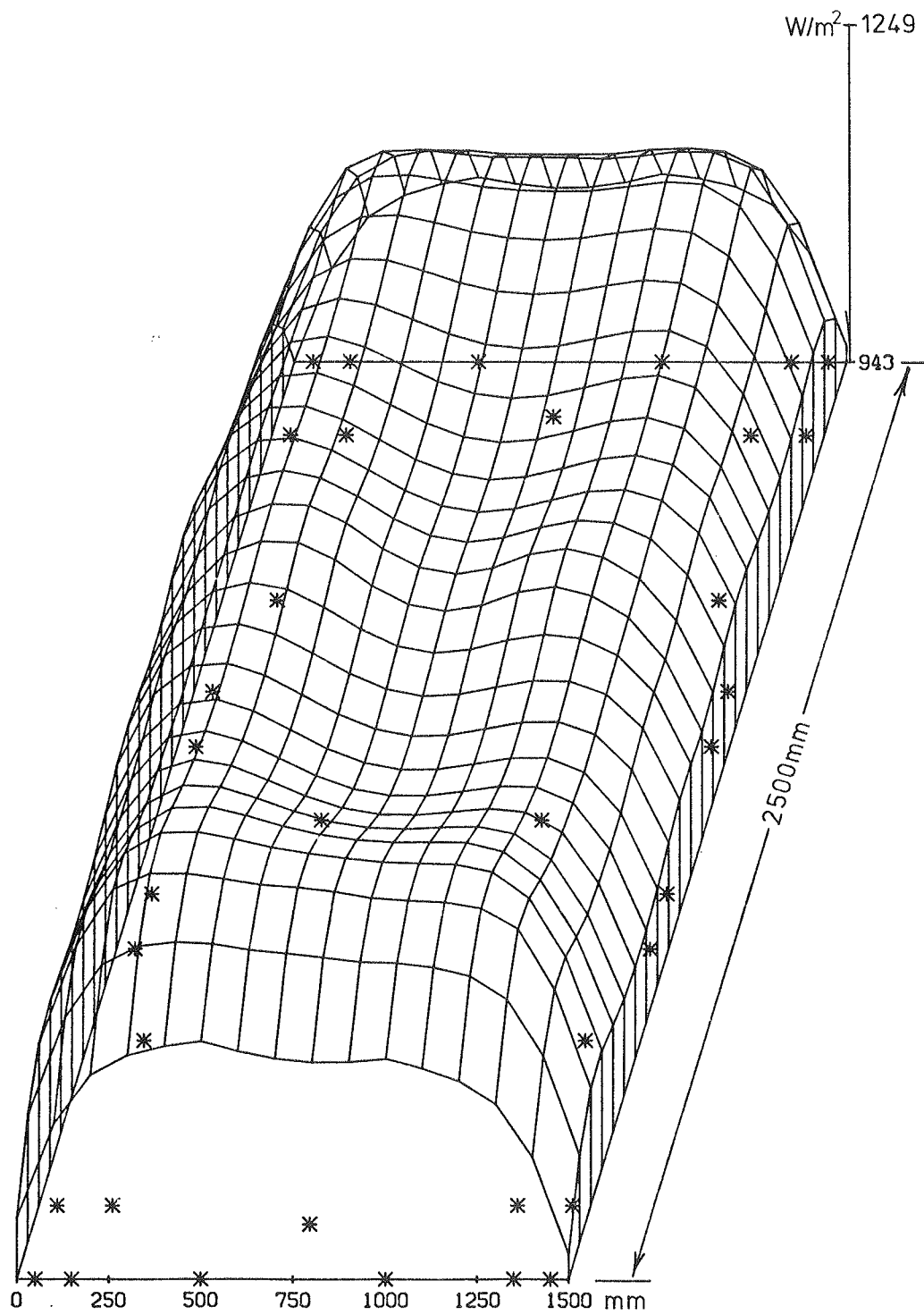


Fig. 5.1.10 Fastgørelsen af lampe med
indstillingsmuligheder

Indstillingen af lamperne blev fastlagt ved hjælp af et simpelt beregningsprogram på grundlag af en fast intensitetsfordeling og maksimalintensiteten for hver af lamperne. For et valgt sæt sigtepunkter beregnedes intensiteten over prøvefeltet i et netværk på 10 cm x 10 cm. Den i fig. 5.1.5 viste intensitetsfordeling er målt i den rigtige afstand og anvendes direkte i programmet, idet man forudsætter, at fordelingsformen er punktsymmetrisk og ens for alle lamperne. Ved at prøve sig frem med en række sæt af dobbeltsymmetriske sigtepunkter fandt man en acceptabel løsning. Den beregnede intensitetsfordeling over et felt på 1,5 m x 2,5 m er vist på fig. 5.1.11. For det egentlige prøvefelt på 1,2 m x 2,4 m havde man ifølge beregningerne en middelintensitet på 1180 W/m^2 og de største afvigelser på ca. $\pm 5\%$. Efter indstillingen af lamperne var foretaget v.h.j.a. fire solarimetre anbragt omkring sigtepunkterne, blev middelintensiteten målt til ca. 1200 W/m^2 , men jævnheden af intensiteten var dårligere end beregnet. Ved at reducere spændingen med ca. 10% og udelade en enkelt lampe opnåede man den på fig. 5.1.12 viste intensitetsfordeling.



* Sigtepunkter

Fig. 5.1.11 Beregnet intensitetsfordeling

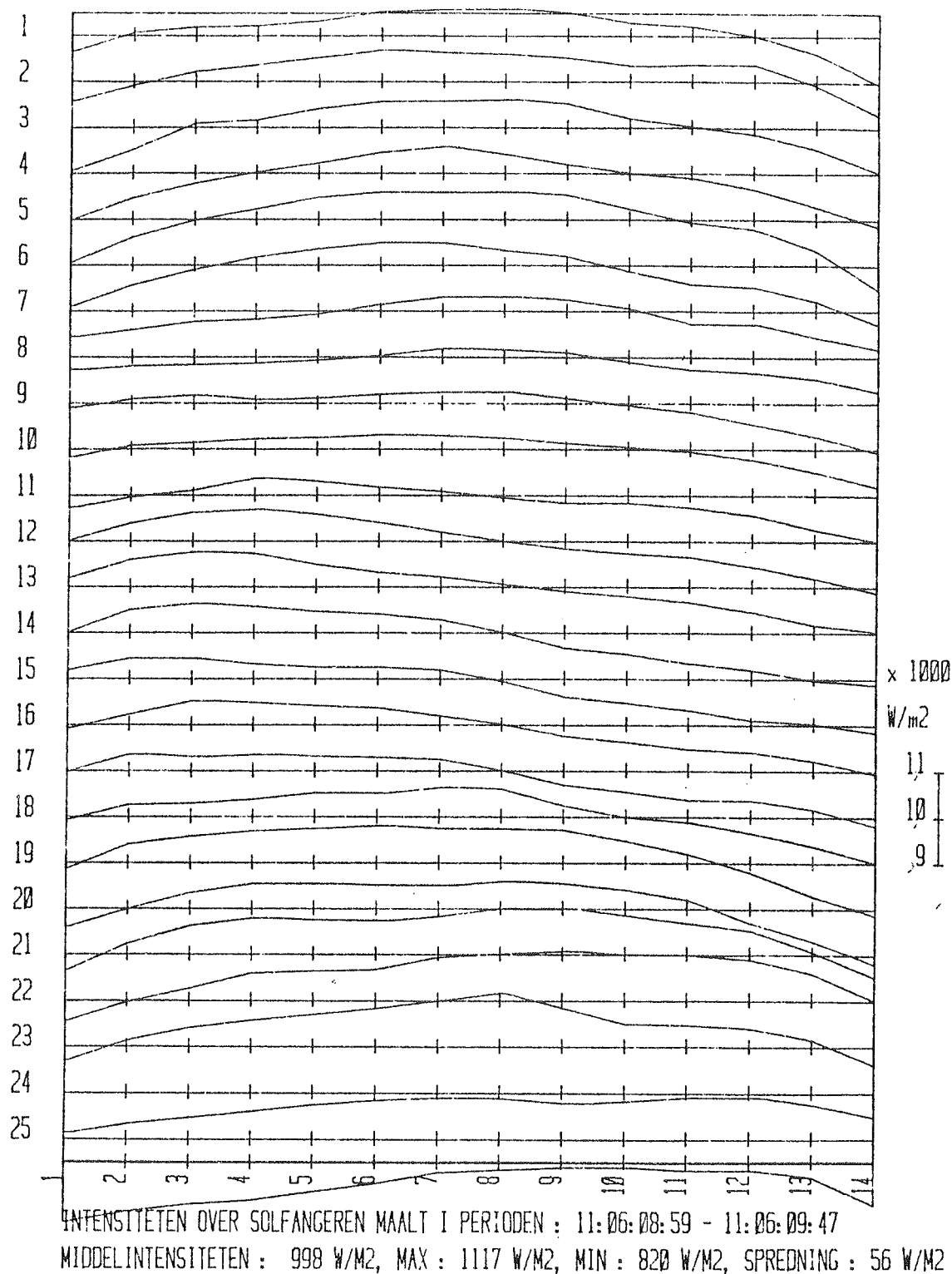


Fig. 5.1.12 Målt intensitetsfordeling over hele feltet

Middelintensiteten over hele feltet på 1,4 m x 2,5 m, der kan måles over, var ca. 1000 W/m². De enkelte største afvigelser var +12% og -18%, medens spredningen for alle 350 målepunkter var 6%. For et typisk felt på 1m x 2m var de enkelte største afvigelser ca. ±15% og spredningen ca. 6%. Man opnåede således ikke helt den ønskede jævnhed i intensiteten, men det er dog et acceptabelt resultat.

Dette var således solsimulatorens egenskaber m.h.t. intensitet, som blev opnået. Herefter aftog middelintensiteten med tiden og var efter ca. 800 timers brændetid faldet til ca. 900 W/m^2 . På det tidspunkt blev spændingen stillet op på den fulde værdi (220 V), hvorved middelintensiteten kom op på ca. 1000 W/m^2 igen. Med hensyn til levetiden på lamperne, som af fabrikanten angives til at være 1000 timer, kan det nævnes, at der kun var udskiftet to lamper, da de 1000 timers brændetid blev rundet.

Strålingen består stort set kun af direkte stråling med en indfaldsvinkel, der bestemt af de geometriske forhold, er mindre end 30° . Måling med afskærmet pyranometer viste, at middelintensiteten af stråling med en indfaldsvinkel større end 30° kun er 10 W/m^2 . Sammenlignet med at den diffuse strålingsandel på en hældende flade selv i klart vejr typisk kan være 20%, kan strålingen fra solsimulatoren siges at mangle diffus stråling for at være realistisk.

Stabiliteten af strålingen i et punkt er ikke særlig god, da alle lampernes strålingsfelter individuelt flytter sig lidt af og til. Man kan tydeligt se dette ved samtidig måling med flere pyranometre og afvigelserne kan typisk udgøre $\pm 5\%$. Stabiliteten af middelintensiteten er derimod god, idet den typiske afvigelse ligger inden for 1 - 2%. Dette skyldes selvfølgelig, at de lokale ændringer stort set ophæver hinanden.

Varmestrålingen fra solsimulatoren kan bedømmes på grundlag af, at temperaturen af frontglassene under normale driftsforhold er målt til ca. 200°C . Da et punkt på prøvebordet har et samlet vinkelforhold til alle lampernes frontglas på 0,02 vil det i forhold til, at alle omgivende overflader havde en temperatur på 25°C modtage ca. 50 W/m^2 mere. Dette er bekræftet ved måling med et pyrgeometer, hvormed man er i stand til at måle intensiteten af den varmemstråling, der fra et halvrum over instrumentet udsendes til dette. Man fik under typiske forhold med solsimulatoren i drift og ude af drift en forskel på ca. 50 W/m^2 . Havde alle omgivende flader samme temperatur, ville denne varmemstråling svare til, at temperaturen af omgivelserne var 33°C .

5.2 Prøvebord

Et prøvebord, som vist på fig. 5.2.1, er opbygget til at anbringe solfangeren på. Dette består af et stativ med hjul, hvortil der er fastgjort en ramme, der kan vippes. Prøvebordet omfatter desuden monteringsramme, vindsimulator, væskesystem samt traverseringsmekanisme for måling af middelintensiteten.

Solfangeren monteres på en løs ramme med tværgående lægter. Bagsiden af solfangeren er således, på nær de ca. 10% af arealet som lægterne udgør, i direkte kontakt med den omgivende luft. Dette har især betydning ved prøvning af solfangere helt uden eller med en meget beskeden bagsideisolering.

Vindpåvirkningen skabes ved hjælp af to tværstrømsblæsere, der er anbragt nederst på den løse ramme. Blæserne kan indstilles, så de sender en bred luftstrøm op langs solfangerens sider og forside. Derimod er der ingen vindpåvirkning på bagsiden, idet der er anbragt en plastfolie på hele rammen omkring solfangeren som vindafskærmning. Lufthastigheden kan indstilles ved at regulere på blæsernes omdrejningshastighed. Den højeste vindhastighed, der kan opnås over hele prøvebordet, er ca. 10 m/s. Vindhastigheden aftager selvfølgelig med afstanden fra blæserne, og man har derfor ved prøvning typisk en vindhastighed på ca. 8 m/s nederst og ca. 5 m/s øverst.

Væskesystemet består af et lukket system med ekspansionsbeholder og sikkerhedsventil, som fyldes op og sættes under tryk ved hjælp af en centrifugalpumpe. Væskesystemet er for at klare varme- og kølebehovene forsynet med en elpatron og en varmeveksler, der er tilsluttet kølevand eller kølesystem. Temperaturen holdes konstant ved hjælp af en modulerende termostat på elpatronen eller en motorventil med proportionalregulator på kølevandet. Herved kan man holde en konstant temperatur i området fra 0°C til 100°C uanset, om der er kølebehov eller varmebehov. Temperaturreguleringen sker i et indre kredsløb, hvor væskestrømmen er passende stor, selvom væskestrømmen ud gennem solfangeren kun er 1 - 2 l/min. Under normale driftsforhold holdes indløbstemperaturens afgivelser inden for $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Væskestrømmen ud gennem solfangeren skabes ved hjælp af en normal cirkulationspumpe og indstilles ved hjælp

af en ventil. Den maksimale væskestrøm er ca. 10 l/min. Stabiliteten af væskestrømmen er forbedret med en trykdifferensventil. Under normale driftsforhold er væskestrømmens afvigelser baseret på middelværdien over ét minut mindre end 2%. Baseret på middelværdien over fem minutter er den mindre end 1%. Der er indbygget en volumenstrømsmåler i systemet, men den omtales under målesystemet. Systemet er forsynet med automatiske luftudladere og skueglas, så man kan kontrollere, at væsken er fri for luft. Systemet er også forsynet med et ventilarrangement, som muliggør, at væskestrømmens retning gennem solfangeren let kan vendes. Væskesystemet kan benyttes til vand og vand-glykol blandinger samt ved ombytning af volumenstrømsmåler type også til olier. Dette er muliggjort ved at benytte komponenter, der kan tåle disse væsker samt ved at forsyne systemet med passende muligheder for tømning og gennemskylning.

Traverseringsmekanismen til måling af middelintensiteten af strålingen består, som det kan ses af figur 5.2.1, af en tværbjælke, der kan sænkes ned parallelt med solfangeren, og en vogn der kan køre på tværbjælken fra den ene side til den anden. Selve måleinstrumentet sidder på denne vogn. Bevægelserne i begge retninger udføres med gearmotorer ved hjælp af wirer. Både tværbjælken og vognen kan stoppes for hver 10 cm ved hjælp af fotoceller og sorte streger. Der er ialt 25 x 14 stoppesteder. Traverseringsmekanismen kan styres manuelt med trykknapper eller automatisk ved hjælp af dataopsamlingssystemet.

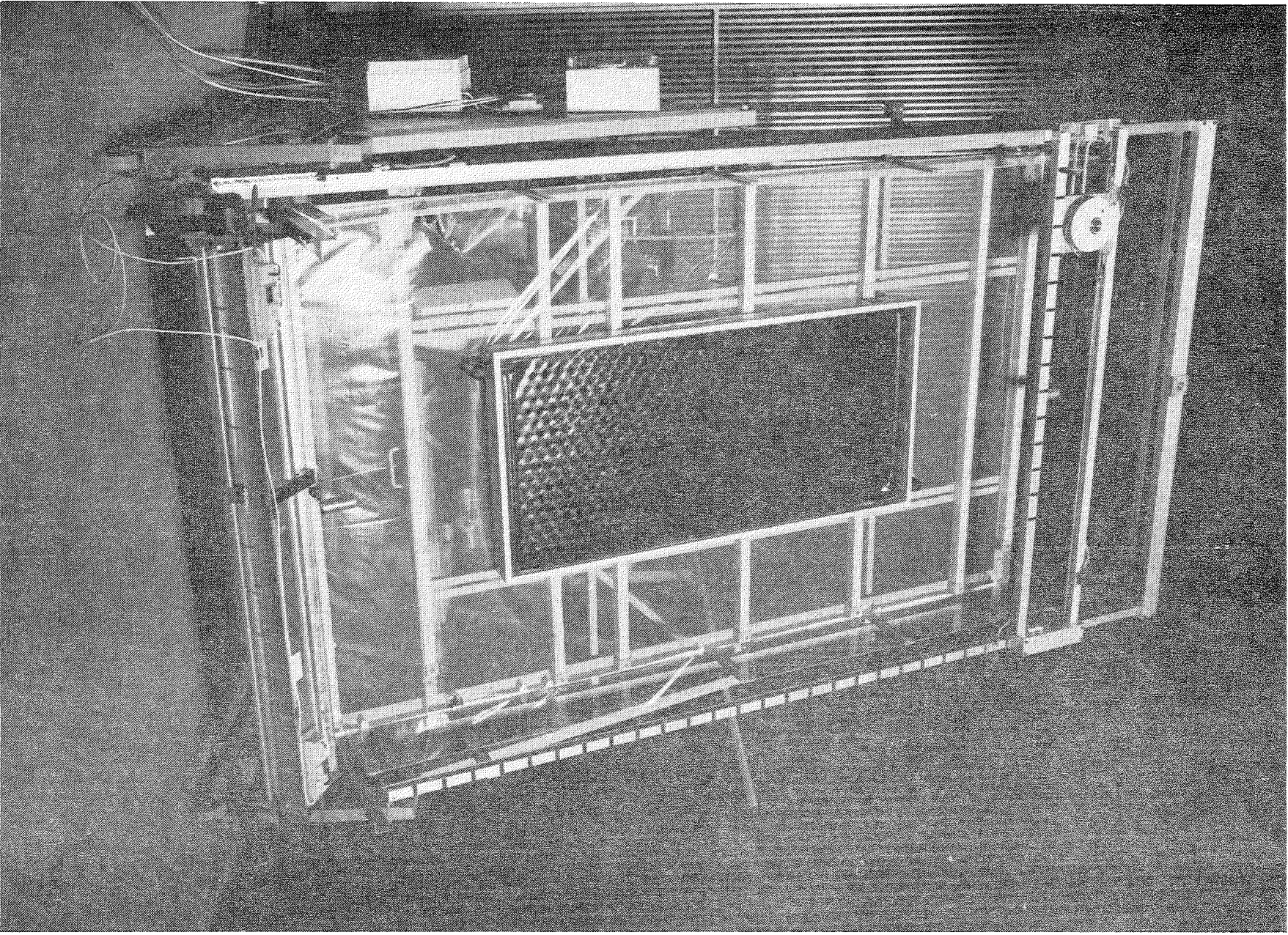


Fig. 5.2.1 Prøvebordet

5.3 Måleudstyr

Princippet i målingen af effektiviteten er, at man bestemmer solindfaldet og den effekt solfangeren har tilført væsken under kendte drifts- og vejrforhold. De enkelte måleinstrumenter og følere samt dataopsamlingsudstyret skal omtales i det følgende.

Solindfaldet bestemmes ved at måle intensiteten med et pyranometer i et netværk over solfangeren ved hjælp af den omtalte traverseringsmekanisme. Intensiteten af strålingen måles med et pyranometer, som er vist på figur 5.3.1. Instrumentet består af en lille sort plade anbragt bag to glaskupler. Den kortbølgede stråling går igennem glaskuplerne og absorberes i den sorte plade, som derved får en højere temperatur end omgivelserne. Denne overtemperatur medfører, at en termosøjle anbragt mellem den sorte plade og instrumentets fod giver et signal, som kan omsættes til intensitet ved hjælp af en kalibreringsfaktor for instrumentet. Det anvendte instrument har følgende fabrikat og typebetegnelse: Eppley PSP. Nøjagtigheden angives af fabrikanten til 1% og tidskonstanten til 1 sekund.

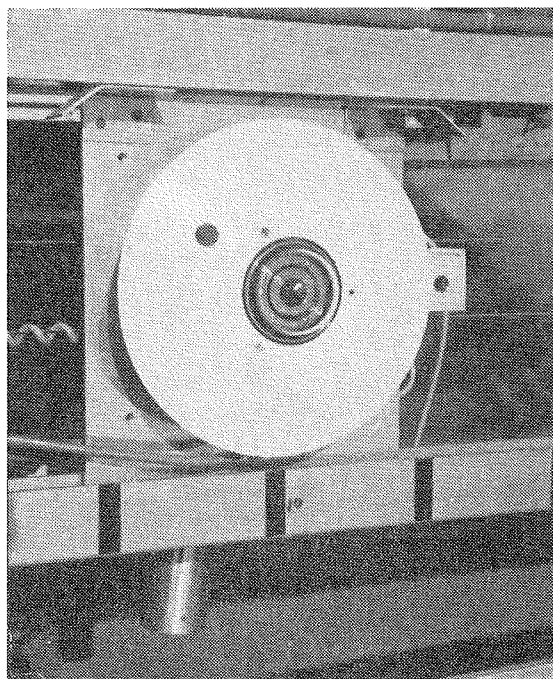


Fig. 5.3.1 Foto af pyranometer

Da strålingsintensiteten aftager med afstanden, og da man af praktiske grunde må have en vis afstand mellem solfangeren og pyranometret, må man korrigere herfor. Dette gøres ved at måle

intensiteten i den normale placering og i en tilbagetrukket placering af prøvebordet. For at måle intensiteten af det samme strålingsfelt i den tilbagetrukne placering er denne valgt, så den svarer til det sæt stoppesteder på traverseringsmekanismen, der ligger ét stoppested længere nede. Afstanden mellem de to planer, man måler intensiteten i, er således 24 cm og svarende hertil bestemmer man intensitetens reduktion med afstanden. Idet man antager, at intensiteten aftager lineært med afstanden for de små afstande, der er tale om, kan man bestemme korrektionen for den aktuelle solfanger. Korrektionen udgør typisk 2 - 4%.

Den afgivne effekt bestemmes ved at måle væskestrømmen igennem og temperaturstigningen over solfangeren, hvorefter disse ganges sammen med vægtfylden og varmfylden for den anvendte væske. Væskestrømmen måles med en volumenstrømsmåler af ringstempeltype, der har følgende fabrikat og typebetegnelse: Aqua Metro VZFM20. Nøjagtigheden er af fabrikanten angivet til 1% af aktuel væskestrøm over 1 l/min., og den maksimale væskestrøm er 15 l/min. (25 l/min. kortvarigt). Volumenstrømsmåleren er forsynet med en pulsgiver, som giver én puls for 0,01 l. Temperaturstigningen over solfangeren måles med en termosøjle med 10 elementer af kobber-konstantan. Denne er monteret i dykrør i rørstykker, der forsynet med vinkler for at skabe opblanding, er anbragt i isolerede kasser. Temperaturdifferensmålekasserne anbringes så tæt som muligt ved solfangerens tilslutningsstudse og de nødvendige slangers længde holdes altid under 0,2 m og isoleres godt. Den anvendte vægtfylde beregnes svarende til temperaturen ved indløbet til solfangeren, som stort set er den samme som ved væskestrømsmåleren. Varmefylden bestemmes svarende til middeltemperaturen i solfangeren.

Væsketemperaturen ved indløbet til solfangeren bestemmes med et termoelement af kobber-konstanten anbragt i samme dykrør som termosøjlen. Lufttemperaturen måles med to termoelementer anbragt i strålingsafskærmende rør, der sidder i luftstrømmen neden for og oven for solfangeren. I prøvningsresultaterne indgår middelværdien af disse som lufttemperaturen. Lufttemperaturen bag solfangeren måles med et termoelement, men den benyttes kun som en kontrolmåling og indgår ikke i resultaterne. Den simulerede vindhastighed måles med et varmetrådsanemometer, der anbringes i en holder på vognen,

hvorpå pyranometret er anbragt. Føleren indstilles, så man måler lufthastigheden i 3 cm's afstand fra solfangerens overflade. Lufthastigheden aflæses direkte på et viserinstrument, og nøjagtigheden er ca. $\pm 0,5$ m/s.

Målingen af signalerne fra de omtalte instrumenter og følere sker ved hjælp af et dataopsamlingsudstyr, hvori også viderebehandlingen og registreringen foregår. Udstyret er af fabrikat Hewlett Packard, og det består, som vist på fig. 5.3.2, af en programmerbar bordregnemaskine og forskellige måle- og registreringsenheder. Der er udviklet programmer til regnemaskinen, så de forskellige måleopgaver under prøvningen kan udføres automatisk. Programmerne er beskrevet i (22) og skal derfor kun omtales meget kort. Som grundlag for de følgende programmer er der et program, hvor man indlæser data for solfangeren. Det drejer sig om identifikationsdata, transparent areal, væskens vægtfylde og varmfylde (som polynomium i temperaturen), samt data vedrørende solfangerens placering på prøvebordet angivet ved øverste, nederste, venstre og højre stoppested, der begrænser solfangeren. Til måling af temperaturer under stagnationsprøvningen er der et program, der tegner temperaturforløbet. Middelstrålingsintensiteten over solfangeren bestemmes ved hjælp af et program, som både styrer traverseringsmekanismen og måler intensitet. Endelig er der to programmer, som anvendes til måling af effektivitet og varmetabskoefficient. Disse er begge bygget op omkring bestemmelsen af middeleffekten over en fem-minutters periode på grundlag af målingen af væskestrøm og temperaturstigning eller -fald over solfangeren hvert minut. Effektiviteten beregnes på grundlag af middelintensiteten, der måles, medens temperaturforholdene i solfangeren stabiliseres. Både ved måling af effektivitet og varmetabskoefficient udskrives de direkte målte væskestrømmes, temperaturforskelle og temperaturers middelværdier, og samtidig udskrives de på grundlag heraf bestemte effektiviteter og varmetabskoefficienter. Desuden tegnes minutværdierne for væskestrøm og temperaturer, og deres maksimale afvigelse i fem-minutters perioder udskrives. Man har således samtidig med målingen også første del af behandlingen af disse.

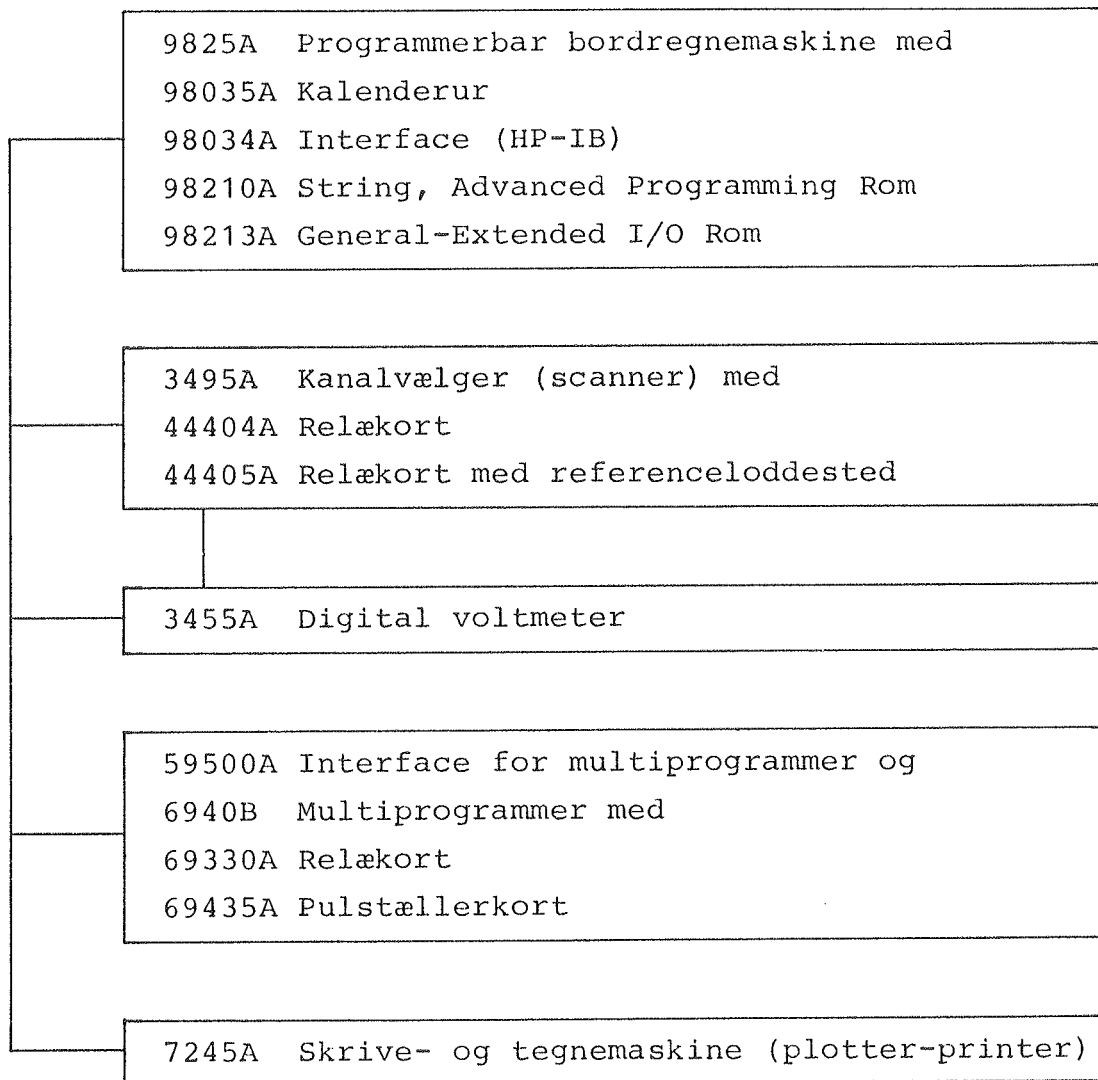


Fig. 5.3.2 Oversigt over dataopsamlingssystemet

6. PRØVNINGERNES NØJAGTIGHED

For at kunne sammenligne solfangernes effektivitet i forbindelse med valg af fabrikat og i forbindelse med produktudvikling er det nødvendigt, at prøvningens nøjagtighed er stor. Da maksimaleffektiviteten typisk kan variere i området fra 85% til 60% afhængig af solfangerens type og kvalitet, er det klart, at unøjagtigheden ikke bør overstige nogle få procent, for at man kan skelne mellem de forskellige solfangere.

Ved sammenligning af solfangere prøvet i den samme opstilling er det sådan set tilstrækkeligt med en god reproducerbarhed, men for at kunne sammenligne solfangere afprøvet forskellige steder må man også have en god absolut nøjagtighed.

I det følgende skal en undersøgelse af nøjagtigheden af de enkelte målinger og den samlede målenøjagtighed (23) omtales med angivelse af hovedresultaterne.

6.1 Nøjagtigheden af de enkelte målinger

Til måling af solintensiteten anvendes et pyranometer (Eppley, PSP), som er leveret kalibreret af fabrikanten.

En generel undersøgelse af pyranometres egenskaber (24) har vist, at pyranometre af den anvendte type er så lidt afhængig af hældning, intensitet og temperatur, at man ikke begår nogen fejl, selv om pyranometret er kalibreret under andre forhold, end det anvendes under i den aktuelle opstilling. Resultaterne for de Eppley-PSP, der indgik i undersøgelsen, er vist på fig. 6.1.1.

Instrumentets kalibrering er kontrolleret ved hjælp af et pyrliometer, som er kalibreret i Carpentras (25). Begge instrumenters kalibreringer er baseret på International Pyrliometric Scale (IPS 1956). Kontrolmålingen af pyranometret gav som resultat en afvigelse på kun 0,1%. Der var således god grund til at anvende den af fabrikanten angivne kalibreringsfaktor og ligeledes den angivne nøjagtighed på $\pm 1\%$.

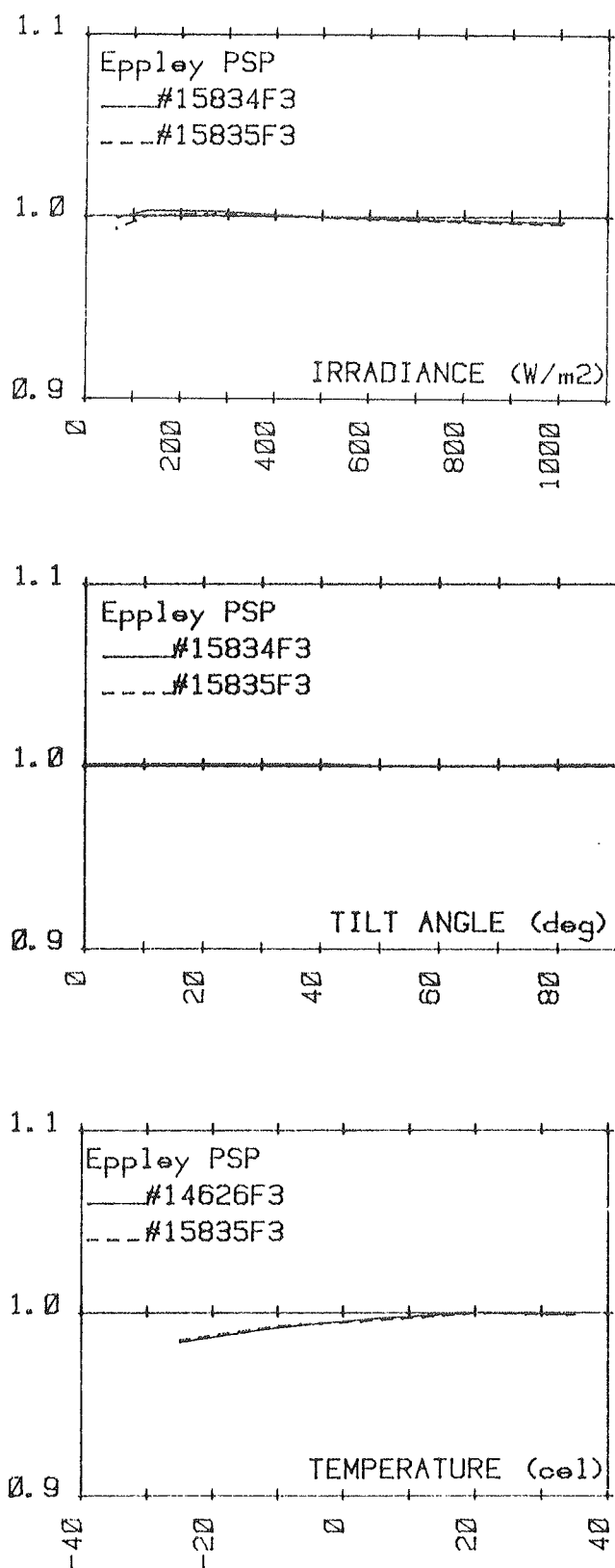


Fig. 6.1.1 Pyranometres visning ved varierende solintensitet, hældning og temperatur, iflg. (24)

Målingen af væskestrømmen gennem solfangeren sker med en ringstempelmåler, hvis nøjagtighed er kontrolleret ved hjælp af en vægt og målerens tælleværk, som er direkte koblet sammen med pulsgiveren. Resultatet var, at ved alle temperaturer i området 10-95°C og ved væskestrømme over godt 1 l/min. er fejlen mindre end $\pm 2\%$ af aktuel væskestrøm. En af de anvendte målere udviste dog en større fejl ved høje temperaturer.

Målingen af temperaturstigningen over solfangeren sker med en termosøjle af kobber-konstantan. Dennes fejl er undersøgt ved hjælp af termostatbade og et præcisionstermometer, der er kalibreret på Risø. Resultatet af forsøgene var, at fejlen var mindre end ca. $\pm 0,03^\circ\text{C}$. Heri er varmetab ikke medtaget.

Ved målingen af temperaturstigningen har man imidlertid også en systematisk fejl, idet der er et varmetab fra tilslutningsslangerne mellem solfangeren og kasserne, hvori temperaturstigningen måles. Denne er bestemt ved at koble kasserne sammen og måle varmetabet ved at cirkulere varmt vand igennem. Varmetabet blev bestemt til ca. $0,3 \text{ W}/^\circ\text{C}$, hvilket for en typisk solfanger på 2m^2 med en varmetabskoefficient på $7 \text{ W}/\text{m}^2^\circ\text{C}$ medfører en 2% for stor varmetabskoefficient. Ved væsketemperaturer lig med lufttemperaturen var temperaturforskellen $0,00^\circ\text{C}$, og der var praktisk talt intet varmetab. Denne fejl påvirker således ikke bestemmelsen af maksimaleffektiviteten.

Med hensyn til målingen af væsketemperaturen og lufttemperaturen, der ikke indgår direkte i effektiviteten men benyttes som parametre, er der også lavet kontrolmålinger. Resultatet af disse var, at unøjagtigheden for hver af dem var ca. $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Vindhastigheden langs solfangeren anvendes ved beskrivelsen af prøveforholdene. Vindhastigheden måles med varmetrådsanemometre, hvis unøjagtighed er ca. $\pm 0,5\text{m/s}$.

6.2 Samlet målenøjagtighed og reproducerbarhed

For at bestemme middelintensiteten over solfangeren udføres der en traverseringsmåling med ca. 100 punkter pr. kvadratmeter solfanger. Det er ikke muligt at kontrollere denne målings nøjagtighed, da man ikke har noget instrument, der kan måle middelintensiteten over en flade. Da man ifølge (4) normalt kun har en afvigelse mellem gentagne målinger på ca. $\pm 1\%$, og der heri også indgår variationer som følge af spændingsændringer, er det rimeligt at antage, at den samlede unøjagtighed ved måling af middelintensiteten er mindre end $\pm 1,5\%$.

Da varmeeffekten bestemmes ved en sammensat måling af væskestrøm og temperaturstigning er det oplagt at undersøge den samlede nøjagtighed. Dette er gjort ved at erstatte solfangeren med en elektrisk varmepatron, der er forsynet med isolering og varmetabsskjold, så varmetabet er meget lille. Den tilførte elektriske effekt måles med et præcisions-wattmeter. Resultaterne af undersøgelsen (23) viste, at fejlen ved væsketemperaturer på niveau med lufttemperaturen kun var ca. $\pm 1,5\%$. Ved høje temperaturer (95°C) er den relative unøjagtighed selvfølgelig større. For typiske solfangere udgør fejlen dog kun ca. -2% målt i absolutte effektivitetsenheder. Det skal bemærkes, at fejlen hovedsagelig skyldes varmetab fra tilslutningerne mellem solfangeren og kasserne, hvori temperaturstigningen måles.

Den forventede samlede relative unøjagtighed på målingen af maksimaleffektiviteten er derfor godt $\pm 2\%$, og den samlede absolutte unøjagtighed er derfor $\pm 2\%$. For høje temperaturer må man forvente, at der er den samme absolutte tilfældige unøjagtighed men dertil kommer den systematiske på -2% . Dette må siges at være et tilfredsstillende resultat.

Reproducerbarheden af prøvningen er også undersøgt ved at gentage en hel prøvning for to solfangere. I alle tilfælde er der tale om en helt ny prøvning, der er udført lang tid efter den oprindelige, således at små ændringer i opstillingen og prøvningens udførelse også indgår i resultaterne. Effektivitetskurverne svarende til den første og anden prøvning er vist på fig. 6.2.1.

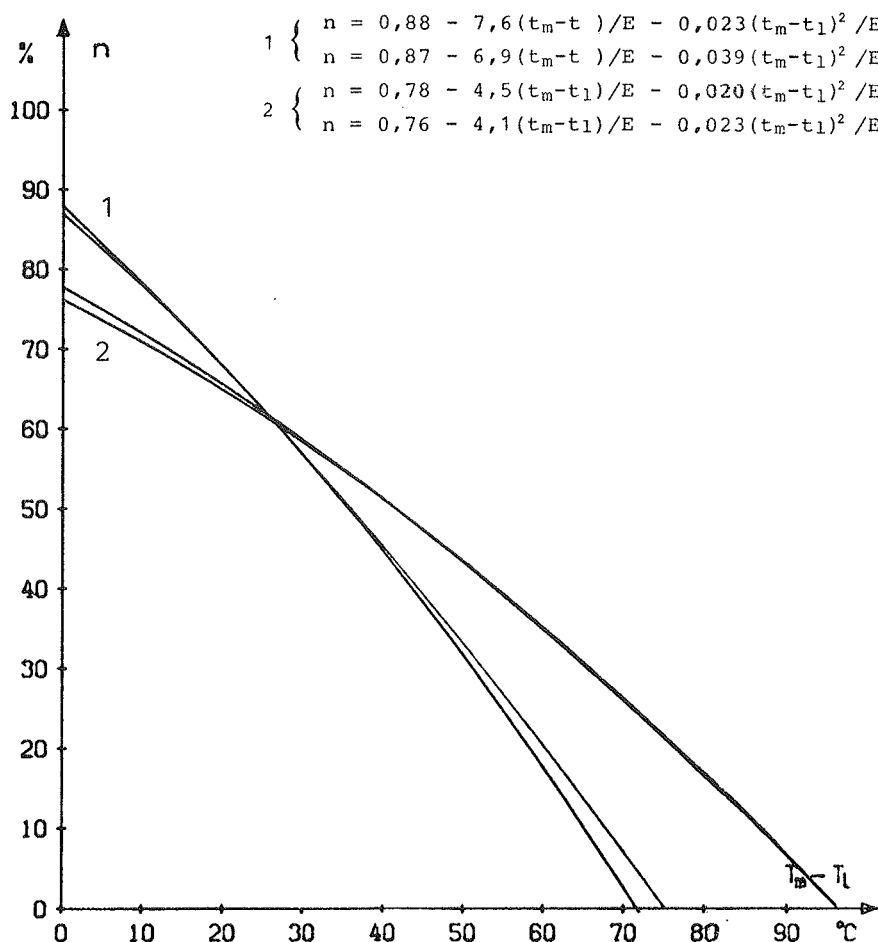


Fig. 6.2.1 Effektivitet af to solfangere ved gentagne målinger

Det ses, at maksimaleffektiviteten kun afviger ca. 1% for hver af solfangerne. Der er især for den ene solfanger en noget større afvigelse ved høje temperaturer. Dette skyldes formodentlig andre vindforhold og varmetab for slangerne mellem solfanger og kasser til måling af temperaturstigning. Fejlene er dog relativt små, og man kan derfor fastslå, at man har en god reproducerbarhed for opstillingen.

6.3 Sammenligning med andre laboratorier

Solsimulatoropstillingen har været benyttet til prøvning af nogle få solfangere i forbindelse med internationale (IEA) og europæiske (EF) arbejdsgruppers sammenligninger af effektivitetsprøvnings af ens solfangere (26, 27). Resultaterne fremgår af fig. 6.3.1. og 6.3.2.

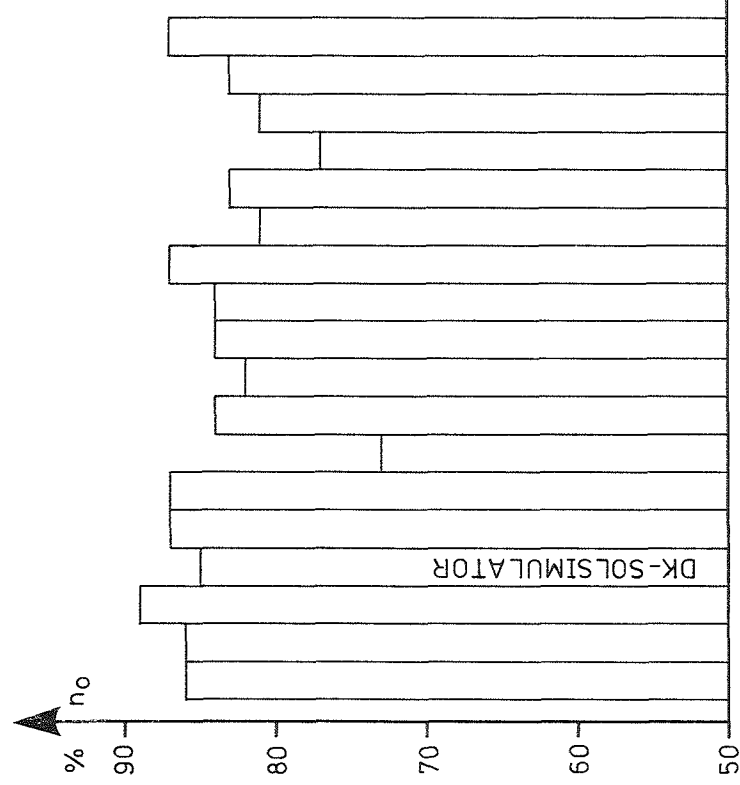


Fig. 6.3.1 Maksimaleffektiviteten for ens solfangere målt af forskellige laboratorier i IEA-regie, iflg. (26)

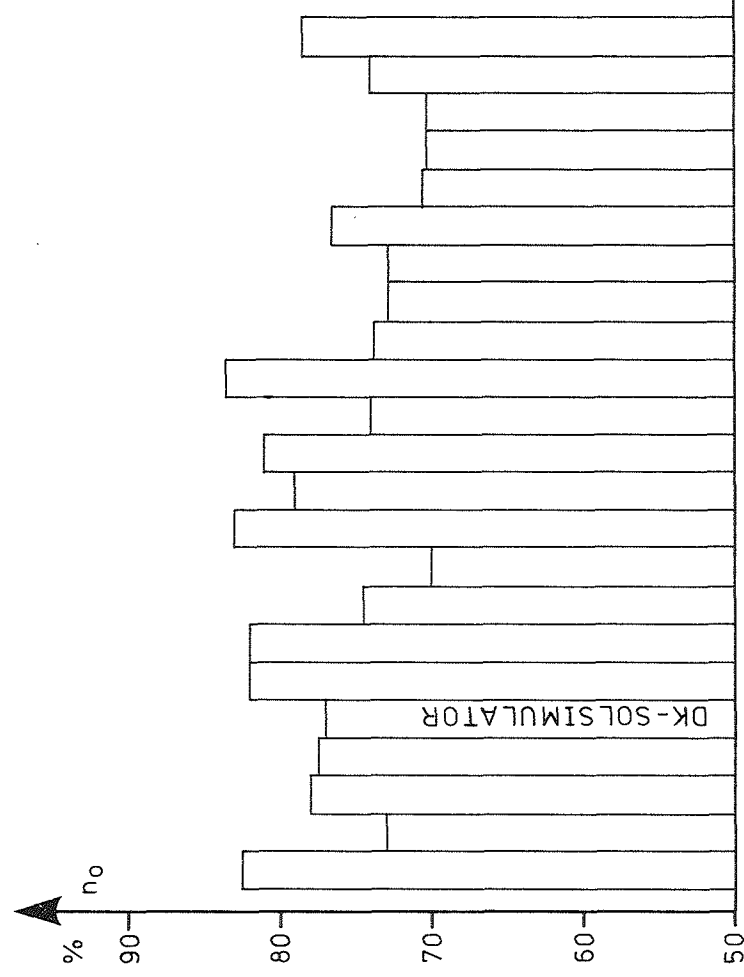


Fig. 6.3.2 Maksimaleffektiviteten for ens solfangere målt af forskellige laboratorier i EF-regie, iflg. (27)

Det ses, at resultaterne generelt afviger temmelig meget fra hverandre, men det skyldes i mange tilfælde forskelle i prøveforhold. De danske resultater passer rimeligt godt med de øvrige.

De ovennævnte sammenligninger er baseret på ens solfangere, men i et enkelt tilfælde har man udført en sammenligning med Statens Provningsanstalt, Borås, baseret på den samme solfanger. Sammenligningens resultat er vist på fig. 6.3.3., og det ses, at der er en forbløffende god overensstemmelse.

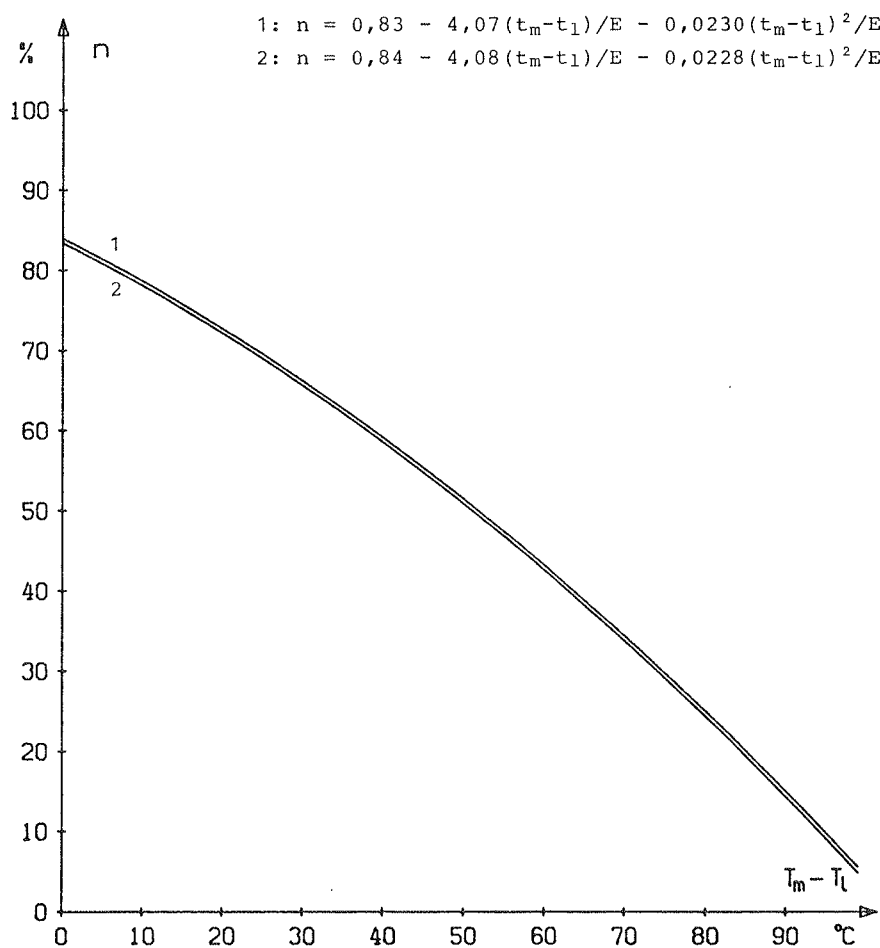


Fig. 6.3.3 Effektivitet af samme solfanger målt hos Statens Provningsanstalt og Laboratoriet for Varmeisolering

Der er også foretaget en sammenligning med Statens Provningsanstalt af prøvninger af ens solfangere, som er afprøvet i begge lande (28, 4). Resultaterne heraf er vist på fig. 6.3.4. Når der tages hensyn til de kendte mindre forskelle i de prøvede solfangere, viser der sig af være en god overensstemmelse.

Generelt med hensyn til målenøjagtighed kan det konkluderes, at man med den beskrevne opstilling kan opnå en rimelig høj nøjagtighed for almindelige plane solfangere. Med henblik på prøvning af solfangere med meget små varmetabskoefficienter, f.eks. evakuerede rørsolfangere, må nøjagtigheden forbedres ved de høje temperaturer ved forbedringer i opstillingen og ved anvendelse af korrektioner.

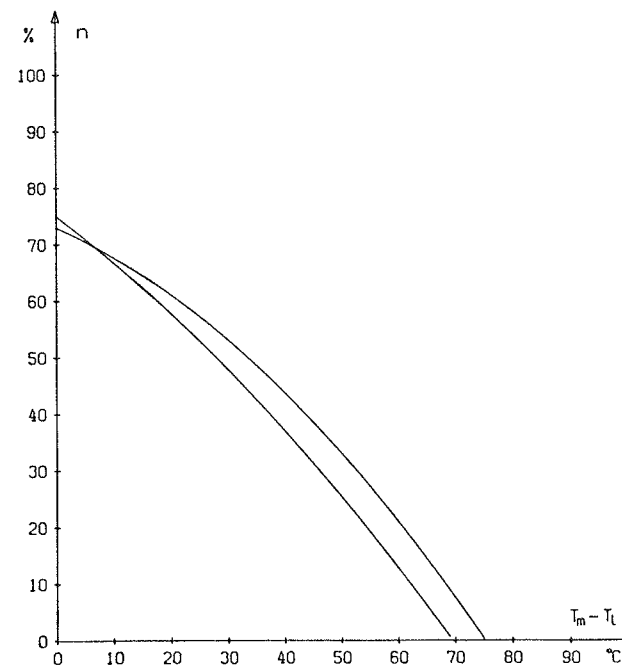
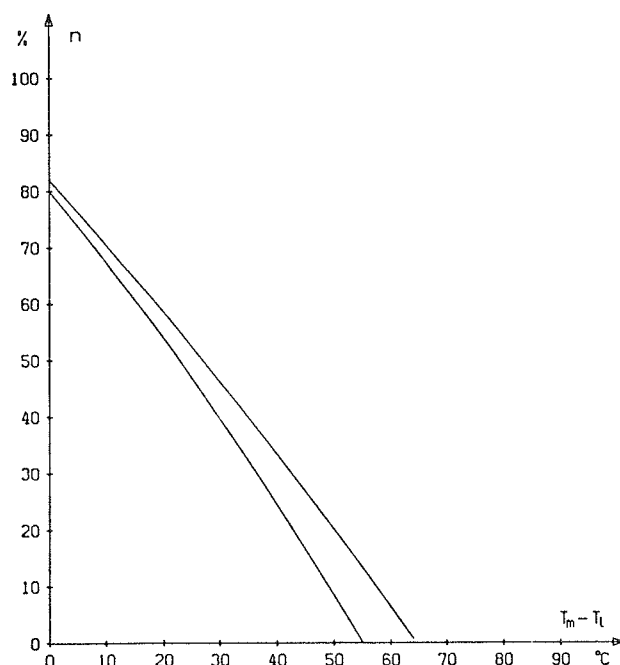
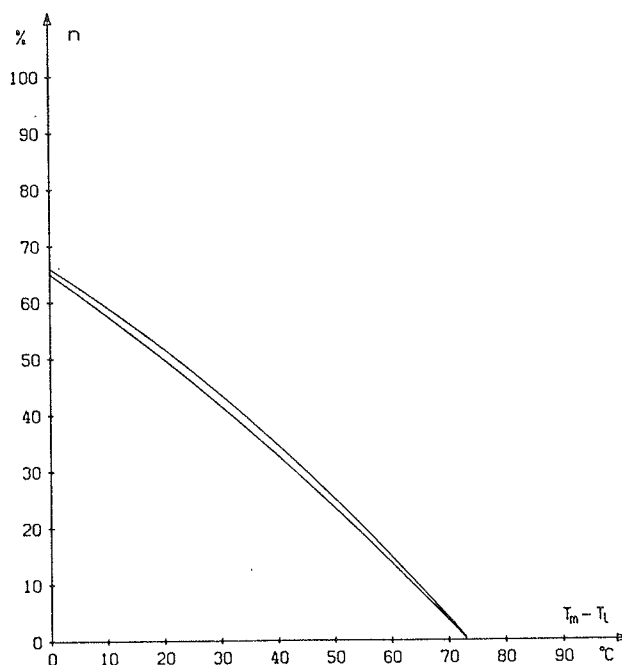
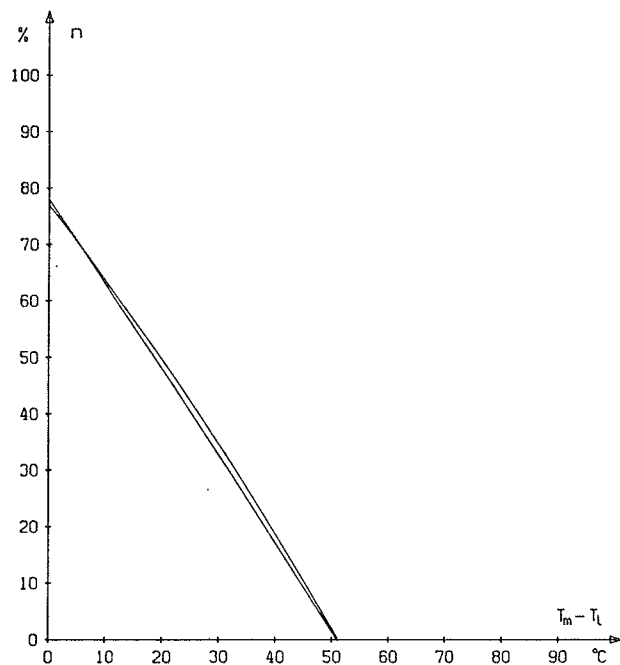


Fig. 6.3.4 Effektiviteten af solfangere af samme fabrikat målt ved Statens Provningsanstalt og Laboratoriet for Varmeisolering

7. PRØVNINGERNES OVERENSSTEMMELSE MED VIRKELIGE FORHOLD

På nogle punkter sker prøvningen under urealistiske forhold. Strålingen fra solsimulatoren indeholder stort set ikke diffus stråling og middelstrålingstemperaturen er lidt højere end lufttemperaturen i modsætning til de udendørs forhold. Hertil kommer, at man udendørs normalt har lavere værdier for solintensitet, lufttemperatur og vindhastighed end anvendt under prøvningerne. Indflydelsen af forskellen i prøveforholdene og de udendørs forhold skal vurderes i det følgende på grundlag af teoretiske og eksperimentelle undersøgelser.

Beregninger af de omtalte vejrparametres indflydelse på typiske solfangeres effektivitet er udført, idet man har taget udgangspunkt i prøveforholdene, som de normalt findes ved en prøvning i solsimulatoropstillingen. Beregningerne er udført med det tidligere omtalte program på grundlag af den detaljerede solfangermodel, og dataene for solfangerne er de samme som anvendt ved beregningerne omtalt i afsnit 3. Der anvendes til sammenligningen de samme vejrforhold, som blev benyttet i afsnit 4. De typiske prøveforhold er vist i skema 7.1. Resultatet af beregningerne er vist i fig. 7.1.

Vejrforhold typenr.		16
Lufttemperatur	°C	25
Himmelstrålingstemperatur	°C	33
Jordstrålingstemperatur	°C	33
Solintensitet	W/m ²	900
Diffus strålingsandel	%	0
Indfaldsvinkel	grader	0
Vindhastighed	m/s	6

Skema 7.1 Vejrforhold svarende til prøveforholdene i
 solsimulatoropstillingen

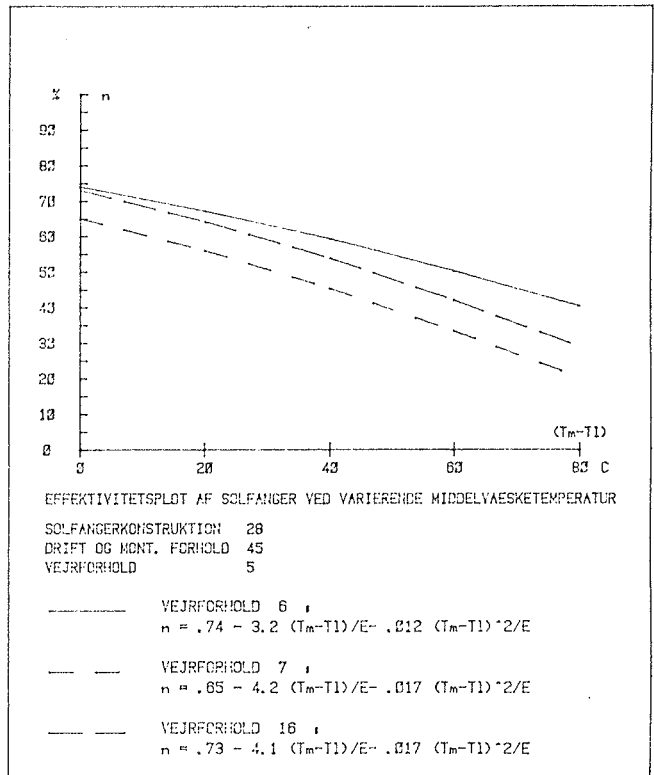
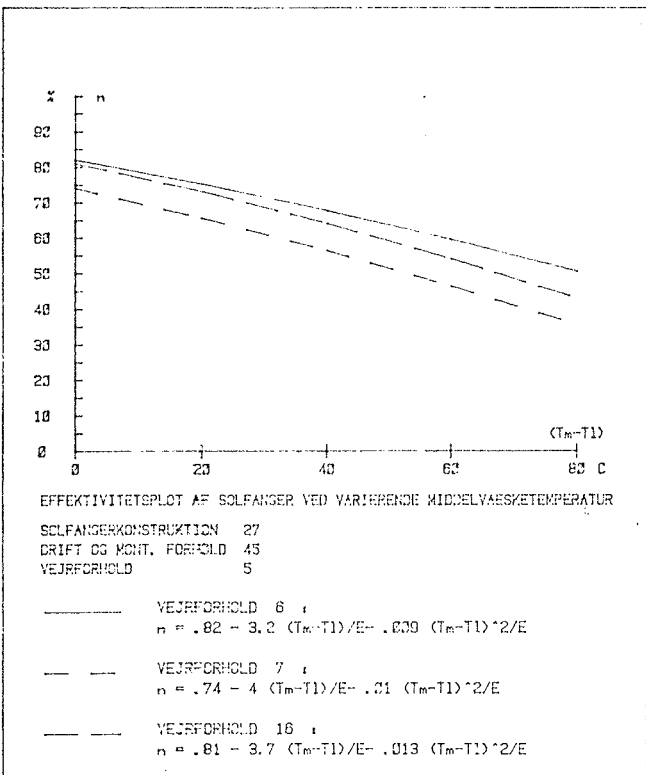
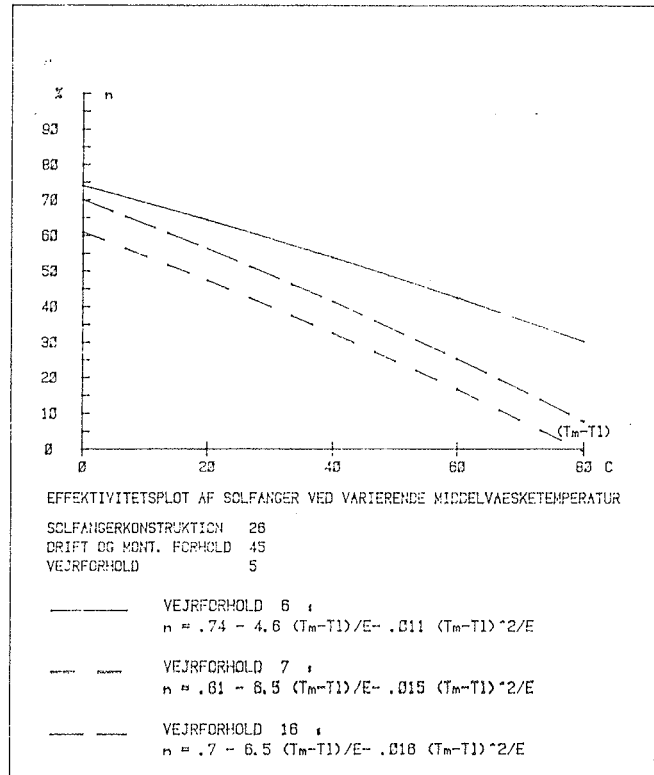
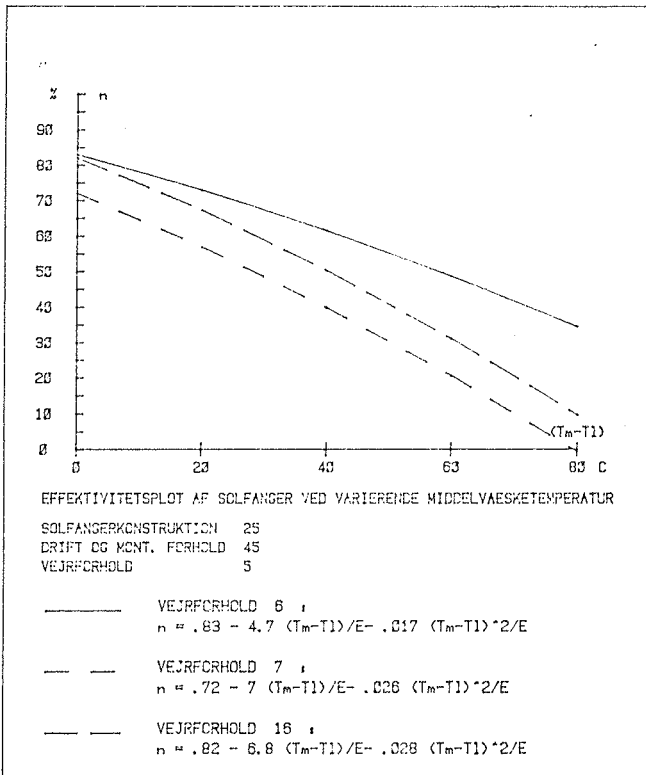


Fig. 7.1 Effektiviteten beregnet ved prøveforholdene (vejrforhold 16) og ved ekstremværdier (vejrforhold 6 og 7)

Det ses, at effektiviteten, der er beregnet ved vejrforhold svarende til prøveforholdene for alle solfangerne, ligger mellem de effektiviteter, der er beregnet ved de to sæt ekstreme vejrforhold. Da der imidlertid er stor variation i de effektiviteter, der svarer til de ekstreme vejrforhold, betyder dette dog kun, at der i hvert fald ikke er store forskelle mellem effektiviteten under prøveforholdene og under virkelige vejrforhold.

Der er udført forskellige eksperimentelle sammenligninger af effektiviteten af ens solfangere målt i solsimulatoropstillingen og i udendørs opstillinger.

I forbindelse med indkøringen af solsimulatoren og prøvemethoden blev der foretaget en effektivitetsprøvning af to solfangere, som tidligere var blevet prøvet i kombinerede udendørs-indendørs prøvninger (2, 3). Resultaterne er vist på figur 7.2, og det ses, at der er rimelig god overensstemmelse, når man tager i betragtning, at der er tale om forskellige prøvemethoder og prøveopstillinger.

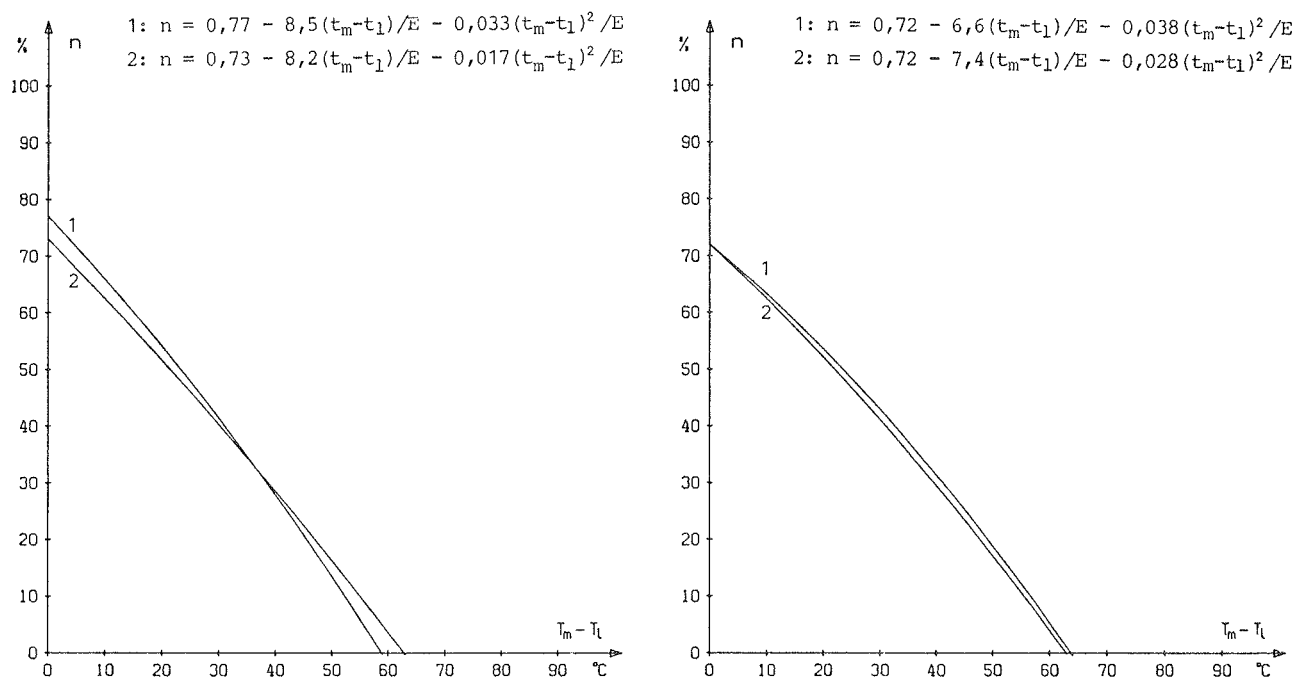


Fig. 7.2 Effektiviteten af to solfangere bestemt ved kombinerede udendørs/indendørs målinger (1) og ved målinger i solsimulatoropstillingen (2)

For at undgå forskelle i prøveudstyr og prøvemethoder er der også lavet effektivitetsprøvninger med prøvebordet og tilhørende måleudstyr udendørs. Resultaterne er vist på figur 7.3.

Det ses, at der for begge solfangere er meget god overensstemmelse mellem de normale indendørs måleresultater og de udendørs kontrolmålinger. Resultaterne er ikke lavere ved de udendørs målinger, selv om der var en diffus strålingsdel på ca. 15% og en lavere temperatur af omgivelserne svarende til en ekstra varmeudstråling på ca. 10 W/m^2 (målt med et pyrgeometer). Årsagen til, at man ikke får en lavere effektivitet udendørs, skal sikkert søges i det forhold, at både solintensiteten og lufttemperaturen er lavere ved de aktuelle udendørs målinger end ved de aktuelle indendørs målinger og det trækker opad.

Effektivitetsprøvningerne i solsimulatoropstillingen er også sammenlignet med effektiviteter, der er bestemt ved måling på solvarmeanlæg, der var installeret på en udendørs systemprøvestand. Solfangerne var af samme type, som dem der blev benyttet i de udendørs målinger med prøvebordet. Resultaterne er vist på figur 7.4.

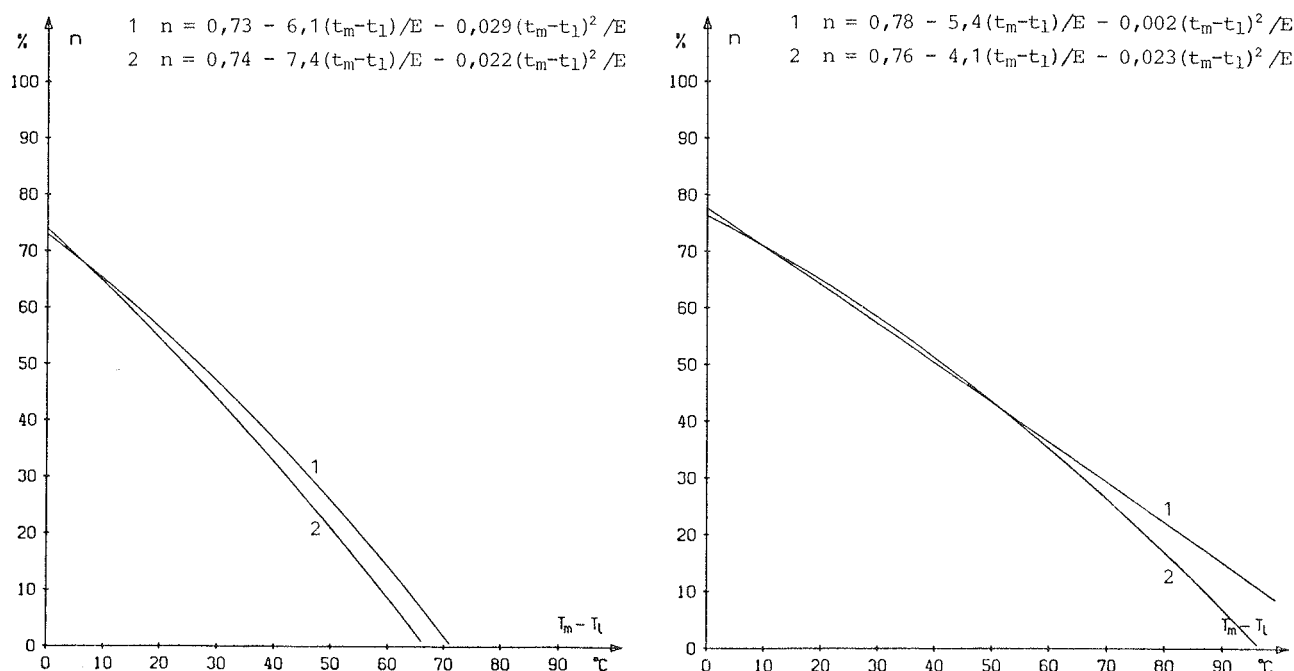


Fig. 7.3 Effektiviteten af solfangere bestemt med samme udstyr ved udendørs målinger (1) og i solsimulatoropstillingen (2)

Det ses, at resultaterne af målingerne på systemprøvestanden, der er udført ved forskellige vejrforhold, ligger temmelig spredte, men i middel passer de rimeligt godt med effektivitetskurven.

På grundlag af disse beregninger og målinger kan det siges, at man ved hjælp af solsimulatoropstillingen får prøvningsresultater, som stemmer godt overens med solfangernes effektivitet under virkelige forhold.

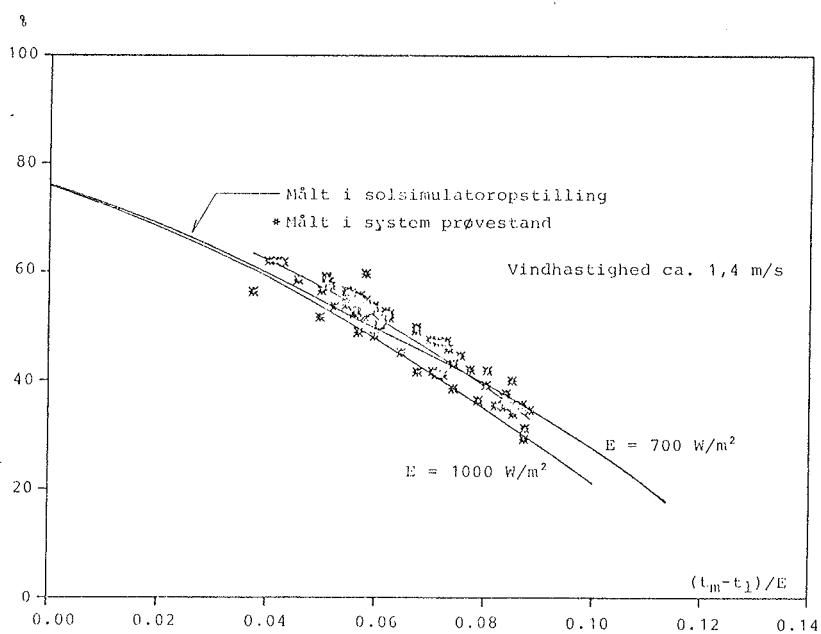
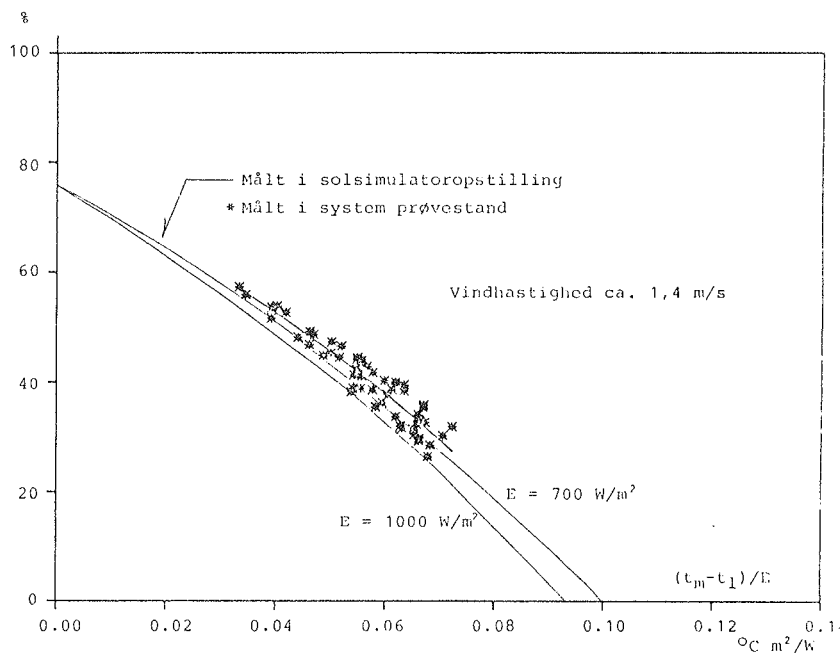


Fig. 7.4 Effektiviteten af solfangere bestemt i systemprøvestand og i solsimulatoropstilling

8. PRØVNING AF SOLFANGERES EFFEKTIVITET

Solsimulatoropstillingen er siden juni 1979 benyttet til prøvning af solfangeres effektivitet i forbindelse med den systemvurdering, som solvarmeanlæg må gennemgå for at blive godkendt som tilskudsberettigede i forbindelse med Lov om Statsstøtte til udnyttelse af vedvarende energikilder (29). Der blev i perioden fra juni 1979 til august 1980 udført prøvninger af ialt 40 solfangere, hvoraf dog nogle var i forbindelse med internationalt og nordisk samarbejde. Prøverapporterne over de markedsførte solfanger er samlet og effektiviteterne sammenlignet i (4).

8.1 Prøvningens udførelse

Prøvningerne udføres ved måling af effektiviteten ved forskellige væsketemperaturer og følger i store træk de retningslinier, der er givet i den svenske standard (15). Prøvningens forløb skal kort omtales.

Før effektivitetsprøvningen gennemgår solfangeren en stagnationsprøvning, hvor den uden væske og vindpåvirkning udsættes for strålingen fra simulatoren i ca. 6 timer. Herved kommer solfangeren op på et temperaturniveau, som er en del højere end den normale maksimale driftstemperatur, men som svarer til de temperaturer, den under uheldige eller unormale driftsforhold vil komme op på. Under og efter prøvningen undersøges det, om dele af solfangeren er gået i stykker. Kun hvis solfangeren har klaret stagnationsprøven uden alvorlige skader, går den videre til effektivitetsprøvningen. De mindre ændringer, der kan tænkes at ske ved stagnationsprøven, er medvirkende til at gøre effektivitetsprøvningen mere realistisk.

Effektiviteten bestemmes ved 4 eller 5 væsketemperaturniveauer ligeligt fordelt mellem rumtemperatur og 100°C. Efter hvert temperaturskift får solfangeren ca. én time til stabilisering så varmekapacitetens indflydelse på effektiviteten forsvinder. Effektiviteten ved hver temperatur bestemmes ud fra fire datapunkter, som hver er middelværdierne over en fem minutter lang periode. Under temperaturskiftet og stabiliseringen

bestemmes middelintensiteten over solfangeren, som tidligere omtalt. Den herved bestemte middelintensitet korrigeres for afstanden fra pyranometret ned til glasset på solfangeren, idet korrektionens størrelse er bestemt for den aktuelle solfanger ved prøvningens start ved måling i to afstande.

Varmetabet bestemmes ved en væsketemperatur på ca. 75°C ved hældninger på ca. 67,5°, ca. 45° og ca. 22,5° fra vandret. På grundlag heraf kan korrektionen for hældningen bestemmes.

Både ved effektivitets- og varmetabsmålingen anvendes der en vindhastighed øverst på ca. 5m/s målt i 3 cm's afstand. Prøvningen udføres med den af fabrikanten anbefalede væske og væskestrøm, hvis denne afviger meget fra den normalt anvendte på 0,02 kg/m²s. Der er således udført prøvninger med vand, forskellige blandinger af vand og ethylenglykol eller propylenglykol samt med forskellige olier.

Da alle effektivitetsmålingerne udføres ved stort set samme intensitet kan man uden korrektioner benytte de sammenhørende værdier for n , $(t_m - t_l)/E$ og $(t_m - t_l)^2/E$ til ved en lineær regression at bestemme n_0 , k_0 og k_1 i udtrykket

$$n = n_0 - k_0(t_m - t_l)/E - k_1(t_m - t_l)^2/E \quad (8.1.1)$$

Varmetabskoefficienterne k_0 og k_1 korrigeres for hældningen, så man får et udtryk for effektiviteten ved en hældning på 45°. Effektiviteten angives på kurveform som funktion af $t_m - t_l$ ved en intensitet på 800 W/m².

8.2 Sammenligning af resultaterne

Resultaterne af prøvningerne af de markedsførte solfangere er vist på fig. 8.2.1 og i skema 8.2.1. Det ses, at der er temmelig store forskelle på solfangernes maksimaleffektivitet og ligeledes på deres varmetabskoefficienter. Ved at inddele solfangerne i forskellige grupper afhængig af antal af transparente lag, absorberbelægningstype og absorbertype som vist på fig. 8.2.2 og fig. 8.2.3, hvor maksimaleffektiviteten og varmetabskoefficienten ved en overtemperatur på 60°C er angivet, kan man bedre vurdere resultaterne.

ID-nr.	trans- parente lag	absorber- belægnings type	absorber type	væske- type	n_o	k_o W/m ² °C	k_1 W/m ² °C ²
101	1	alm.	kanalpl.	glykol	0,73	8,7	0,003
102	1	alm.	kanalpl.	glykol	0,88	7,9	0,024
103	2	alm.	kanalpl.	glykol	0,79	6,8	0,001
104	1	alm.	kanalpl.	glykol	0,78	8,5	0,023
105	1	alm.	roll-bond	olie	0,74	6,6	0,027
110	1	alm.	roll-bond	olie	0,78	7,6	0,023
111	1	alm.	kanalpl.	glykol	0,82	6,1	0,039
112	1	sel.	rør-pl.	glykol	0,66	4,7	0,012
113	1	sel.	rør-pl.	glykol	0,74	5,1	0,017
116	1	alm.	roll-bond	glykol	0,83	6,9	0,025
117	1	alm.	kanalpl.	vand	0,82	9,0	0,018
118	0	alm.	kanalpl.	vand	0,89	35,1	0,25
119	1	sel.	rør-pl.	glykol	0,74	5,1	0,026
121	1	sel.	rør-pl.	glykol	0,73	3,7	0,054
124	2	alm.	roll-bond	glykol	0,72	5,3	0,007
125	1	alm.	roll-pl.	glykol	0,80	7,1	0,021
126	1	sel.	roll-bond	glykol	0,79	4,7	0,007
129	1	alm.	rør-pl.	glykol	0,63	7,1	0,007
130	1	alm.	kanalpl.	glykol	0,82	6,7	0,023
131	1	sel.	rør-pl.	glykol	0,73	5,5	0,013
132	2	alm.	rør-pl.	glykol	0,66	5,3	0,017
133	1	alm.	rør-pl.	glykol	0,74	7,7	0,015
134	1	alm.	kanalpl.	glykol	0,84	8,3	0,029
135	1	alm.	rør-pl.	glykol	0,65	5,7	0,019
136	1	alm.	kanalpl.	glykol	0,82	7,0	0,024
137	1	alm.	rør-pl.	glykol	0,84	9,3	0,015
138	1	sel.	rør-pl.	glykol	0,64	4,8	0,017

Skema 8.2.1 Oversigt over solfangerne og deres effektivitetsudtryk ved en hældning på 45°.

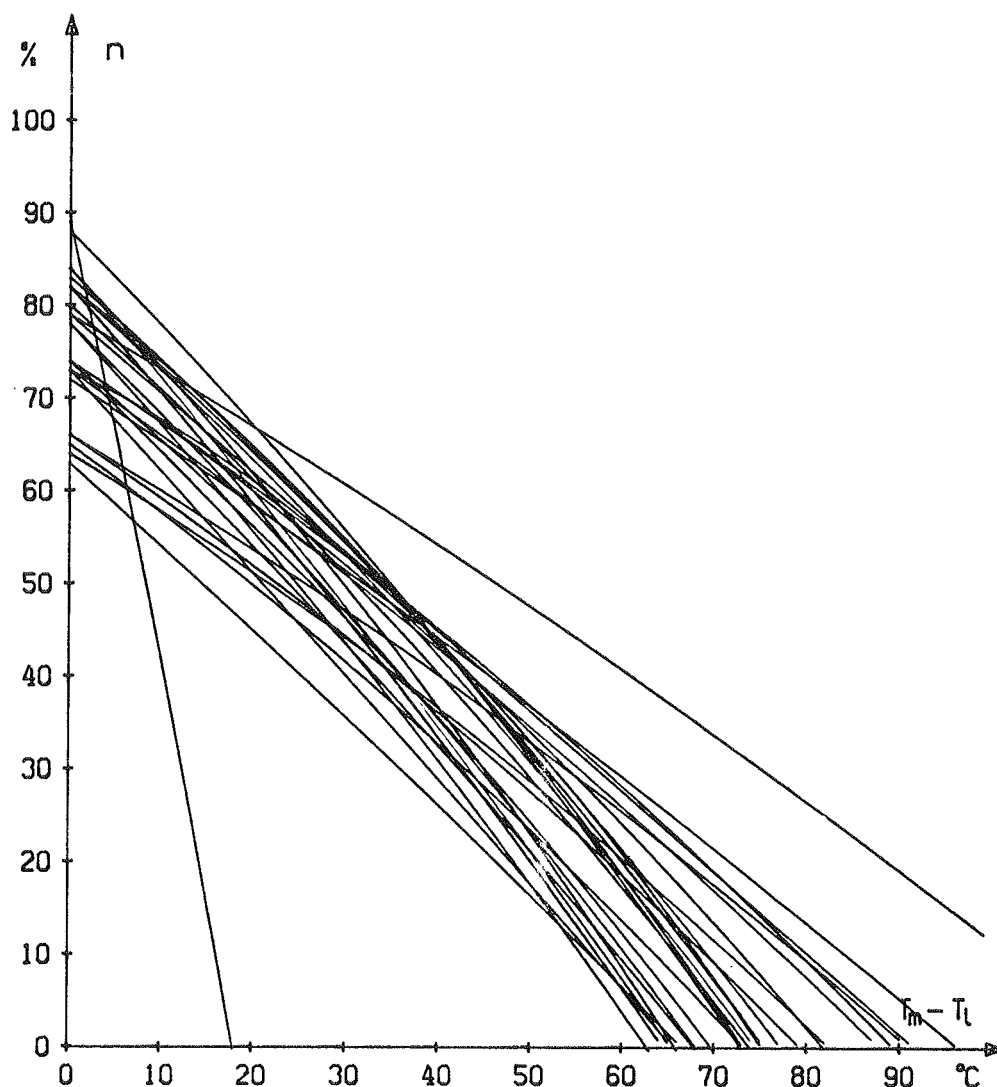


Fig. 8.2.1 Effektiviteten ved solintensitet på 800 W/m^2 og en hældning på 45° for alle solfangerne

Ved at sammenligne maksimaleffektiviteterne på fig. 8.2.2 kan man se, at absorbere af kanalpladetyper og Roll-Bond-typen generelt er bedre med hensyn til varmeoverføring end absorbere af rør-plade-typen. Den specielt store værdi, man har for solfangeren med nummer 102, skyldes en speciel randudformning. I de to solfangerne med Roll-Bond absorbere, der ligger lavest, anvendes der olie som varmetransporterende væske med en dårligere varmeoverføring end for vand-glykol blandinger.

Blandt solfangerne med absorbere af rør-plade typen er der relativt store forskelle i maksimal-effektivitet. I den gruppe på fire med lave værdier er der enten dårlig varmeoverføring i absorberpladen eller i kontakten mellem plade og rør. Af de øvrige er der fem med rimeligt gode værdier svarende til, at

varmeoverføringsforholdene i absorberne er gode, eller at varmetabskoefficienterne er små, hvorved indflydelsen af overtemperaturer bliver mindre. Endelig er der en enkelt solfanger med en høj maksimaleffektivitet hvilket skyldes, at absorberen består af en lamelvarmevlade, som normalt anvendes i lamellerne og ventilationsanlæg. Man har i denne en meget god varmeoverføring både i lamellerne og imellem disse og rørene. Desuden er der mange lameller, så der kun skal transporteres en lille varmeeffekt i hver. På grund af lamellerne kan man også regne med, at den effektive absorptionskoefficient er højere end for absorbere med plan forside.

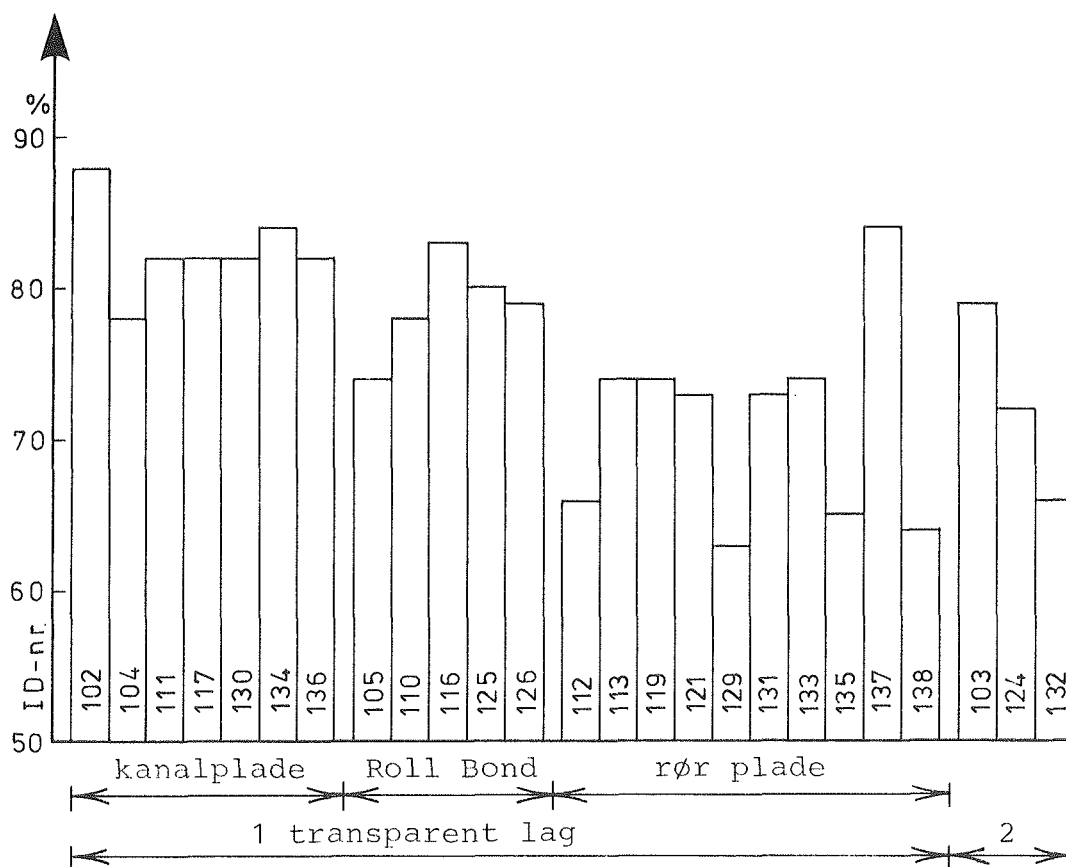


Fig. 8.2.2 Maksimaleffektiviteten af de forskellige typer af solfangere

Ved sammenligning af solfangerne med ét og to transparente lag kan man se, at dette ofte har mindre betydning end absorberudformningen. For solfangere, der på nær antallet af transparente lag, er ens, som det er tilfældet med nummer 124-5 og 132-3, er der dog klart en lavere n_0 -værdi for to-lags end for ét-lags solfangere.

Ved sammenligning af varmetabskoefficienterne på fig. 8.2.3 kan man se, at der er meget store forskelle. Der er således en faktor to mellem de største og de mindste. Der er tydeligt forskel på solfangere med og uden selektive absorberbelægninger. Derimod er varmetabskoefficienten stort set den samme for selektive ét-lags og almindelige to-lags solfangere. Det skal bemærkes, at solfangere med en dårlig maksimaleffektivitet ofte udviser lave varmetabskoefficienter, men det er selvfølgelig ikke nogen fordel, da den tilhørende effektivitet er lav. Det ses, at der er mulighed for at forbedre solfangere væsentligt ved at anvende selektive absorberbelægninger.

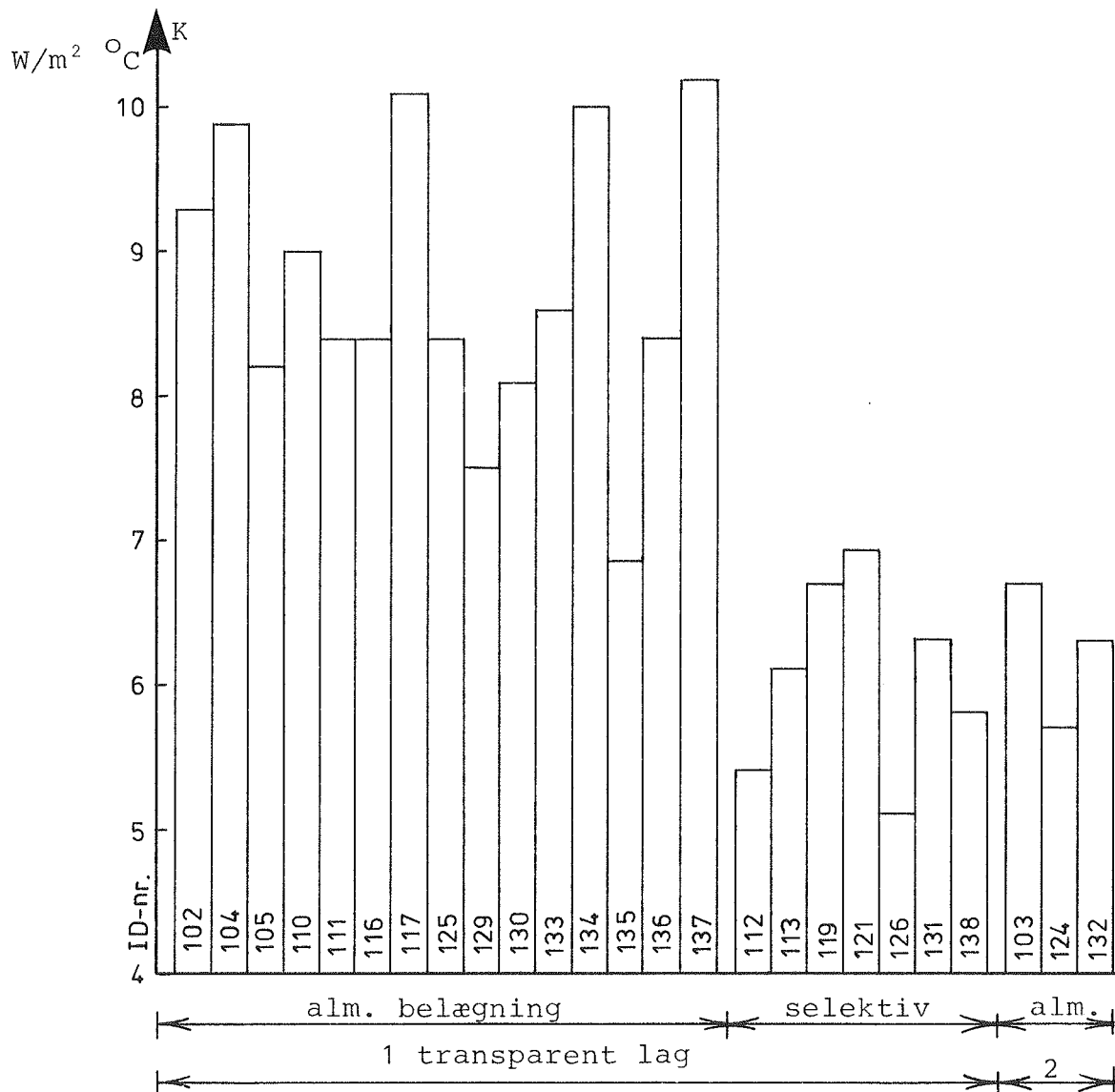


Fig. 8.2.3 Varmetabskoefficienten af de forskellige typer af solfangere ved en overtemperatur på 60°C ($t_m - t_l = 60^\circ\text{C}$)

Der er imidlertid også en ret stor forskel på solfangere af samme type. Det ses tydeligt for et-lags solfangere med almindelig absorberbelægning, hvor der er en gruppe med varmetabskoefficienter omkring $8,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$ og en anden omkring $10 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Ved en nøjere gennemgang af solfangernes opbygning, som er udført i (4), kan man se, at forskellen på de to grupper er kantisoleringen eller hele konstruktionens egenskaber med hensyn til randtab. Der er således mulighed for at reducere de store varmetabskoefficienter med ca. 15% ved at benytte en god kantisolering.

Det samme forhold gælder også for de andre typer solfangere. Det skal dog bemærkes, at for selektive solfangere og to-lags solfangere kan et relativt stort varmetab imidlertid også skyldes, at den selektive belægning eller det inderste transparente lag ikke er så varmeteknisk gode. Det er således vanskeligere at vurdere, hvad der er grunden til at nogle af solfangerne i denne gruppe har større varmetabskoefficienter end de andre. Absorberbelægningens emissionstal bør derfor måles og indgå i vurderingen.

Foruden denne direkte sammenligning af maksimaleffektivitet og varmetabskoefficient kan man også lave en sammenligning baseret på hele effektivitetsudtrykket. Dette er gjort ved at benytte en simplificeret metode til beregning af solvarmeanlægs dækningsgrad, f-chart (30, 31). Beregningerne er udført for et solvarmeanlæg til opvarmning af brugsvand med et areal på 8m^2 .

Bortset fra solfangerne er anlæggene ens, så det alene er indflydelsen fra disse, man ser. Man kan herved få et indtryk af, hvad en forskel i den øjeblikkelige effektivitet betyder for ydelsen af anlægget.

Resultatet af beregningerne er ifølge (32) angivet på fig. 8.2.4. Det ses, at dækningsgraden varierer mellem 47% og 71% svarende til, at anlægget med solfangeren med den højeste effektivitet er 50% bedre end anlægget med den dårligste solfanger. Der er således en ret stor forskel i anlæggenes ydelse ved anvendelse af forskellige solfangere.

På grundlag af denne omtale af resultaterne af prøvningerne er det klart, at man foruden de konkrete objektive oplysninger om den enkelte solfangers effektivitet også ved sammenligning med de øvrige solfangere får mulighed for at vurdere, om den kan forbedres og i nogen grad, hvor man i givet fald skal sætte ind.

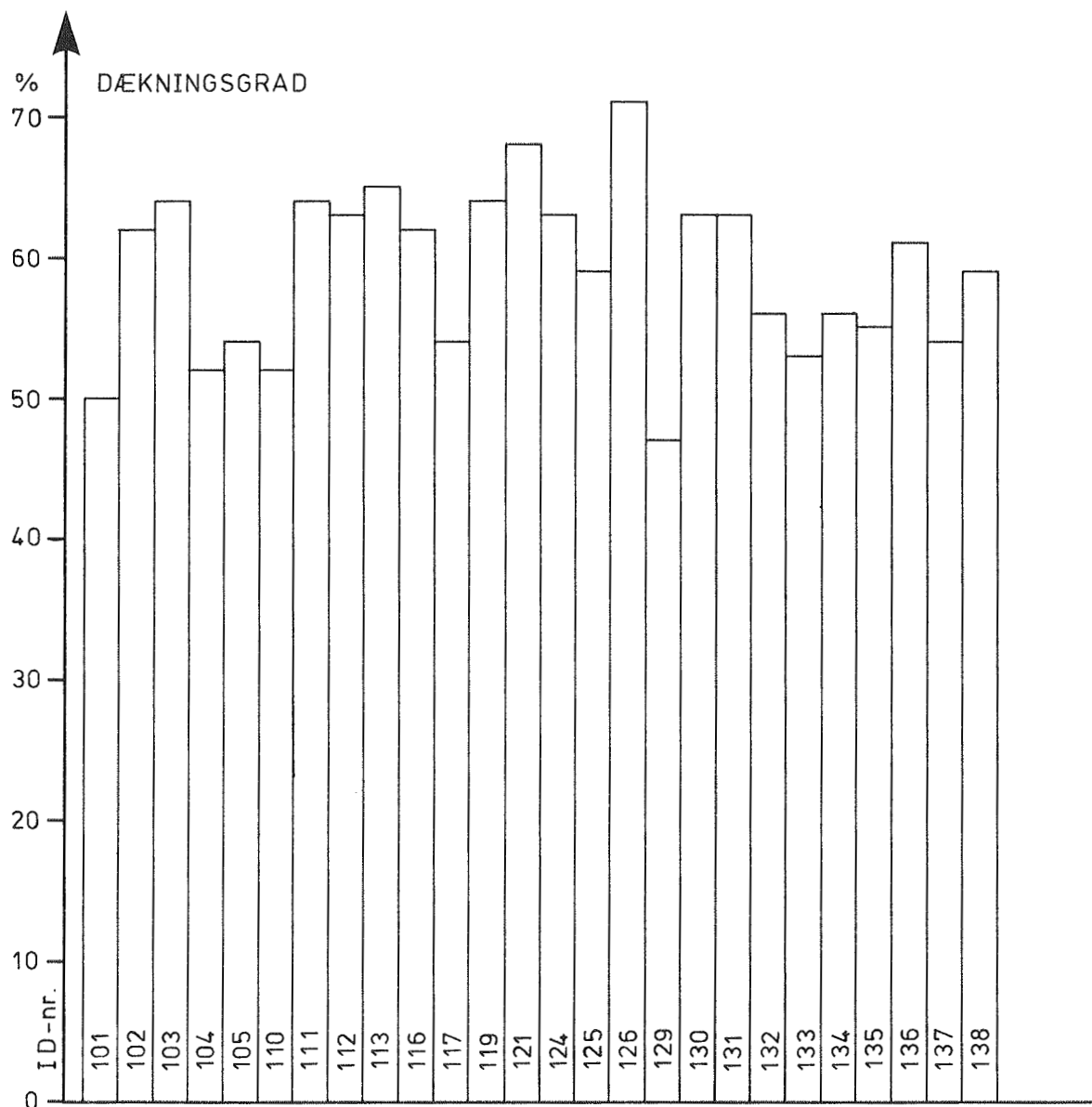


Fig. 8.2.4 Dækningsgrad for et solvarmeanlæg på 8m² med de forskellige solfangere.

9. MÅLING AF SOLFANGERES EGENSKABER I DETALJER

Ved prøvningen af solfangere får man oplysninger om deres samlede egenskaber, men ved udviklingsarbejde er dette ikke altid tilstrækkeligt. Forslag til forbedringer af en solfangerkonstruktion må bygge på viden om solfangerens egenskaber i detaljer. Det drejer sig især om en række egenskaber vedrørende solfangeres transmission-absorption af solstrålingen, varmeoverføring til det varmetransporterende medium og varmetab. Disse egenskaber kan undersøges ved forskellige målinger, som skal omtales i det følgende.

Transmissionskoefficienten for solstråling for det transparente lag kan måles i klart solskin eller ved hjælp af en solsimulator, idet man måler intensiteten med og uden det transparente lag anbragt foran pyranometret. Man må være opmærksom på eventuelle variationer i intensiteten under forsøget. Ved at benytte passende store prøveemner og anbringe dem relativt tæt på pyranometret vil den spredte stråling også komme med i målingen, og den målte reducerede intensitet i forhold til den oprindelige er derfor direkte et udtryk for transmissionskoefficienten.

Absorptionskoefficienten for solstråling for absorberen kan bestemmes i en speciel opstilling beskrevet i (33). Heri benyttes en enkelt lampe, som den der anvendes i solsimulatoren og ved hjælp af en meget lille strålingsmåler, der skiftevis drejes mod lampen og mod prøveemnet. Forholdet mellem disse giver direkte reflektionskoefficienten og dermed absorptionskoefficienten for absorberen.

Den samlede transmissions-absorptionskoefficients vinkelafhængighed kan ifølge (13) bestemmes ved at måle maksimaleffektiviteten ved forskellige indfaldsvinkler. Dette kan dog ikke udføres med solsimulatoren, da strålerne ikke er parallelle, og intensiteten varierer med afstanden.

Varmeoverføringen i absorbere af rør-plade typen sker ved ledning i pladen, i kontaktpunkter mellem plade og rør og ved konvektion i væskestrømmen inde i røret. For de andre absorbertyper (Roll-Bond og dobbeltplade) er der færre led i

transporten. Varmeoverføringsevnen for de enkelte led kan bestemmes ved at måle temperaturen af væsken, røret, pladen umiddelbart uden for røret og pladen midt mellem rørene samtidig med, at der overføres en kendt effekt, f.eks. ved at lave et varmetabsforsøg. Temperaturmålingen kan ske med termoelementer, der fastgøres til absorberen eller ved hjælp af termovisionsudstyr, hvor man ved at tage et billede af absorberen direkte kan få temperaturfordelingen. Et eksempel herpå er vist på fig. 9.1. På grundlag af varmetabet pr. længdeenhed fra ét rør med tilhørende pladestrimmel og de forskellige temperaturforskelle i konstruktionen kan varmeoverføringsevnerne bestemmes. Der er især behov for at bestemme varmeoverføringsevnen af forbindelsen mellem røret og pladen, idet denne ikke kan beregnes.

I forbindelse med varmeoverføring i absorbere skal væskefordelingsproblemet også omtales. Hvis der er felter på absorberen, hvor væskestrømmen er mindre, vil disse felter også yde mindre på grund af højere temperaturer og dermed højere varmetab. Problemet kan optræde, hvis kanalsystemet er udformet uheldigt, eller hvis man har en nedadgående strømningsretning. Normalt vil symmetrien i kanalsystemet samt opvarmningen og dermed udvidelsen af væsken ved strømning igennem solfangeren bevirke, at væskefordelingen er jævn. Problemet kan undersøges ved temperaturmåling over hele absorberen samtidig med, at der optages eller tabes varme. Temperaturfordelingen kan måles ved hjælp af et termovisionsudstyr. Et eksempel på en sådan undersøgelse findes i (34).

Varmetabet fra solfangere sker igennem forsiden, bagsiden og randen. Varmetabet er domineret af forsidetabet, men en uheldig randudformning kan forøge varmetabet betydeligt. Det er især svært ved selektive absorbere at afgøre, om et relativt stort varmetab skyldes et stort randtab eller en dårlig absorberbelægning. Ved at lave en varmetabsmåling med en kraftig isolering af det transparente lag kan varmetabet gennem bagsiden og randen bestemmes. For solfangere uden kuldebroer i bagsideisoleringen kan man beregne varmetabet gennem bagsiden og derved bestemme randtabet alene. Varmetabets variation med hældningen bestemmes normalt ved effektivitetsprøvningen og skal ikke nærmere omtales. Varmetabets variation med vindhastigheden

kan bestemmes ved at indstille tværstrømsblæserne, så de giver den ønskede lufthastighed op langs det transparente lag.

Emissionskoefficienten for absorberen kan måles direkte ved hjælp af et såkaldt emissometer (35), der består af et målehoved med et lille varmelegeme og en temperaturføler. Målehovedet giver et signal, som er proportionalt med emissionskoefficienten. Ved hjælp af to referenceplader kan målehovedet justeres. Udstyret er simpelt, men det er både nemt at betjene og rimeligt nøjagtigt.

Varmekapaciteten eller tidskonstanten for solfangeren kan ifølge (13) bestemmes ved enten at ændre væsketemperaturen til lufttemperatur eller solindfaldet til nul og bestemme den tid, der går, før temperaturdifferencen mellem indløb og udløb i forhold til dennes oprindelige værdi er nået ned på $1/e=0,368$. Det er måleteknisk vanskeligt at lave nøjagtige målinger, og derfor er det bedre at nøjes med at beregne varmekapaciteten ifølge (8) eller (14).

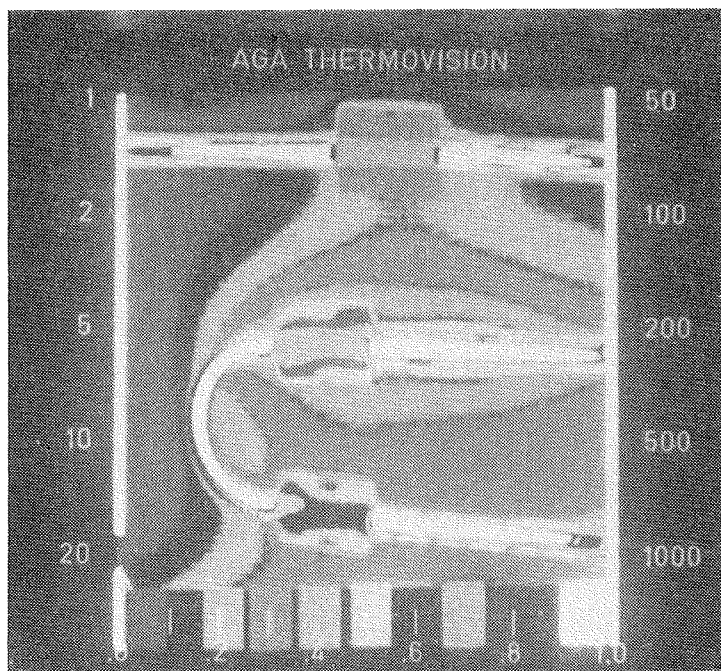


Fig. 9.1 Termovisionsbillede af temperaturfordelingen over en absorber bestående af en plade, hvortil der med bøjler er fastgjort en rørslange.

10. SAMMENLIGNING AF BEREGNET OG MÅLT EFFEKTIVITET

For at underbygge den detaljerede model og det tilhørende program, der blev omtalt i afsnit 2, er der foretaget en sammenligning mellem beregnede og målte effektiviteter for to solfangere. Desuden er modellen kontrolleret med hensyn til indflydelsen af hældning og vindhastighed.

Oplysningerne om solfangerne, der er vist i skema 10.1, er baseret på beskrivelser, målinger og skøn. De benyttede monterings-, drifts- og vejrforhold svarer til prøveforholdene og er vist i skema 10.2 og 10.3.

Resultaterne af beregningerne og målingerne af effektiviteten er vist i figur 10.1. Det ses, at der med hensyn til varmetabskoefficient er god overensstemmelse mellem de beregnede og målte værdier.

For maksimaleffektivitetens vedkommende giver beregningerne i begge tilfælde lavere værdier end prøvningerne. Afvigelserne er dog kun på 2-3%, hvilket kan ligge i de indlæste data for solfangerne. Afvigelserne passer iøvrigt med, at man ved prøvningerne har målt solintensiteten i IPS 1956-skalaen og derved måler 2,2% for lidt i forhold til WRR-skalaen, som må formodes at være mere korrekt. Da afvigelserne ligger inden for måleusikkerheden kan man dog ikke tillægge anvendelsen af forskellige skalaer større betydning.

Sammenfattende kan det siges, at det detaljerede program passer godt med målinger for de to solfangere.

For den ene solfanger er der udført målinger af varmetabskoefficientens afhængighed af vindhastighed og hældning. Resultaterne heraf er vist på fig. 10.2 sammen med de beregnede værdier. Det ses, at der overalt er rimelig god overensstemmelse mellem de målte og de beregnede værdier.

Solfanger-typenr.		30	31
Antal transparente lag		1	1
Absorberbelægningstype		alm.	sel.
Absorberudformning		rør-pl.	roll-b.
Transparente lag			
Tykkelse	mm	4	4
Brydningsindeks		1,53	1,53
Ekstinktionskoefficient	l/m	24	20
Emissionskoefficient		0,88	0,88
Varmeledningsevne	W/mC	0,8	0,8
Absorber			
Absorptionskoeff.(normal)		0,95	0,98
Absorptionskoeff.(vinkel)		0,078	0,078
Emissionskoefficient		0,95	0,10
Antal kanaler		6	19
Kanallængde	m	2,3	1,5
Kanalafstand	m	0,092	0,042
Kanalens tværsnitsareal	mm ²	28	20
Kanalens perimeter	mm	19	20
Tykkelse af absorberplade	mm	0,9	1,5
Pladens varmeledningsevne	W/mC	200	200
Plade-kanal-forbindelse	W/mC	20	
Isolering			
Tykkelse af bagsideisol.	m	0,037	0,070
Varmeledn. af bagsideisol.	W/mC	0,045	0,045
Tykkelse af randisolering	m	0,015	0,015
Varmeledn. af randisol.	W/mC	0,045	0,045
Transparent areal			
Randareal	m ²	1,25	1,57
Tykkelse af luftlag	mm	50	18
Ventilation af luftlag	m ³ /h	0	0

Skema 10.1 Solfangerkonstruktioner

Mont.- og driftsforhold typenr.		50	51	52
Solfangerens vinkel med vandret	grader	67,5	67,5	67,5
Varmeovergangstal for bagside	W/°Cm ²	25	25	25
Varmeovergangstal for rand	W/°Cm ²	25	25	25
Væsketype (EG=ethylenglykol)		EG	PG	PG
Glykolkoncentration(vægtpct.)	%	36	38	50
Massestrøm pr transparent areal	g/sm ²	0,04	0,02	0,02
Væsketemperatur	°C	60	60	75

Skema 10.2 Monterings- og driftsforhold

Vejrforhold typenr.		10	11	18
Lufttemperatur	°C	25	25	20
Himmelstrålingstemperatur	°C	33	33	20
Jordstrålingstemperatur	°C	33	33	20
Solintensitet	W/m ²	870	930	0
Diffus strålingsandel	%	0	0	0
Indfaldsvinkel	grader	0	0	0
Vindhastighed	m/s	6	6	6

Skema 10.3 Vejrforhold

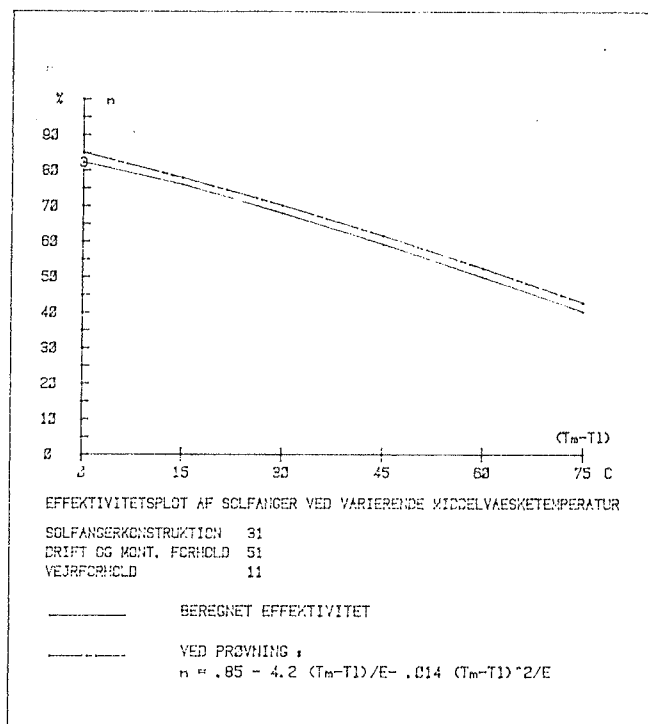
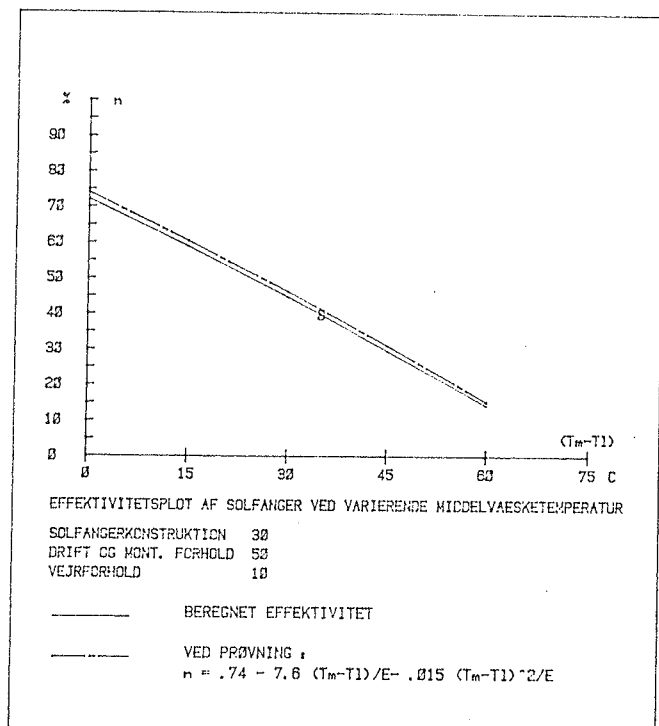


Fig. 10.1 Effektiviteten af to solfangere bestemt ved beregning og prøvning

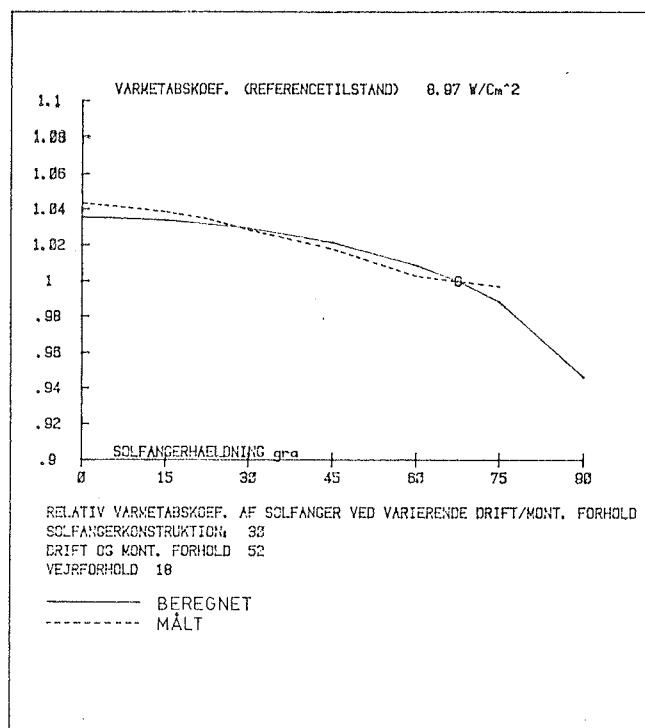
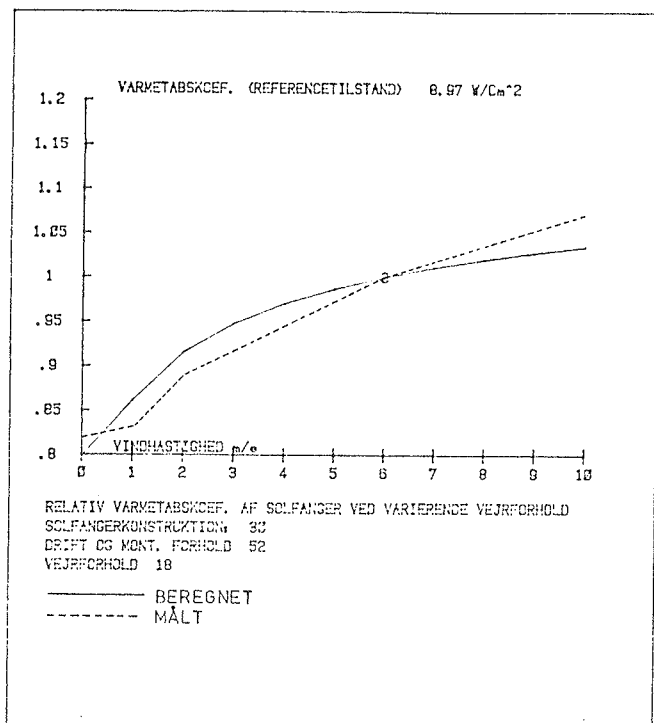


Fig. 10.2 Relativ varmetabskoefficient for solfanger ved varierende vindhastighed og hældning

11. BEREGNING AF SOLFANGERES EFFEKTIVITET

Ved udvikling af solfangere har man brug for at kunne beregne effektiviteten af en given konstruktion. Man har ved optimeringen af solfangerens udformning især brug for at kunne beregne betydningen af ændringer af en enkelt del af konstruktionen. Dette kan gøres ved hjælp af det tidligere omtalte program baseret på den detaljerede model. Da solfangere og især absorbere kan udformes på mange måder og ved brug af mange forskellige materialer, skal der i det følgende kun vises nogle eksempler på, hvordan man med programmet kan udføre parameteranalyser af solfangerkonstruktioner.

Der benyttes en række typiske solfangere, hvis konstruktion fremgår af skema 3.1.1 og 11.1. De benyttede forhold med hensyn til montering, drift og vejr fremgår af skema 3.1.2-3 og 11.2-3. Resultaterne af beregningerne er vist på figur 11.1-5.

På figur 11.1 kan man sammenligne solfangere med ét og to transparente lag kombineret med almindelige og selektive absorberbelægninger. Det ses, at den selektive ét-lags solfanger er den mest effektive over næsten hele temperaturområdet. Ved at benytte to transparente lag kan varmetabskoefficienten, svarende til hældningen af effektivitetskurven, gøres lige så lav som for den selektive ét-lags solfanger. Imidlertid bliver maksimaleffektiviteten også reduceret som følge af reflektions- og absorptionstab i det andet transparente lag. Benytter man en selektiv absorberbelægning i en to-lags solfanger kan man ved meget høje temperaturer få en lidt højere effektivitet end for en selektiv ét-lags solfanger. Dette er dog uden praktisk betydning for solvarmeanlæg til vand- og rumopvarmning, hvor man ikke har brug for så høje temperaturer. Af de to ét-lags solfangere kan man se, at der især ved relativt høje temperaturer er en stor fordel i at benytte selektive absorberbelægninger.

På figur 11.2 kan man sammenligne tre typiske absorberudformninger i ét-lags solfangere med almindelig og selektiv absorberbelægning. Det ses, at dobbeltpladen og kanalpladen (Roll Bond) er stort set lige gode, og rør-plade absorberen er noget dårligere. Dette fremgik også tydeligt af de

i afsnit 8 omtalte prøvninger. Rør-plade absorberens udformning har selvfølgelig stor indflydelse på solfangerens effektivitet, men det er meget vanskeligt med rimelige konstruktioner at gøre den lige så god som de to andre absorbertyper. Det ses, at ved anvendelsen af selektive solfangere mindskes indflydelsen af absorberens udformning. Dette skyldes, at den selektive belægning også reducerer varmetabet, der skyldes, at absorberen har en overtemperatur i forhold til væsken.

På figur 11.3 kan man se den relative maksimaleffektivitet for en ét-lags solfanger med en almindelig absorberbelægning ved forskellige udformninger af en rør-plade absorber. Det ses, at effektiviteten falder jævnt med stigende afstand mellem kanalerne. Indflydelsen af pladetykkelsen og varmeoverføringsevnen mellem plade og rør er især stor for små værdier.

På figur 11.4 kan man se indflydelsen af glassets ekstinktionskoefficient og absorberens absorptionskoefficient. Det er ikke overraskende, at der er en stort set lineært faldende effektivitet ved faldende absorptionskoefficient og ved stigende ekstinktionskoefficient. Ekstinktionskoefficienten for normalt glas ligger typisk på $10-20 \text{ m}^{-1}$, og jernfrit glas har en værdi på ca. 4 m^{-1} . Man kan se, at der ved anvendelse af jernfrit glas kan opnåes en effektivitetsforøgelse på 2-5%.

På figur 11.5 kan man se den relative varmetabskoefficient ved varierende udformning af en ét-lags solfanger. Det ses, at varmetabskoefficienten næsten falder til det halve, når absorberens emissionstal reduceres fra 0,95 til 0,10. Ved afstande mellem absorber og glas under 10mm sker der en voldsom stigning i varmetabskoefficienten, når afstanden mindskes. Derimod sker der stort set intet for større afstande. Med hensyn til tykkelsen af bagsideisoleringen ser man især en stigning i varmetabskoefficienten, når man anvender mindre end ca. 40 mm. Ventilationstab har i det benyttede område næsten ingen indflydelse på varmetabskoefficienten.

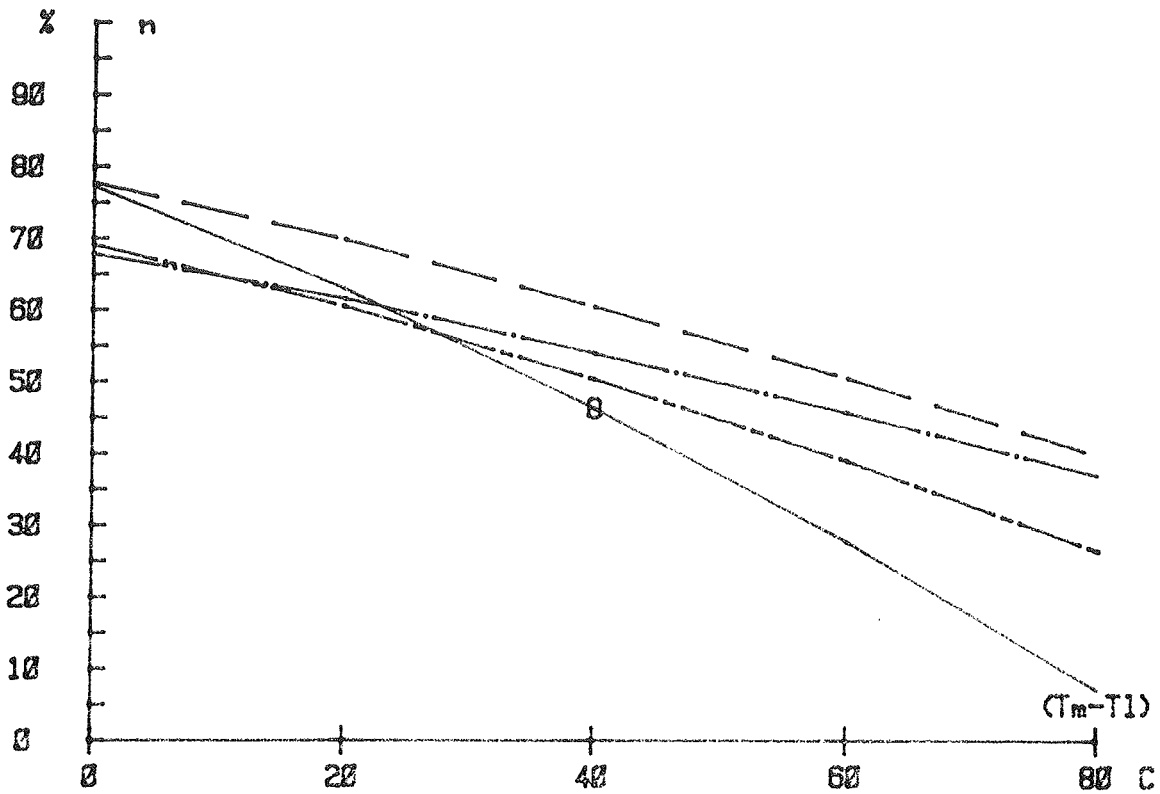
Solfanger-typenr.		29	32	33	34
Antal transparente lag		2	1	1	1
Absorberbelægningstype		sel.	sel.	alm.	sel.
Absorberudformning		dob-pl	rør-pl	roll-b	roll-b
Transparente lag					
Tykkelse	mm	4	4	4	4
Brydningsindeks		1,53	1,53	1,53	1,53
Ekstinktionskoefficient	1/m	20	20	20	20
Emissionskoefficient		0,88	0,88	0,88	0,88
Varmeledningsevne	W/mC	0,8	0,8	0,8	0,8
Absorber					
Absorptionskoeff.(normal)		0,95	0,95	0,95	0,95
Absorptionskoeff.(vinkel)		0,078	0,078	0,078	0,078
Emissionskoefficient		0,1	0,1	0,95	0,1
Antal kanaler		1	10	20	20
Kanallængde	m	2	2	2	2
Kanalafstand	m		0,1	0,050	0,050
Kanalens tværsnitsareal	mm ²	2000	78,5	20	20
Kanalens perimeter	mm	2000	31,4	24	24
Tykkelse af absorberplade	mm	1	1	1	1
Pladens varmeledningsevne	W/mC	50	200	200	200
Plade-kanal-forbindelse	W/mC		15		
Isolering					
Tykkelse af bagsideisol	m	0,050	0,050	0,050	0,050
Varmeledn. af bagsideisol	W/mC	0,045	0,045	0,045	0,045
Tykkelse af randisolering	m	0,025	0,025	0,025	0,025
Varmeledn. af randisol.	W/mC	0,045	0,045	0,045	0,045
Transparent areal					
Randareal	m ²	2	2	2	2
Tykkelse af luftlag	mm	50	50	50	25
Ventilation af luftlag	m ³ /h	0	0	0	0

Mont.- og driftsforhold typenr.		46
Solfangerens vinkel med vandret	grader	45
Varmeovergangstal for bagside	W/°Cm ²	25
Varmeovergangstal for rand	W/°Cm ²	25
Væsketype (PG=propylenglykol)		PG
Glykolkoncentration(vægtpct)	%	50
Massestrøm pr transparent areal	g/sm ²	20
Væsketemperatur	°C	20

Skema 11.2 Monterings- og driftsforhold

Vejrforhold typenr.		17
Lufttemperatur	°C	20
Himmelstrålingstemperatur	°C	0
Jordstrålingstemperatur	°C	20
Solintensitet	W/m ²	0
Diffus strålingsandel	%	0
Indfaldsvinkel	grader	0
Vindhastighed	m/s	5

Skema 11.3 Vejrforhold



EFFEKTIVITETSPLOT AF SOLFANGER VED VARIERENDE MIDDLEVAESKETEMPERATUR

SOLFANGERKONSTRUKTION 25
 DRIFT OG MONT. FORHOLD 45
 VEJRFORHOLD 5

— — — SOLFANGERKONSTRUKTION : 27 (1 LAG, SEL.)
 — — — SOLFANGERKONSTRUKTION : 25 (1 LAG, ALM.)
 — . — . — SOLFANGERKONSTRUKTION : 29 (2 LAG, SEL.)
 — — — SOLFANGERKONSTRUKTION : 28 (2 LAG, ALM.)

Fig. 11.1 Effektiviteten af solfangere med ét og to transparente lag kombineret med almindelige og selektive absorberbelægninger

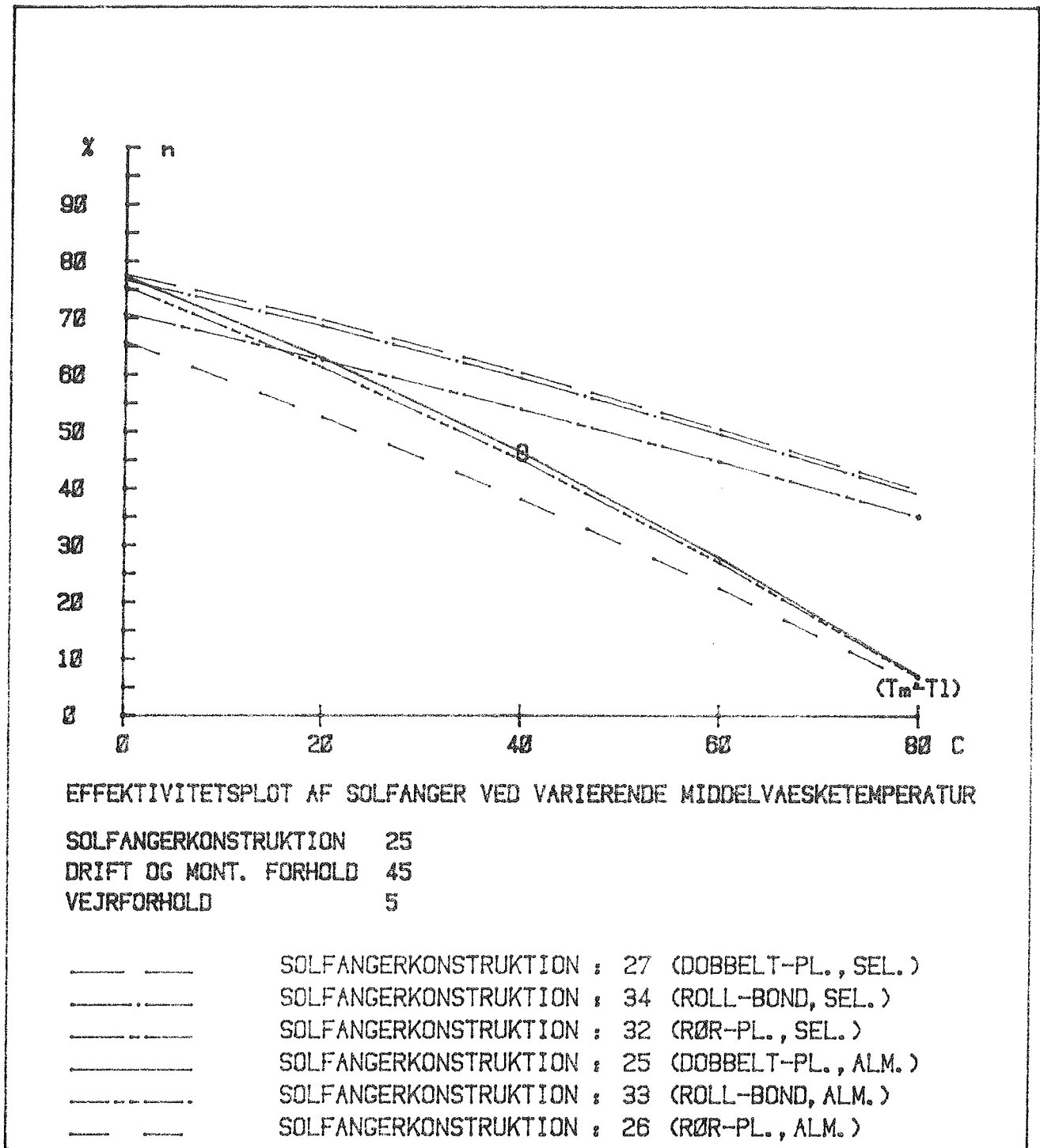


Fig. 11.2 Effektiviteten af solfangere med ét transparent lag med og uden selektiv absorberbelægning i kombination med forskellige absorberudformninger

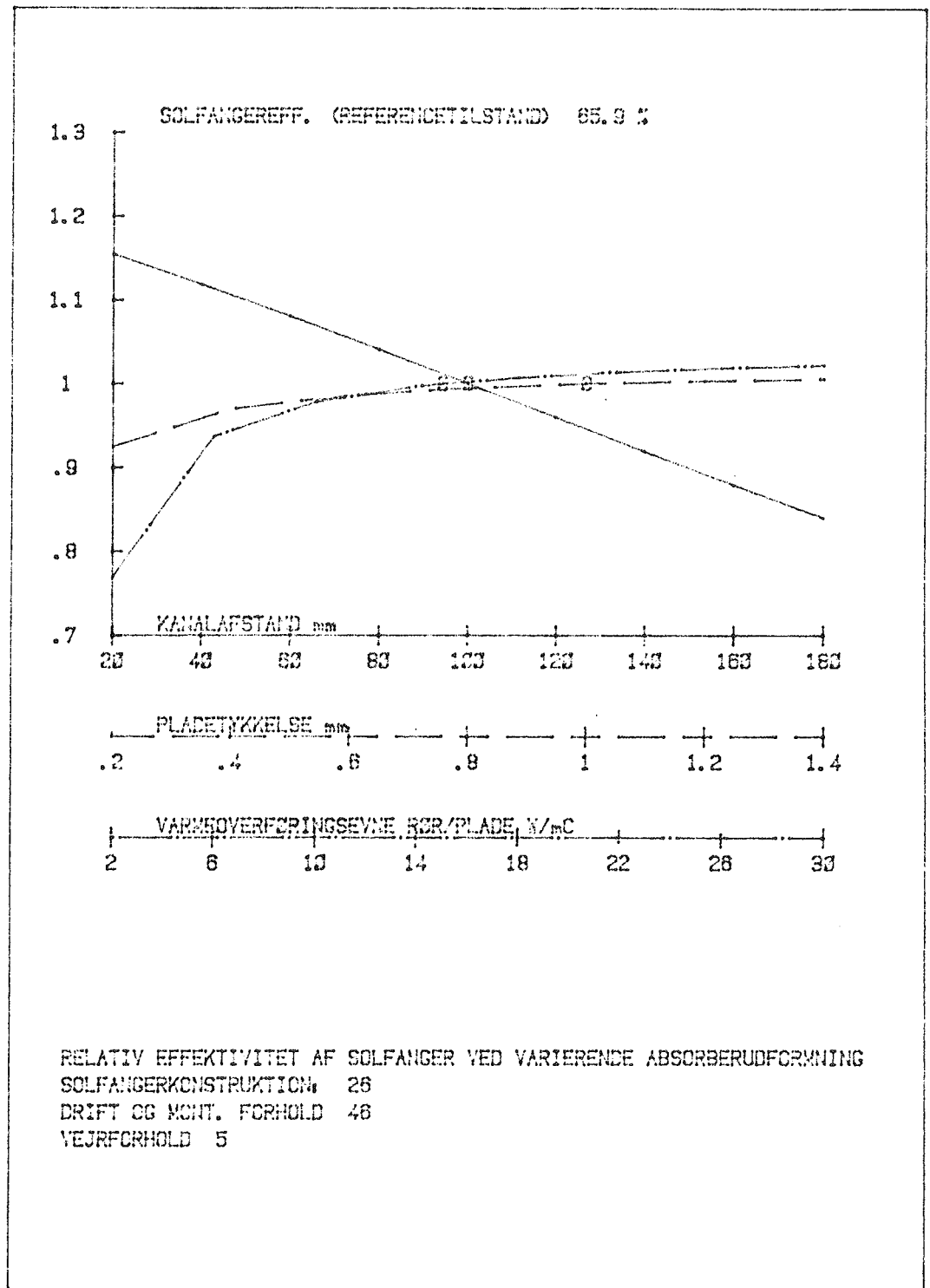


Fig. 11.3 Effektivitet af solfangere med forskellige absorberudformninger

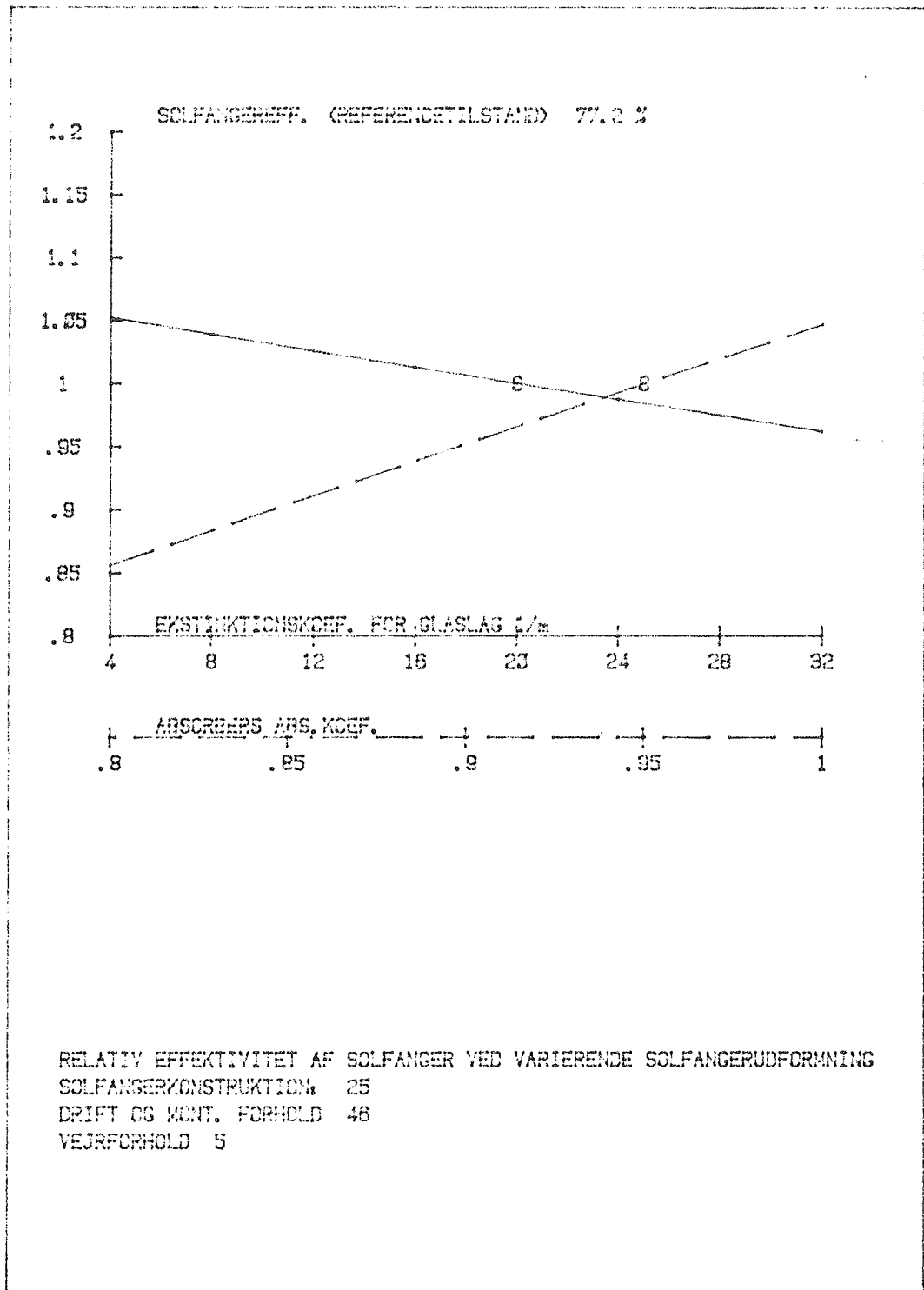


Fig. 11.4 Effektivitet af solfanger med varierende ekst.koefficient og absorptionskoefficient

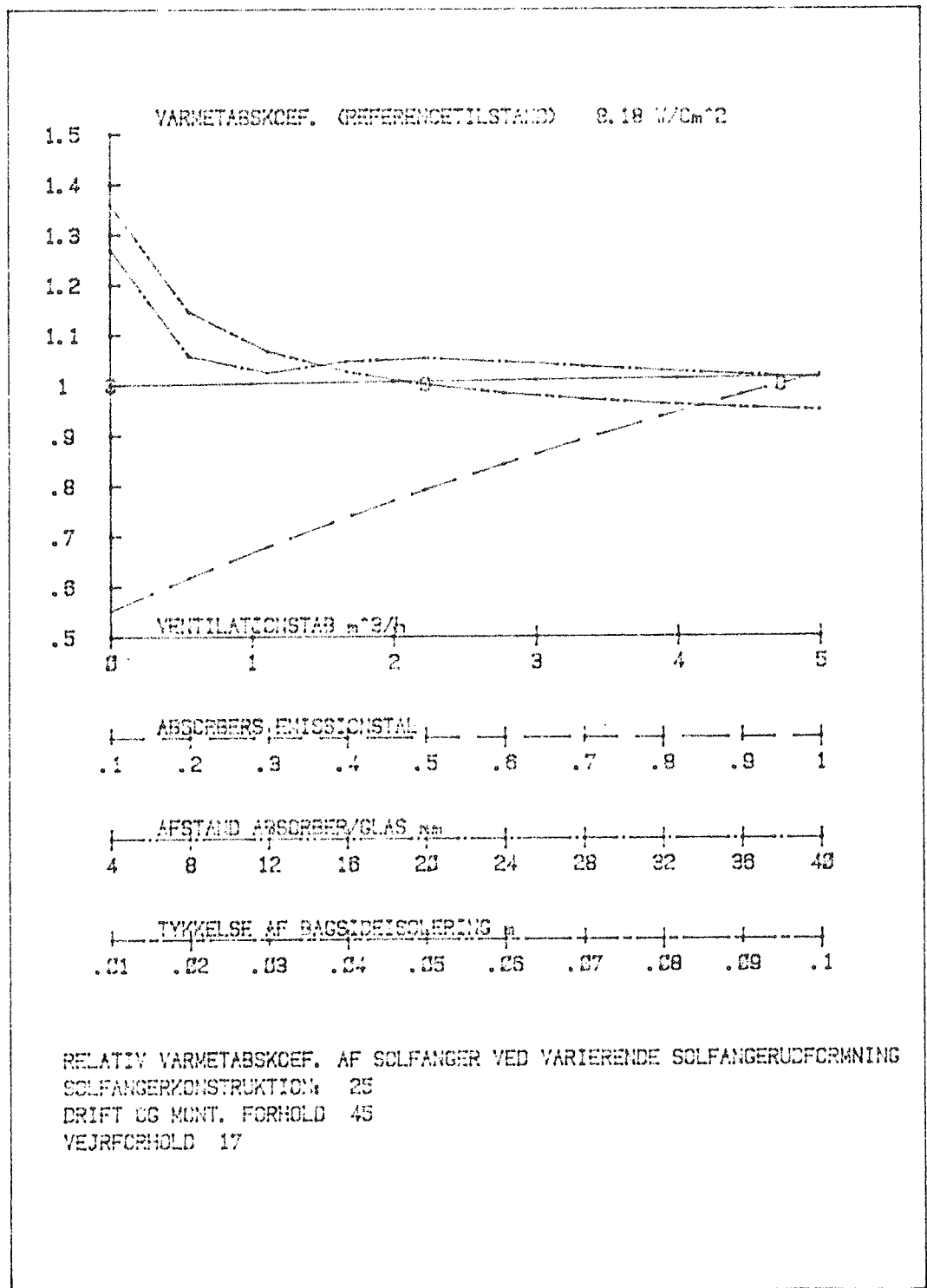


Fig. 11.5 Relativ varmetabskoefficient for solfanger med varierende udformning vedrørende absorberens emissionskoefficient, afstand absorber-glas, tykkelse af bagsideisolering og ventilation i luftspalten mellem absorber og glas.

12. SOLVARMEANLÆG

Idet man følger bygningsdelssystematikken (36), som opdeler anlæg til vand- og rumopvarmning i forsyningsanlæg, distributionsanlæg og forbrugsanlæg må et solvarmeanlæg opfattes som et forsyningsanlæg. Derfor indgår f.eks. tappesteder og radiatorer samt røranlæggene, der forbinder disse med varmelageret, ikke i solvarmeanlægget. Normalt er solvarmeanlæg kombineret med andre varmeproducerende anlæg, f.eks. elvandvarmere eller oliefyrede kedelunits, og derfor er solvarmeanlæg egentlig kun en del af et forsyningsanlæg.

Et solvarmeanlæg består af solfangere, varmelager og solfangerkreds, som vist på fig. 12.1. Varmelageret er i anlæg til vandopvarmning ofte samtidig varmtvandsbeholder. Solfangerkredsen består af et røranlæg, der forbinder solfangerne med varmelageret. Af hensyn til beregninger af solvarmeanlægs ydelse baseret på prøvning af solfangere og varmelagre medregnes der til solfangerkredsen kun de rørstrækninger og komponenter, der ikke er indbygget i solfangerne eller varmelageret. Dette har især betydning ved brug af varmelagerunits, som ofte indeholder alle komponenter (pumper, ventiler) i solfangerkredsen.

Et solvarmeanlæg, som vist på fig.12.1, fungerer på følgende måde. Når temperaturen i solfangerne er højere end i varmelageret starter styresystemet pumpen, som cirkulerer væsken mellem solfangerne og varmelageret. Solfangerne tilfører væsken en vis varmeeffekt, hvoraf en del tabes i solfangerkredsen og resten afleveres via varmeveksleren til varmelageret, hvorfra en del tabes, og resten tilføres det varme vand. Ved for lave temperaturer i solfangerne stopper styresystemet cirkulationspumpen. Uønsket naturlig cirkulation forhindres v.h.a. kontraventilen.

Der findes mange udformninger af solvarmeanlæg, idet man især for varmelagerets og solfangerkredsens vedkommende har en del forskellige typer. Da det i denne forbindelse primært er solfangeren der ønskes behandlet i solvarmeanlægget, vil kun den omtalte udformning blive behandlet.

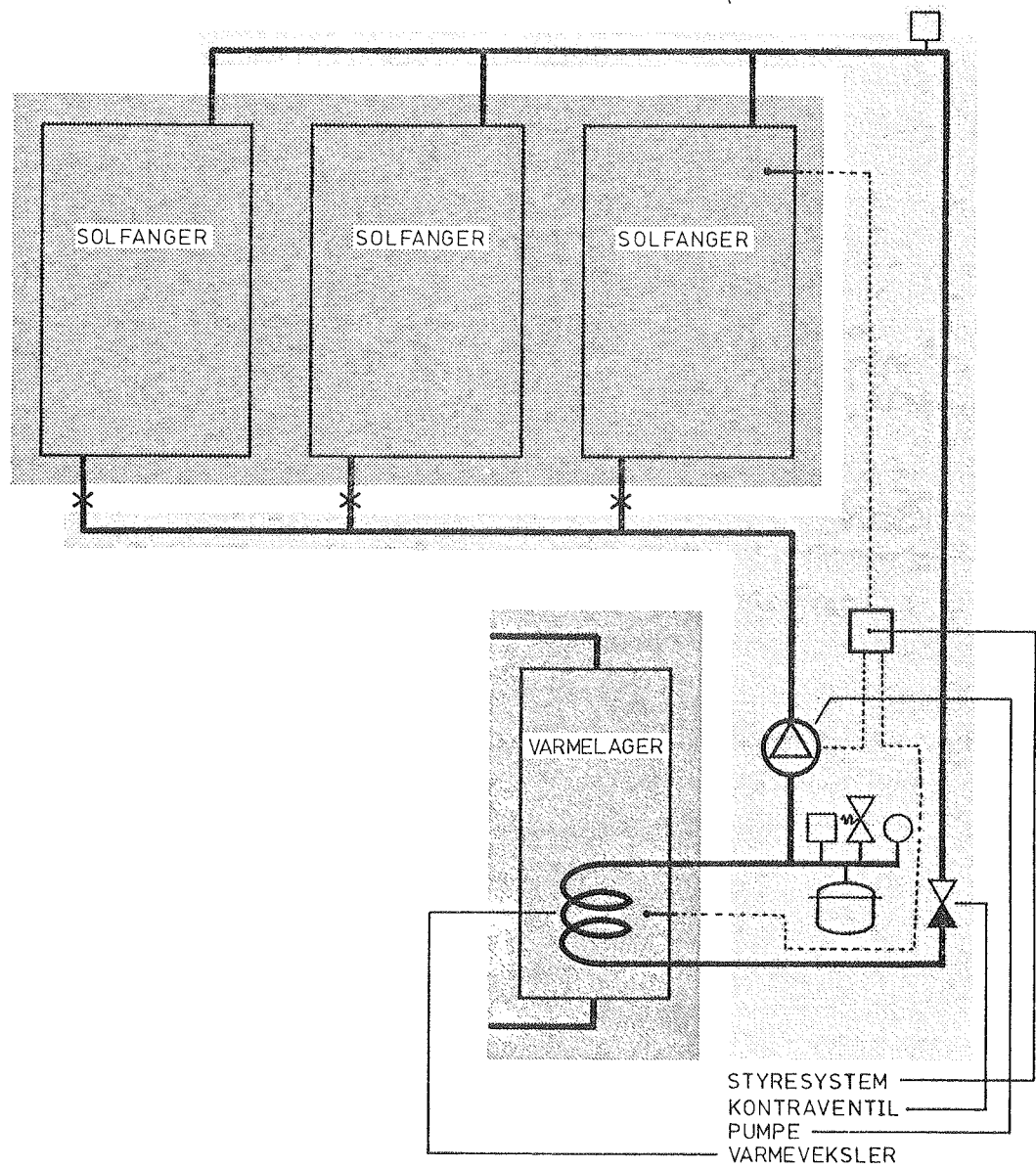


Fig. 12.1 Solvarmeanlæg opdelt i solfanger, varmelager og solfangerkreds.

13. BEREGNINGSMODEL FOR SOLVARMEANLÆGS YDELSE

I det følgende skal der opstilles en model til beregning af solvarmeanlægs ydelse. Modellen er baseret på den tidligere omtalte effektivitetsprøvning af solfanger (4) og på prøvning af varmelagres egenskaber (37). Ydelsen af et solvarmeanlæg afhænger af mange flere parametre end medtaget i præsentationen af prøvningsresultaterne for solfanger og varmelager. Desuden befinder anlægget sig i sagens natur altid i instationær tilstand. Ved opstillingen af modellen benyttes en detaljeret opdeling af solvarmeanlægget og indflydelsen af alle parametre medtages så vidt muligt. Herved opnår man, at modellen kan benyttes til en detaljeret undersøgelse af solvarmeanlægs ydelse. Til gengæld vil der for normale anlæg og driftsforhold blive udført en række delberegninger, hvis indflydelse er minimal.

13.1 Solfanger

Solfangerens effektivitet under stationære forhold beregnes af udtrykket

$$\eta = \eta_0 - k_0(t_m - t_l)/E - k_1(t_m - t_{lp})(t_m - t_l)/E \quad (13.1.1)$$

Dette udtryks konstanter η_0 , k_0 og k_1 kendes fra effektivitetsprøvningen af den pågældende solfanger, og t_{lp} , der er lufttemperaturen under prøvningen, kan normalt sættes til 25°C. Udtrykket gælder under følgende forudsætninger:

- effektiviteten er baseret på det transparente areal
- solindfaldet består udelukkende af direkte stråling
- indfaldsvinklen er mindre end 30°
- hældningen er 45°
- vindhastigheden langs det transparente lag er mindst 5m/s og en typisk middelværdi er ca. 6m/s
- vasken og væskestrømmen er som ved prøvningen.

Derfor må det angivne udtryk korrigeres, hvis monterings-, drifts- eller vejrforhold er anderledes end i de nævnte forudsætninger.

Ifølge (13) kan der korrigeres for indfaldsvinklen ved hjælp af følgende korrektionsfaktor ("angle of incidence modifier")

$$K_i = 1 - K_{i1}(1/\cos(i) - 1) \quad (13.1.2)$$

hvor i man for ét og to lag glas typisk kan regne med en værdi for K_{i1} på henholdsvis 0,1 og 0,175. Korrektionen udføres ved at gange maksimaleffektiviteten, n_0 , med korrektionsfaktoren.

Ifølge (7) kan man med god tilnærmelse beregne transmissionen af diffus stråling, som om det var direkte stråling med en indfaldsvinkel på 60° . Herved kan man korrigere for diffus stråling ved at anvende en korrektionsfaktor for indfaldsvinkel. Med i lig med 60° indsat i 13.1.2 fås

$$K_d = 1 - K_{i1} \quad (13.1.3)$$

Korrektionen udføres sammen med korrektionen for indfaldsvinklen, idet man benytter en samlet korrektionsfaktor, der ganges på maksimaleffektiviteten

$$K_{id} = (1 - p_d)K_i + p_d K_d \quad (13.1.4)$$

hvor p_d er andelen af diffus stråling.

Varmetabskoefficienterne korrigeres for hældning, idet man benytter det i prøverapporterne angivne udtryk

$$k_s = k_{s0} - k_{s1}s \quad (13.1.5)$$

hvor s er solfangerens vinkel med vandret. Korrektionen udføres ved at gange k_0 og k_1 med korrektionsfaktoren

$$K_s = (k_{s0} - k_{s1}s) / (k_{s0} - k_{s1}45^\circ) \quad (13.1.6)$$

Varmetabskoefficienterne korrigeres for vindhastighed, idet man benytter korrektionsfaktoren

$$K_v = k_v / k_p \quad (13.1.7)$$

hvor k_v er et udtryk for varmetabskoefficienten som funktion af vindhastigheden, og k_p er k_v med v lig med 6m/s svarende til den middelvindhastighed, man har over solfangeren ved effektivitetsprøvningen. Udtrykket for varmetabskoefficienten er fundet ved at benytte det tidligere omtalte program for beregning af solfangeres effektivitet til at beregne varmetabskoefficienten ved varierende vindhastighed. Beregningerne er udført for tre typiske solfangere ved at variere vindhastigheden mellem 0 og 10m/s og resultaterne er tilnærmet udtrykkene, der er angivet i skema 13.1.1.

Solfangertype	udtryk
ét-lags, alm	$K_v = 0,75 + 0,102v^{1/2}$
ét-lags, sel.	$K_v = 0,88 + 0,051v^{1/2}$
to-lags, alm.	$K_v = 0,80 + 0,082v^{1/2}$

Skema 13.1.1 Udtryk for korrektionsfaktoren for
varierende vindhastighed

Varmetabskoefficienterne er målt under forhold, der med hensyn til varmestraling fra omgivelserne ikke er typiske for virkeligheden. Der kan korrigeres herfor, men da man ikke har oplysninger om himmelstrålingstemperaturen blandt vejrdatoene, der benyttes ved beregningerne, er der ikke medtaget en direkte korrektion for forskelle i varmestralingen.

Hvis der i solfangeren benyttes en anden væske eller væskestrøm end svarende til prøveforholdene påvirker dette både maksimaleffektiviteten og varmetabskoefficienterne. Korrektionsfaktoren kan bestemmes ved at beregne solfangerens effektivitet ved de aktuelle forhold og ved de under prøvningen gældende forhold vedrørende væske og væskestrøm. Korrektionsfaktoren bestemmes ved hjælp af det tidligere omtalte program til beregning af solfangeres effektivitet.

$$K_f = n_a/n_p \quad (13.1.8)$$

Herefter kan effektivitetsudtrykket skrives således

$$n = \frac{K_f K_{id} n_o - K_f K_s K_v k_o (t_m - t_l)}{E - K_f K_s K_v k_l (t_m - t_{lp}) (t_m - t_l)} / E \quad (13.1.9)$$

Dette udtryk benyttes til at bestemme effektiviteten af solfangeren, når denne er i drift under stationære forhold.

Når solfangeren ikke er i ddrift, er effektiviteten selvfølgelig nul. Den varme, der eventuelt er tilført solfangeren medgår til opvarmning af solfangeren især absorberen og væsken og i mindre grad det transparente lag.

Ifølge (8) kan solfangerens effektive varmekapacitet beregnes af udtrykket

$$C_e = C_a + C_m + C_i / 2 + a_1 C_1 + a_2 C_2 \quad (13.1.10)$$

hvor C_a , C_m , C_i , C_1 og C_2 h.h.v er varmekapaciteten af absorberen, det varmetransporterende medium, isoleringen, det første (inderste) og det andet transparente lag, hvis dette findes. Koefficienterne a_1 og a_2 er forholdet mellem varmetabskoefficienten fra absorber til luft og fra det aktuelle lag til luften. Normalt forekommende tal for a_1 og a_2 er angivet i skema 13.1.2.

solfangertype	a_1	a_2
ét-lags, almindelig absorberbelægning	0,27	
et-lags, selektiv absorberbelægning	0,13	
to-lags, almindelig absorberbelægning	0,62	0,15

Skema 13.1.2. Koefficienter til brug i udtryk for solfangerens effektive varmekapacitet, iflg. (8)

Den effektive varmekapacitet pr. arealenhed fås herefter af udtrykket

$$c_e = C_e / A_t \quad (13.1.11)$$

Temperaturen af det varmetransporterende medium kan ifølge (8) ved et tidsskridts slutning beregnes af udtrykket

$$t_{ms} = t_1 + En_o/k_b - (En_b/k_b) \exp(-k_b p/c_e) \quad (13.1.12)$$

hvor n_b og k_b er den formelle effektivitet og varmetabskoefficient ved tidsskridtets begyndelse. Tidsskridtets længde benævnes p . De tidligere omtalte korrektioner for effektiviteten og varmetabskoefficienterne må selvfølgelig også benyttes i udtrykket til beregning af t_{ms} .

Under drift vil temperaturen i solfangeren normalt også ændres, og derfor må man ved beregning af udbyttet over et tidsskridt, Q_{su} , tage hensyn til solfangerens varmekapacitet. Dette kan ske ved hjælp af udtrykket

$$Q_{su} = A_t (nEp - c_e (t_{ms} - t_{mb})) \quad (13.1.13)$$

13.2 Solfangerkreds

Solfangerne og varmelagret forbindes ofte med et rørsystem som vist på fig. 12.1. Varmetabet for et sådant rørsystem består af et transmissionstab og et kapacitetstab og sker både indendørs og udendørs.

Transmissionstabet under drift beregnes af udtrykket

$$Q_{rtt} = pK_{ru}(t_m - t_{lu}) + pK_{ri}(t_m - t_{li}) \quad (13.2.1)$$

hvor K_{ru} og K_{ri} er den totale varmetabskoefficient for h.h.v. den udendørs og den indendørs del af rørene. Der regnes med, at middeltemperaturen af væsken i rørene er den samme som i solfangeren. Dette er en god tilnærmelse, da temperaturfaldet i rørsystemet må være mindre end temperaturstigningen i solfangeren, for at den til lageret tilførte effekt er positiv.

Uden for driftsperioderne falder temperaturen af væsken i de udvendige rør ifølge udtrykket

$$t_{rus} = t_{lu} + (t_{rub} - t_{lu}) \exp(-pK_{ru}/C_{ru}) \quad (13.2.2)$$

hvor t_{rub} og t_{rus} h.h.v. er temperaturen af de udvendige rør med væske ved tidsskridtets begyndelse og slutning. C_{ru} er den

totale varmekapacitet af de udendørs rør med væskeindhold. Tilsvarende udtryk haves for de indendørs rør.

$$t_{ris} = t_{li} + (t_{rib} - t_{li}) \exp(-pK_{ri}/C_{ri}) \quad (13.2.3)$$

hvor t_{rib} og t_{ris} h.h.v. er temperaturen af de indendørs rør med væske ved tidsskridtets begyndelse og slutning. C_{ri} er den totale varmekapacitet af rørene med væskeindhold.

Ved start af solfangerkredsen vil den kolde væske i rørene blive udskiftet med varmt svarende til lagertemperaturen. Herved sker der et kapacitetstab, som kan beregnes af udtrykket.

$$Q_{rkts} = C_{ru}(t_{mb} - t_{rus-}) + C_{ri}(t_{mb} - t_{ris-}) \quad (13.2.4)$$

hvor t_{rus-} og t_{ris-} h.h.v. er temperaturen af de udvendige og indendørs rør ved slutningen af den foregående periode.

Under drift med ændringer i væskens temperatur sker der også et kapacitetstab, som dog ved faldende temperatur vil være negativt.

$$Q_{rktd} = (C_{ru} + C_{ri})(t_{ms} - t_{mb}) \quad (13.2.5)$$

hvor t_{mb} og t_{ms} er væsketemperaturen ved periodens begyndelse og slutning. Der regnes med samme middeltemperatur i solfanger og i rør.

13.3 Varmelager

I systemer, som vist på fig. 12.1, sker varmelagringen i brugsvandet, og varmeveksleren mellem solfanger og lager er indbygget i varmelageret i form af en rørs spiral i bunden af beholderen eller en kappe omkring beholderen. Modellen for lageret skal derfor foruden varmelagringskapacitet og varmetab også omfatte varmeoverføringsevne

Når der tilføres eller bortføres varme fra lageret samt ved varmetab, sker der en ændring i lagerets temperatur. På grundlag af varmelagringskapaciteten kan temperaturændringerne over en periode beregnes af udtrykket

$$t_{vls} = t_{vlb} + (Q_{il} - Q_{ul} - Q_{tl}) / C_{vl} \quad (13.3.1)$$

hvor t_{vlb} og t_{vls} er begyndelses- og sluttemperaturen af varmelageret. Q_{il} og Q_{ul} er den tilførte og bortførte varme. C_{vl} er varmelagringskapaciteten, som kendes fra prøvningen af varmelagerunits (37). Q_{tl} er varmetabet, som beregnes på grundlag af den ved prøvningen bestemte varmetabskoefficient, K_{vl} .

$$Q_{tl} = K_{vl}(t_{vlb} - t_{li})p \quad (13.3.2)$$

Da temperaturen i varmelageret normalt ændres relativt langsomt er fejlen, der begås ved at benytte lagerets temperatur ved begyndelsen af tidsskridtet, minimal.

I varmeveksleren overføres varmen fra solfangerkredsen til vandet i lageret med en vis temperaturforskelle, som må bestemmes.

Antager man, at temperaturen på lagersiden af varmeveksleren er den samme ud for hele varmeveksleren, kan man bestemme varmevekslerens effektivitet af udtrykket

$$n_{vv} = 1 - \exp(-H/S_s c_s) \quad (13.3.3)$$

hvor H er varmeoverføringsevnen af varmeveksleren. S_s er massestrømmen i solfangerkredsen og c_s er solfangervæskens varmekapacitet. Fra prøvningen af varmelagrene kendes varmeoverføringsevnen ved forskellige lagertemperaturer, som vist på fig. 13.3.1. Kurverne tilnærmes følgende udtryk

$$H = H_0 + H_1 t_{vl} \quad (13.3.4)$$

hvor t_{vl} er lagerets temperatur.

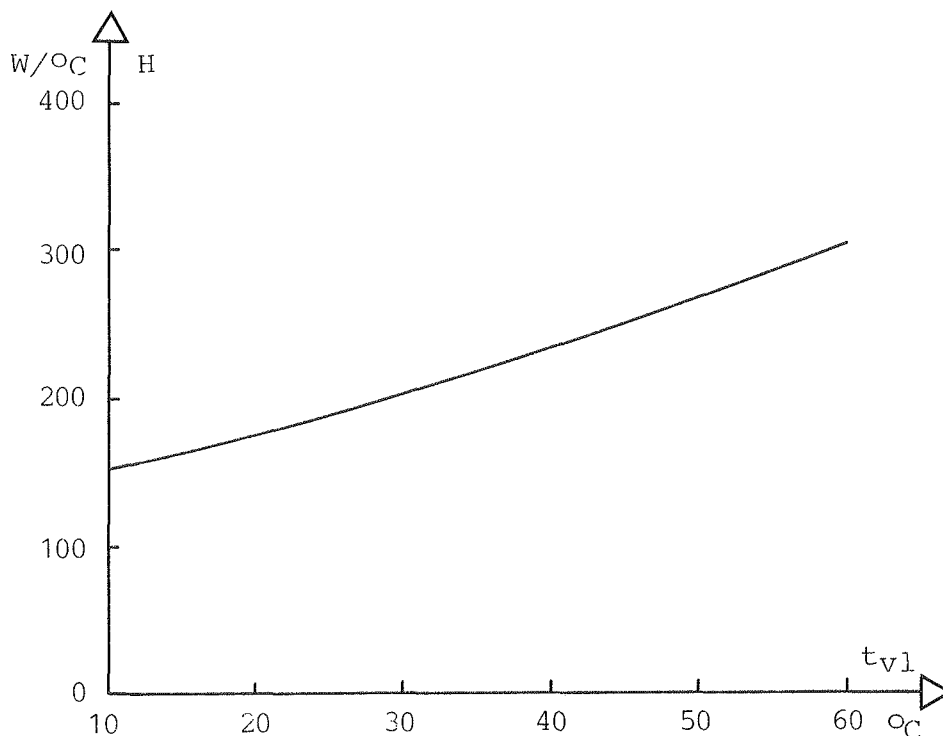


Fig 13.3.1 Varmeoverføringssevne af varmeveksler ved forskellige temperaturer af lageret, ifølge (37)

For en given overført effekt kan man ved hjælp af varmevekslerens effektivitet bestemme temperaturerne ved varmevekslerens ind- og udløb.

$$t_{mil} = t_{vl} + \frac{Q_{il}}{S_s c_s n_{vvp}} \quad (13.3.5)$$

$$t_{mul} = t_{mil} - \frac{Q_{il}}{S_s c_s p} \quad (13.3.6)$$

hvor t_{mil} , t_{mul} er temperaturen af det varmetransporterende medium ved indløb til og udløb fra varmelager. Q_{il} er den varmemængde, der er ført ind i lageret, og t_{vl} er temperaturen af vandet i lageret.

Temperaturen i lageret er imidlertid ikke ensartet, idet der ved tapning ledes koldt vand ind i bunden af beholderen, og p.g.a. vægtfyldeforskelle sker der kun en langsom opblanding med det varmere vand. Man får derfor en lagdeling, som har indflydelse på temperaturen af vandet ved varmeveksleren til

solfangerkredsen. I forhold til et varmelager uden lagdeling opnår man ved lagdeling i perioder en lavere temperatur i solfangeren og en højere temperatur af vandet, der tappes. Dette er selvfølgelig en fordel for anlæggets ydelse.

For at tage hensyn til lagdelingen opdeler man lageret i et antal lag, f.eks. tre som vist på fig. 13.3.2. Herefter beregner man temperaturen i hvert lag, idet man antager, at temperaturen er ensartet i det enkelte lag. Beregningerne udføres under forudsætning af, at tapningen i en tidsperiode ikke overstiger vandmængden i ét lag.

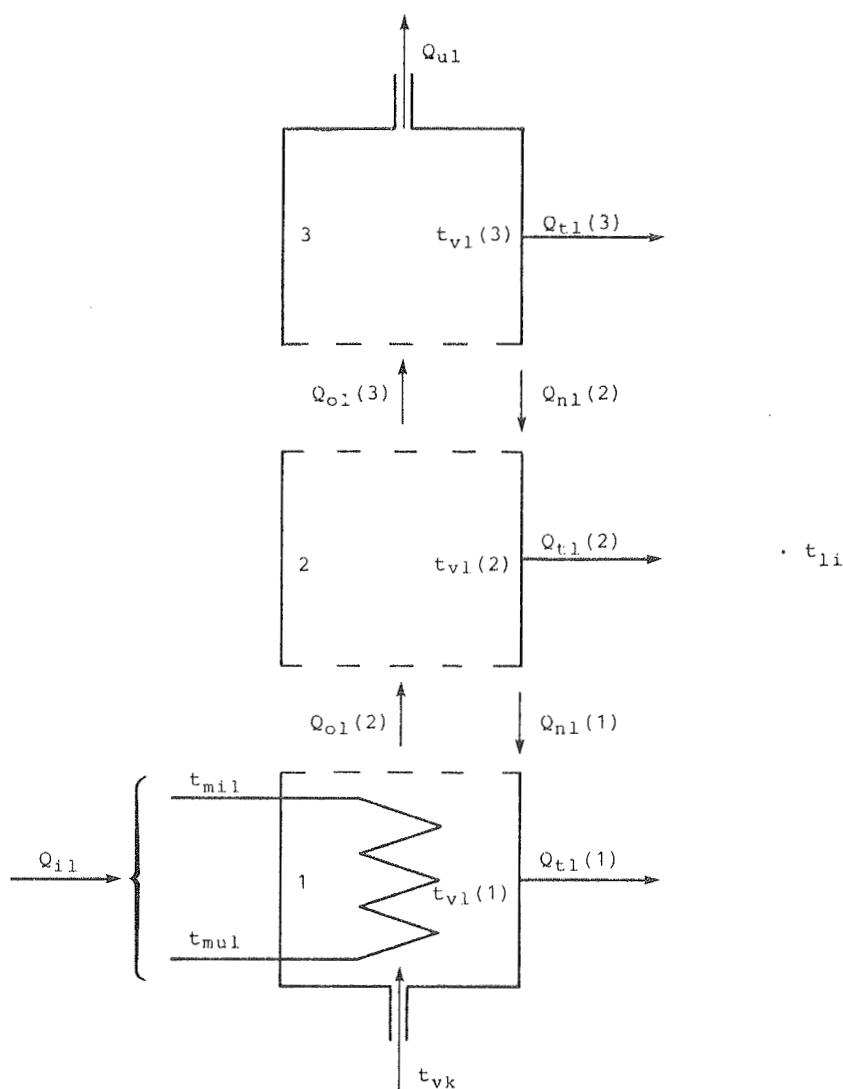


Fig. 13.3.2 Opdeling af varmelageret i lag og de forskellige varmestømme

På grund af varmeledning i vandet og beholdervæggen vil der ske en nedadrettet varmetransport fra det ene lag til det andet. Idet man antager, at varmetransporten sker fra midten af hvert lag, kan den beregnes af udtrykket for det i'te lag.

$$Q_{nl}(i) = (A_{vlv}(k_v/h) + A_{vlg}(k_g/h))(t_{vl}(i+1) - t_{vl}(i))p \quad (13.3.7)$$

hvor A_{vlv} og A_{vlg} er tværsnitsarealet af vandet og godset i beholdervæggen. Tilsvarende er k_v og k_g varmeledningsevnen for vand og godset i beholdervæggen. Højden af et lag betegnes h og $t_{vl}(i)$, $t_{vl}(i+1)$ er temperaturen af de to lag. I midterlagene sker der hverved både til- og bortledning af varme, medens der i top- og bundlagene h.hv. kun er bortledning og tilledning. Ved tapning eller tilførsel af varme fra solfangeren sker der en transport af varme til lagene ovenover, og lagenes temperatur vil ændres således, at man altid har en højere eller samme temperatur i højereliggende lag.

Ved tapning af varmt vand er der både et mængdekrav og et temperaturkrav, der skal opfyldes. Hvis vandet i det øverste lag har en lavere temperatur end ønsket, tappes hele den ønskede mængde, som derefter opvarmes til den ønskede temperatur i en anden varmtvandsbeholder, f.eks. i en oliefyret kedelunit. Den herved bortførte varmemængde kan bestemmes af udtrykket

$$Q_{ul} = M_t c_v (t_{vl}(n) - t_{vk}) \quad (13.3.8)$$

hvor M_t er den tappede vandmængde i tidsskridtet, c_v er vandets varmekapacitet, og t_{vk} er temperaturen af det kolde vand, der løber ind i beholderen. Temperaturen af det øverste lag i beholderen betegnes $t_{vl}(n)$.

Hvis vandet i det øverste lag har en højere temperatur end ønsket, tappes der kun så meget, at man efter opblanding med koldt vand får den ønskede temperatur og vandmængde. Den herved bortførte vandmængde og varmemængde kan bestemmes af udtrykkene

$$M_{vl} = M_t (t_t - t_{vk}) / (t_{vl}(n) - t_{vk}) \quad (13.3.9)$$

$$Q_{ul} = M_t c_v (t_t - t_{vk}) \quad (13.3.10)$$

hvor M_{v1} er den vandmængde, der er tappet fra lageret i perioden, og t_t er den ønskede tappetemperatur. Antallet af lag betegnes n .

Svarende til den bortførte vandmængde overføres der en vandmængde fra hvert af lagene til det ovenover. Herved bortføres der normalt også en vis varmemængde fra hvert af lagene. For det i 'te lag har man

$$Q_{o1}(i) = M_{v1} c_v (t_{v1}(i) - t_{v1}(i-1)) \quad (13.3.11)$$

hvor M_{v1} for $t_{v1}(n)$ større end t_t bestemmes af 13.3.9, og for $t_{v1}(n)$ mindre end t_t er lig med den tappede vandmængde M_t .

Ved tilførsel af varme fra solfangerkredsen via varmeveksleren til det nederste lag sker der en opvarmning af dette alene indtil temperaturen når op på samme niveau som i laget ovenover. Derefter tilføres varmen ved naturlig konvektion begge lag, og således fortsættes der op igennem alle lagene.

Herefter kan man opstille følgende udtryk til beregning af den varmemængde der netto er tilført det i 'te lag

$$Q_{v1t}(i) = Q_{i1}(i) - Q_{o1}(i) + Q_{n1}(i) - Q_{n1}(i-1) - Q_{t1}(i) \quad (13.3.12)$$

hvor man i første omgang kun tilfører varmen fra solfangerkredsen til det nederste lag.

Varmetabskoefficienten for hele lageret deles ud på de enkelte lag proportionalt med overfladearealet af beholderen, som i dette tilfælde antages at være cirkulær-cylindrisk. Man har således for det øverste eller det nederste lag.

$$K_{v1}(1) = K_{v1}(n) = K_{v1} \frac{d_{v1} h + d_{v1}^2/4}{d_{v1} h n + d_{v1}^2/2} \quad (13.3.13)$$

hvor d_{v1} er diameteren af beholderen.

For et mellemlag har man

$$K_{vl}(i) = K_{vl} \frac{d_{vl}h}{d_{vl}hn + d_{vl}^2/2} \quad (13.3.14)$$

Nye temperaturer af lagene bestemmes af udtrykket

$$t_{vls}(i) = t_{vlb}(i) + Q_{vlt}(i)n/C_{vl} \quad (13.3.15)$$

Hvis temperaturen i hvert lag ikke opfylder betingelsen om, at den skal være lavere end i de højereliggende lag, må den tilførte varmemængde, Q_{il} , fordeles over flere lag. Dette må på grund af tabet både gøres ved at gå opad og nedad i lageret.

Hermed er modellen for varmelageret opstillet, og man kan for hver tidsperiode beregne middeltemperaturerne af lagene og dermed også den varmemængde, der kan tilføres det varme brugsvand.

Dermed er modellen for hele solvarmeanlægget også opstillet. Tilsvarende kan der opstilles modeller for andre udformninger af varmelagre. Da modellen i denne forbindelse kun skal benyttes til undersøgelse af solfangerens indflydelse på anlæggets ydelse, er der ingen grund til at opstille modeller for andre anlæg.

14. SIMULERINGSPROGRAM TIL BEREGNING AF SOLVARMEANLÆG

På grundlag af den i afsnit 13 opstillede beregningsmodel er der udarbejdet et simuleringsprogram på en bordregnemaskine (HP-85). Programmet er baseret på tidsskridt, der normalt er på én time. Inden for hver time regnes der med konstante vejr- og driftsforhold. Tapningen af vand fra lagertanken regnes at ske jævnt fordelt over tidsskridtene. Beregningen af solvarmeanlæggets ydelse sker ved en dobbelt gennemregning af systemet, idet man først ved en grov beregning finder lagerets middeltemperatur over timen og derefter på grundlag af denne ved en mere detaljeret beregning finder den oplagrede og leverede varmemængde. Et rutediagram med hovedtrækkene af simuleringsprogrammet er vist på figur 14.1. En detaljeret beskrivelse af programmet findes i (38).

Programmet er forsynet med en rutine, hvori man indlæser vejrdata baseret på det nye referenceår, der er omtalt i (39). Ved hjælp af udtryk som er beskrevet i (40) beregnes solintensiteten på den aktuelle flade. Forbrugsdata indlæses i programmet med samme værdi og fordeling hver dag.

Da beregningen af et anlæg på grundlag af referenceåret typisk varer et par timer på bordregnemaskinen, er der udvalgt et koncentreret referenceår på ialt 36 døgn. Udvalgelsen af disse døgn er foretaget, så solintensiteten passer månedsvis, og de valgte tre døgn fra hver måned omfatter både gode og dårlige dage med hensyn til solintensitet. En sammenligning af det komplette referenceår med det koncentrerede referenceår baseret på lufttemperatur og solintensitet er vist i skema 14.1. Der er også foretaget en sammenligning af solvarmeanlægs ydelser beregnet på grundlag af det komplette og det koncentrerede referenceår. Et eksempel herpå for et solvarmeanlæg til vandopvarmning er vist i skema 14.2. Det ses, at der for alle energimængderne er god overensstemmelse. Det vil på denne baggrund være acceptabelt at anvende det koncentrerede referenceår ved beregning af normale solvarmeanlæg til vandopvarmning. For andre anlægstyper må man undersøge, om det koncentrerede referenceår giver resultater svarende til det komplette, før det anvendes.

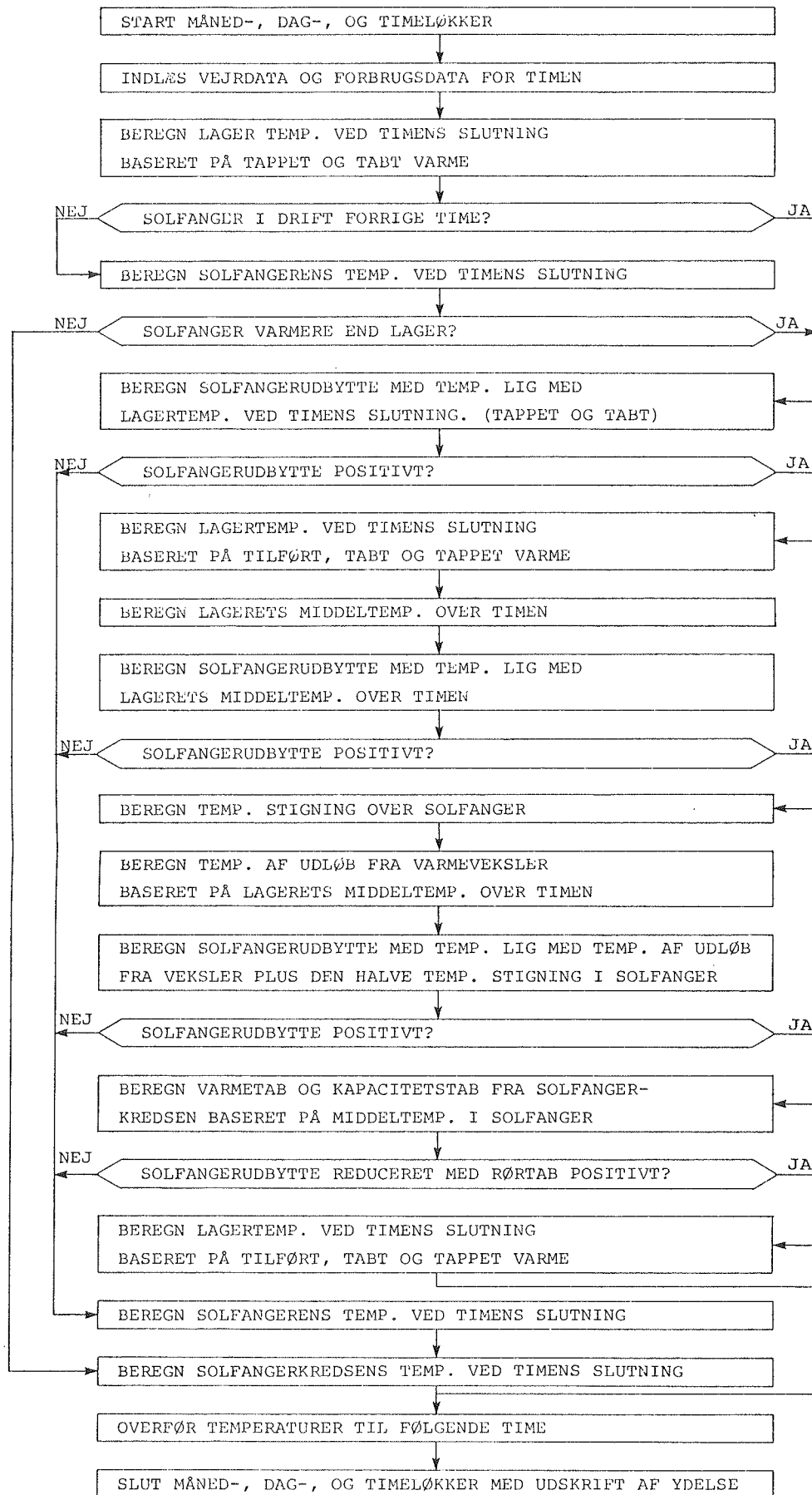


Fig. 14.1 Forenklet rutediagram for simuleringsprogrammet.

Ref.år	lufttemperatur, °C		Solintensitet, W/m ²	
	komplet	konc.	komplet	konc.
januar	-0,6	0,3	36,6	38,9
februar	-1,1	-3,0	87,2	87,5
marts	2,6	4,1	103,6	106,3
april	6,6	9,5	189,7	190,7
maj	10,6	12,4	214,8	214,9
juni	15,7	15,9	250,9	247,1
juli	16,4	18,1	215,1	215,5
august	16,6	17,5	203,8	202,4
september	13,7	14,2	151,3	149,6
oktober	9,2	11,5	93,3	92,0
november	5,0	6,5	54,4	54,4
december	1,6	3,6	46,4	49,5
årsmiddel	8,0	9,2	137	137

Skema 14.1 Sammenligning af lufttemperatur
og middelsolintensitet på sydvendt 45° skrå
flade ifølge det komplette og det koncentrerede
referenceår

Referenceår		komplet	koncentreret
Solindfald	GJ	23,4	23,4
Solfangerudbytte	GJ	7,86	8,12
Transmissionstab fra rør	GJ	0,45	0,45
Kapacitetstab fra rør	GJ	0,19	0,19
Tilført lager	GJ	8,32	8,68
Varmetab fra lager	GJ	0,61	0,60
Tappet fra lager	GJ	7,71	8,08
Driftstimer		2345	2575
Solfangereffektivitet	%	33,6	34,7
Dækningsgrad	%	68,1	71,4

Skema 14.2 Sammenligning af ydelser beregnet på grundlag
af det komplette og det koncentrerede
referenceår

15. SAMMENLIGNING AF BEREGNEDE OG MÅLTE YDELSER

Simuleringsprogrammets nøjagtighed er undersøgt ved at sammenligne beregnede og målte ydelser for ialt tre solvarmeanlæg. Der er desuden foretaget en sammenligning med et andet simuleringsprogram, der er udviklet ved laboratoriet.

Det første solvarmeanlæg, der sammenlignes med, er beskrevet i (41) og vist på fig. 15.1. Dets hoveddata er angivet i skema 15.1. Anlægget, der kun er beregnet til vandopvarmning, er et pilotanlæg, og derfor er forbruget simuleret under målingerne. Solfangerens effektivitet er bestemt i solsimulatoropstillingen, som tidligere omtalt. Varmelagerunitens egenskaber er bestemt ved prøvning, som omtalt i (37).

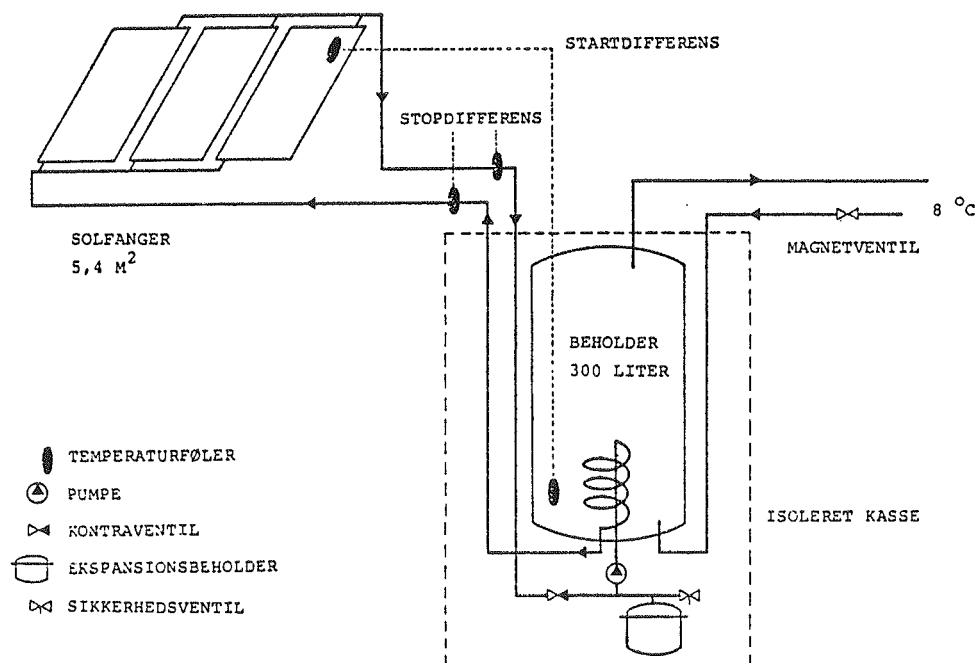


Fig. 15.1 Principdiagram af solvarmeanlæg, iflg. (41)

ANLÆG		1	2	3
SOLFANGER	m ²	5,4	30	47
Transparente lag		1	1	1
Absorberbelægning		sel.	alm.	sel.
Maksimaleffektivitet		0,79	0,74	0,76
Varmetabskoeff. (k ₀)	W/°Cm ²	4,7	7,7	4,1
Varmetabskoeff. (k ₁)	W/°C ² m ²	0,007	0,015	0,023
Varmekapacitet	kJ/°Cm ²	9,0	9,0	8,5
Vinkel med vandret	gra.	45	56	56
SOLFANGERKREDS				
Varmetabskoeff. udv.	W/°C	0,63	9,0	32
Varmetabskoeff. indv.	W/°C	1,34	0	0
Varmekapacitet udv.	kJ/°C	7,7	136	487
Varmekapacitet indv.	kJ/°C	5,9	0	0
Tilført pumpeeffekt	W	130	0	0
VARMELAGER			benyttes ikke	
Varmevekslerplacering		nederst		
Varmeoverføringsevne (H ₀)	W/°	115		
Varmeoverføringsevne (H ₁)	W/°C ²	3		
Beholderhøjde	m	1,14		
Beholderdiameter	m	0,58		
Beholdermateriale		stål		
Beholdergodstykkelse	mm	5		
Varmetabskoeff.	W/°C	1,3		
Omgivelsestemperatur	°C	24		
Koldtvandstemperatur	°C	8		
Tappetemperatur	°C	45		
Forbrug	kg/døgn	200		

Skema 15.1 Hoveddata for de solvarmeanlæg, der benyttes
i sammenligningen

Ved sammenligningen benyttes temperaturen af vandet øverst i lageret, hvis beregnede og målte værdi fire gange i døgnet er vist på fig. 15.2. Det ses, at den beregnede temperatur for det meste er lidt lavere end den målte. Den tappede varmemængde fra lageret for hele perioden på 14 døgn er ifølge målinger og beregninger h.h.v. 221MJ og 213MJ. Der er således kun en afvigelse på 4% mellem målte og beregnede ydelser. Da det kun er temperaturen og varmeindholdet af den tappede vandmængde, der er målt, er det ikke muligt at foretage mere detaljerede sammenligninger på grundlag af dette anlæg.

For det samme anlæg er der udført en sammenligning mellem det omtalte simuleringsprogram og et andet program, der benyttes ved laboratoriet. Sammenligningen er baseret på det nye referenceår i komplet og koncentreret udgave. Resultatet af beregningerne gav årsydelser, som kun afveg 4% fra hinanden.

De to andre anlæg, der er benyttet ved sammenligning mellem målte og beregnede ydelser, er begge større anlæg beregnet til kombineret vand- og rumopvarmning. Da begge anlæg indeholder specielle varmelagre og solfangerkredse, er sammenligningen alene baseret på solfangernes ydelser, idet der dog er medtaget en del af rørene i solfangerkredsene. Herved kan man undersøge, hvor godt simuleringsprogrammet er til beregning af udbyttet fra solfangere. Anlæggene er monteret på laboratoriets systemprøvestand, og solfangerne er de samme, som blev benyttet ved sammenligningen mellem udendørs og indendørs effektivitetsprøvning, som blev omtalt i afsnit 7. De relevante hoveddata for anlæggene er vist i skema 15.1

Ved beregningen af solfangernes ydelse benyttes de målte temperaturer af væsken i solfangerkredsene samt selvfølgelig vejrdataene. Resultaterne for en periode på 6 døgn er vist i skema 15.2. Det ses, at der i begge tilfælde er rimelig god overensstemmelse mellem de målte og de beregnede ydelser.

Der er hermed vist eksempler på, at det udviklede simuleringsprogram kan benyttes til beregning af solvarmeanlægs ydelse med en god nøjagtighed. Der er således god grund til at antage, at både beregningsmodellen og simuleringsprogrammet kan benyttes til en nøjagtig beregning af solvarmeanlægs ydelse.

ANLÆG		1	2	3
Målt ydelse	MJ	221	602	889
Beregnet ydelse	MJ	213	658	814

Skema 15.2 Sammenligninger af målte og beregnede ydelser

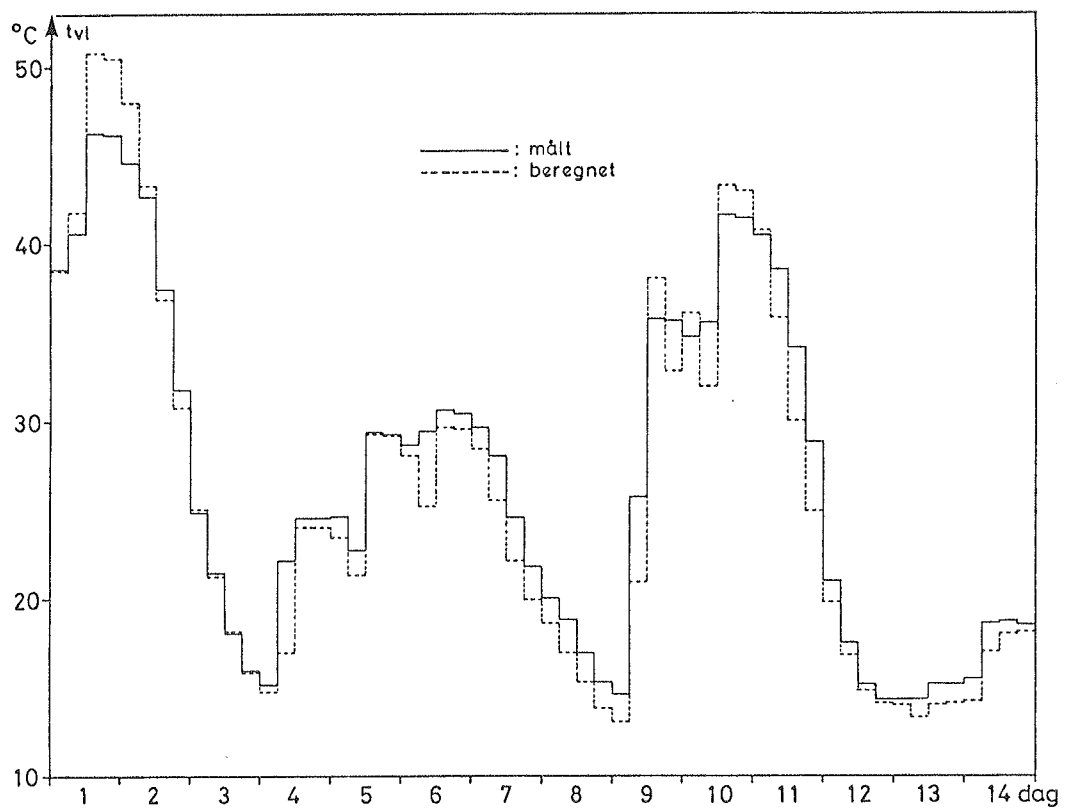


Fig. 15.2 Sammenligning af målte og beregnede temperaturer i varmelageret i anlæg 1.

16. BEREGNING AF SOLVARMEANLÆGS YDELSE

Ved hjælp af det omtalte simuleringsprogram er der foretaget en række beregninger af ydelsen af solvarmeanlæg til vandopvarmning. Med udgangspunkt i det i afsnit 15 beskrevne anlæg har man undersøgt ydelsen ved anvendelse af forskellige solfangertyper, solfangerarealer, længder af solfangerkredsen samt væskestrømme. Forbruget og varmelageret ændres ikke, men ved variation i solfangerarealet ændres varmeveksleren dog, så varmeoverførselsevnen er proportional med solfangerarealet. Hoveddataene for anlægget med tre forskellige solfangertyper er vist i skema 16.1 sammen med variationen af de enkelte parametre.

Ydelsen af anlægget med de tre forskellige solfangertyper ved varierende solfangerareal er vist på fig. 16.1. Det ses, at solfangeren med den selektive absorberbelægning giver den største anlægsydelse efterfulgt af solfangerne med almindelig absorberbelægning med ét og to lag glas. For de to ét-lags solfangere er den selektive ca. 10% bedre end den almindelige ved et areal på 5,4 m². Det er således muligt at forbedre anlægsydelsen betragteligt ved anvendelse af selektive belægninger. Med hensyn til indflydelsen af arealet bemærkes det, at ydelsen praktisk talt ikke stiger for arealer over 5-7 m².

Indflydelsen af solfangerens varmekapacitet er undersøgt ved at beregne ydelsen af referenceanlægget ved varierende varmekapaciteter, som vist på fig. 16.2. Det ses, at for varmekapaciteter under 30 kJ/°Cm² er indflydelsen beskeden. For større varmekapaciteter falder ydelsen derimod en del. Da solfangerne normalt har en mindre varmekapacitet end de nævnte 30 kJ/°Cm² er der ifølge beregningerne ikke større forskel på, om der benyttes solfangere med lav eller høj varmekapacitet, så længe den blot ikke er unormalt høj.

ANLÆG		reference	variation	
SOLFANGER				
Solfangerareal	m ²	5,4	1,8 -	12,6
Transparente lag		1	1	2
Absorberbelægning		sel.	alm	alm.
Maksimaleffektivitet		0,79	0,80	0,72
Varmetabskoeff. (k ₀)	W/°Cm ²	4,7	7,1	5,3
Varmetabskoeff. (K ₁)	W/°C ² m ²	0,007	0 ,021	0,007
Varmekapacitet	kJ/°Cm ²	9,0	5 -	50
Vinkel med vandret	gra	45	fastholdt	
SOLFANGERKREDS				
Varmetabskoeff. udv.	W/°C	0,63	x(1-5)	
Varmetabskoeff. indv.	W/°C	1,34	x(1-5)	
Varmekapacitet udv.	kJ/°C	7,7	x(1-5)	
Varmekapacitet indv.	kJ/°C	5,9	x(1-5)	
Pumpeeffekt	W	130	fastholdt	
VARMELAGER				
Varmevekslerplacering		nederst		
Varmeoverføringsevne (H ₀)	W/°C	115	solf.proportionalt	
Varmeoverføringsevne (H ₁)	W/°C ²	3	solf.proportionalt	
Beholderhøjde	m	1,14	fastholdt	
Beholderdiameter	m	0,58	fastholdt	
Beholdermaterialer		stål	fastholdt	
Beholderens godstykkelse	mm	5	fastholdt	
Varmetabskoeff.	W/°C	1,3	fastholdt	
Omgivelsestemperatur	°C	20	fastholdt	
Koldtvandstemperatur	°C	8	fastholdt	
Tappetemperatur	°C	45	fastholdt	
Forbrug	kg/døgn	200	fastholdt	

Skema 16.1 Hoveddata for solvarmeanlægget samt variationen af de enkelte parametre

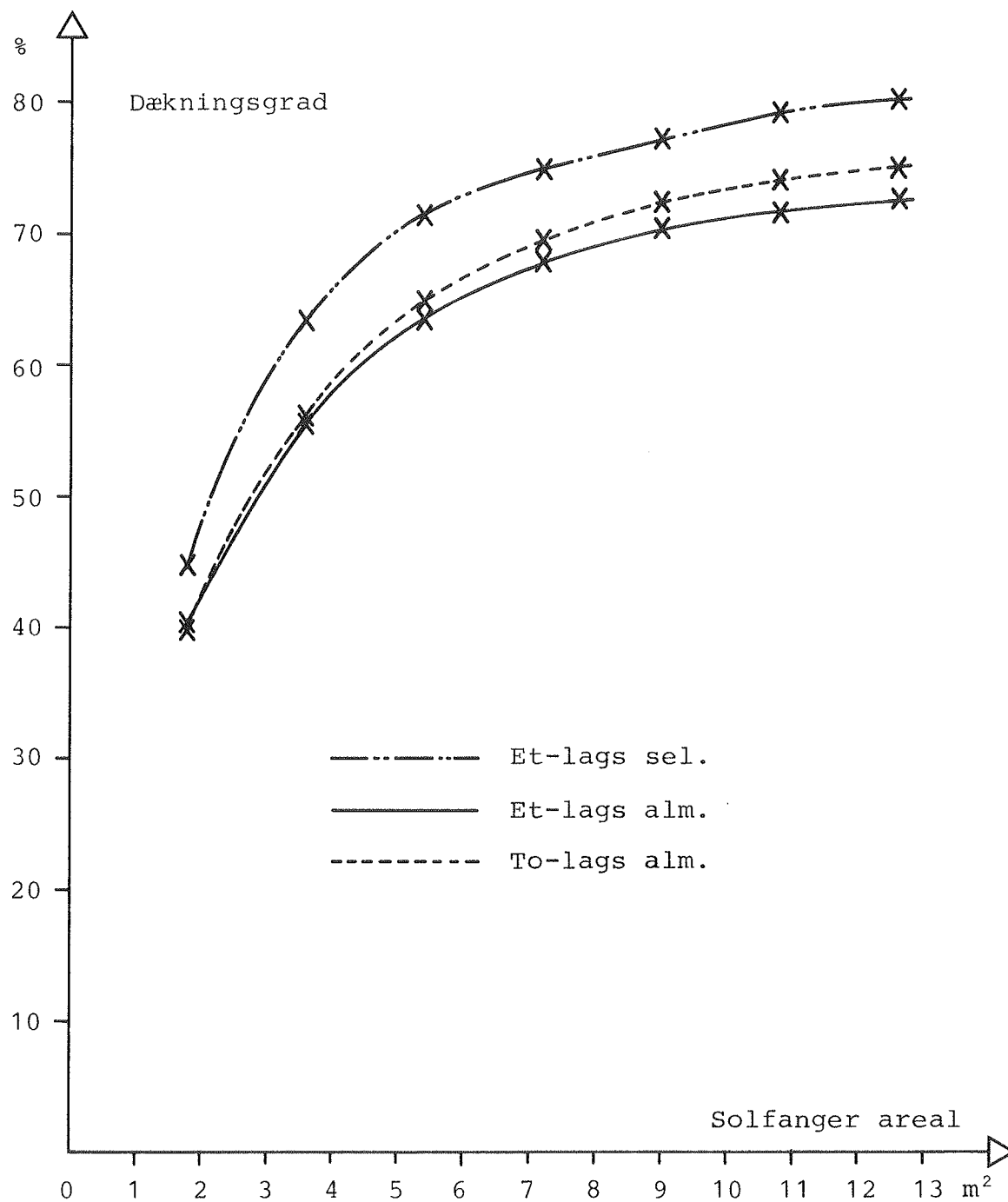


Fig. 16.1 Dækningsgraden for referenceanlægget med forskellige solfangertyper og arealer

Indflydelsen af solfangerkredsens varmetabskoefficient og varmekapacitet er undersøgt ved beregning af referenceanlægget med varierende længde af solfangerkredsen, som vist på fig. 16.3. Variationen er udført ved, at både varmetabskoefficienterne og varmekapaciteterne forøges med faktorer på 2-5. Der er således ikke ændret på fordelingen mellem indendørs og udendørs placerede rør. Det skal bemærkes, at både varmetabskoefficienten og varmekapaciteten for referenceanlægget er meget små. Den største værdi, der benyttes i variationen, svarer til ca. 30m stålør med nominal diameter på 20 mm og en isoleringstykkelse på 30mm. Det ses, at ydelsen falder jævnt med stigende rørlængde, men der er dog tale om ret beskedne nedgange i ydelsen.

Ydelsen af anlægget ved forskellige væskestrømme igennem solfangerne er vist på fig. 16.4. Der er ikke taget hensyn til, at effektiviteten af solfangeren baseret på middelvæsketemperatur, vil ændres ved ændring i væskestrømmen. Ifølge beregningseksemplerne, vist på fig. 3.2.4, er solfangereffektiviteten dog normalt næsten konstant, selvom væskestrømmen sættes helt ned til $0,005 \text{ kg/sm}^2$. I anlægget vil der imidlertid ske en stigning i middeltemperaturen i solfangeren, når væskestrømmen sættes ned, og derved vil ydelsen falde. Det ses af fig. 16.4, at der kun sker et ubetydeligt fald i ydelsen, selvom man sætter væskestrømmen ned fra den normalt anvendte væskestrøm på $0,015 \text{ kg/sm}^2$ til $0,005 \text{ kg/sm}^2$. Ved at reducere væskestrømmen kan man imidlertid anvende mindre rør i solfangerkredsen og dermed mindske varmetabet. Der kan eventuelt også anvendes en mindre pumpe og dermed spares driftsudgifter. Det skal i den forbindelse bemærkes, at den i beregningerne anvendte pumpe er nødvendig stor, og at man normalt vil benytte pumper med en effekt på ca. 50W.

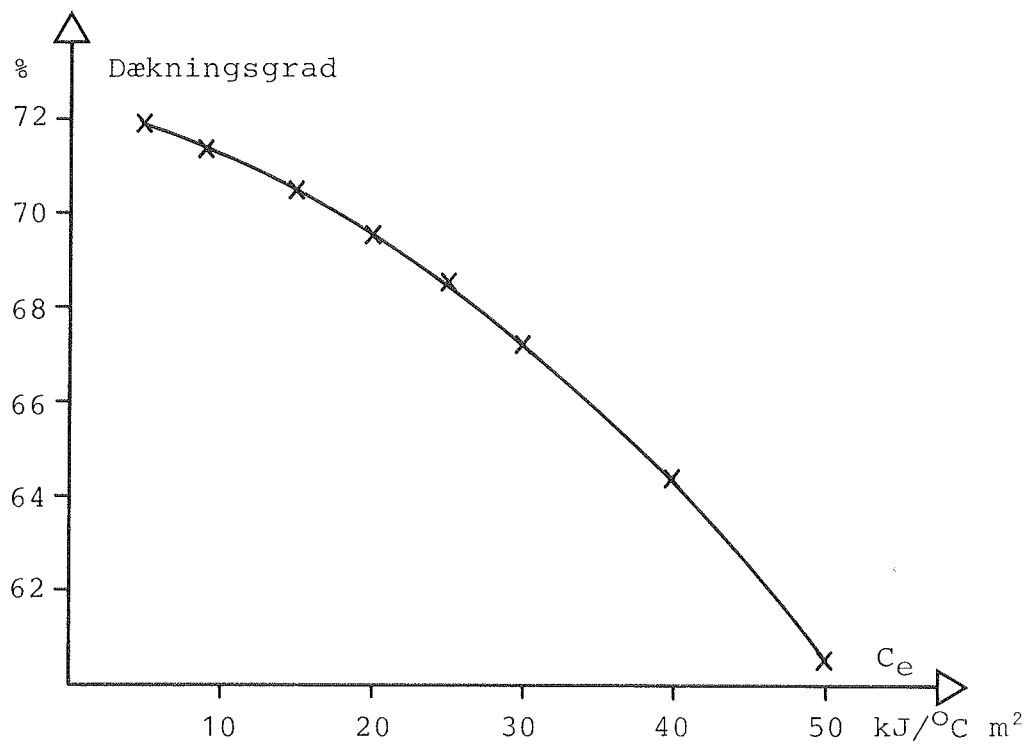


Fig. 16.2 Dækningsgraden for referenceanlægget med forskellige varmekapaciteter i solfangerne

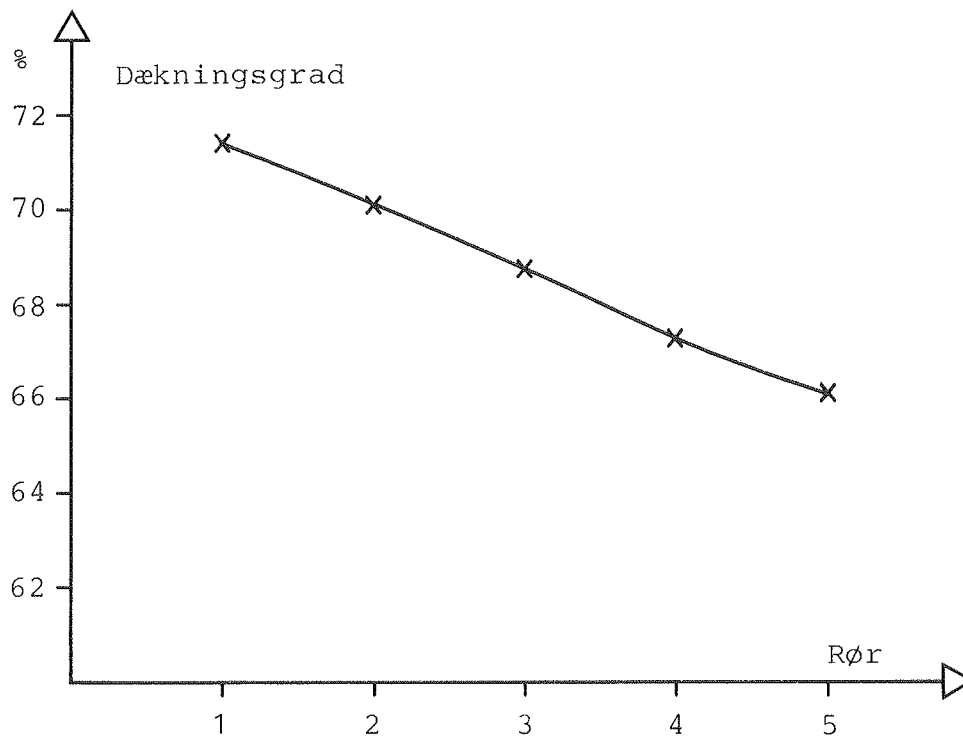


Fig. 16.3 Dækningsgraden for referenceanlægget med forskellige varmetabskoefficienter og varmekapaciteter af solfangerkredsen

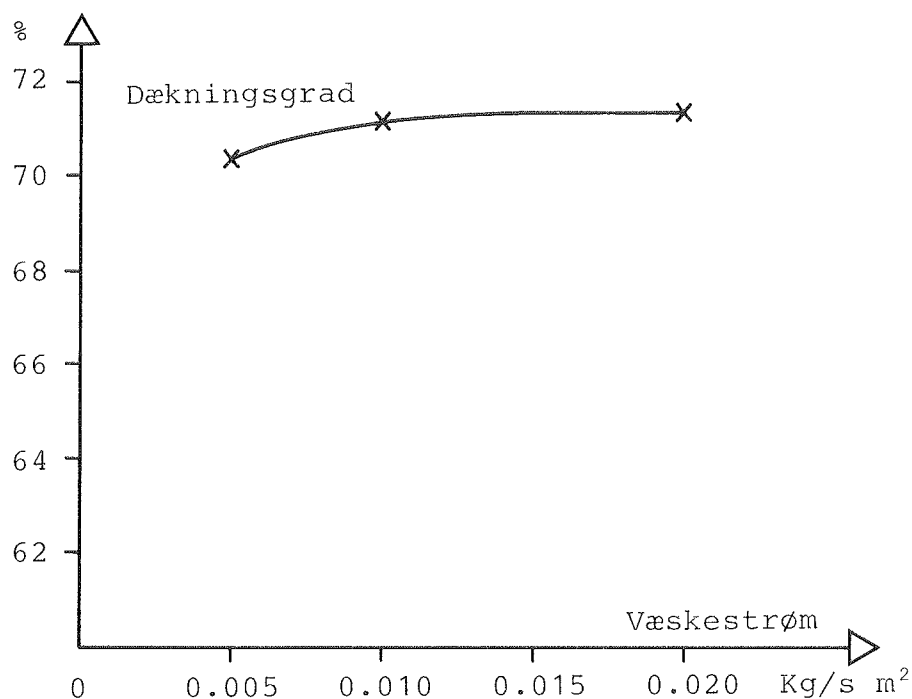


Fig. 16.4 Dækningsgraden af referenceanlægget ved varierende væskestrøm

Der er hermed vist eksempler på anvendelse af simuleringsprogrammet til beregning af ydelsen af solvarmeanlæg. Beregninger med forskellige solfangere med varierende arealer som vist på fig. 16.1 er et godt grundlag for dimensionering og optimering af solvarmeanlæg.

Ved større anlæg, hvor der udføres en egentlig projektering, vil det være oplagt for den projekterende at foretage en sådan gennemregning af anlægget. Hvis der skal foretages ca. 20 beregninger, som man har benyttet i fig.nr. 16.1 vil det tage ca. 10 timer. Dette giver dog næppe problemer, da programmet er udstyret med en automatisk afvikling af flere sæt beregninger, og bordregnemaskinen kan køre uden opsyn og dermed også om natten.

17. AFSLUTNING

Der skal afslutningsvis anlægges en vurdering af, hvilken rolle de omtalte muligheder for prøvning og beregning af solfangeres effektivitet kan spille i udvikling af solvarmeteknologien.

Der har i Danmark siden 1974 været en forsknings- og udviklingsaktivitet direkte vedrørende solvarme. Der er i disse 7 år tilvejebragt en viden og erfaring på solvarmeområdet, som gør det muligt at udføre et målrettet arbejde på området. Dette gælder bl.a. den eksperimentelle og beregningsmæssige bestemmelse af solfangeres effektivitet, som omtalt i denne rapport. Med solsimulatoropstillingen og beregningsprogrammet for solfangere har man fået værktøjet, der kan benyttes til generelle undersøgelser og specifikke udviklingsarbejder vedrørende solfangeres effektivitet.

I den nævnte 7-års periode er der opstået en dansk produktion af solvarmeanlæg og tilhørende komponenter. Der er dog som følge af det beskedne marked ikke tale om en egentlig industriel produktion. De involverede firmaer fremstiller og installerer dog en række relativt gode anlæg, som kan anvendes, men som gradvist også kan forbedres både med hensyn til ydelse, holdbarhed og økonomi. Dette kan ske, efterhånden som firmaernes afsætningsmuligheder øges.

På baggrund heraf kan man sige, at udviklingen af solvarmeteknologien er sat igang, og at der med de omtalte muligheder for prøvning og beregning af solfangeres effektivitet er ydet et bidrag til, at udviklingen kan fortsætte.

SUMMARY

In the report flat-plate solar collectors and solar water heating systems are treated. Only the efficiency of the solar collectors and the output of the solar heating systems are dealt with.

A detailed calculation model for solar collectors and a corresponding computer calculation programme is described. By means of the programme an analysis of the influence of the weather, the working and the installation conditions on the efficiency of typical solar collectors are performed.

Various methods for testing and presentation of the efficiency of solar collectors are described and evaluated. The influence of the testing conditions on the results are examined by means of the above-mentioned calculation programme.

A solar simulator facility for efficiency testing of solar collectors is described in detail. The qualities of and the experiences with the solar simulator are described.

The accuracy and the reproducibility of the testings made by means of the solar simulator facility are described and comparisons are made with test results obtained at other laboratories. The accordance of the indoor testings with real conditions is illustrated by calculations and measurements. Both with regard to the accuracy of the testings and to the accordance with the outdoor testings satisfactory results have been obtained.

The testing results of a considerable number of solar collectors available on the market are described and analysed on the basis of the maximum efficiency and the heat loss coefficient. It has thus been established that the testings can be used for a consumer-oriented evaluation as well as for development of solar collectors.

The aforementioned programme for a detailed calculation of the efficiency of solar collectors is compared with measured efficiencies, and a good accordance is found. The programme is

then used for calculation of the efficiency of several solar collectors during variation of the solar collector designs. Hereby it is shown that the programme, for one thing, can be of use for the development of solar collectors.

Solar heating systems used for domestic hot water are mentioned, and a simulation model for a chosen system design is made. The model is based on the results from testings of the solar collector efficiency and the thermal properties of the heat storages.

A simulation programme based on the established model is described. The programme, which can be run on a desk computer, normally uses a concentrated reference year of 36 days as a weather data basis. To the actual application there is a good accordance between the concentrated and the complete reference year.

The accuracy of the simulation programme has been investigated by comparison between measured and calculated output for different systems. In this way a reasonably good accordance has been found. After this the programme is used for a parameter analysis of solar heating systems with the main stress laid on the solar collectors' influence on the output. It is thus shown that the programme is applicable for development and dimensioning of solar heating systems.

SYMBOLLISTE

Visse steder anvendes der samme symbol for flere størrelser, men det vil dog klart fremgå ved omtalen af udtrykket hvilken størrelse, der aktuelt anvendes.

A	Forholdet mellem højde og tykkelse af luftspalte
A, A ₁ , A ₂	Absorptionskoefficient for ét transparent lag
A ₁₁	Absorptionskoefficient for lag 1 af to transparente lag med lag 1 forrest
A ₂₂	Absorptionskoefficient for lag 2 af to transparente lag med lag 1 forrest
A _{1d} , A _{2d}	Absorptionskoefficient for diffus stråling for ét transparent lag
A _{11d}	Absorptionskoefficient for diffus stråling for lag 1 af to transparente lag med lag 1 forrest
A _{22d}	Absorptionskoefficient for diffus stråling for lag 2 af to transparente lag med lag 1 forrest
A _k	Kanalens varmeoverførende areal pr. længdeenhed, (m ² /m ¹), m
A _r	Areal af randen, m ²
A _{s1a}	Resultierende absorptionskoefficient for absorber i ét-lags solfanger
A _{s2a}	Resultierende absorptionskoefficient for absorber i to-lags solfanger
A _{s11}	Resultierende absorptionskoefficient for det transparente lag i ét-lags solfanger
A _{s21}	Resultierende absorptionskoefficient for inderste lag i to-lags solfanger
A _{s22}	Resultierende absorptionskoefficient for yderste lag i to-lags solfanger
A _{s1ad}	Resultierende absorptionskoefficient for diffus stråling for absorber i ét-lags solfanger
A _{s11d}	Resultierende absorptionskoefficient for diffus stråling for det transparente lag i ét-lags solfanger
A _{s2ad}	Resultierende absorptionskoefficient for diffus stråling for absorber i to-lags solfanger
A _{s21d}	Resultierende absorptionskoefficient for diffus stråling for inderste transparente lag i to-lags solfanger

A_{s22d}	Resulterende absorptionskoefficient for diffus stråling for yderste transparente lag i to-lags solfanger
A_{vlv}	Tværsnitsareal af vandet i varmelageret, m^2
A_{vlg}	Tværsnitsareal af beholdervæggen i varmelageret, m^2
A_t	Transparent areal, m^2
C_1	Varmekapacitet af inderste (nr. 1) transparente lag $J/^\circ C$
C_2	Varmekapacitet af yderste (nr. 2) transparente lag $J/^\circ C$
C_a	Varmekapacitet af absorber, $J/^\circ C$
C_e	Effektiv varmekapacitet af solfanger, $J/^\circ C$
C_i	Varmekapacitet af isoleringen $J/^\circ C$
C_L	Hjælpestørrelse i udtryk for naturlig konvektion i hulrum
C_m	Varmekapacitet af væsken $J/^\circ C$
C_{ri}	Varmekapacitet af de indendørs rør $J/^\circ C$
C_{ru}	Varmekapacitet af de udendørs rør $J/^\circ C$
C_t	Hjælpestørrelse i udtryk for naturlig konvektion i hulrum
C_{vl}	Varmelagringskapacitet, $J/^\circ C$
E	Solintensitet, W/m^2
F	Pladens finnefaktor
Gr_b	Grashof-tallet for hulrum
H	Varmeoverføringsevnen af varmeveksleren $W/^\circ C$
H_1	Varmeoverføringsevnen temperaturkoefficient, $W/^\circ C^2$
H_0	Varmeoverføringsevnen af varmeveksleren ved en lagertemperatur på $0^\circ C$, $W/^\circ C$
K_d	Korrektionsfaktor for diffus stråling
K_f	Korrektionsfaktor for væske og væskestrøm
K_i	Korrektionsfaktor for indfaldsvinkel
K_{il}	Koefficient for vinkelafhængighed
K_{id}	Korrektionsfaktor for indfaldsvinkel og diffus stråling
K_{ri}	Varmetabskoefficient for indendørs rør, $W/^\circ C$
K_{ru}	Varmetabskoefficient for udvendige rør, $W/^\circ C$
K_s	Korrektionsfaktor for hældning
K_v	Korrektionsfaktor for vind
K_{vl}	Varmetabskoefficienten for lageret, $W/^\circ C$
$K_{vl(i)}$	Varmetabskoefficienten for det i'te lag i lageret, $W/^\circ C$
L	Længde af kanaler i solfanger, m
L_h	Kubikroden af volumen af hus, m
M_t	Tappet vandmængde i et tidsskridt, kg
M_{vl}	Vandmængde tappet fra lageret, kg
Nu	Nusselt-tal
P	Perimeteren i kanalen, m

Pr	Prandtl-tallet
Q_{i1}	Tilført varme til lageret fra solfangerkredsen, J
$Q_{n1}(i)$	Varmetab fra et lag i lageret til det underliggende, J
$Q_{o1}(i)$	Overført varme til det i'te lag fra det i-1'te, J
Q_{rktd}	Kapacitetstab af rørene ved drift af anlægget, J
Q_{rkts}	Kapacitetstab af rørene ved start af anlægget, J
Q_{rtt}	Transmissionstab for rør, J
Q_{su}	Solfangerudbytte over et tidsskridt, J
Q_{t1}	Varmetabet fra lageret, J
Q_{u1}	Bortført varme fra lageret ved tapning, J
$Q_{v1t}(i)$	Netto tilført varme til det i'te lag i lageret, J
R, R_1, R_2	Transmissionskoefficient for ét transparent lag
R_{12}	Reflektionskoefficient for to transparente lag, totalt med lag 1 forrest
R_{ab}	Rayleigh-tallet for luftspalten med tykkelsen b
R_{1d}, R_{2d}	Refleksionskoefficient for diffus stråling for ét transparent lag
Re_d	Reynold-tal
R_{12d}	Refleksionskoefficient for diffus stråling for to transparente lag, totalt med lag 1 forrest
S_s	Massestrømmen i solfangerkredsen, kg/s
T	Tværsnitsareal i kanal i m^2
T, T_1, T_2	Transmissionskoefficient for ét transparent lag
T_{12}, T_{21}	Transmissionskoefficient for to transparente lag, totalt med lag 1 forrest
T_a	Absolut temperatur af absorberen, K
T_h	Absolut formel temperatur af himlen, K
T_j	Absolut temperatur af jorden, K
T_{1i}	Absolut temperatur af det transparente lag (nr. 1) indvendigt, K
T_{1u}	Absolut temperatur af det transparente lag (nr. 1) udvendigt, K
V_1	Luftstrømmen ind i solfangeren, m^3/s
a_1	Forholdet mellem varmetabskoefficienten fra absorber til luft og fra det inderste transparente lag (nr. 1) til luften
a_2	Som for a_1 , blot for det yderste transparente lag
a	Absorptionskoefficient for absorberoverflade
a_n	Absorptionskoefficient for absorberoverflade ved normalt indfald

b	Brydningsvinkel
b	Kanalafstand, center-center, m
b ₁	Tykkelse af transparente lag (nr. 1), m
b _{aø}	Tykkelsen af absorberens øverste plade, m
b _{h1}	Tykkelsen af hulrummet (nr. 1), m
b _{ib}	Tykkelse af bagsideisoleringen, m
b _{ir}	Tykkelse af randisoleringen, m
b _p	Tykkelsen af absorberpladen, m
c _l	Varmefylde af luft, J/kg°C
c _e	Effektiv varmekapacitet pr areal, J/°Cm ²
c _s	Strålingstallet for det absolut sorte legeme W/m ² K ⁴
c _s	Solfangervæskens varmfylde J/kg°C
c _v	Vands varmfylde, J/kg°C
d	Kanalbredde udvendigt, m
d _h	Hydraulisk diameter af kanalen, m
d _{vl}	Diameteren af beholderen, m
e _a	Emissionskoefficienten for absorberoverfladen
e _{li}	Emissionskoefficienten for det transparente lag (nr. 1) indvendigt
e _{lu}	Emissionskoefficienten for det transparente lag (nr. 1) udvendigt
g	Gennemgangstal m.h.t. absorption
g	Tyngdeaccelerationen, m/s ²
h	Højden af et lag i varmelageret, m
h _f	Varmeoverføringskoefficienten for forbindelsen mellem plade og kanal pr. længdeenhed, W/m°C
h _m	Varmeoverføringskoefficienten for det varmetransporterende medium, W/m ² °C
i	Indfaldsvinkel
k	Ekstinktionskoefficient 1/m
k	Varmetabskoefficient, W/m ² °C
k _{aø}	Varmeledningsevnen for materialet i den øverste absorberplade, W/m°C
k _b	Varmetabskoefficient for solfanger ved begyndelsen af et tidsskridt, W/m ² °C
k ₁	Varmeledningskoefficienten for det transparente materiale i lag nr. 1, W/m°C
k _g	Varmeledningsevnen for godset i beholderen, W/m°C
k _h	Varmeledningskoefficienten for luft i hulrummet, W/m°C
k _{ib}	Varmeledningskoefficienten for bagsideisoleringen, W/m°C
k _{ir}	Varmeledningskoefficienten for randisoleringen, W/m°C
k _l	Varmetabskoefficientens temperaturkoefficient, W/m ² °C ²

k_m	Varmeledningskoefficienten for væsken, $W/m^{\circ}C$
k_o	Varmetabskoefficientens startværdi, $W/m^{\circ}C$
k_p	Varmetabskoefficient ved vindhastighed svarende til prøveforholdene, $W/m^{\circ}C$
k_p	Varmeledningskoefficienten for absorberpladen, $W/m^{\circ}C$
k_s	Varmetabskoefficient ved varierende vinkel med vandret, $W/m^{\circ}C$
k_{s1}	Varmetabskoefficientens vinkelkoefficient, $W/m^{\circ}C$
k_{so}	Varmetabskoefficient ved vandret solfanger, $W/m^{\circ}C$
k_{tab}	Varmetabskoefficienten for solfangerens bagside, $W/m^{\circ}C$
k_{tal}	Varmetabskoefficienten for varmetabet fra absorberen til det transparente lag, $W/m^{\circ}C$
k_v	Varmetabskoefficient ved varierende vindhastighed, $W/m^{\circ}C$
k_v	Varmeledningskoefficient for stillestående vand, $W/m^{\circ}C$
m	Karakteristisk størrelse for pladen, l/m
m_b	Overgangsisolansen ved bagsiden, $m^{\circ}C/W$
m_m	Væskens dynamiske viskositet, kg/ms
m_o	Væskens dynamiske viskositet ved overfladetemperaturen af kanalen, kg/ms
m_r	Overgangsisolansen ved randen, $m^{\circ}C/W$
n	Antal lag i modellen af lageret
n	Brydningsindeks
n	Effektivitet af solfanger
n	Kinematiske viskositet, m^2/s
n_a	Effektiviteten under aktuelle forhold med hensyn til væske og væskestrøm
n_b	Effektivitet af solfanger ved begyndelsen af et tidsskridt
n_o	Maksimaleffektivitet af solfanger
n_m	Væskens kinematiske viskositet, m^2/s
n_p	Effektiviteten under prøveforholdene med hensyn til væske og væskestrøm
n_{vv}	Varmevekslerens effektivitet
p	Tidsskridtets længde, s
p_d	Diffus del af solintensiteten
q_o	Effekt overført fra absorberens overflade til det varmetransporterende medium i en absorber, W/m^2
q_{o1}	Effekt overført fra absorberens overflade til det varmetransporterende medium i en type 1 absorber, W/m^2
q_{o2}	Effekt overført netto til det varmetransporterende medium i en type 2 absorber, W/m^2

q_{o3}	Effekt overført netto til det varmetransporterende medium i en type 3 absorber, W/m^2
q_{o4}	Effekt overført netto til det varmetransporterende medium i en type 4 absorber, W/m^2
q_a	Absorberet solstråling i absorber, W/m^2
q_{as1a}	Absorberet solstråling i absorber i 1-lags solfanger, W/m^2
q_{as1l}	Absorberet solstråling i transparent lag i 1-lags solfanger, W/m^2
q_{as2a}	Absorberet solstråling i absorber i 2-lags solfanger, W/m^2
q_{as2l}	Absorberet solstråling i det inderste (nr. 1) transparente lag i solfanger, W/m^2
q_{as22}	Absorberet solstråling i det yderste (nr. 2) transparente lag i solfanger, W/m^2
q_{khl}	Varmeoverførsel i hulrummet (nr. 1) ved konvektion og ledning, W/m^2
q_{ku}	Varmetab udvendigt ved konvektion, W/m^2
q_{lb}	Varmetab gennem bagsiden, W/m^2
q_{1lu}	Varmeoverførsel i det transparente lag (nr. 1), W/m^2
q_{2lu}	Varmeoverførsel i det transparente lag (nr. 2), W/m^2
q_{lr}	Varmetab gennem randen, W/m^2
q_{shl}	Varmeoverførsel i hulrummet (nr. 1) ved stråling, W/m^2
q_{su}	Varmetab udvendigt ved stråling, W/m^2
q_{vh1}	Varmetab ved ventilation i hulrum 1, W/m^2
q_{vh2}	Varmetab ved ventilation i hulrum 2, W/m^2
r	Refleksionskoefficient for én grænseflade
r_l	Massefylde af luft, kg/m^3
r_x	Refleksionskoefficient for én grænseflade
r_y	Refleksionskoefficient for én grænseflade
s	Solfangerens vinkel med vandret
t_{li}	Temperaturen af det transparente lags inderside, $^{\circ}C$
t_{lu}	Temperaturen af det transparente lags yderside, $^{\circ}C$
t_a	Temperaturen af absorberoverfladen, $^{\circ}C$
t_f	Temperaturen af forbindelsen mellem plade og kanal, $^{\circ}C$
t_k	Temperaturen af kanalen, $^{\circ}C$
t_l	Lufttemperaturen, $^{\circ}C$
t_{li}	Lufttemperatur indendørs, $^{\circ}C$
t_{lp}	Lufttemperaturen ved solfangerprøvningen, $^{\circ}C$
t_{lu}	Lufttemperatur udendørs, $^{\circ}C$
t_m	Middeltemperatur af det varmetransporterende medium, $^{\circ}C$

t_{mb}	Temperatur af væsken ved begyndelsen af et tidsskridt, °C
t_{mil}	Temperaturen af det varmetransporterende medium ved indløb til varmelagerets varmeveksler, °C
t_{ms}	Temperatur af væsken ved begyndelsen af et tidsskridt, °C
t_{mul}	Temperaturen af det varmetransporterende medium ved udløb fra varmelagerets varmeveksler, °C
t_{pm}	Middeltemperaturen af absorberpladen, °C
t_{px}	Temperaturen af absorberpladen, °C
t_{rib}	Temperaturen af de indendørs rør ved tidsskridtets begyndelse, °C
t_{ris}	Temperaturen af de indendørs rør ved tidsskridtets slutning, °C
t_{ris-}	Temperaturen af de indendørs rør ved slutningen af det foregående tidsskridt, °C
t_{rub}	Temperatur af de udendørs rør ved tidsskridtets begyndelse, °C
t_{rus}	Temperatur af de udendørs rør ved tidsskridtets slutning, °C
t_{rus-}	Temperaturen af udendørs rør ved slutningen af det foregående tidsskridt, °C
t_t	Tappetemperaturen
t_{vk}	Temperaturen af det kolde brugsvand, °C
t_{vl}	Temperaturen af vandet i varmelageret, °C
$t_{vl(i)}$	Temperaturen af vandet i det i'te lag i lageret, °C
$t_{vl(i+1)}$	Temperaturen af vandet i det i+1'te lag i lageret, °C
$t_{vl(n)}$	Temperaturen af vandet i det øverste lag i lageret, °C
t_{vlb}	Temperaturen af vandet i varmelageret ved begyndelsen af et tidsskridt, °C
t_{vls}	Temperaturen af vandet i varmelageret ved slutningen af et tidsskridt, °C
$t_{vlb(i)}$	Temperaturen af det i'te lag i varmelageret ved begyndelsen af et tidsskridt, °C
$t_{vls(i)}$	Temperaturen af det i'te lag i varmelageret ved slutningen af et tidsskridt, °C
u	Rumudvidelseskoefficienten for luft, 1/°C
v	Vindhastighed, m/s
v	Strømningshastigheden af væske i kanal, m/s
x	Afstand fra midt mellem rør, m

REFERENCELISTE

- (1) Svendsen, S: Solvarmesystemer. Definition og principper. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. Meddelelse nr. 33. oktober 1974.
- (2) Kristensen, P.E. & Nielsen, C, & Svendsen, S: Rapport vedrørende prøvning af solfangere. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Meddelelse nr. 74. januar 1978.
- (3) Ellehauge, K. & Nielsen, C. & Svendsen, S: Rapport vedrørende prøvning af solfangere. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Meddelelse nr. 86. juli 1979.
- (4) Svendsen, S.: Effektivitetsprøvning af solfangere. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Meddelelse nr. 107. november 1980.
- (5) Duffie, J.A. & Beckman, W.A.: Solar Energy Thermal Processes. 1974.
- (6) Svendsen, S.: Analyse af visse vejrparametres indflydelse på solfangeres termiske effektivitet. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Juli 1977.
- (7) Brandemuehl, M.J & Beckman, W.A.: Transmission of diffuse radiation through CPC and flat plate collector glazings. Solar Energy, Vol. 24 pp. 511-513, 1980.
- (8) Duffie, John A. & Beckman, W.A.: Solar Engineering of Thermal Processes. 1980.
- (9) Raithby, G.D. & Hollands, K.G.T. & Unny, T.E.: Analysis of Heat Transfer by Natural Convection Across Vertical Fluid Layers. Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer. May 1979, Vol. 99, 287.
- (10) Gillett, W.B.: The Equivalence of Outdoor and Mixed Indoor/Outdoor Solar Collector Testing. Solar Energy, Vol. 25, pp 543-548, 1980.

- (11) Becher P.: Varme og Ventilation 1. Grundlaget og isolering. Teknisk Forlag. 1971.
- (12) Ravn, O. & Svendsen, S.: Beskrivelse af program til beregning af solfangeres effektivitet. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Rapport nr. 81-11. Marts 1981.
- (13) Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors. ASHRAE Standard 93-77.
- (14) DIN 4757, Teil 4, Sonnenkollektoren, Bestimmung von Wirkungsgrad, Wärmekapazität und Druckabfall
- (15) Svensk Standard 1782. Termiska solfångare med vätske som värmebärare - Termiska prestanda - Provning.
- (16) Svendsen, S.: Theoretical Investigation of the Methodical Errors of the BSE-Procedure for Testing Solar Collectors. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark. Report no. 78-27. November 1978.
- (17) Svendsen, S.: Project Reporting Form for CCMS. Solar Energy Project. Thermal Insulation Laboratory. December 1974.
- (18) Svendsen, S.: Måling af effektiviteten af en solfangersektion på nul-energi-huset. Danmarks Tekniske Højskole. Laboratoriet for Varmeisolering. Juni 1976.
- (19) Krægpøth, K.: Indendørs prøvestand for afprøvning af solfangere.
- (20) W.B. Gillett: Solar Simulators and Indoor Testing. Paper presented at the Meeting of the International Solar Society, U.K. Section - April 1977. Solar Energy Unit, University College, Cardiff.
- (21) Bergqvist, P.: Del 1: Matning av irradians och illuminans for strålkastare fabr. Thorn, typ CSI 1000 C. Del 2: Matning av relativ spektral irradians for lampa fabr. Thorn, typ CSI 1000 C. Statens Provningsanstalt, Borås

- (22) Svendsen, S.: Programmer til HP9825 til effektivitetsprøvning af solfangere. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Rapport nr. 81-12. Marts 1981.
- (23) Svendsen, S.: Undersøgelse af målenøjagtigheden i solsimulatoropstillingen. LfV, DTH. Rapport 81-13. Marts 1981.
- (24) Andersson, H.E.B. m.fl.: Kalibrering och provning av pyranometrar. Statens Provningsanstalt. SP-RAPP 1981:1.
- (25) Plazy, Jean-Louis: Compte-Rendu Final de la Comparaison des Pyrhéliometres Étalons, Carpentras, Janvier 1979.
- (26) Results and Analysis of IEA, Round Robin Testing, Kernforschungsanlage Julich.
- (27) Derrick, A.: Results and Analysis of the Round Robin Testing of the Fourth Solar Collector in the European Community Programme. University College, Cardiff.
- (28) Ekstrøm, Leif, Lagerkvist, Knut-Olof & Wennerholm, Hans: Provning af solfångare för uppvärmning av tappvarmvatten på uppdrag av konsumentverket.
- (29) Lov om statstilskud til udnyttelse af vedvarende energikilder m.v. vedtaget 28.maj 1979.
- (30) Beckman, W.A. & Klein, S.A. & Duffie, J.A.: Solar Heating Design by the f-Chart Method.
- (31) Bason, Frank & Vest Hansen, T: Beregningsprogram til solvarmeanlæg. Energiministeriets solvarmeprogram. Rapport nr. 4.
- (32) Bisgaard, Carl & Lønbæk, Erik: Vurdering af Solvarmeanlæg, Bind I, eksamensprojekt.
- (33) Kielsgård Hansen, Kurt & Lawaetz, Henrik: Måling af Overfladers Absorptionskoefficient med Thorn Lampe og

Strålingsmåler. Rapport nr. 78-28, Laboratoriet for Varmeisolering.

- (34) Svendsen, S.: Termografisk undersøgelse af absorptorplade i solfanger. Maj 1975.
- (35) Emissometer Model AE Operating Instructions, Devices & Services Company, Dallas, Texas, U.S.A.
- (36) BPS - fælles tegningsprincipper, med eksempelsamling, BPS-publikation 21, januar 1979.
- (37) Furbo, Simon: Prøvning af Varmelagerunits til Solvarmeanlæg. Rapport nr. 5. Energiministeriets Varmelagerprojekt. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole.
- (38) Ravn, O. & Svendsen, S.: Foreløbig beskrivelse af program til beregning af solvarmeanlægs ydelse. SIMSOL-HP-85. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Rapport nr. 81-14. Maj 1981.
- (39) Lawaetz, Henrik: Solindfald og Solvarmeanlæg - målt og beregnet. Meddelelse nr. 108. Oktober 1980. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole.
- (40) Lawaetz, Henrik: Beregning af Solindfald, Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Meddelelse nr. 42. December 1975.
- (41) Ellehauge, Klaus: To Solvarmeanlæg til Varmt Brugsvand. En beskrivelse og vurdering efter 4 måneders drift af anlæggene. Energiministeriets Solvarmeprogram. Rapport nr. 12.

