Optimal udformning af low flow solvarmeanlæg

Simon Furbo

Meddelelse nr. 238

December 1992

Laboratoriet for Varmeisolering
Danmarks Tekniske Højskole

Forord

Denne rapport beskriver arbejdet, som er gennemført under projektet: "Små low flow solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning". Projektet, som er finansieret af Energiministeriet, er en del af programområde 5: "Energianvendelse i bygninger" under ministeriets forskningsprogram EFP-91. Projektets journal nr. er 1213/91-0005.

Foruden denne rapport er artiklen: "Low flow gi'r bonus" udarbejdet til Vedvarende energi & miljø 4/91 august 1991. Desuden er der udarbejdet to papers: "Low flow solar heating systems - theory and practice" til ISES konferencen i Denver i august 1991 og "Optimum designed heat storage for small low flow systems" til North Sun' 92 konferencen i Trondheim i juni 1992.

Projektet er gennemført på Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, med deltagelse af medarbejderne:

Simon Furbo, civilingeniør, Ph.D.
Peter Fagerlund Carlsson, civilingeniør
Martin Dandanell, maskinarbejder
Christina Dipo Zimmermann, assistent
Mette Flagstad Brand, teknisk tegner

Resumé

Ydelsen af tre forskelligt udformede små low flow solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning blev målt under ensartede driftsbetingelser. De tre anlæg har forskellige varmelagre: Det første anlæg har en varmtvandsbeholder med en indbygget varmevekslerspiral fra toppen til bunden af tanken.

Det andet anlæg har en varmtvandsbeholder og en varmevekslingskreds med en ekstern varmeveksler. Varmen overføres til varmtvandsbeholderen ved at vand ved naturlig konvektion cirkulerer fra bunden af beholderen gennem varmeveksleren til toppen af beholderen. Det tredje anlæg har en kappebeholder som varmelager.

Målingerne viste, at forskellene mellem ydelserne for de tre anlægstyper er små. Kun for perioder med små dækningsgrader for solvarmeanlægget er der forskelle af betydning. I disse perioder yder kappebeholderanlægget mest, anlægget med den eksterne varmeveksler næstmest og spiralbeholderanlægget mindst.

Der blev gennemført beregninger af den årlige ydelse for det af Aidt Miljø ApS markedsførte low flow solvarmeanlæg. Beregningerne, som blev gennemført med forskelligt udformede varmelagre, viste, at et anlæg med et perfekt varmelager med størst mulig temperaturlagdeling yder ca. 19 % mere end standardanlægget med en kappebeholder.

Halvdelen af denne forøgelse kan opnås ved effektivt at forhindre temperaturudjævningen i varmelageret. Den anden halvdel af forøgelsen kan opnås ved at gøre varmetilførslen fra solfangervæsken til brugsvandet ideel, således at varmen tilføres lageret i det rigtige niveau og således at varme ikke føres nedad i varmelageret med den cirkulerende solfangervæske.

Der blev gennemført prisundersøgelser for de tre afprøvede anlægstyper med de forskellige varmelagre. Prisforskellene mellem de tre anlægstyper er små. På basis af pris- og ydelsesundersøgelserne kan det konkluderes, at små low flow solvarmeanlæg tilsyneladende ikke kan forbedres ved at erstatte kappebeholderen med en anden lagertype.

De markedsførte solfangeres egnethed til low flow drift blev undersøgt. Undersøgelserne viste, at solfangerne er velegnede til at indgå i low flow solvarmeanlæg.

Omfanget af problemerne med kritisk høje anlægstemperaturer for små low flow solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning blev klarlagt ved hjælp af beregninger. For anlæg med ét solfangerelement kan problemerne løses ved hjælp af små kuldebroer og/eller ved hjælp af et styresystem, som sikrer en stor volumenstrøm når anlægstemperaturerne bliver høje.

For nogle solvarmeanlæg med to solfangerelementer må problemerne løses på en anden måde. For de fleste anlæg med to solfangerelementer kan benyttelse af et styresystem, som sikrer cirkulation i solfangerkredsen med en stor volumenstrøm i perioder med kritisk høje lagertemperaturer, sikre så stor en køling af tanken om natten, at der ikke opstår kritisk høje anlægstemperaturer.

For anlæg med to højeffektive solfangerelementer eller med mere end to solfangerelementer må problemerne imidlertid løses anderledes.

Endelig blev følgerne af uønsket selvcirkulation i solfangerkredsen om natten belyst. Beregninger viste, at anvendelse af små rørdiametre i solfangerkredsens rør kan reducere varmetabet fra varmelageret ved uønsket selvcirkulation om natten. Beregningerne viste imidlertid også, at det ikke er muligt at eliminere varmelagerets varmetab forårsaget af selvcirkulation om natten ved at reducere rørdiameteren. Altså er det nødvendigt at forhindre selvcirkulation i solfangerkredsen på en anden måde.

Summary

Side-by-side tests of three small low flow solar heating systems for domestic hot water supply have been carried out under realistic conditions. The three systems are identical, apart from the design of the heat storage and the principle used to transfer heat from the solar collector loop to the heat storage.

The first system has a hot water tank with a built-in heat exchanger spiral as the heat storage. The second system has a hot water tank and a heat exchanger loop with an external heat exchanger placed below the tank. Heat is transferred to the hot water tank by means of water circulating in the heat exchanger loop by natural convection from the bottom of the tank through the heat exchanger to the top of the tank. The third system has a mantle hot water tank as the heat storage.

The measurements showed that the thermal performance of one low flow system is not much different from the thermal performance of the other low flow systems. Only in periods with small solar fractions there will be differences of importance. The mantle heat storage system performs better than the system with the external heat exchanger, while the system with the hot water tank with the built-in heat exchanger spiral performs worst in these periods.

Calculations of the yearly thermal performance for the low flow system marketed by Aidt Miljø were carried out. The calculations were carried out with different heat storages. A system with a perfectly stratified heat storage will perform about 19 % better than the standard mantle heat storage system.

About half of this improvement can be obtained by avoiding temperature equalization in the heat storage. The second half of the improvement can be obtained by an improved heat transfer mechanism that ensures that heat from the solar collector fluid only is transferred to the "right" level in the hot water tank and that heat is not transferred downwards inside the tank by means of the circulating solar collector fluid.

Investigations of the costs for the three tested systems were carried out. The cost differences between the three systems are small.

Based on the tests and on the cost investigations it can be concluded that small low flow systems can not be improved by replacing the mantle heat storage tank with another heat storage type.

The suitability for low flow operation for different marketed solar collectors was investigated. The solar collectors marketed in Denmark are suitable for low flow solar heating systems.

The range of the problems with high system temperatures for small low flow solar heating systems for domestic hot water supply have been elucidated by means of calculations. For systems with only one collector panel the problems can be solved by means of introducing thermal bridges and/or using a control system which ensures a high volume flow rate for high system temperatures.

For some systems with two collector panels the problems have to be solved differently. For most of these systems the problems can be solved by means of a control system which ensures a high volume flow rate in the solar collector loop during nights if the temperatures are too high. However, if the solar collector efficiency is very high or if more than two collector panels are used the problems have to be solved differently.

Finally the heat loss from the mantle heat storage caused by solar collector fluid thermosyphoning in the solar collector loop during nights was considered. The heat loss is decreasing for decreasing pipediameters in the solar collector loop.

However, the heat loss can not be eliminated by means of extremely small pipes. Therefore it is necessary to design the system in such a way that thermosyphoning in the solar collector loop is avoided by other means.

Indhold

Forord 1

Resumé 2

Summary 3

1. Indledning 1

2. Forsøg 2

2.1 Forsøgsanlæg 2
2.2 Måleresultater 3

3. Ideel og optimal udformning af varmelager 7

4. Markedsførte solfangeres effektivitet ved små volumenstrømme 11

5. Driftsproblemer 13

5.1 Høje anlægstemperaturer 13
5.1.1 Baggrund 13
5.1.2 Beregningsforudsætninger 13
5.1.3 Beregnede maksimale temperaturer 16
5.1.4 Styresystem som forhindrer høje anlægstemperaturer 37
5.1.5 Sammenfatning 41
5.2 Selvcirkulation i solfangerkreds 42

6. Konklusion 44

Referencer 46

1. Indledning

Teoretiske undersøgelser og laboratoriemæssige forsøg har vist, at ydelsen af low flow solvarmeanlæg er 10 - 20 % højere end ydelsen af traditionelle solvarmeanlæg, [1], [2], [3], [4], [5].

Desuden har undersøgelser af små low flow solvarmeanlæg i praksis vist, at anlæggene kan fungere uden driftsproblemer med særdeles høje ydelser, [6]. Undersøgelserne viste imidlertid også, at nogle af anlæggene var behæftede med alvorlige fejl. To problemer, som således kræver effektive løsninger, er: Kogning i solfangerkredsen i sommerferieperioder uden varmtvandsforbrug og selvcirkulation i solfangerkredsen om natten.

Foruden forøgede ydelser muliggør anvendelsen af low flow princippet en billiggørelse af anlæggene.

Dette projekt har til formål at pege på optimale, pålidelige og holdbare udformninger af små low flow solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning.

2. Forsøg

2.1 Forsøgsanlæg

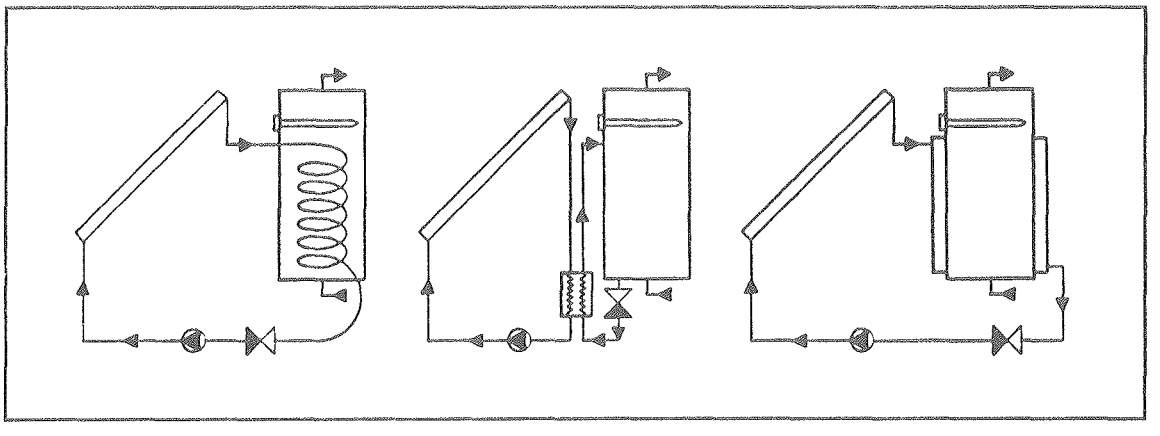
Hovedårsagen til low flow solvarmeanlægs høje ydelser er den store fordelagtige temperaturlagdeling, som opbygges i varmelageret under solfangernes drift. Derfor har varmelagerudformningen stor indflydelse på low flow solvarmeanlægs ydelser. De eksperimentelle undersøgelser i dette projekt blev derfor koncentreret om betydningen af varmelagerets udformning.

Tre små low flow solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning blev afprøvet. Det første anlæg har en varmtvandsbeholder med en indbygget varmevekslerspiral fra toppen til bunden af tanken. Varmevekslerspiralen er et 13 m 22/20 mm rustfrit stålrør.

Det andet anlæg har en varmtvandsbeholder og en 3/4" stålrør varmevekslingskreds med en ekstern varmeveksler, som er placeret under varmtvandsbeholderen. Varmen overføres til varmtvandsbeholderen ved at vand ved naturlig cirkulation cirkulerer fra bunden af beholderen gennem varmeveksleren til toppen af tanken. Anlæg udformet på denne måde markedsføres i Canada. Varmeveksleren er en pladevarmeveksler type PO 25/21, som markedsføres af Power Trans A/S. For typiske driftsbetingelser er varmeoverføringsevnen for denne varmeveksler ca 200 W/K.

Det tredje anlæg benytter en kappebeholder som varmelager. Kappen, som indeholder 27 l solfangervæske, har en indvendig diameter på 46 cm, en udvendig diameter på 51 cm og en højde på 84 cm.

Altså overføres varmen fra solfangerkredsene til brugsvandet på forskellige måder i de tre anlæg. Næsten den samme vertikale udstrækning gående fra niveauet lige under de i tankene indbyggede elpatroner til bunden af tankene benyttes til varmeoverførslen i de tre anlæg. Figur 1 viser en skematisk illustration af de tre anlæg.



Figur 1. Skematisk illustration af de tre afprøvede low flow solvarmeanlæg.

Varmelagrene i alle de tre anlæg er 200 l opretstående cylinderformede varmtvandsbeholdere. Beholdermaterialet for anlægget med den eksterne varmeveksler er rustfrit stål. Beholdermaterialet for de to øvrige tanke er St 37-2.

En elpatron på 1000 W er indbygget i den øverste femtedel af hver tank, således at der også i solfattige perioder kan tappes varmt vand fra tankene.

Varmelagrene er på sider og top isoleret svarende til 5 cm mineraluld. Bundene af varmelagrene er ikke isoleret. For hvert anlæg benyttes et 4,0 m² solfangerpanel fra Aidt Miljø ApS som solfanger. Solfangereffektiviteten er ved en volumenstrøm på 1,2 l/min pr m² solfanger og en solfangerhældning på 45° bestemt af udtrykket:

$$\eta = 0{,}74 - 5{,}8 \cdot (Tm - Tl) / E - 0{,}020 \cdot (Tm - Tl)^2 / E$$

hvor Tm er middelvæsketemperaturen i solfangeren, Tl er lufttemperaturen og E er bestrålingsstyrken.

Vand benyttes som solfangervæske i alle tre anlæg. Solfangerkredsens rørsystemer er opbygget af 12/10 mm kobberrør isoleret med 20 mm polyethylencelleplast. Anlæggenes pumper er styret af en differenstermostat med en temperaturføler placeret øverst på absorberen og en temperaturføler placeret i bunden af varmelageret. Pumpen startes når temperaturforskellen mellem toppen af absorberen og bunden af varmelageret bliver 10 K. Pumpen stoppes igen når temperaturforskellen mellem toppen af absorberen og bunden af varmelageret bliver mindre end 2 K. Volumenstrømmene i solfangerkredsene er 0,15 l/min pr m² solfanger.

2.2 Måleresultater

De tre anlæg, som var installeret ved siden af hinanden på laboratoriets prøvestand for solvarmeanlæg, blev afprøvet under de samme realistiske betingelser: Bestrålingsstyrken på solfangene var den samme og der blev dagligt tappet 200 l vand ved 45°C fra hvert anlæg.

Fire gange dagligt blev der tappet 50 l vand ved 45°C fra hvert anlæg: kl. 8, 12, 18 og 20. Elpatronerne tilfører varme til lageret, hvis temperaturen i toppen af varmelageret er mindre end 50°C.

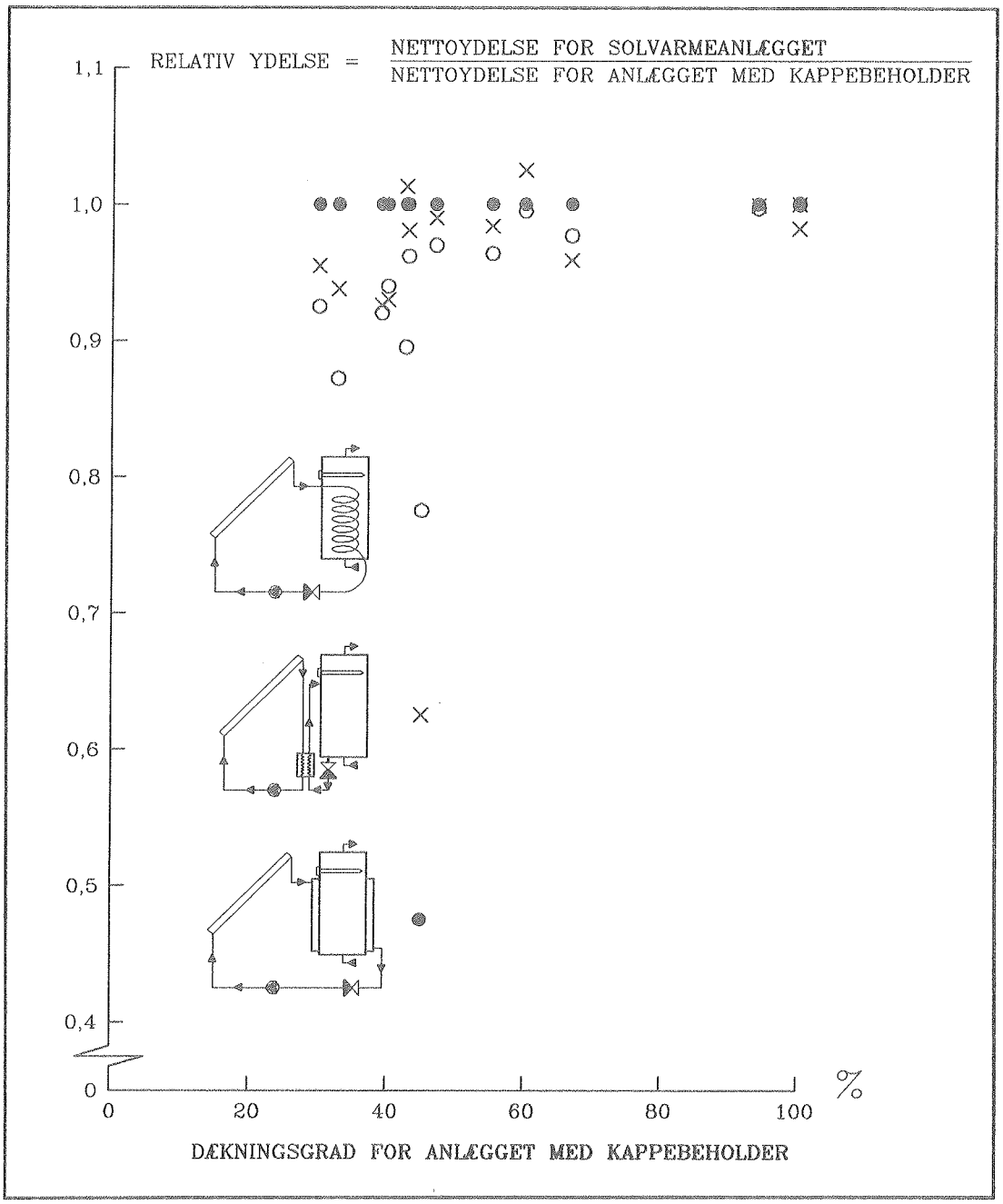
Afprøvningerne startede i april 1992. Det gode vejr i sommeren 1992 resulterede i 100 % dækningsgrader for alle tre anlæg i mange af afprøvningsperioderne, som alle havde en varighed på en uge.

Måleresultaterne er sammenfattet på figur 2. Figuren viser for forskellige afprøvningsperioder de målte relative ydelser for spiralbeholderanlægget, for anlægget med den eksterne varmeveksler og for kappebeholderanlægget som funktion af dækningsgraden for kappebeholderanlægget.

Den relative ydelse for et anlæg er defineret som forholdet mellem nettoydelsen for anlægget og nettoydelsen for kappebeholderanlægget. Derfor er den relative ydelse for kappebeholderanlægget 1,00 for alle afprøvningsperioder.

Nettoydelsen er defineret som tappet energi fra varmelageret minus elpatronens energiforbrug. Dækningsgraden er defineret som: (tappet energi fra varmelageret ÷ elpatronens energiforbrug)/tappet energi fra varmelageret.

Hvert punkt på figuren angiver måleresultater for anlæggene for en periode af en uges varighed. Viser et målepunkt, at den relative ydelse for et anlæg er 0,95, betyder det at ydelsen for det pågældende anlæg var 5 % lavere end ydelsen af kappebeholderanlægget i den pågældende uge.



Figur 2. Målte relative ydelser for tre low flow solvarmeanlæg som funktion af dækningsgraden for anlægget med kappebeholderen.

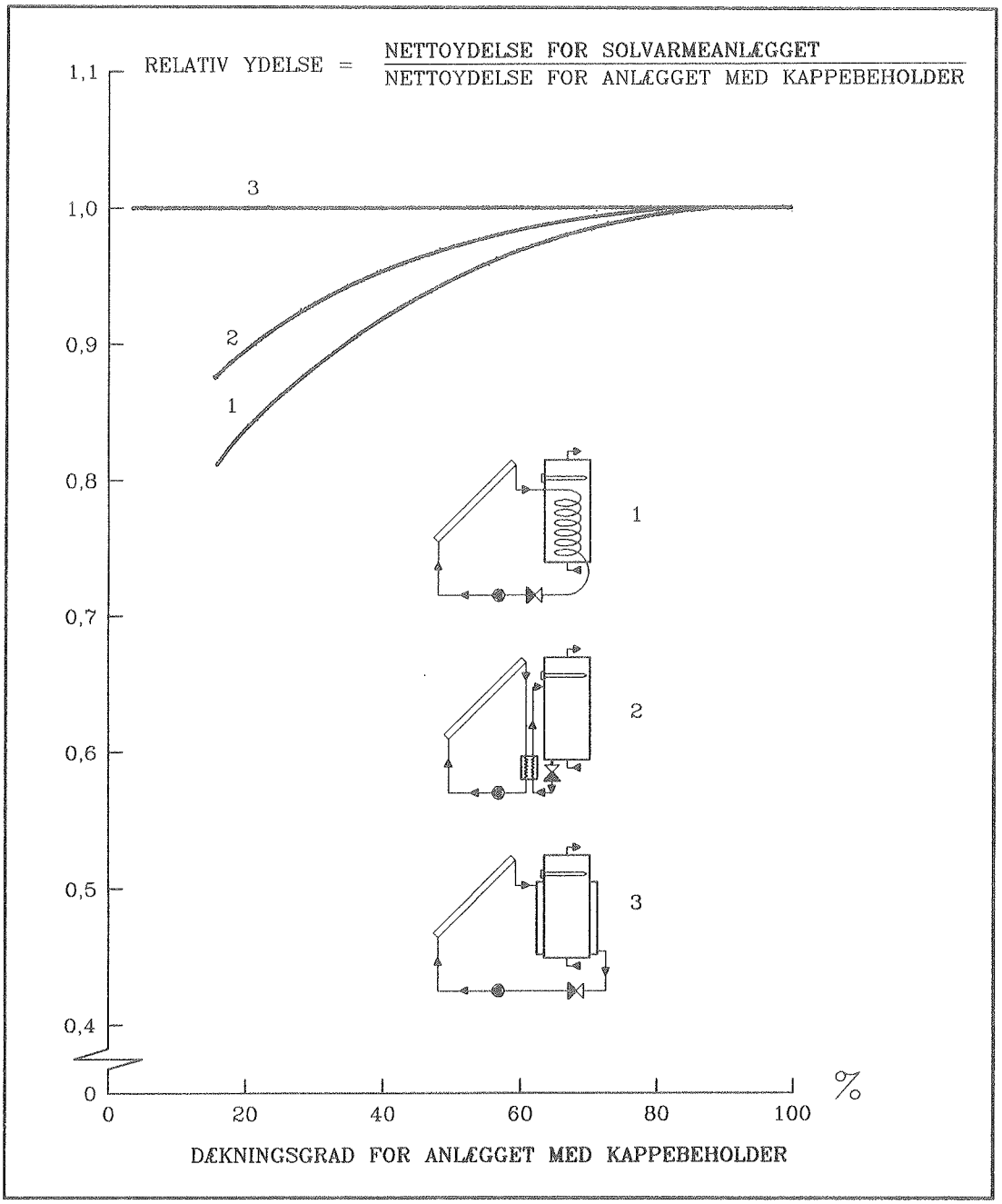
Den lange solrige sommer resulterede i, at der ikke er perioder med dækningsgrader mellem 70 % og 90 %. Af figuren ses, at forskellene mellem ydelserne for de tre afprøvede anlæg er små. Kun i perioder med små dækningsgrader er der forskelle af betydning. Spiralbeholder-anlægget yder normalt mindst i disse perioder, mens kappebeholderanlægget yder mest.

Anlægget med den eksterne varmeveksler yder i de fleste perioder næstmest, dog yder det i enkelte perioder mest og i andre perioder mindst. Årsagen til disse små variationer er, at varmeoverføringsevnen fra solfangerkredsen til varmelageret afhænger stærkt af bestrålings-styrken. I perioder med små bestrålingsstyrker cirkulerer vandet i varmevekslingskredsen ikke eller så langsomt ved naturlig konvektion, at anlægsydelsen reduceres. I perioder uden skyer synes vandet til gengæld ved naturlig konvektion at cirkulere på en sådan måde, at temperaturlagdelingen i varmtvandsbeholderen opbygges på en speciel fordelagtig måde med høje ydelser til følge.

Endvidere er måleresultaterne forsøgt sammenfattet på figur 3. Figuren viser tilnærmede kurver gældende for de tre afprøvede anlægstyper. Figuren kan benyttes for perioder af vilkårlig varighed, f.eks. perioder af 1 uges, 1 måneds eller 1 års varighed.

For at undersøge hvorledes anlægsydelserne påvirkes af volumenstrømmen blev der gennemført yderligere målinger med forøgede volumenstrømme i solfangerkredsene for spiralbeholderanlægget og for anlægget med den eksterne varmeveksler.

Sammenholdes disse undersøgelser med undersøgelserne af volumenstrømmens indflydelse på ydelsen af kappebeholderanlæg [1], er det muligt at konkludere: Gøres volumenstrømmen i de tre anlægstyper større end 0,15 - 0,25 l/min pr. m² solfanger reduceres anlægsydelsen. Anlægsydelsen reduceres mest for anlægget med den eksterne varmeveksler, næstmest for spiralbeholderanlægget og mindst for kappebeholderanlægget. Altså er kappebeholderan-lægget mindst sårbart over for en fejlagtig indstilling af volumenstrømmen.



Figur 3. Tilnærmede relative ydelser for tre low flow solvarmeanlæg som funktion af dækningsgraden for anlægget med kappebeholderen.

3. Ideel og optimal udformning af varmelager

Ud fra et ydelsesmæssigt synspunkt er et ideelt varmelager til et low flow solvarmeanlæg udformet på en sådan måde, at temperaturlagdelingen i varmelageret opbygges i størst muligt omfang under solfangernes drift og at temperaturlagdelingen ikke nedbrydes, hverken i perioder med eller uden solfangerdrift.

For at klarlægge betydningen af varmelagerets udformning for anlægsydelsen blev der med det i [4] og [5] omtalte simuleringsprogram gennemført en række beregninger af årsydelsen for low flow solvarmeanlæg med forskelligt udformede varmelagre. Anlægget, som blev taget i beregning, fremgår af tabel 1.

Referenceårets vejrdata benyttes i beregningerne, som er gennemført med fire forskellige varmelagerudformninger: Kappebeholderen med St 37-2 som beholdermateriale, kappebeholderen med rustfrit stål som beholdermateriale, kappebeholderen uden vertikal varmeledning - hverken i beholdermaterialet, i solfangervæsken i kappen eller i brugsvandet i beholderen og kappebeholderen uden vertikal varmeledning og med en varmeoverføringsmekanisme, som sikrer at solfangervæskens varme altid overføres til det rigtige niveau i varmtvandsbeholderen og at varme aldrig transporteres nedad i varmelageret med den cirkulerende solfangervæske. Denne fjerde kappebeholder er næsten et perfekt varmelager med størst mulig temperaturlagdeling.

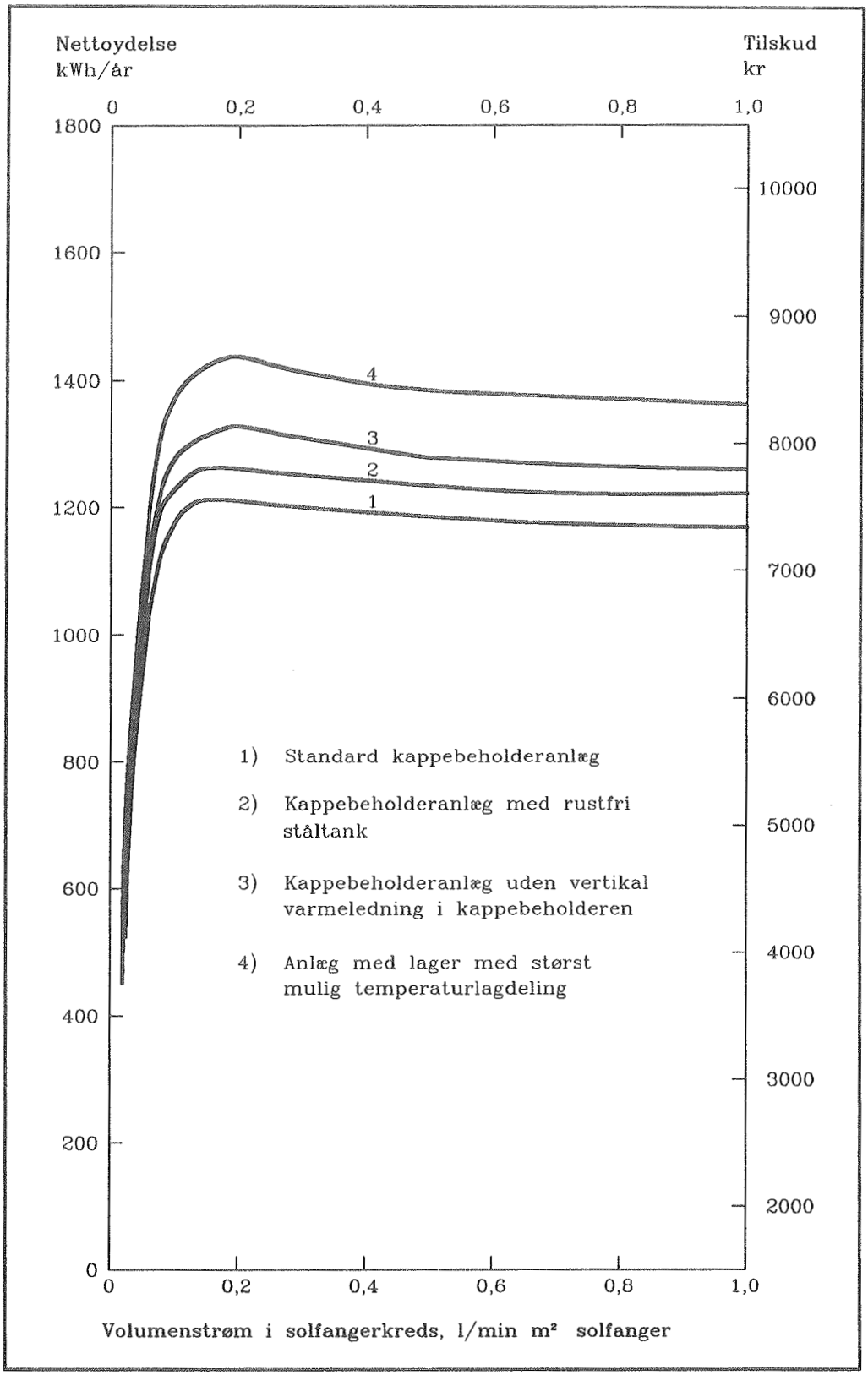
Anlæggets årlige nettoydelse beregnes som anlæggets årlige bruttoydelse ÷ årligt energiforbrug til cirkulationspumpen ÷ energiforbrug til elpatronen om sommeren ÷ energiforbrug til vintersupplering via en varmevekslerspiral i toppen af varmtvandsbeholderen.

Anlæggets tilskud beregnes af formlen: (årlig nettoydelse + 300) · 5 kr.
Beregningsresultaterne er vist på figur 4. Anlæggets årlige ydelse forøges med ca 4 %, hvis kappebeholderens materiale ændres fra almindeligt stål til rustfrit stål, som er mindre varmeledende.

Endvidere ses, at et anlæg med et perfekt varmelager med størst mulig temperaturlagdeling yder ca 19 % mere end standardanlægget, som markedsføres af Aidt Miljø ApS i dag. Halvdelen af denne forøgelse kan opnås ved effektivt at forhindre temperaturudjævningen i varmelageret. Den anden halvdel af forøgelsen kan opnås ved at gøre varmetilførslen fra solfangervæsken til brugsvandet ideel, således at varmen tilføres lageret i det rigtige niveau og således at varme ikke føres nedad i varmelageret med den cirkulerende solfangervæske. Disse teoretisk beregnede forbedringer kan dog ikke opnås i praksis uden stærkt forøgede anlægspriser.

SOLFANGER	
Fabrikat	Aidt Miljø A/S
Type	LF4
Solfangerareal	3,84 m²
Solfangereffektivitet for små indfaldsvinkler	$0\eta = 0{,}74 - 6{,}5 \cdot \frac{T_m - T_l}{E}$
Varmekapacitet for solfangeren	32000 J/m²K
Solfangerhældning	45°
Solfangerorientering	sydvendt
Solfangervæske	30 % propylenglykol/vandblanding
Volumenstrøm i solfangerkreds	0,15 l/min m² solfanger
KAPPEBEHOLDER	
Varmtvandsbeholder	
Volumen	280 l
Diameter	500 mm
Højde	1432 mm
Godstykkelse	3 mm
Kappe	
Volumen	19 l
Diameter	535 mm
Højde	821 mm
Vandvolumen over kappen	100 l
Godstykkelse	3 mm
Elpatron	
Effekt	1100 W
Vandvolumen over elpatronen	90 l
Termostattemperatur	50°C
Isolering	
Isoleringsmateriale	PUR skum
Isoleringstykkelse bund	ca 20 mm
sider	32-50 mm
top	70-115 mm
Varmetabskoefficient ved 60°C under drift	2,4 W/K
Lageromgivelsestemperatur	20°C
SOLFANGERKREDS	
Rørmateriale	kobber
Ydre diameter	15 mm
Indre diameter	13 mm
Isoleringsmateriale	glasuld
Isoleringstykkelse	10 mm
Længde af fremløbsrør til lager udendørs	1,25 m
Længde af returrør fra lager udendørs	1,25 m
Længde af fremløbsrør til lager indendørs	3,75 m
Længde af returrør fra lager indendørs	3,75 m
Cirkulationspumpeeffekt	30 W
STYRESYSTEM	
Differenstermostatstyring med en føler i bunden af kappen og en i solfangeren	
Startdifferens	6 K
Stopdifferens	2 K

Tabel 1. Data for solvarmeanlægget, som tages i beregning.



Figur 4. Beregnede årlige nettoydelser og tilskud for low flow solvarmeanlæg med forskellige varmelagre som funktion af volumenstrømmen i solfangerkredsen.

Priser for den samme beholdertype varierer fra fabrikant til fabrikant, og prisforskelle mellem forskellige beholdertyper varierer ligeledes fra fabrikant til fabrikant. For eksempel er kappebeholderprisen mindre end spiralbeholderprisen for nogle fabrikanter, mens det forholder sig omvendt for andre fabrikanter. Udformningen af beholderfabrikanternes standardbeholdere har afgørende betydning for disse forhold.

Beholderfabrikanten, som producerer beholdere til Aidt Miljø's markedsførte low flow anlæg, oplyser, at kappebeholderprisen er den samme som spiralbeholderprisen. Baseret på disse oplysninger og på oplysninger fra Aidt Miljø er priserne for fire forskelligt udformede low flow anlæg med et 4 m² Aidt Miljø solfangerelement og et 280 l varmelager angivet i tabel 2. Desuden er anlæggenes årlige nettoydelser og tilskuddets størrelser angivet. Ydelser og tilskud er beregnet for de to kappebeholderanlæg, mens ydelser og dermed tilskud for de to øvrige anlæg er fundet ved hjælp af figur 3.

Af tabellen ses, at standard kappebeholderanlægget er det mest fordelagtige efterfulgt af kappebeholderanlægget med en rustfri ståltank, af spiralbeholderanlægget, og af anlægget med en standard varmtvandsbeholder og en ekstern varmeveksler.

Altså kan low flow solvarmeanlæg tilsyneladende ikke forbedres ved at erstatte kappebeholderen med en anden lagertype.

	Kappebeholder-anlæg	Spiralbeholder-anlæg	Anlæg med standard varmtvandsbeholder og ekstern varme-veksler	Kappebeholder-anlæg med rustfri ståltank
4 m² solfangerelement	5710	5710	5710	5710
Beslag for opsætning	360	360	360	360
Beholder inkl. varmeveksler i top for suppleringsvarme og PUR-isolering	6955	6955	6100	9955
Ekstern varmeveksler			2000	
Elvarmelegeme i beholder	1060	1060	1060	1060
Sikkerhedsaggregat og skoldnings-sikring	770	770	770	770
Styring og pumpe indbygget i varme-lager	4860	4860	4860	4860
Åbent ekspansionssystem	465	465	465	465
Solfangerkreds	480	480	480	480
Glykol (20 kr/l)	300	190	150	300
Div. fittings	900	900	900	900
Installation	6100	6100	6100	6100
I alt	27960	27850	28955	30960
I alt inkl. 25 % moms	34950 kr	34812 kr	36194 kr	38700 kr
Tilskud	7560	7120	7305	7810
Forbrugerpris	27390 kr	27692 kr	28889 kr	30890 kr
Nettoydelse	1212 kWh/år	1124 kWh/år	1161 kWh/år	1262 kWh/år
Nettoydelse/Forbrugerpris	0,044 kWh/år kr	0,041 kWh/år kr	0,040 kWh/år kr	0,041 kWh/år kr

Tabel 2. Priser og årlige nettoydelser for 4 forskelligt udformede low flow anlæg med et 4 m² Aidt Miljø solfangerelement og et 280 l varmelager.

4. Markedsførte solfangeres effektivitet ved små volumenstrømme

Igennem de sidste år er der i forbindelse med afprøvning af markedsførte solfangere gennemført enkelte målinger af solfangereffektiviteten med flow, som er mindre end den normalt anvendte 0,02 kg/s pr. m² solfanger.

Volumenstrømmens indflydelse på solfangereffektiviteten er normalt lille, når sammenligningen af effektiviteterne foretages med samme middelsolfangervæsketemperatur. Derfor er der i [7] indført en korrektionsfaktor F_f, som benyttes til at bestemme effektiviteten ved små volumenstrømme ud fra effektiviteten ved en normal volumenstrøm:

$$F_f = \frac{\eta \ low\ flow}{\eta \ normal\ flow}$$

hvor $\eta_{low\,flow}$ er solfangereffektiviteten ved en lille volumenstrøm og $\eta_{normal\,flow}$ er solfangereffektiviteten ved den normalt anvendte volumenstrøm ved samme middelsolfangervæsketemperatur.

I [7] er det detaljeret beskrevet, hvorledes F_f bestemmes på basis af måleresultater. Størrelsen af F_f for en række markedsførte solfangere er bestemt på basis af måleresultater fra [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14] og [15]. De bestemte korrektionsfaktorer for volumenstrømmen som funktion af volumenstrømmen fremgår af figur 5.

Det ses, at volumenstrømmens indflydelse på F_f og dermed på solfangereffektiviteten er lille. Jo større F_f er for små volumenstrømme des bedre egner solfangeren sig til anvendelse i low flow solvarmeanlæg.

Den optimale volumenstrøm i solfangerkredsen for små low flow solvarmeanlæg er beliggende i intervallet fra 0,15 l/min pr. m² solfanger til 0,25 l/min pr. m² solfanger. Det ses, at effektiviteten af de afprøvede solfangere typisk kun ændres med nogle få procent, hvis volumenstrømmen reduceres fra 1,2 l/min pr. m² solfanger til 0,2 l/min pr. m² solfanger. Derfor kan det konkluderes, at de markedsførte solfangere er velegnede til low flow solvarmeanlæg.

Normalt reduceres solfangereffektiviteten når volumenstrømmen reduceres fra 1,2 l/min pr. m² solfanger til 0,2 l/min pr. m² solfanger. For en enkelt solfanger, Aidt Miljø's LW, forholder det sig modsat. For denne solfanger forøges effektiviteten. Denne solfanger synes altså at være særlig velegnet til low flow solvarmeanlæg.

En række forhold har betydning for hvorledes F_f afhænger af volumenstrømmen. Blandt andet kan nævnes:

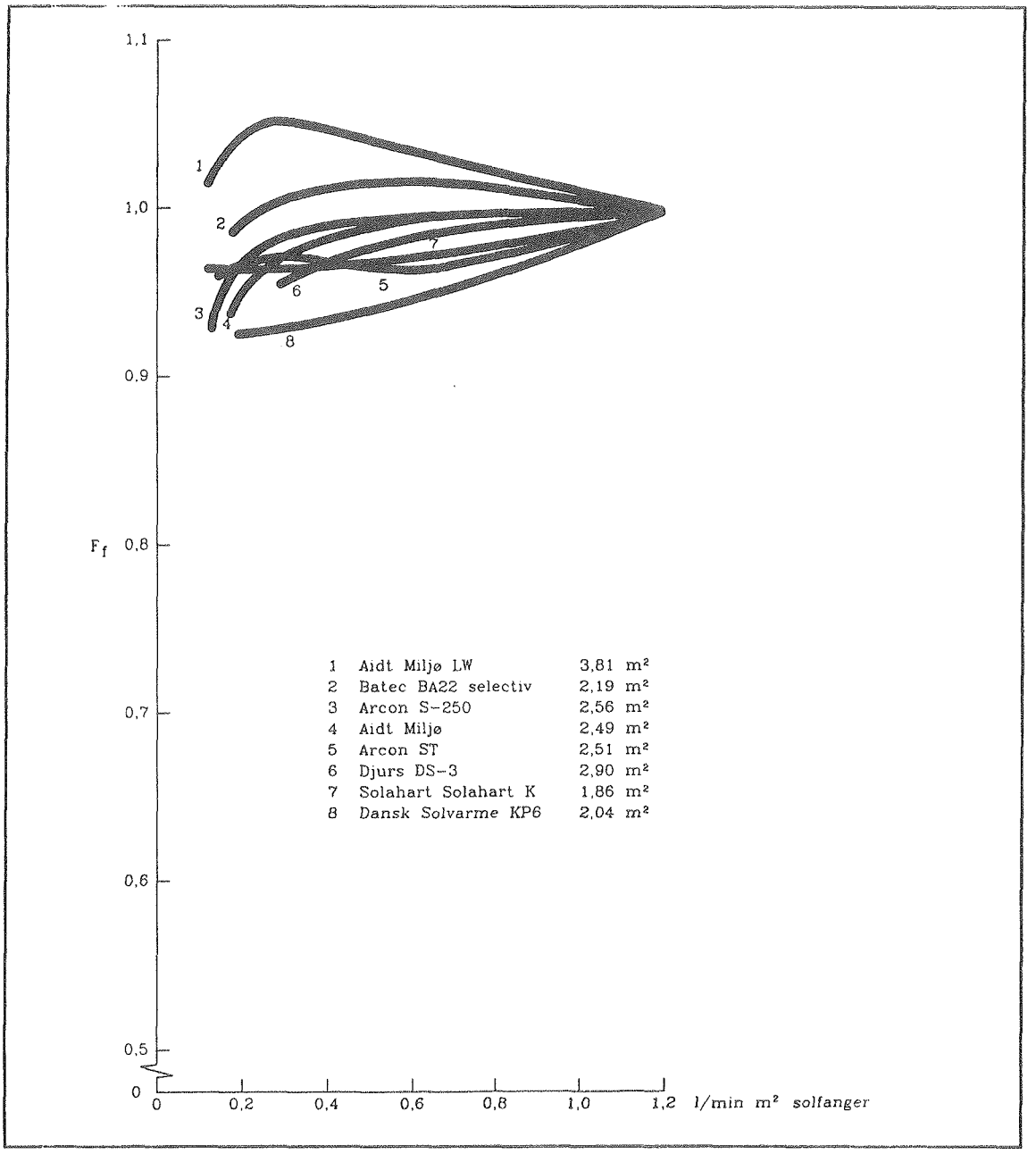
- Varmeoverførslen fra absorberen til solfangervæsken reduceres normalt når volumenstrømmen reduceres. Dette vil resultere i en reduktion af effektiviteten og dermed af F_f.

- Når volumenstrømmen reduceres forøges temperaturlagdelingen i solfangeren. Denne temperaturlagdeling har betydning for bevægelsesmønstret for luften mellem absorberen og dæklaget. Dette bevægelsesmønster påvirker solfangerens varmetabskoefficient og dermed solfangereffektiviteten og F_f.

- Placeringen af kuldebroer i solfangeren. For eksempel vil en kuldebro i den "varme" del af solfangeren reducere effektiviteten og dermed F_f mest, når volumenstrømme reduceres.

- Størrelsen af solfangerelementet.

I det hele taget er forholdene i solfangerne så komplicerede, at det er særdeles vanskeligt beregningsmæssigt at bestemme F_f for forskellige volumenstrømme for hver enkelt solfanger. Derfor er det en fordel at det er muligt at bestemme F_f ved hjælp af målinger.



Figur 5. Korrektionsfaktor for volumenstrømmen F_f som funktion af volumenstrømmen for forskellige markedsførte solfangere.

5. Driftsproblemer

Erfaringer fra praksis har vist [6], at der kan opstå to alvorlige problemer i forbindelse med driften af low flow solvarmeanlæg: Kritisk høje temperaturer i solfangerkredsen og i varmtvandsbeholderen i sommerferieperioder uden varmtvandsforbrug og selvcirkulation i solfangerkredsen om natten.

De høje temperaturer i solfangerkredsen kan for eksempel resultere i at der opstår kogning i solfangeren. I de følgende to afsnit er omfanget af problemerne forsøgt belyst, og der er peget på anlægsudformninger, som kan reducere størrelsen af problemerne.

5.1 Høje anlægstemperaturer

5.1.1 Baggrund

Normalt benyttes propylenglycol/vand-blandinger som solfangervæsker. Kogepunktet for disse blandinger afhænger af trykforholdene i solfangerkredsen. Blandingerne nedbrydes hvis temperaturen bliver for høj. Endvidere tåler solvarmeanlæggets cirkulationspumpe ikke solfangervæsketemperaturer højere end 110°C. Endelig er den maksimalt tilladelige temperatur i varmtvandsbeholdere under normal drift 95°C. Altså er det vigtigt, at solvarmeanlæg udformes og styres således, at der ikke opstår for høje temperaturer - hverken i solfangerkredsen eller i varmtvandsbeholderen - specielt i solrige sommerferieperioder uden varmtvandsforbrug.

I det følgende er de maksimale temperaturer i et standard low flow solvarmeanlæg med forskellige solfangere beregnet. Temperaturerne er beregnet uden varmtvandsforbrug med referenceårets vejrdata.

5.1.2 Beregningsforudsætninger

Anlægget, som tages i beregning, fremgår af tabel 3. Anlægget er bortset fra solfangerne identisk med det af Aidt Miljø markedsførte low flow solvarmeanlæg.

I beregningerne forudsættes endvidere, at solfangervæsken er en 30 % propylenglycol/vand-blanding.

De maksimale returtemperaturer fra solfangeren og de maksimale varmtvandstemperaturer beregnes med den i [4] og [5] omtalte simuleringsmodel med referenceårets vejrdata uden varmtvandsforbrug. Herved simuleres forholdene under en sommerferieperiode.

Otte forskellige markedsførte solfangere tages i beregning. Solfangernes effektiviteter, som er bestemt ved afprøvning i laboratoriets solsimulator [8], [9], [10], [13], [14], [16], [17], [18], er angivet i tabel 4. Solfangernes effektiviteter uden vind langs dæklaget er bestemt ved hjælp af den i [19] angivne metode. Disse effektiviteter uden vindpåvirkning benyttes i beregningerne.

Det vurderes, at disse høje effektiviteter opvejer det faktum, at der i virkeligheden kan være sommerperioder, som er varmere og mere solrige end referenceårets "værste" periode. Solfangerne vender mod syd i alle beregningerne.

KAPPEBEHOLDER	
Varmtvandsbeholder	
Volumen	280 l
Diameter	500 mm
Højde	1432 mm
Godsmateriale	St 37-2
Godstykkelse	3 mm
Kappe	
Volumen	19 l
Diameter	535 mm
Højde	821 mm
Vandvolumen over kappen	100 l
Godsmateriale	St 37-2
Godstykkelse	3 mm
Elpatron	
Effekt	1100 W
Vandvolumen over elpatronen	90 l
Termostattemperatur	50°C
Isolering	
Isoleringsmateriale	PUR skum
Isoleringstykkelse bund sider top	ca 20 mm 32-50 mm 70-115 mm
Varmetabskoefficient ved 60°C under drift	2,4 W/K
Lageromgivelsestemperatur	20°C
SOLFANGERKREDS	
Rørmateriale	kobber
Ydre diameter	15 mm
Indre diameter	13 mm
Isoleringsmateriale	glasuld
Isoleringstykkelse	10 mm
Længde af fremløbsrør til lager udendørs	1,25 m
Længde af returrør fra lager udendørs	1,25 m
Længde af fremløbsrør til lager indendørs	3,75 m
Længde af returrør fra lager indendørs	3,75 m
Cirkulationspumpeeffekt	30 W
STYRESYSTEM	
Differenstermostatstyring med en føler i bunden af kappen og en i solfangeren	
Startdifferens	6 K
Stopdifferens	2 K

Tabel 3. Data for solvarmeanlægget, som tages i beregning.

Solfanger Fabrikat Type	Aidt Miljø LW		Dansk Solvarme KP VI		Batec BA 22 selectiv		Solahart Solahart K		Arcon ST		Djurs Solvarme DS-3		Ans Solvarme 2,6 SEL		Arcon S-250	
Solfangerareal, m²	3,84		2,01		2,19		1,86		2,51		2,90		2,60		2,56	
Dæklag	6 mm polycarbonat kanalplade		4 mm glas		4 mm glas		3,3 mm glas		4,4 mm glas og en teflonfolie		10 mm polycarbonat kanalplade		5 mm glas		10 mm polycarbonat kanalplade	
Effektiv varmekapacitet, J/K m²	32000		15000		7000		15000		7000		4800		5000		4900	
Maksimal effektivitet	0,74		0,85		0,77		0,91		0,82		0,69		0,70		0,68	
k_0 og k_1 W/m²K og W/m²K²																
For en vindhastighed på 5 m/s langs dæklaget - for forskellige solfangerhældninger fra vandret:																
0°	5,88	0,0206	6,05	0	5,48	0,0082	6,62	0,0022	5,03	0	2,95	0,0219	3,91	0,0223	1,98	0,0242
15°	5,84	0,0205	5,77	0	5,30	0,0079	6,46	0,0022	4,87	0	2,90	0,0215	3,66	0,0209	1,94	0,0237
30°	5,80	0,0204	5,50	0	5,13	0,0076	6,30	0,0021	4,70	0	2,84	0,0210	3,42	0,0195	1,90	0,0232
45°	5,76	0,0202	5,22	0	4,96	0,0074	6,14	0,0021	4,54	0	2,78	0,0206	3,17	0,0181	1,86	0,0227
60°	5,72	0,0201	4,94	0	4,79	0,0071	5,98	0,0020	4,38	0	2,73	0,0202	2,92	0,0167	1,82	0,0222
75°	5,68	0,0199	4,66	0	4,61	0,0069	5,82	0,0020	4,22	0	2,67	0,0198	2,68	0,0153	1,78	0,0218
90°	5,64	0,0198	4,38	0	4,44	0,0066	5,66	0,0019	4,06	0	2,61	0,0194	2,43	0,0139	1,74	0,0213
Beregnede størrelser uden vind langs dæklaget - for forskellige solfangerhældninger fra vandret:																
0°	4,70	0,0165	5,27	0	4,76	0,0071	5,76	0,0020	4,63	0	2,72	0,0201	3,40	0,0194	1,82	0,0223
15°	4,67	0,0164	5,02	0	4,61	0,0069	5,62	0,0019	4,48	0	2,66	0,0197	3,19	0,0182	1,78	0,0218
30°	4,64	0,0163	4,78	0	4,46	0,0066	5,48	0,0019	4,32	0	2,61	0,0194	2,97	0,0170	1,75	0,0214
45°	4,61	0,0162	4,54	0	4,31	0,0064	5,34	0,0018	4,18	0	2,56	0,0190	2,76	0,0158	1,71	0,0209
60°	4,58	0,0161	4,30	0	4,16	0,0062	5,20	0,0018	4,03	0	2,51	0,0186	2,54	0,0145	1,67	0,0205
75°	4,54	0,0159	4,05	0	4,01	0,0060	5,06	0,0017	3,88	0	2,46	0,0182	2,33	0,0133	1,64	0,0200
90°	4,51	0,0158	3,81	0	3,86	0,0058	4,92	0,0017	3,74	0	2,41	0,0178	2,11	0,0121	1,60	0,0196

Tabel 4. Data for de 8 solfangere, som tages i beregning.

5.1.3 Beregnede maksimale temperaturer

De beregnede maksimale temperaturer i solfangerne og i varmtvandsbeholderne fremgår af figur 6 - 25.

Figur 6 - 21 viser de maksimale temperaturer for forskellige solfangertyper og - arealer som funktion af solfangerhældningen og for en solfangerhældning på 45° som funktion af placering og størrelse af en kuldebro. For hver solfangertype er der gennemført beregninger for anlæg både med et og med to solfangerelementer. I alle disse beregninger er der benyttet en volumenstrøm i solfangerkredsen på 0,15 l/min pr m² solfanger.

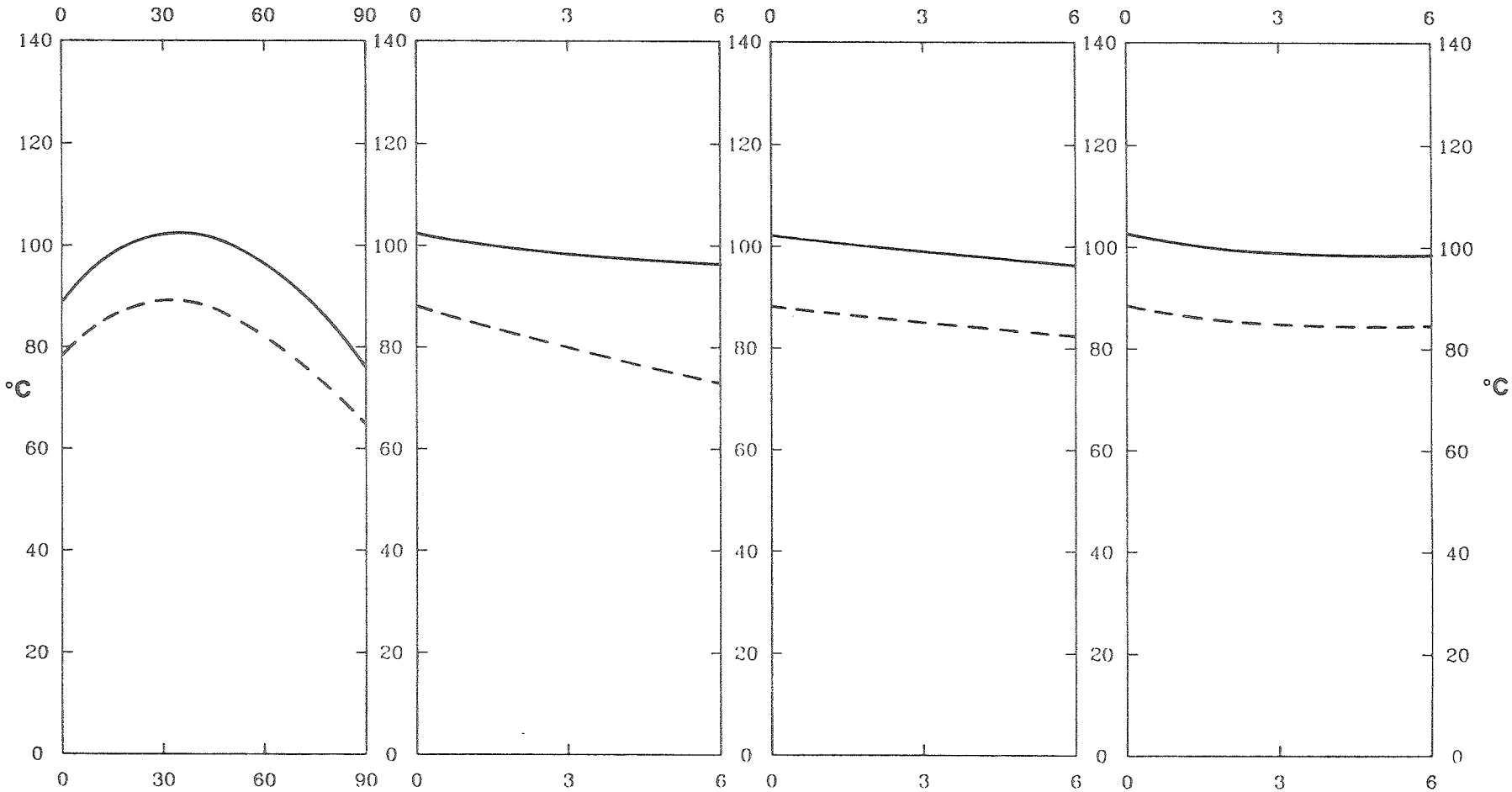
For alle solfangerne opnås de maksimale anlægstemperaturer for solfangerhældninger mellem 30° og 45° fra vandret. For de fleste anlæg med ét solfangerelement bliver de maksimale temperaturer ikke kritisk høje, hvorimod de maksimale anlægstemperaturer kan blive kritisk høje for anlæg med to solfangerelementer og for nogle få anlæg med ét solfangerelement.

En kuldebro placeret i solfangerkredsen eller i bunden af varmtvandsbeholderen reducerer ikke anlægsydelsen mærkbart. Derfor er sådanne kuldebroer velegnede til at reducere de maksimale temperaturer, som opnås i sommerferieperioder. Af figurerne ses, at for anlæg med ét solfangerelement kan rimeligt små kuldebroer reducere de maksimale temperaturer til et acceptabelt niveau. Imidlertid kan rimeligt små kuldebroer ikke løse problemet med for høje temperaturer for de fleste anlæg med to solfangerelementer.

Figur 22 - 25 viser de maksimale anlægstemperaturer for en solfangerhældning på 45° og for forskellige solfangertyper og - arealer som funktion af volumenstrømmen i solfangerkredsen.

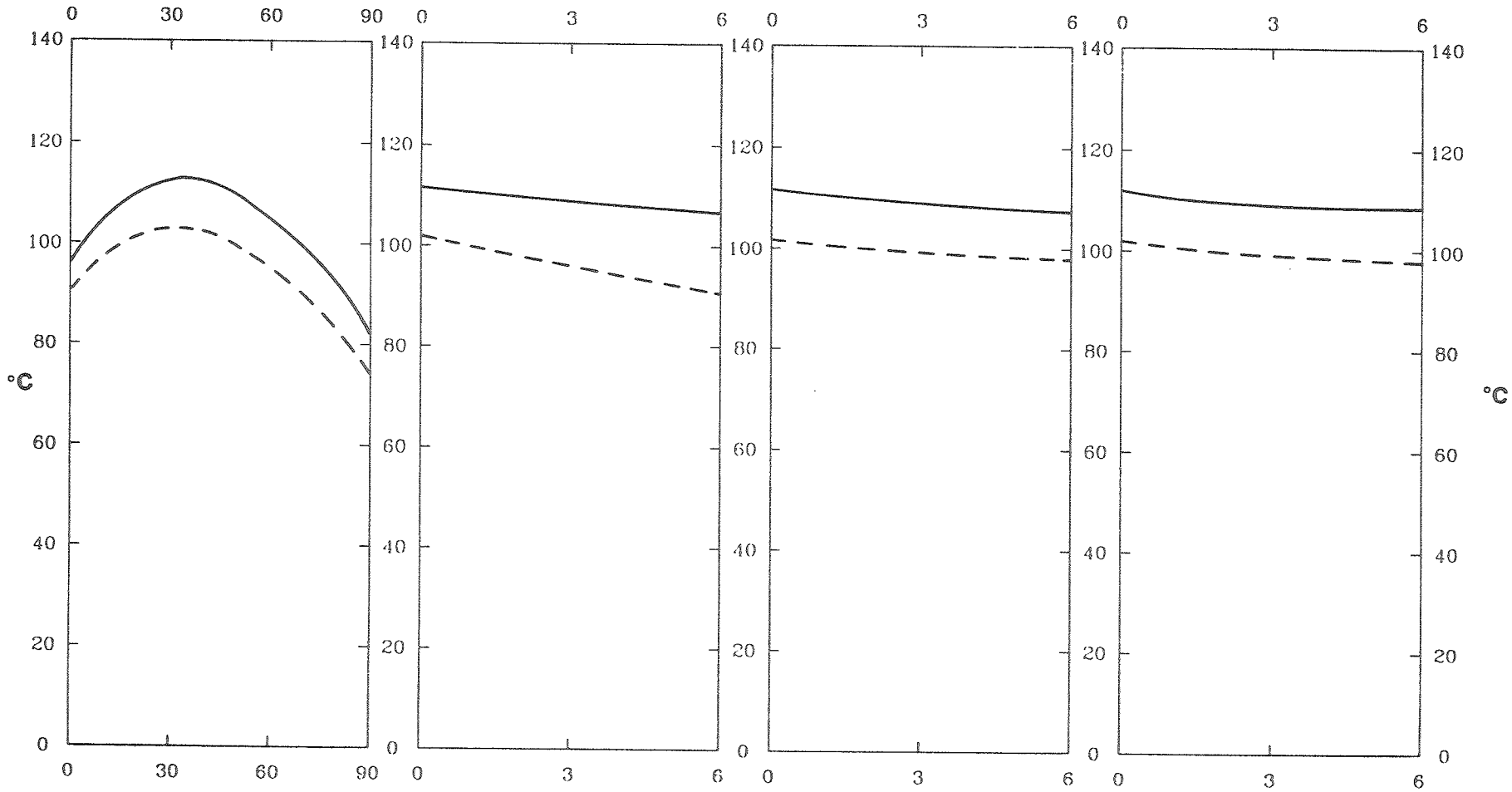
Jo større volumenstrømmen er des mindre er de maksimale anlægstemperaturer. Derfor kan et styresystem, som forøger volumenstrømmen når solfangertemperaturerne bliver høje, reducere de maksimale anlægstemperaturer. Et sådant styresystem markedsføres i dag af Aidt Miljø. Det ses dog også, at en forøgelse af volumenstrømmen ikke kan løse problemet med de høje temperaturer for alle anlæg. Problemet må derfor for nogle anlæg løses anderledes. En mulig løsning er at benytte det af Aidt Miljø markedsførte styresystem, som foruden at forøge volumenstrømmen når der nås høje solfangertemperaturer også sikrer, at solfangervæsken pumpes rundt i solfangerkredsen om natten hvis lagertemperaturen er for høj. Egnetheden af dette styresystem er forsøgt vurderet i følgende afsnit.

Figur 6. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af solfangerhældningen (til venstre) og for en solfangerhældning på 45° (i midten og til højre) som funktion af størrelse og placering af en kuldebro for et 3,84 m² Aidt Miljø anlæg med en volumenstrøm på 0,15 l/min m² solfanger.



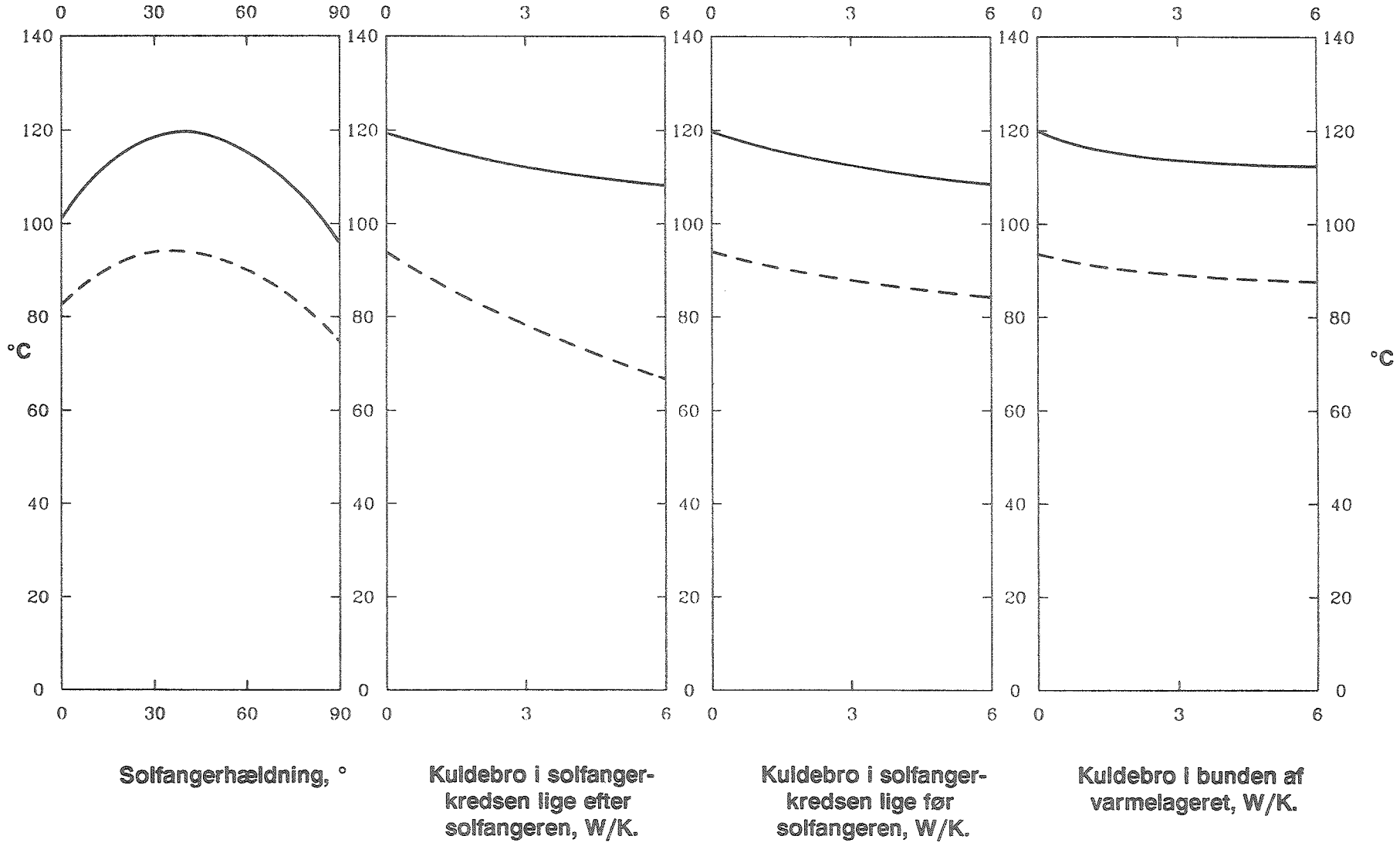
Maksimal solfangertemperatur ————
Maksimal lagertemperatur - - - - -

Figur 7. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af solfangerhældningen (til venstre) og for en solfangerhældning på 45° (i midten og til højre) som funktion af størrelse og placering af en kuldebro for et 7,68 m² Aidt Miljø anlæg med en volumenstrøm på 0,15 l/min m² solfanger.

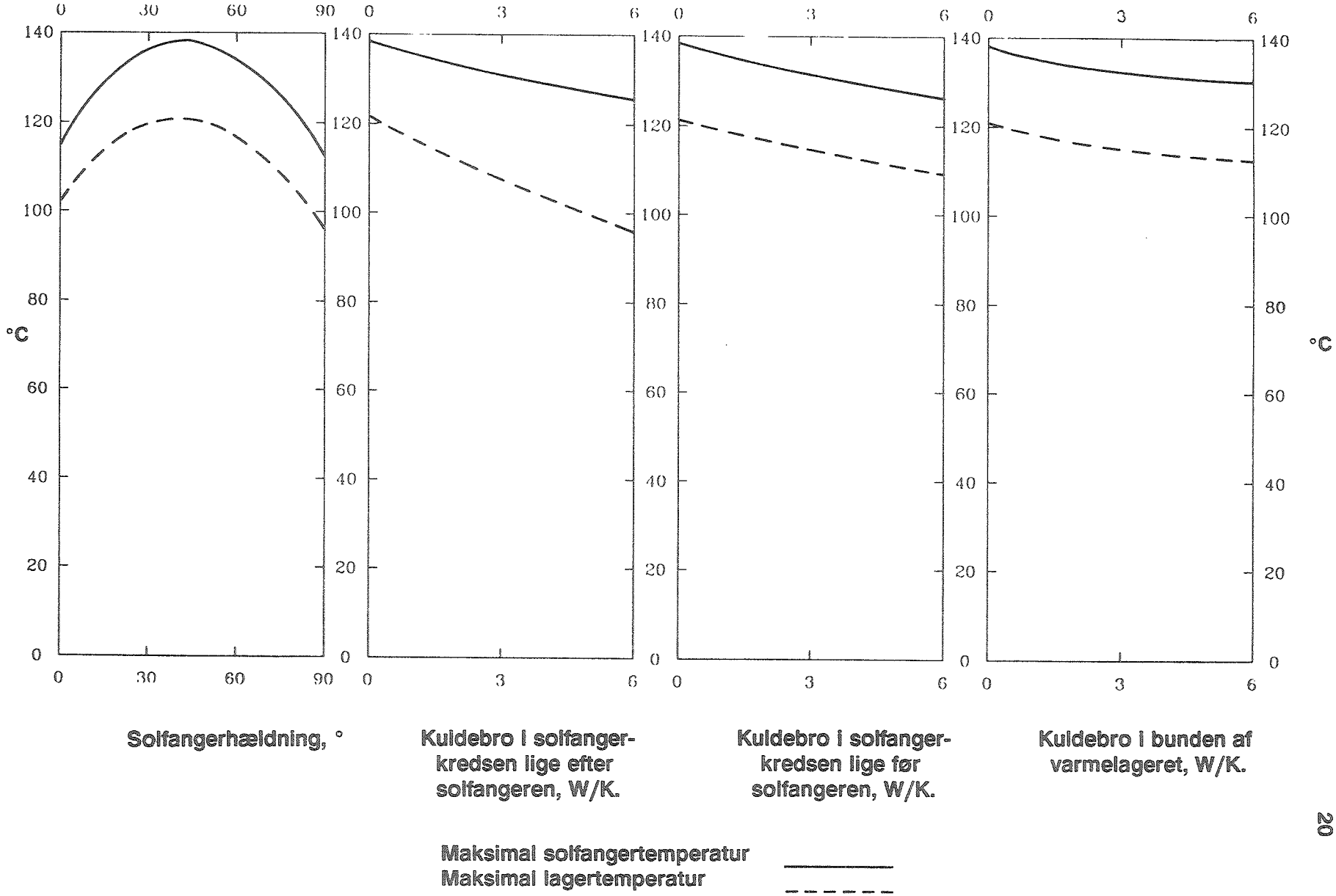


Maksimal solfangertemperatur ———
Maksimal lagertemperatur - - - - -

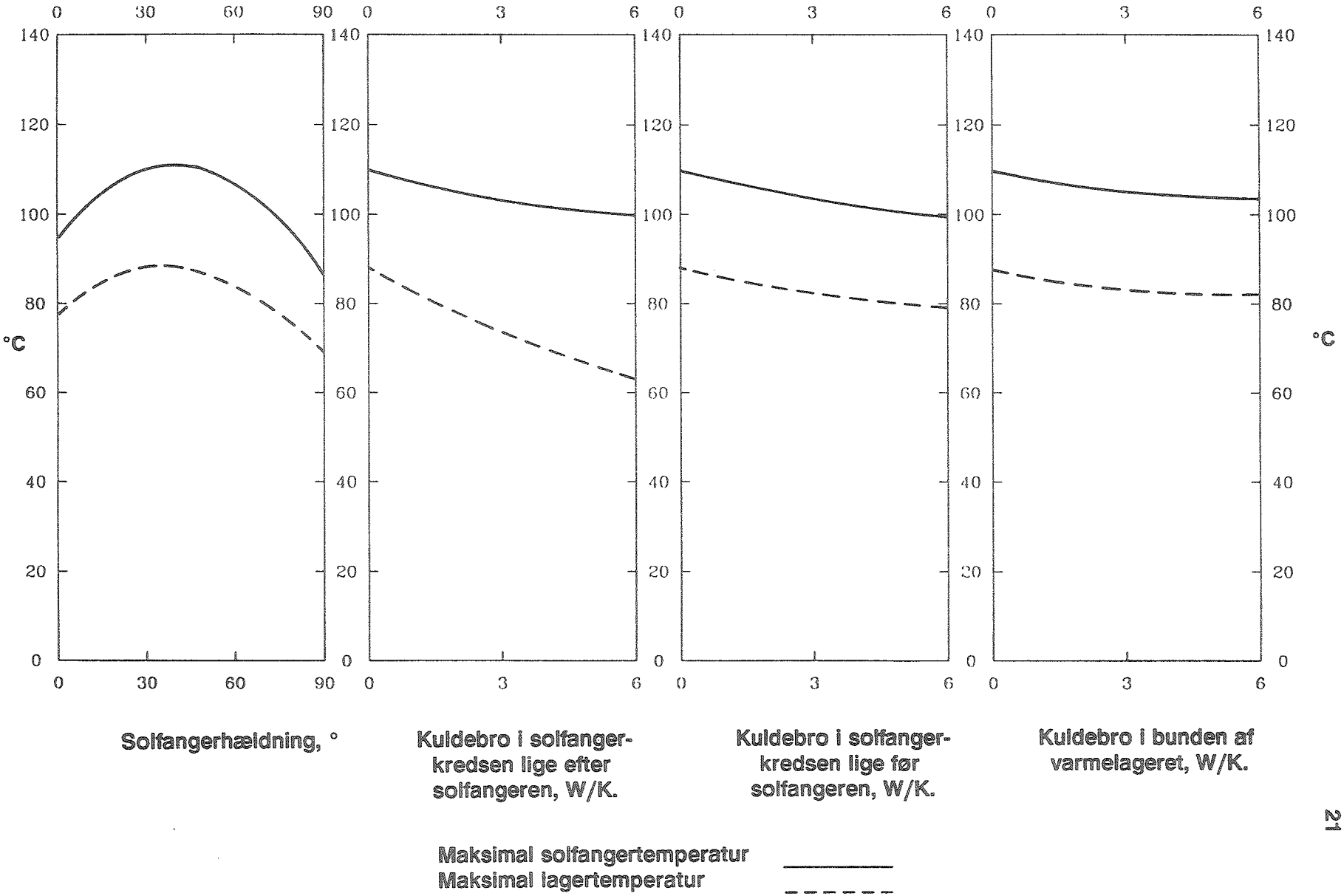
Figur 8. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af solfangerhældningen (til venstre) og for en solfangerhældning på 45° (i midten og til højre) som funktion af størrelse og placering af en kuldebro for et 2,01 m² Dansk Solvarme anlæg med en volumenstrøm på 0,15 l/min m² solfanger.



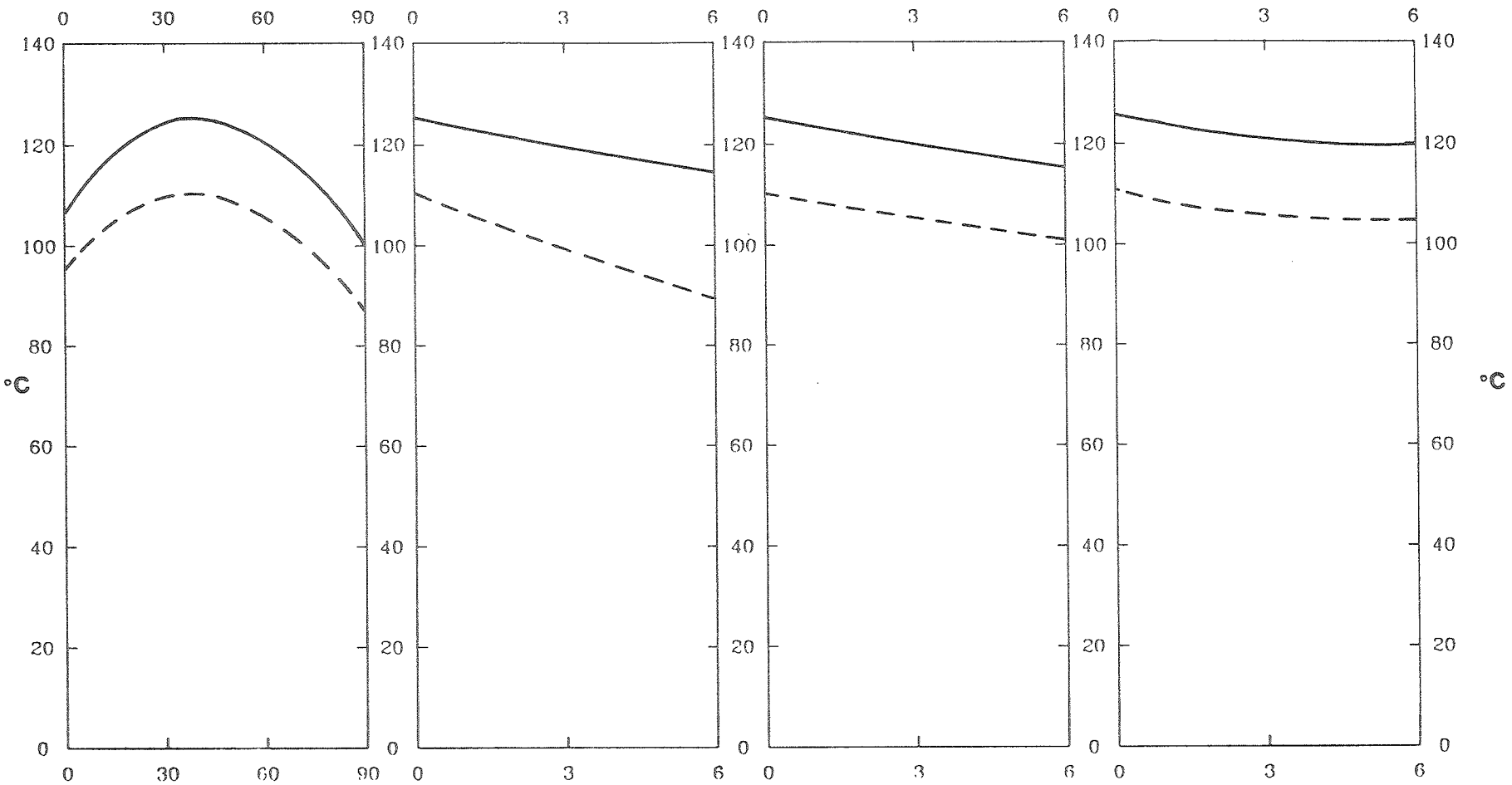
Figur 9. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af solfangerhældningen (til venstre) og for en solfangerhældning på 45° (i midten og til højre) som funktion af størrelse og placering af en kuldebro for et 4,02 m² Dansk Solvarme anlæg med en volumenstrøm på 0,15 l/min m² solfanger.



Figur 10. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af solfangerhældningen (til venstre) og for en solfangerhældning på 45° (i midten og til højre) som funktion af størrelse og placering af en kuldebro for et 2,19 m² Batec anlæg med en volumenstrøm på 0,15 l/min m² solfanger.

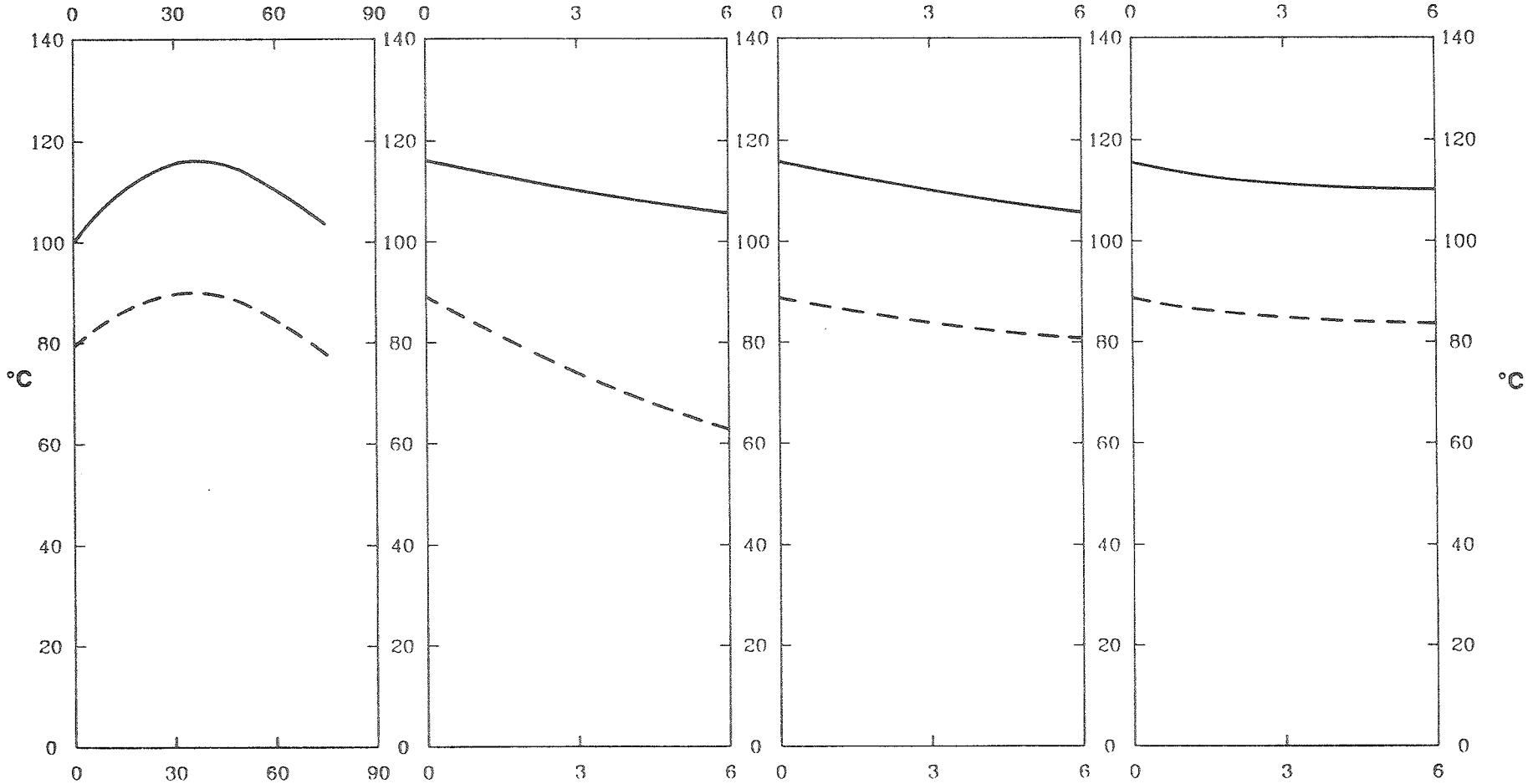


Figur 11. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af solfangerhældningen (til venstre) og for en solfangerhældning på 45° (i midten og til højre) som funktion af størrelse og placering af en kuldebro for et 4,38 m² Batec anlæg med en volumenstrøm på 0,15 l/min m² solfanger.



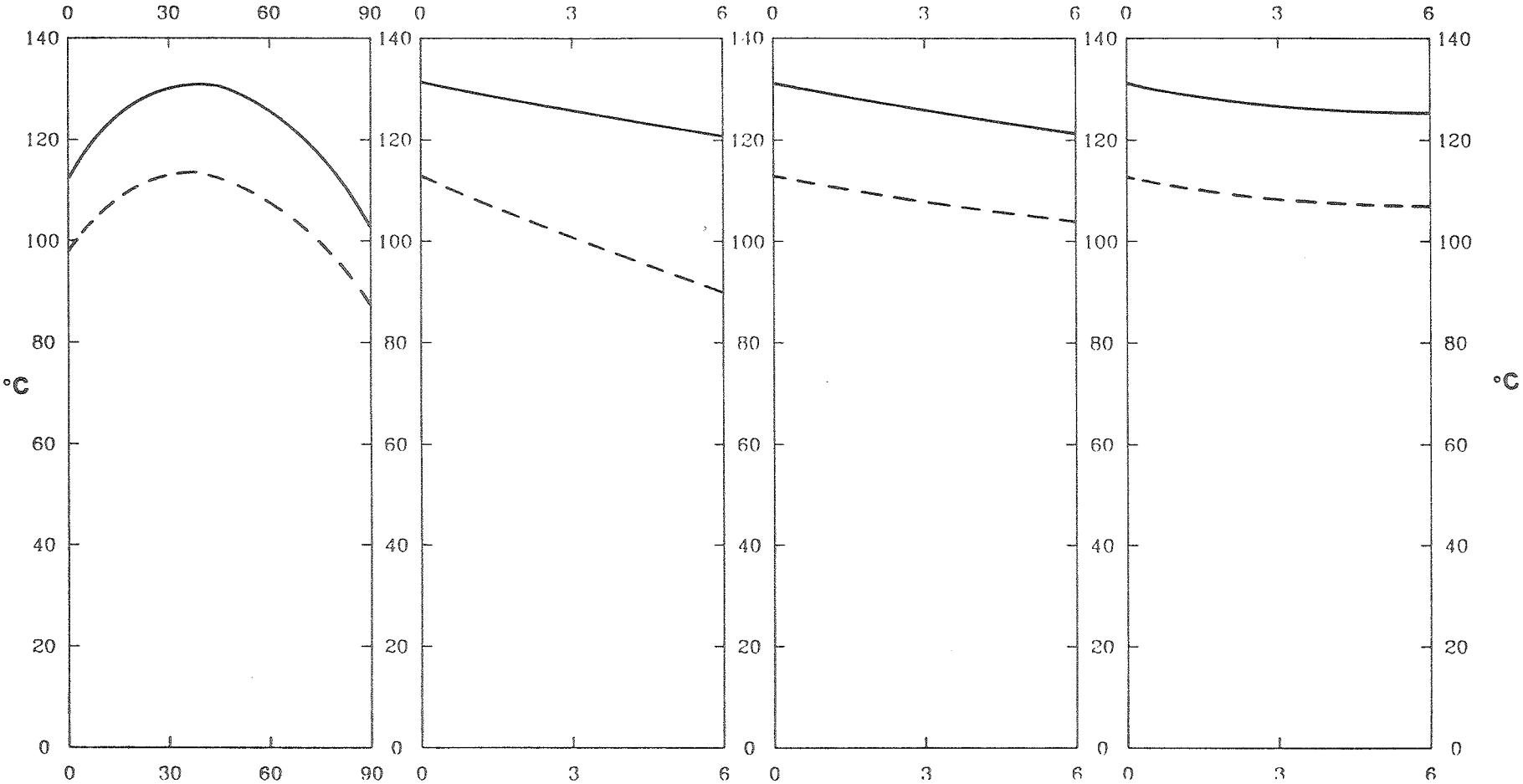
Maksimal solfangertemperatur ————
Maksimal lagertemperatur - - - - -

Figur 12. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af solfangerhældningen (til venstre) og for en solfangerhældning på 45° (i midten og til højre) som funktion af størrelse og placering af en kuldebro for et 1,86 m² Solahart anlæg med en volumenstrøm på 0,15 l/min m² solfanger.



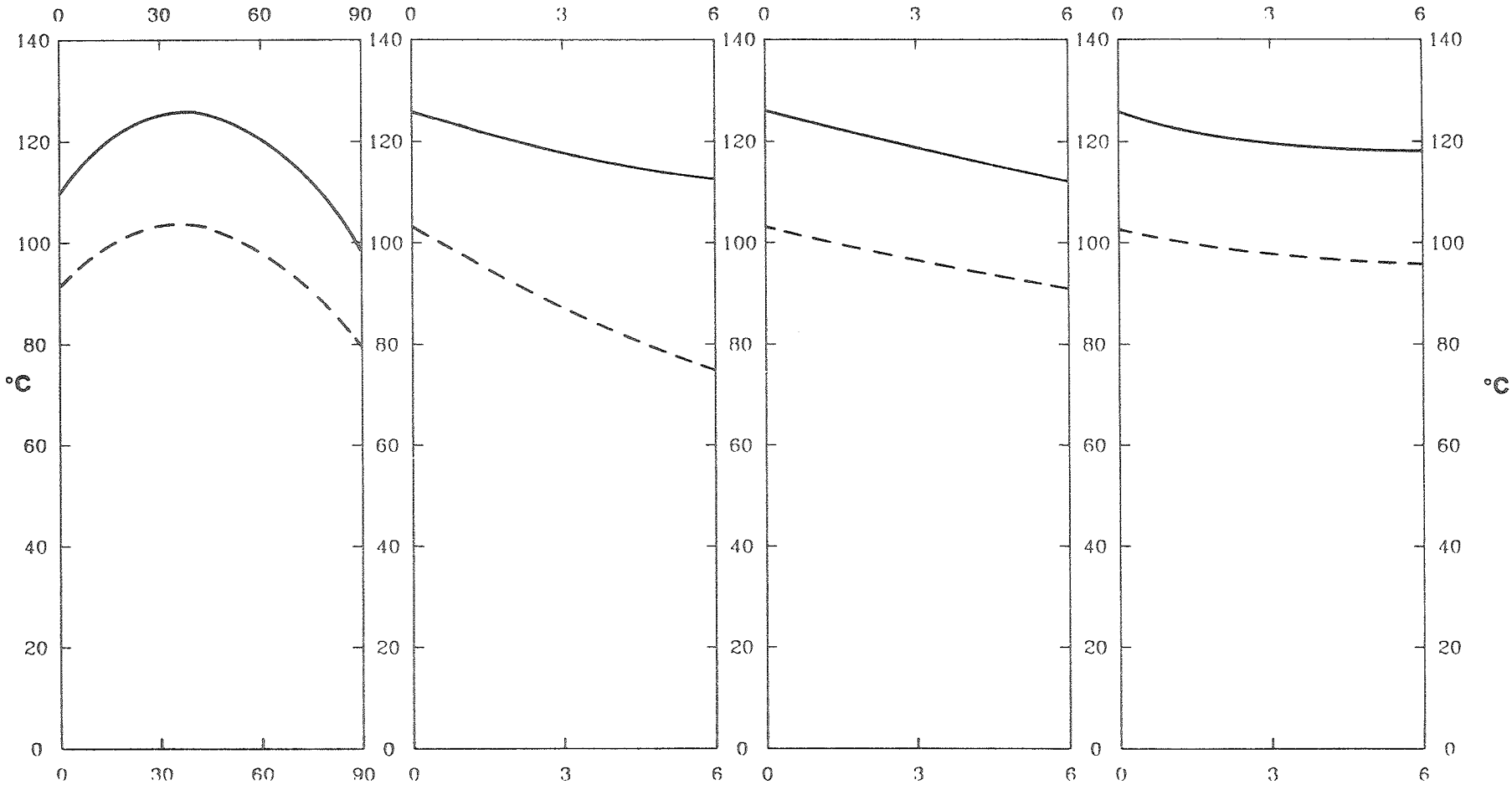
Maksimal solfangertemperatur ————
Maksimal lagertemperatur - - - - - -

Figur 13. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af solfangerhældningen (til venstre) og for en solfangerhældning på 45° (i midten og til højre) som funktion af størrelse og placering af en kuldebro for et 3,72 m² Solahart anlæg med en volumenstrøm på 0,15 l/min m² solfanger.



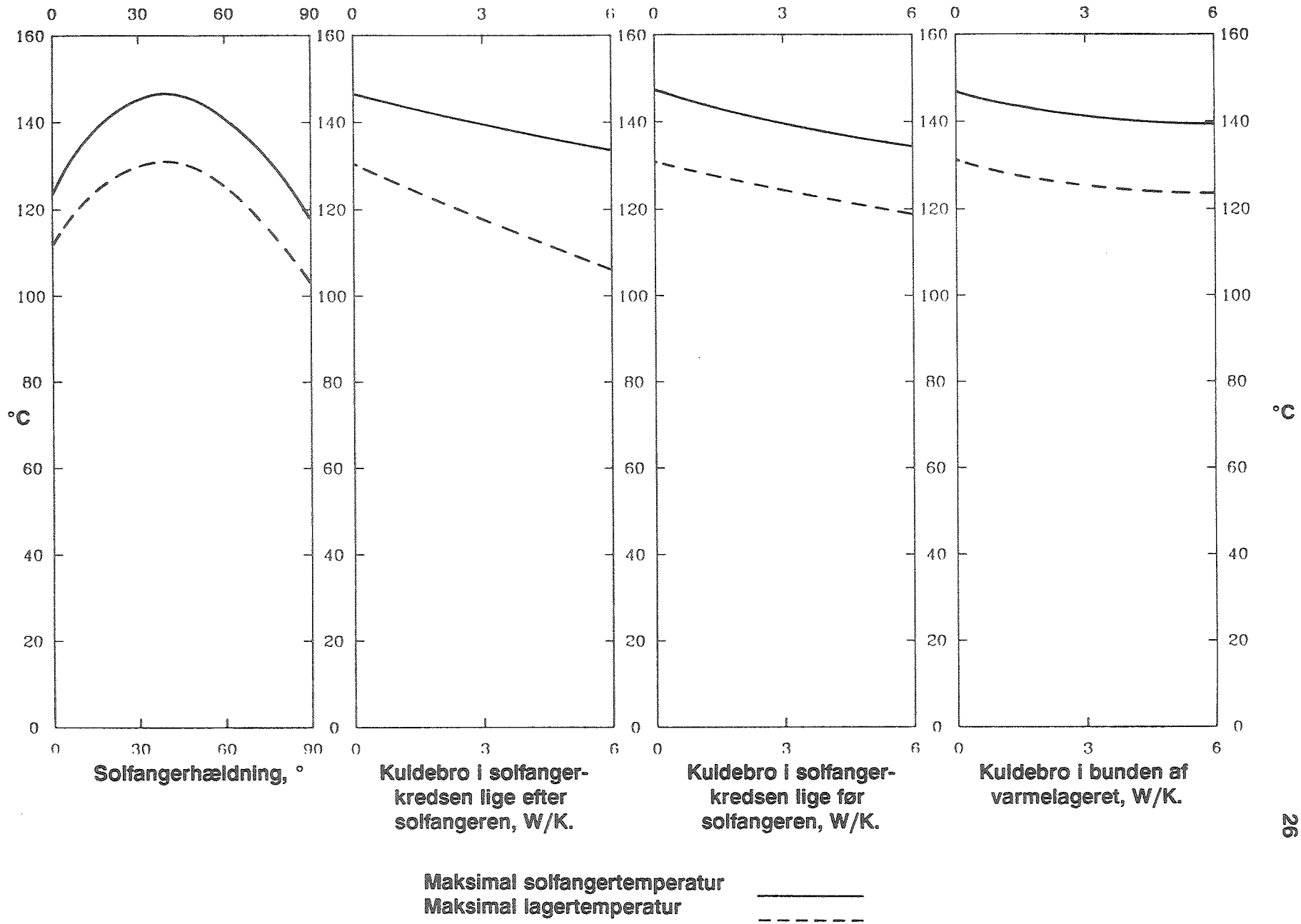
Maksimal solfangertemperatur ————
Maksimal lagertemperatur - - - - -

Figur 14. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af solfangerhældningen (til venstre) og for en solfangerhældning på 45° (i midten og til højre) som funktion af størrelse og placering af en kuldebro for et 2,51 m² Arcon ST anlæg med en volumenstrøm på 0,15 l/min m² solfanger.

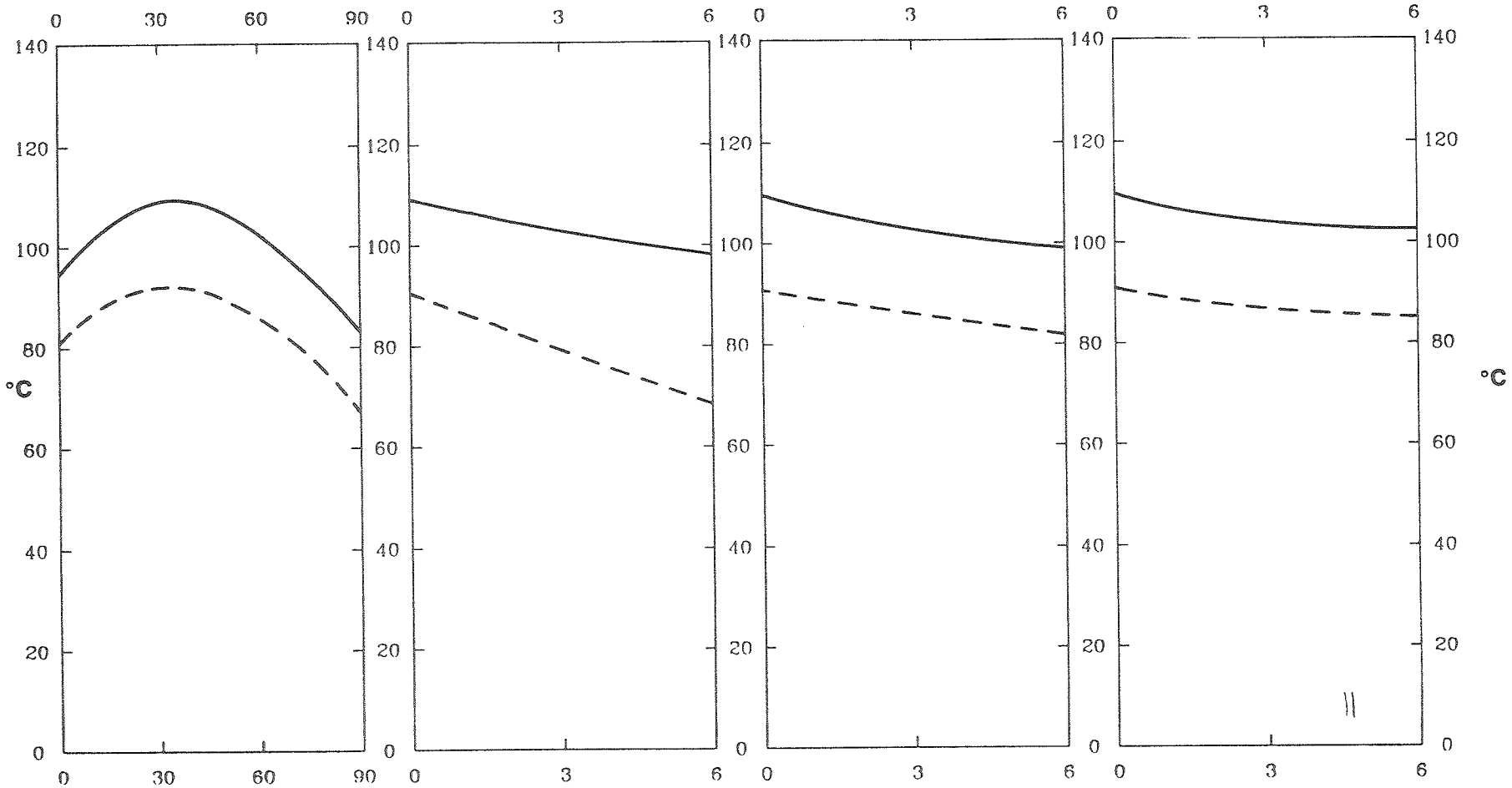


Maksimal solfangertemperatur ————
Maksimal lagertemperatur - - - - -

Figur 15. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af solfangerhældningen (til venstre) og for en solfangerhældning på 45° (i midten og til højre) som funktion af størrelse og placering af en kuldebro for et 5,02 m² Arcon ST anlæg med en volumenstrøm på 0,15 l/min m² solfanger.

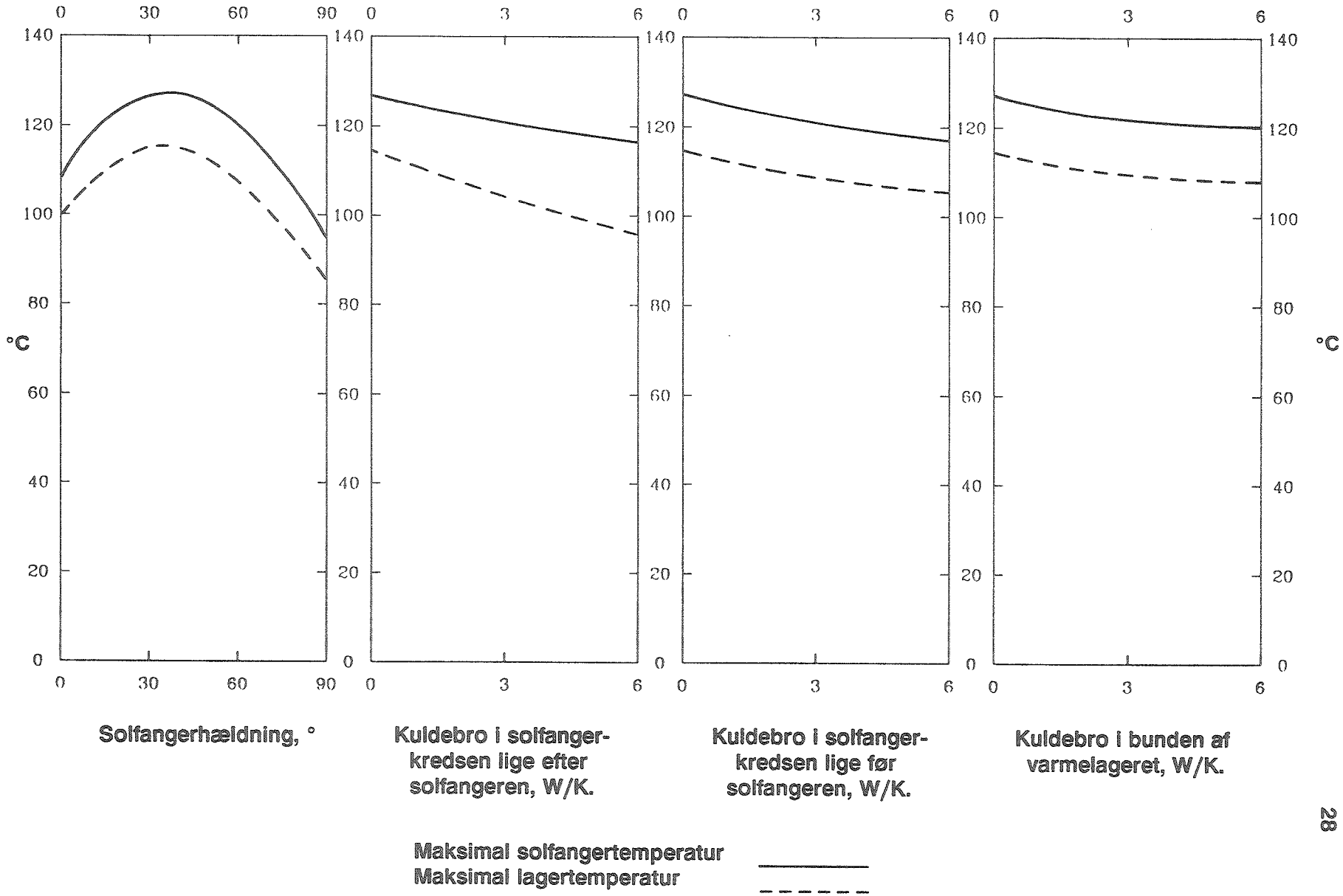


Figur 16. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af solfangerhældningen (til venstre) og for en solfangerhældning på 45° (i midten og til højre) som funktion af størrelse og placering af en kuldebro for et 2,90 m² Djurs anlæg med en volumenstrøm på 0,15 l/min m² solfanger.

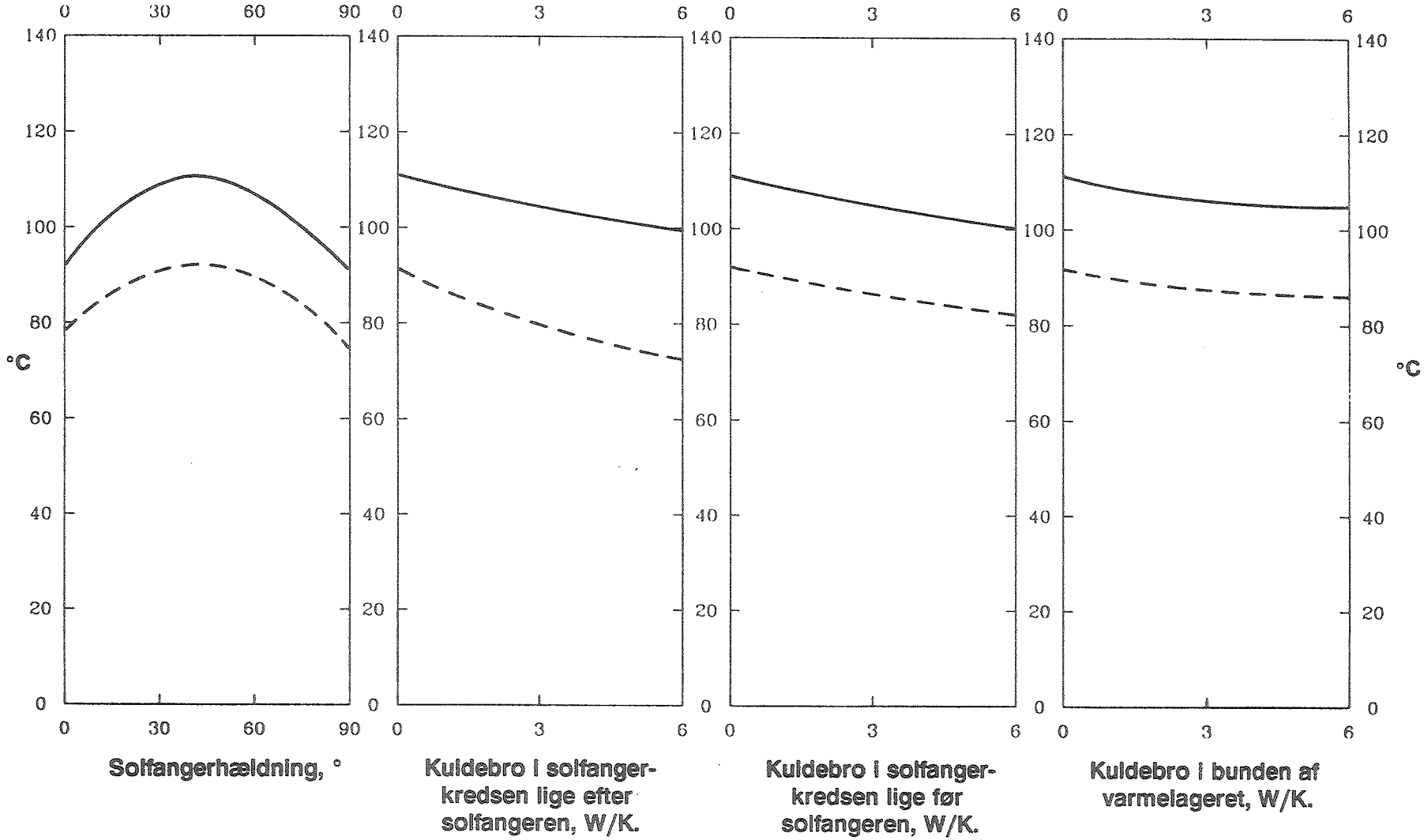


Maksimal solfangertemperatur ———
Maksimal lagertemperatur - - - - -

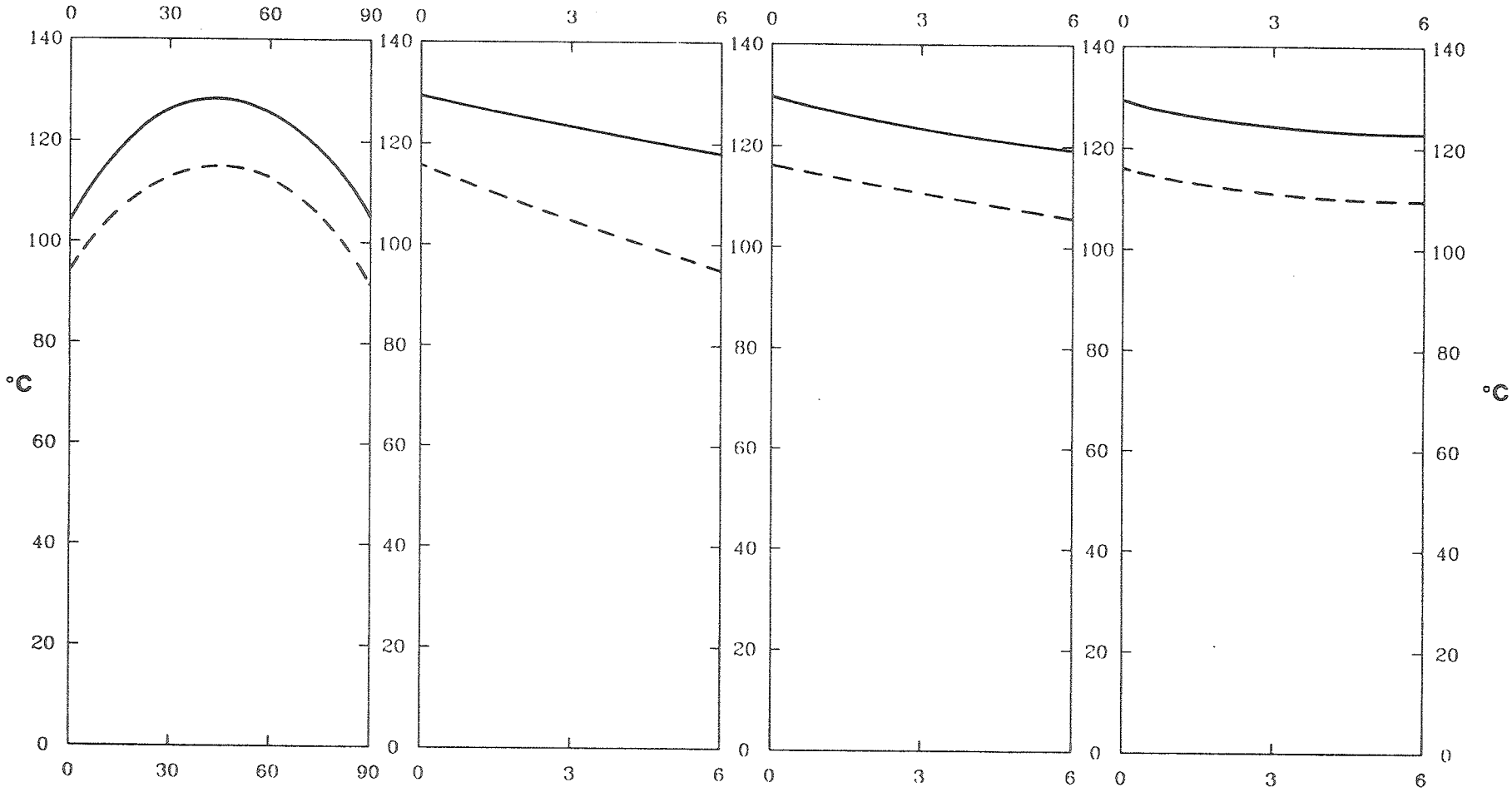
Figur 17. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af solfangerhældningen (til venstre) og for en solfangerhældning på 45° (i midten og til højre) som funktion af størrelse og placering af en kuldebro for et 5,80 m² Djurs anlæg med en volumenstrøm på 0,15 l/min m² solfanger.



Figur 18. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af solfangerhældningen (til venstre) og for en solfangerhældning på 45° (i midten og til højre) som funktion af størrelse og placering af en kuldebro for et 2,60 m² Ans anlæg med en volumenstrøm på 0,15 l/min m² solfanger.

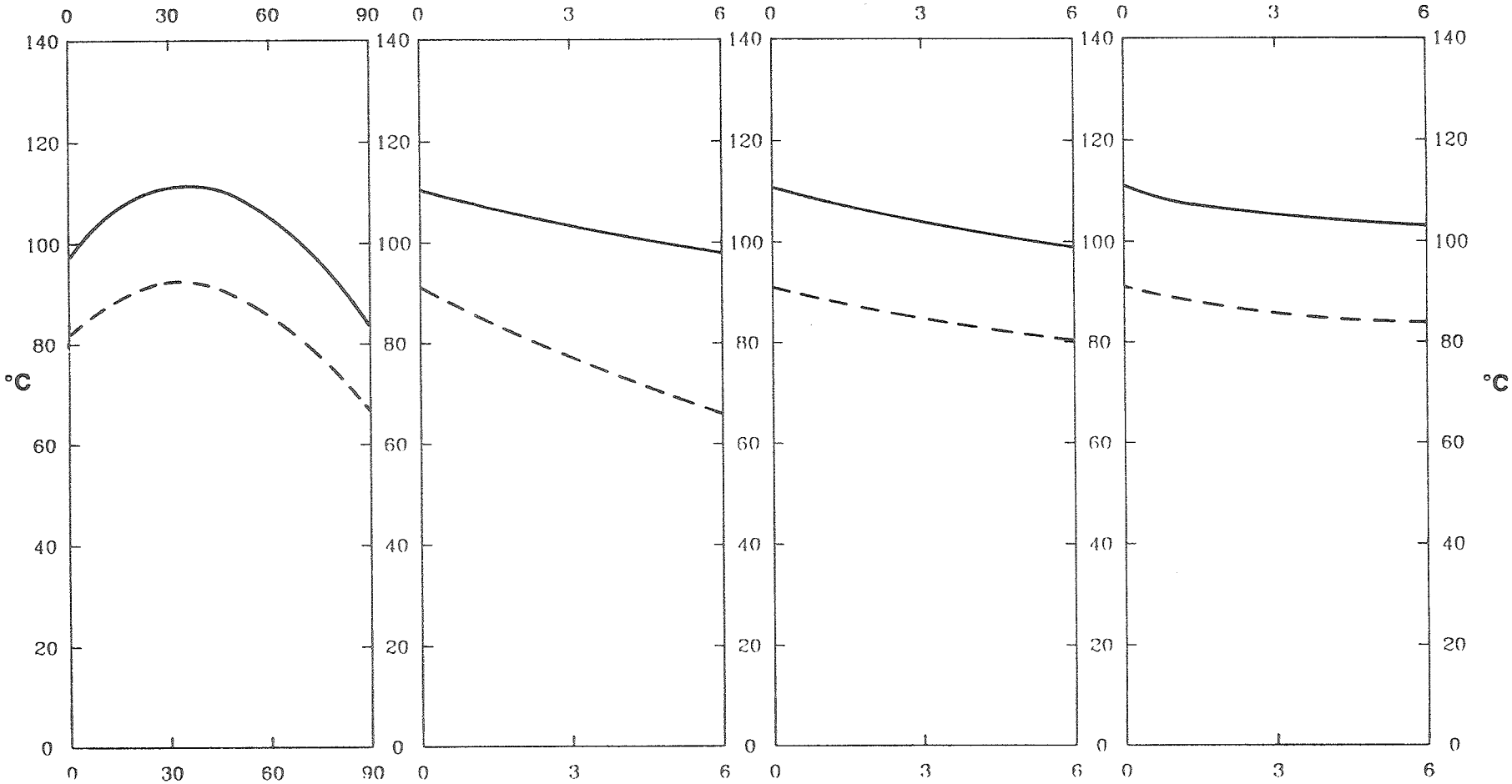


Figur 19. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af solfangerhældningen (til venstre) og for en solfangerhældning på 45° (i midten og til højre) som funktion af størrelse og placering af en kuldebro for et 5,20 m² Ans anlæg med en volumenstrøm på 0,15 l/min m² solfanger.



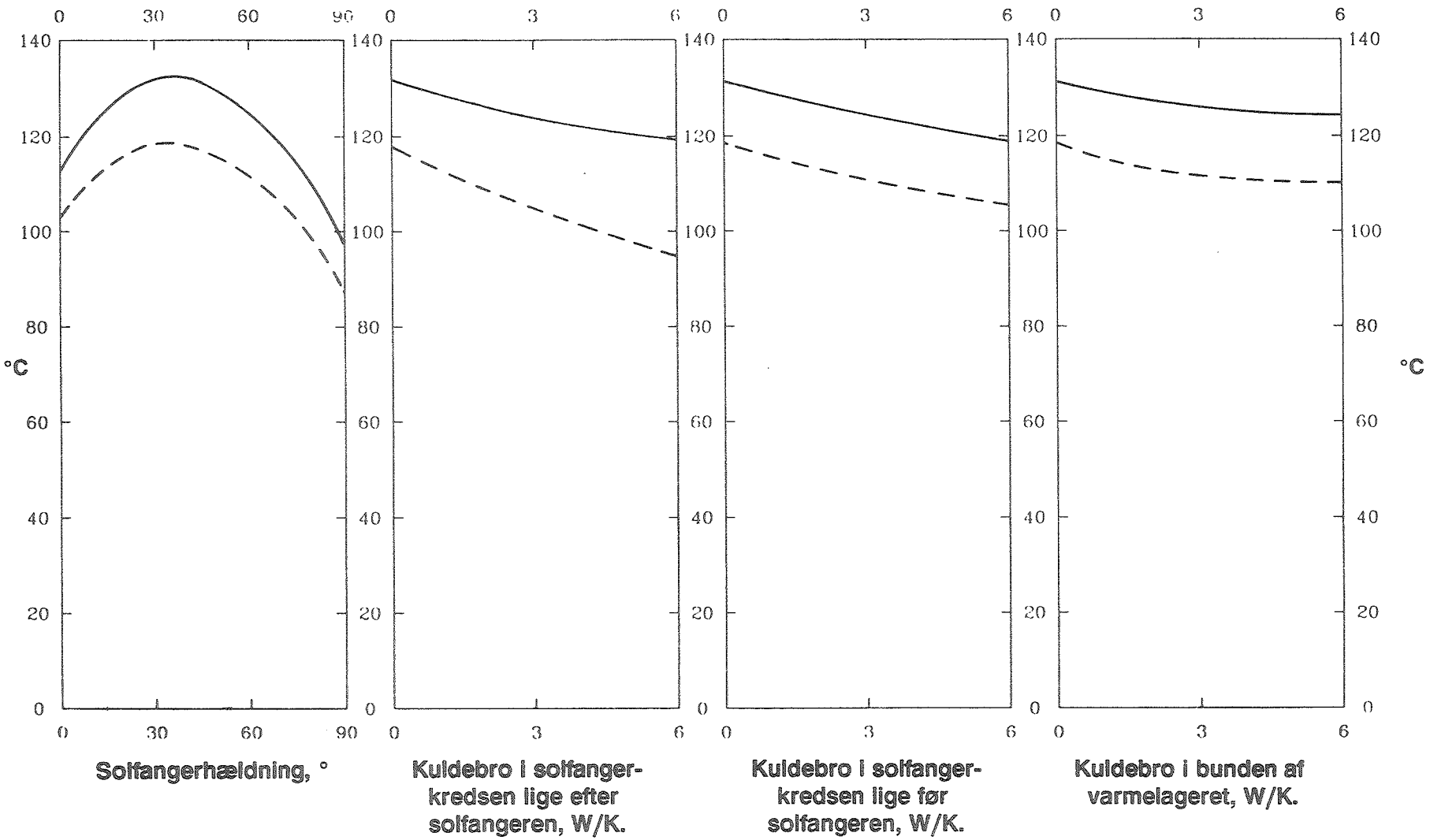
Maksimal solfangertemperatur ————
Maksimal lagertemperatur - - - - -

Figur 20. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af solfangerhældningen (til venstre) og for en solfangerhældning på 45° (i midten og til højre) som funktion af størrelse og placering af en kuldebro for et 2,51 m² Arcon S250 anlæg med en volumenstrøm på 0,15 l/min m² solfanger.

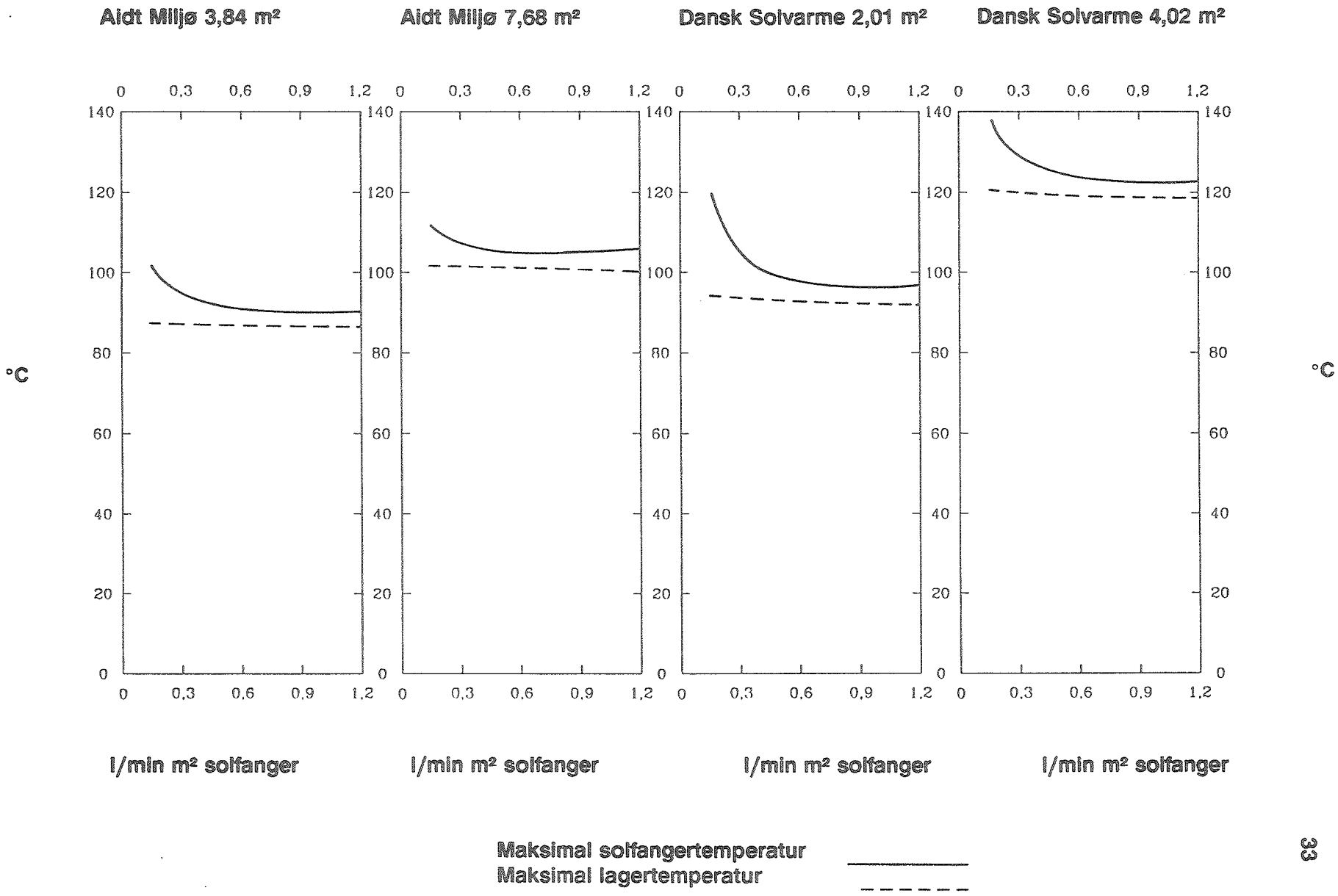


Maksimal solfangertemperatur ———
Maksimal lagertemperatur - - - - -

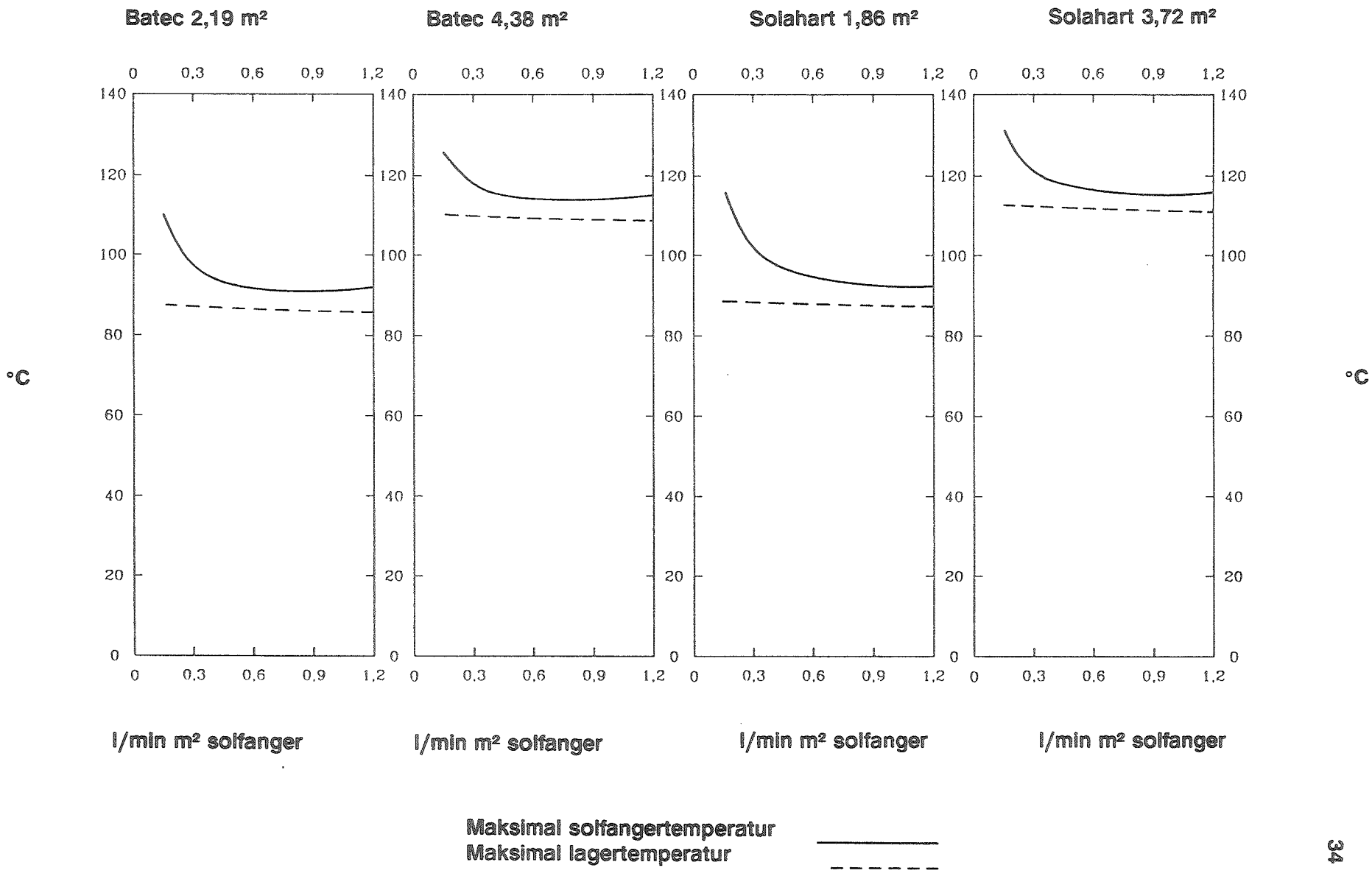
Figur 21. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af solfangerhældningen (til venstre) og for en solfangerhældning på 45° (i midten og til højre) som funktion af størrelse og placering af en kuldebro for et 5,02 m² Arcon S250 anlæg med en volumenstrøm på 0,15 l/min m² solfanger.



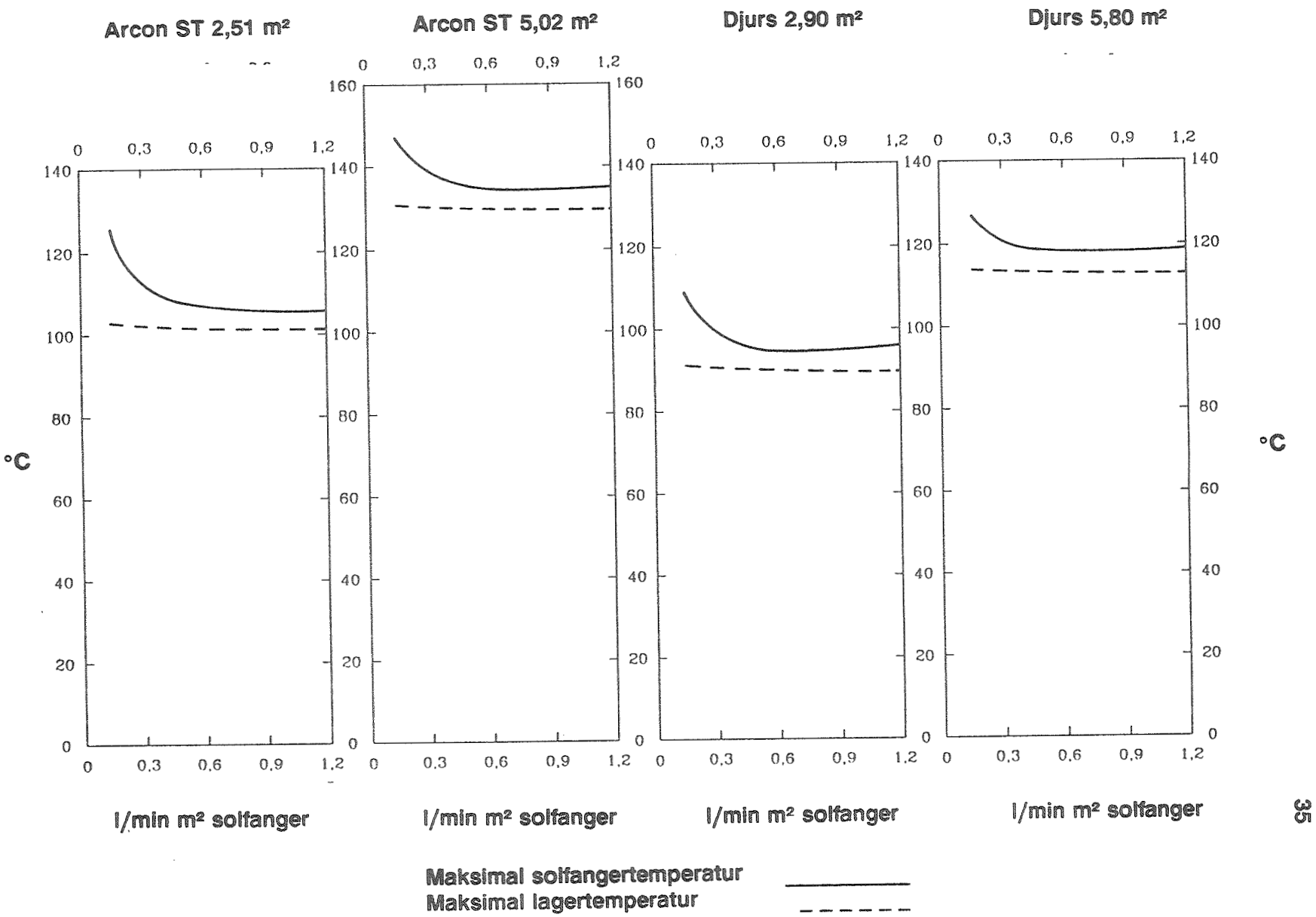
Figur 22. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af volumenstrømmen i solfangerkredsen for forskellige solfangertyper og -arealer med en solfangerhældning på 45°.



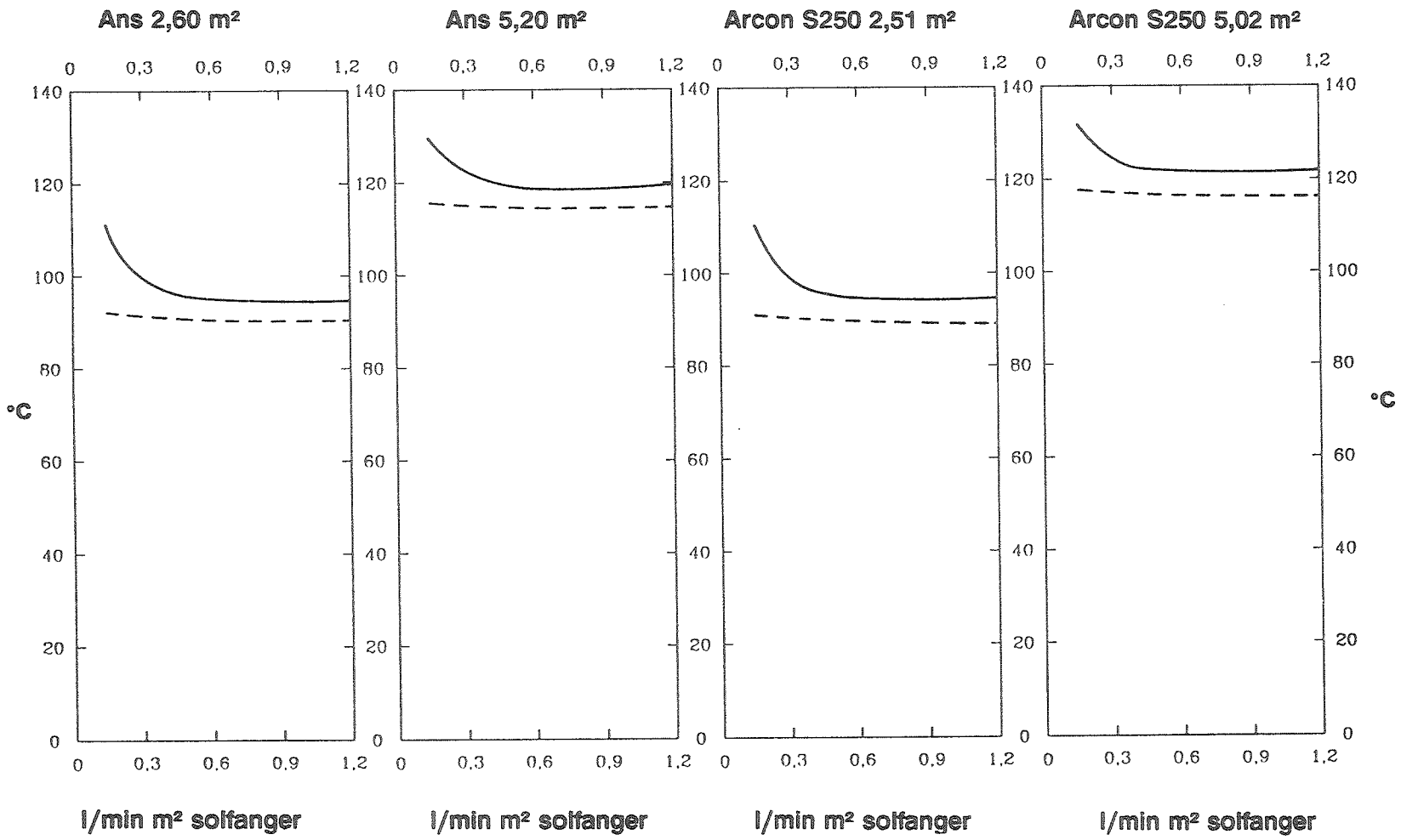
Figur 23. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af volumenstrømmen i solfangerkredsen for forskellige solfangertyper og -arealer med en solfangerhældning på 45°.



Figur 24. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af volumenstrømmen i solfangerkredsen for forskellige solfangertyper og -arealer med en solfangerhældning på 45°.



Figur 25. Beregnede maksimale solfanger- og lagertemperaturer som funktion af volumenstrømmen i solfangerkredsen for forskellige solfangertyper og -arealer med en solfangerhældning på 45°.



5.1.4 Styresystem som forhindrer høje anlægstemperaturer

Aidt Miljø ApS markedsfører et styresystem, som reducerer risikoen for kritisk høje temperaturer i solvarmeanlægget [20]. Styresystemet sikrer, at cirkulationspumpen skifter fra trin 1 til trin 3 når lufttemperaturen i toppen af solfangeren bliver højere end 80°C. Når lufttemperaturen i solfangeren når ned på 70°C skifter pumpen igen fra trin 3 til trin 1.

For normale anlæg svarer dette skift til, at volumenstrømmen i solfangerkredsen cirka fordobles. Herved reduceres de maksimale anlægstemperaturer. Desuden sikrer styresystemet, at pumpen cirkulerer solfangervæsken på trin 3, så snart temperaturen nederst i kappen overstiger 85°C. Pumpen stoppes først igen når denne temperatur når ned på 77°C. Altså kan kappebeholderen herved blive afkølet ved at solfangervæsken cirkuleres gennem solfangerkredsen med en stor volumenstrøm om natten.

For at undersøge, hvor meget en kappebeholder kan afkøles igennem en nat, er der med den i [4] benyttede 200 l kappebeholder gennemført en række afkølingsforsøg i laboratoriets lagerprøvestand efter at beholderen er opvarmet til det samme høje temperaturniveau. Vand er benyttet som solfangervæske. Der er gennemført forsøg med tre forskellige volumenstrømme. Afkølingsperiodens varighed var 10 h for alle tre forsøg. Fremløbstemperaturen til toppen af kappen blev efter forholdsvis korte indkøringsperioder holdt på 20°C.

De målte temperaturer i de tre afkølingsforsøg fremgår af figur 26 - 28. Desuden blev der gennemført et 10 h afkølingsforløb uden volumenstrøm gennem kappen. Alle afkølingsforsøgene er sammenfattet i figur 29, som viser temperaturerne ved starten og slutningen af de 10 h.

Det ses, at det er muligt at tappe store varmemængder fra kappebeholderen, hvis fremløbstemperaturen kan holdes tilstrækkelig lav. Jo større volumenstrømmen er des større varmemængde kan tappes fra beholderen. Forsøgene tyder altså på, at det er muligt at reducere de maksimale anlægstemperaturer under sommerferieperioder betydeligt ved at tvangsstyre cirkulationspumpen om natten.

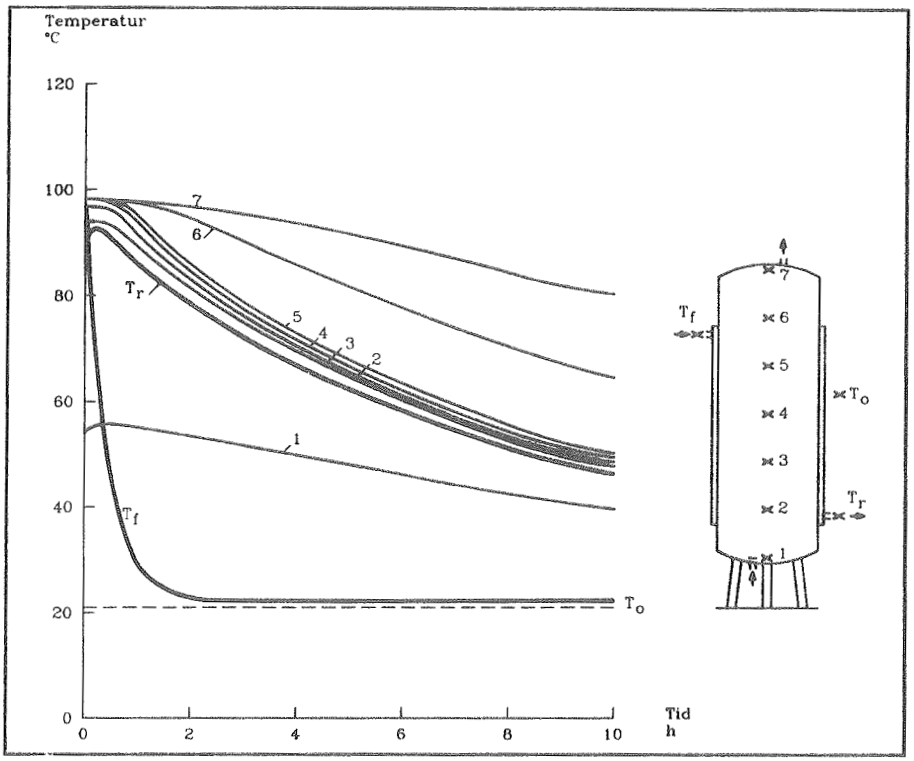
Med det i [4] beskrevne simuleringsprogram er der gennemført beregninger af lagertemperaturerne for de tre afkølingsforsøg. Der kan kun opnås god overensstemmelse mellem målte og beregnede lagertemperaturer igennem afkølingsforsøgene ved at ændre størrelsen af varmeoverføringsevnen mellem varmtvandsbeholder og kappe i forhold til de normalt anvendte størrelser af varmeoverføringsevnen fra [4].

Dette er ikke overraskende, idet de forhold, som lageret udsættes for under afkølingerne, er helt anderledes end de forhold, som forekommer under normal drift. Under afkølingerne er solfangervæsketemperaturen i den øverste del af lageret således ofte meget lavere end varmtvandsbeholdertemperaturen.

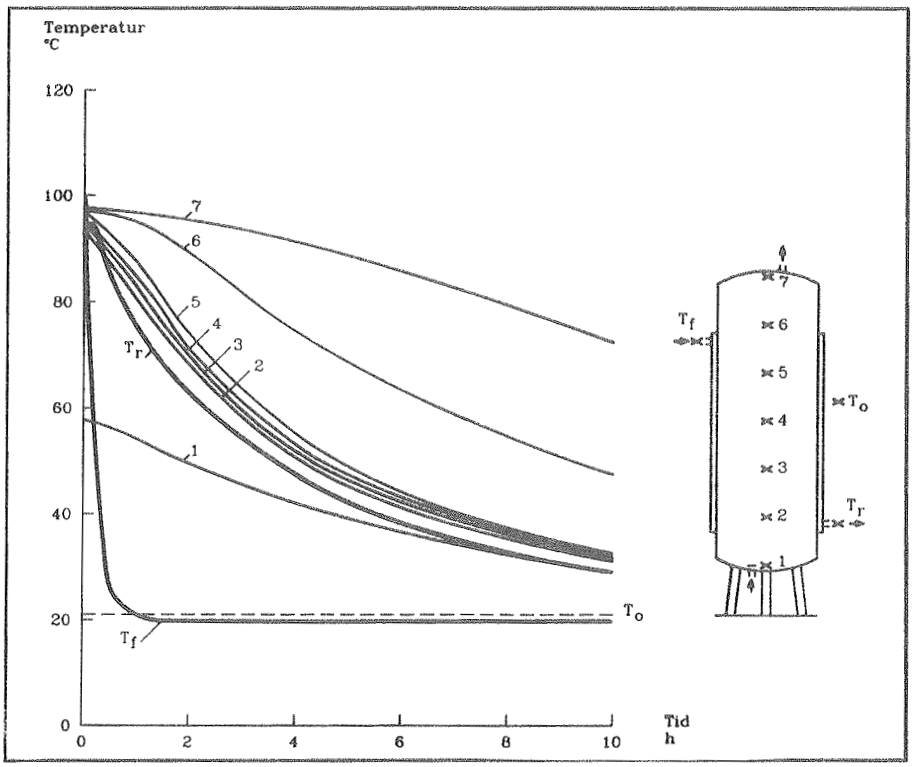
Under sådanne forhold spreder solfangervæsken sig i mindre omfang end normalt rundt i hele kappens omkreds. Beregningsmæssigt må der derfor i disse perioder benyttes mindre størrelser af varmeoverføringsevnen mellem varmtvandsbeholder og kappe end normalt.

Der er gennemført en række beregninger af de maksimale temperaturer, som optræder i sommerferieperioder uden varmtvandsforbrug i solvarmeanlæg, som er forsynet med et styresystem, som sørger for at pumpen cirkulerer solfangervæsken rundt i solfangerkredsen også om natten, hvis anlægstemperaturerne nærmer sig et kritisk niveau. De ovenfor bestemte varmeoverføringsforhold er benyttet i disse beregninger om natten, når solfangervæsken cirkuleres gennem kappen. Om natten benyttes også andre varmetabskoefficienter for solfangerne end angivet i tabel 4 idet varmetabskoefficienterne for solfangere normalt er væsentligt større med bestrålingsstyrke end uden bestrålingsstyrke.

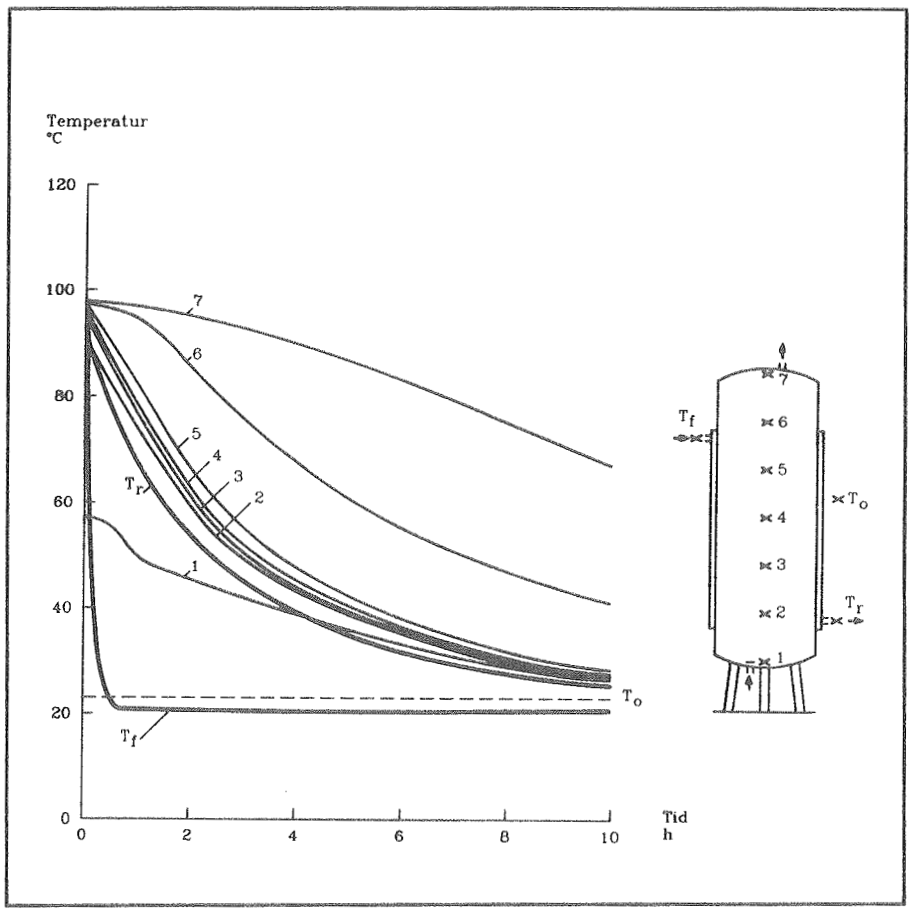
De om natten benyttede varmetabskoefficienter er for at være på den sikre side, bestemt ved en vindhastighed på 0 m/s. Disse varmetabskoefficienter er bestemt på basis af varmetabsmålinger for solfangerne og på basis af den i [19] beskrevne korrektion for forskellige lufthastigheder langs solfangerne.



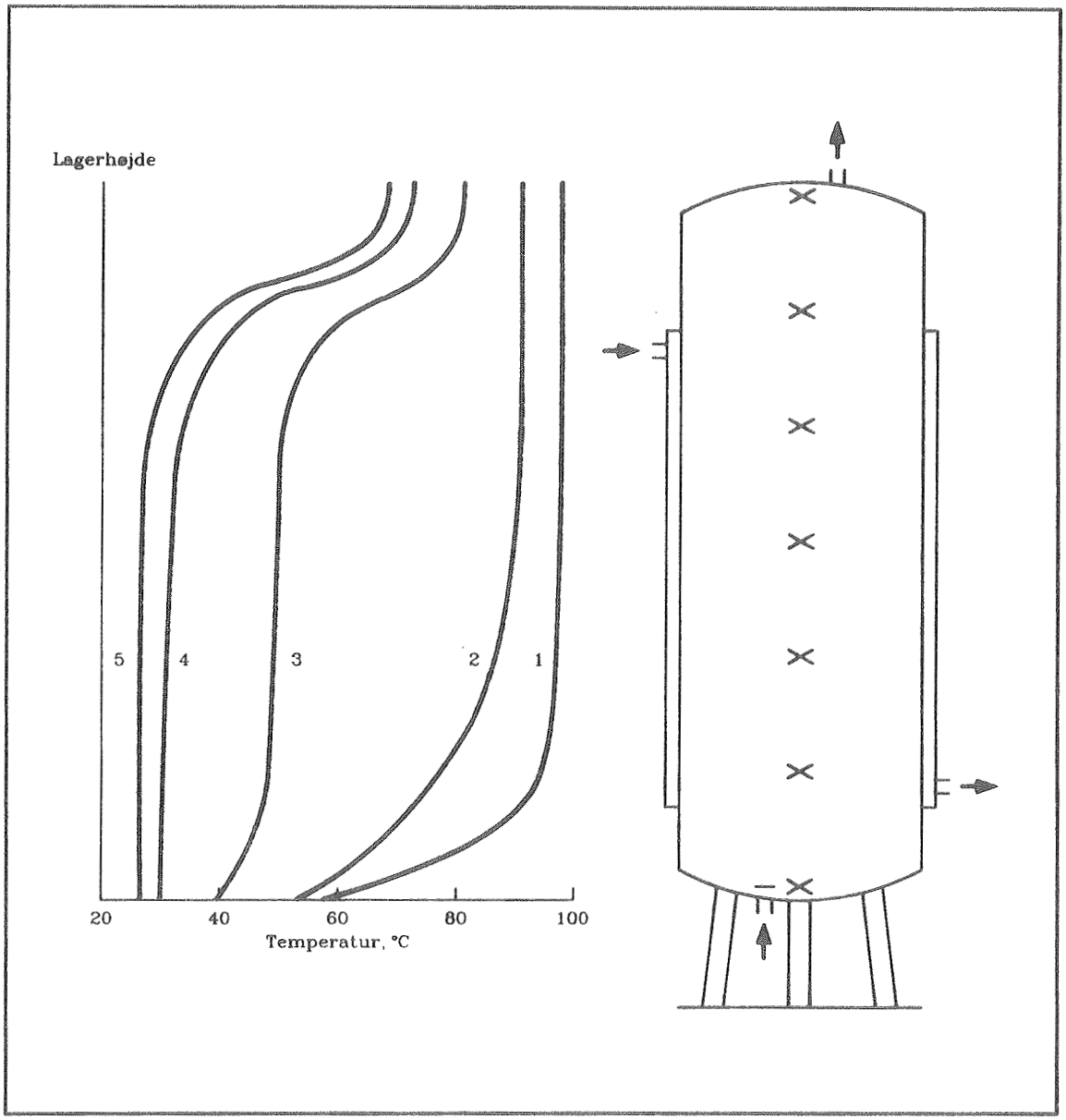
Figur 26. Målte temperaturer under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på 0,35 l/min.



Figur 27. Målte temperaturer under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på 0,81 l/min.



Figur 28. Målte temperaturer under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på 1,15 l/min.



1. Starttemperaturer
2. Sluttemperaturer efter 10 h stilstand
3. Sluttemperaturer efter 10 h køling med volumenstrømmen 0,35 l/min
4. Sluttemperaturer efter 10 h køling med volumenstrømmen 0,81 l/min
5. Sluttemperaturer efter 10 h køling med volumenstrømmen 1,15 l/min

Figur 29. Lagertemperaturer før og efter afkølingsforsøg.

Beregningerne viste, at de maksimale anlægstemperaturer reduceres betydeligt, når cirkulationspumpen altid cirkulerer solfangervæsken rundt i solfangerkredsen. Styresystemet kan derfor løse problemet med de kritiske høje anlægstemperaturer for langt de fleste af de anlæg, som er taget i beregning.

Det skal dog bemærkes, at pumpen ikke bør stoppes allerede når temperaturen nederst i kappen når ned på 77°C. Kun ved at vælge en lavere temperatur, hvor pumpen stoppes, kan styresystemet forhindre kritisk høje anlægstemperaturer.

Imidlertid skal det bemærkes, at styresystemet tilsyneladende ikke fuldstændig eliminerer risikoen for kritisk høje anlægstemperaturer for alle anlæg med to solfangerelementer.

Benyttes højeffektive solfangere kan der således stadig opstå høje anlægstemperaturer. Eksempelvis viste beregningerne, at de maksimale temperaturer i solfangeren og i varmtvandsbeholderen i sommerferieperioder for Arcon-anlægget med 5,02 m² ST solfanger er henholdsvis 110°C og 105°C, når volumenstrømmen i solfangerkredsen er 0,6 l/min pr. m² solfanger igennem hele døgnet.

Endelig skal det bemærkes, at en række af de forudsætninger, som er benyttet i beregningerne af forholdene om natten, er usikre. Før styresystemet anvendes for anlæg med to højeffektive solfangerelementer må det derfor anbefales at virkemåden kontrolleres i praksis i en solrig sommerperiode uden varmtvandsforbrug.

5.1.5 Sammenfatning

Omfanget af problemerne med kritisk høje anlægstemperaturer for små low flow solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning er blevet klarlagt ved hjælp af beregninger.

For anlæg med ét solfangerelement kan problemerne løses ved hjælp af små kuldebroer og/eller ved hjælp af et styresystem, som sikrer en stor volumenstrøm når solfangertemperaturerne bliver for høje.

For nogle solvarmeanlæg med to solfangerelementer må problemerne løses på en anden måde. For de fleste anlæg med to solfangerelementer kan benyttelse af et styresystem, som sikrer cirkulation i solfangerkredsen med en stor volumenstrøm i perioder med kritisk høje lagertemperaturer, sikre så stor en køling af tanken om natten, at der ikke opstår kritisk høje anlægstemperaturer.

For anlæg med to højeffektive solfangerelementer eller med mere end to solfangerelementer må problemerne imidlertid løses anderledes.

Blandt de løsninger, som kan tages i anvendelse, kan nævnes:

- Anlæg kan opføres som tømmesystemer.
- I solfangerkredsen indbygges en varmeveksler, som kan benyttes til køling.
- Der tappes automatisk varmt vand fra varmelageret, hvis temperaturen bliver for høj.

Problemerne kan løses på andre måder end foreslået oven for. Det må naturligvis i praksis eftervises, at problemerne er løst, før nye anlægsudformninger markedsføres.

5.2 Selvcirkulation i solfangerkreds

Når en kappebeholder benyttes som varmelager i et low flow solvarmeanlæg, kan der ved selvcirkulation gennem kappen tabes store varmemængder fra kappebeholderen om natten. Det er derfor vigtigt at forhindre selvcirkulation om natten i disse anlæg.

Low flow solvarmeanlæg er normalt forsynet med kontraventiler i solfangerkredsene. Erfaringer fra praksis viser imidlertid, at disse kontraventiler ikke altid - for eksempel på grund af snavs - lukker helt tæt. Low flow solvarmeanlæg med en kappebeholder som varmelager bør derfor være udformet således, at selvcirkulation forhindres på en anden måde end ved at benytte en kontraventil.

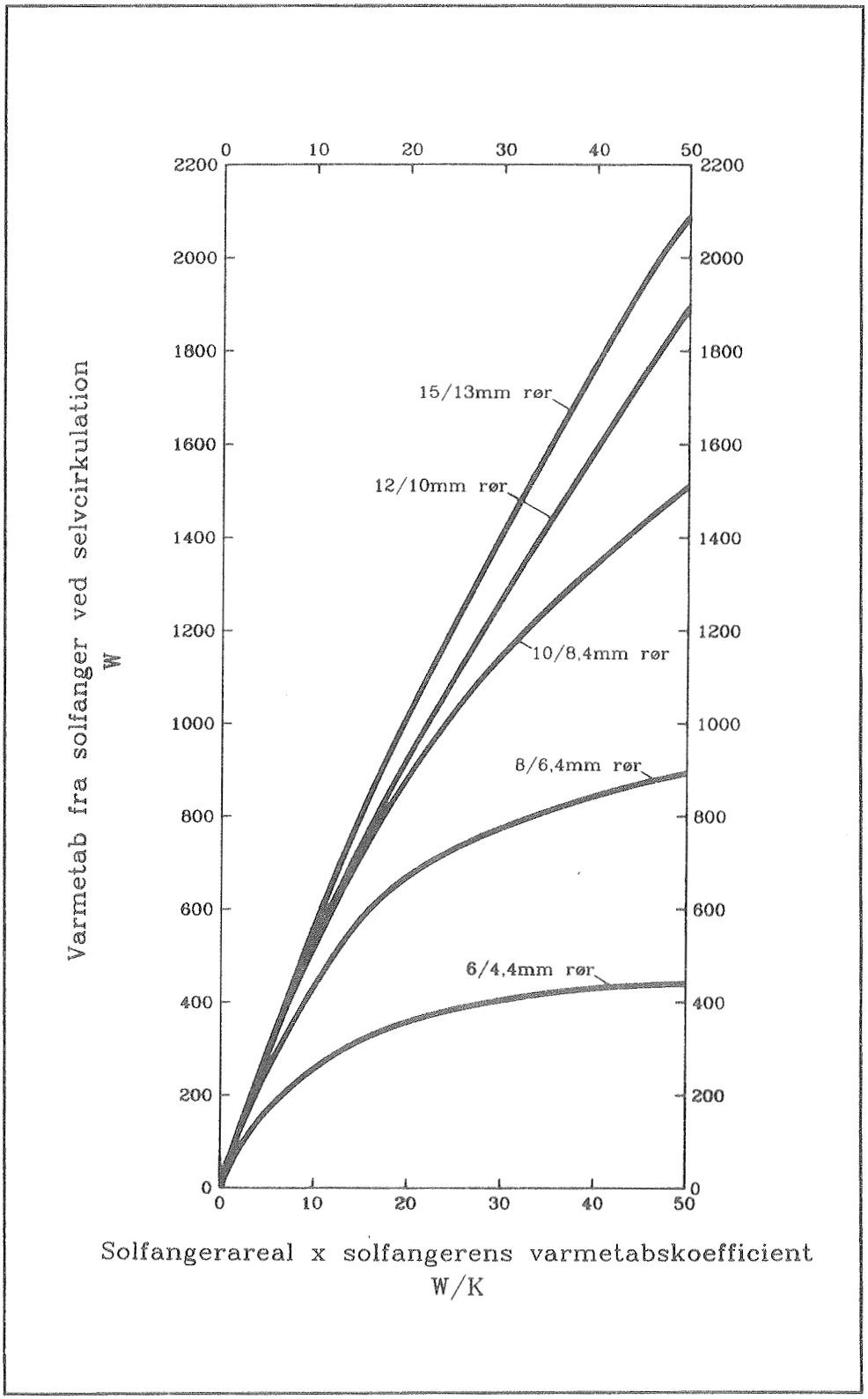
Man kan begrænse den baglæns volumenstrøm i solfangerkredsen om natten og dermed varmemængden, som tabes fra varmelageret ved selvcirkulation om natten dels ved at isolere solfangerkredsens rør omhyggeligt og dels ved at benytte små diametre for solfangerkredsens rør.

Der er gennemført beregninger af varmetabet fra solfangeren i et low flow solvarmeanlæg ved baglæns selvcirkulation i solfangerkredsen om natten. Der er forudsat en udelufttemperatur på 0°C og en temperatur på 60°C i den øverste del af anlæggets kappebeholder. Solfangerkredsen består af bløde kobberrør med en isoleringskappe af plast. Solfangervæsken er en 50 % propylenglycol/vand-blanding, og højdeforskellen mellem toppen af solfangeren og toppen af kappen er 4 m.

Solfangerkredsens totale rørlængde er 10 m. Der er ikke regnet med tryktab fra ventiler, snavssamler o.l. i solfangerkredsen. Arcon-solfangertypen S-250's tryktab er benyttet i beregningerne.

Figur 30 viser det beregnede varmetab som funktion af solfangerkredsens rørdiameter og som funktion af produktet mellem solfangerarealet og solfangerens varmetabskoefficient. Jo mindre dette produkt er og jo mindre rørdiameteren er, des mindre er varmetabet ved selvcirkulation.

Altså er det muligt at begrænse selvcirkulation og varmetabet fra varmelageret ved selvcirkulation om natten ved at benytte små rørdiametre i solfangerkredsen.



Figur 30. Varmetab fra solfanger ved selvcirkulation om natten som funktion af rørdiameter i solfangerkredsen og som funktion af produktet mellem solfangerarealet og solfangerens varmetabskoefficient.

Af figuren ses det imidlertid også, at varmetabet ikke kan elimineres ved at reducere rørdiameteren. Altså er det nødvendigt at forhindre selvcirkulation i solfangerkredsen på en anden måde.

Selvcirkulation i solfangerkredsen om natten kan forhindres på forskellige måder:

- Med en effektiv kontraventil, som lukker tæt.
- Med en magnetventil, som er lukket når cirkulationspumpen ikke er i drift.
- Anlægget kan opføres som et tømmesystem.
- Der kan indbygges en "luftboblebremse" i solfangerkredsen.

Problemet kan løses anderledes end foreslået oven for.

Det kan anbefales at iværksætte undersøgelser for at klarlægge, om der optræder selvcirkulation om natten i markedsførte low flow solvarmeanlæg i praksis. Kun ved hjælp af sådanne undersøgelser kan det afgøres, om der er behov for at forbedre de markedsførte low flow solvarmeanlæg på dette område.

6. Konklusion

Ydelsen af tre forskelligt udformede små low flow solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning blev målt under ensartede driftsbetingelser. De tre anlæg har forskellige varmelagre: Det første har en varmtvandsbeholder med en indbygget varmevekslerspiral, det andet har en varmtvandsbeholder og en varmevekslingskreds med en ekstern varmeveksler, hvor solvarmen overføres til brugsvandet og det tredje har en kappebeholder.

Forskellene mellem de målte ydelser for de tre anlægstyper er små. Kun for perioder med små dækningsgrader for solvarmeanlægget er der forskelle af betydning. I disse perioder yder kappebeholderanlægget mest, anlægget med den eksterne varmeveksler næstmest og spiralbeholderanlægget mindst.

Beregninger viste, at et anlæg med et perfekt varmelager med størst mulig temperaturlagdeling yder ca. 19 % mere end et markedsført low flow anlæg med en kappebeholder. Halvdelen af denne forøgelse kan opnås ved effektivt at forhindre temperaturudjævningen i varmelageret. Den anden halvdel af forøgelsen kan opnås ved at gøre varmetilførslen fra solfangervæsken til brugsvandet ideel, således at varmen tilføres lageret i det rigtige niveau og således at varme ikke føres nedad i varmelageret med den cirkulerende solfangervæske.

På basis af prisundersøgeler og på basis af ydelsesmålingerne kan det konkluderes at små low flow solvarmeanlæg ikke kan forbedres ved at erstatte kappebeholderen med en anden af de afprøvede lagertyper.

Undersøgelser viste, at de solfangere, som markedsføres i Danmark i dag, er velegnede til at indgå i low flow solvarmeanlæg.

Omfanget af problemerne med kritisk høje anlægstemperaturer for små low flow solvarmeanlæg blev klarlagt ved hjælp af beregninger. For anlæg med ét solfangerelement og for de fleste anlæg med to solfangerelementer kan problemerne løses ved hjælp af små kuldebroer og/eller ved hjælp af et styresystem, som sikrer en stor volumenstrøm i solfangerkredsen når anlægstemperaturerne bliver høje.

Anvendelse af små rørdiametre i solfangerkredsens rør kan reducere varmetabet fra varmelageret ved uønsket selvcirkulation om natten. Imidlertid er det ikke muligt helt at eliminere dette varmetab ved at reducere rørdiameteren.

Referencer

1] "Fordele ved små volumenstrømme i solvarmeanlæg. Måling på 3 små brugsvandsanlæg". Simon Furbo, Laboratoriet for Varmeisolering. Meddelelse nr. 188, december 1987.

2] "Højtydende solvarmeanlæg med små volumenstrømme. Eksperimentelle undersøgelser". Simon Furbo, Laboratoriet for Varmeisolering. Meddelelse nr. 205, marts 1989.

3] "Små low flow solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning - status". Simon Furbo, Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 90-7, oktober 1990.

4] "Højtydende solvarmeanlæg med små volumenstrømme. Teoretiske undersøgelser". Peter Berg, Laboratoriet for Varmeisolering. Meddelelse nr. 209, marts 1990.

5] "Små low flow solvarmeanlægs ydelser". Simon Furbo og Peter Fagerlund Carlsson. Meddelelse nr. 221, august 1991.

6] "Ydelser og erfaringer fra 9 små low flow solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning". Simon Furbo, Laboratoriet for Varmeisolering. Meddelelse nr. 224, januar 1992.

7] "Low flow test procedure and results". Svend Svendsen. Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 92-22, august 1992.

8] "Prøvning af solfangers effektivitet og driftssikkerhed foretaget for Prøvestationen for Solvarmeanlæg. Solfangerfabrikant: Ar-con Solvarme". Svend Svendsen, Laboratoriet for Varmeisolering, august 1989.

9] "Prøvning af solfangers effektivitet og driftssikkerhed foretaget for Prøvestationen for Solvarmeanlæg. Solfangerfabrikant: Solahart". Finn Kristiansen, Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 91-1, januar 1991.

10] "Prøvning af solfangers effektivitet og driftssikkerhed foretaget for Prøvestationen for Solvarmeanlæg. Solfangerfabrikant: Ar-Con Solvarme". Finn Kristiansen, Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 91-2. januar 1991.

11] "Prøvning af solfangers effektivitet og driftssikkerhed foretaget for Prøvestationen for Solvarmeanlæg. Solfangerfabrikant: Dansk Solvarme". Finn Kristiansen, Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 91-8, marts 1991.

12] "Prøvning af solfangers effektivitet og driftssikkerhed foretaget for Prøvestationen for Solvarmeanlæg. Solfangerfabrikant: Aidt Miljø ApS". Finn Kristiansen, Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 91-9, marts 1991.

[13] "Prøvning af solfangers effektivitet og driftssikkerhed foretaget for Prøvestationen for Solvarmeanlæg. Solfangerfabrikant: Batec". Finn Kristiansen, Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 91-3, januar 1991.

[14] "Prøvning af solfangers effektivitet og driftssikkerhed foretaget for Prøvestationen for Solvarmeanlæg. Solfangerfabrikant: Djurs Solvarme". Finn Kristiansen, Laboratoriet for Varmeisolering, Rapport nr. 92-3, 1992.

[15] "Prøvning af solfangeres effektivitet og driftssikkerhed foretaget for Prøvestationen for Solvarmeanlæg. Solfangerfabrikant: Aidt Miljø A/S". Finn Kristiansen, Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 92-30, oktober 1992.

[16] "Effektivitetsprøvning af solfanger foretaget for Prøvestationen for Solvarmeanlæg. Fabrikat: Aidt Miljø ApS". Svend Svendsen, Laboratoriet for Varmeisolering, november 1988.

[17] "Prøvning af solfangers effektivitet og driftssikkerhed foretaget for Prøvestationen for Solvarmeanlæg. Solfangerfabrikant: Dansk Solenergi A/S". Svend Svendsen, Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 89-13, juli 1989.

[18] "Effektivitetsprøvning af solfanger foretaget for Prøvestationen for Solvarmeanlæg. Fabrikant: Ans Solvarme". Svend Svendsen, Laboratoriet for Varmeisolering, februar 1988.

[19] "Solfangeres effektivitet målt og beregnet". Svend Svendsen, Laboratoriet for Varmeisolering. Meddelelse nr. 109, maj 1981.

[20] "Prøvning af microprocessorbaseret solfangerstyring". Simon Furbo & Peter Carlsson, Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 91-20, oktober 1991.