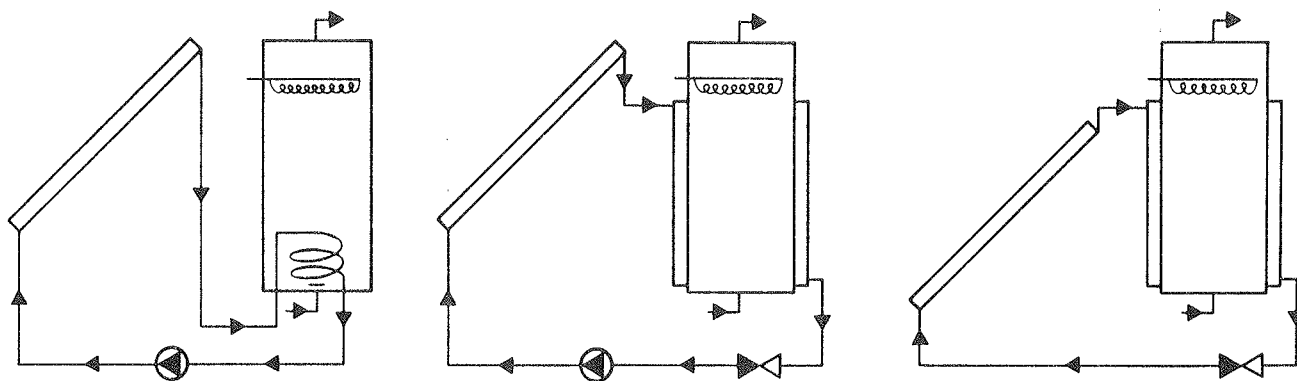


FORDELE VED SMÅ VOLUMENSTRØMME I SOLVARMEANLÆG

MÅLING PÅ 3 SMÅ BRUGSVANDSANLÆG



SIMON FURBO

MEDDELELSE NR. 188 DECEMBER 1987
LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

Medvirkende ved projektet:

Simon Furbo, civilingeniør.

Svend Erik Mikkelsen, civilingeniør.

Kim Finnich, stud.polyt.

Lars Jørgensen, elektronikmekaniker.

Flemming Karn, maskinarbejder.

Sally Lykke Høgsted, programmør.

Bente Kjølhede Petersen, assistent.

Elin van Kooten, overassistent.

Arne Skovslund, Haarlev Installationsforretning ApS.

Carl Chr. Frost, Carl Chr. Frost Isolering, Holte.

Desuden rettes en tak til følgende, som har været behjælpelig med ideer, kommentarer og kritik:

Søren Østergaard Jensen, civilingeniør.

Svend Aage Svendsen, civilingeniør.

Peter Trans, elektroniktekniker.

Peter Berg, civilingeniør.

Forord.

Denne rapport afslutter projektet: "Forbedring af solvarmeanlægs ydelser". Projektet, sag 1986-144/001-86.192, er finansieret af Teknologirådet.

Udover denne slutrapport er projektets foreløbige resultater beskrevet i paperet: "Is low flow operation an advantage for solar heating systems?" Paperet blev præsenteret på ISES Solar World Congress i Hamborg i september 1987.

Desuden er projektets resultater omtalt i "Vedvarende Energi" i december 1987, og Pressesekretariatet for Vedvarende Energi har for Teknologirådets Styregruppe for Vedvarende Energi udarbejdet en artikel om resultaterne til pressen.

Indholdsfortegnelse.

	<u>side</u>
Resume	1
1. Indledning.	2
2. Udformning af de tre små brugsvandsanlæg.	3
3. Målesystem.	14
4. Prøvebetingelser.	18
5. Måleresultater.	19
6. Vurdering af måleresultater.	39
7. Erfaringer fra anlæggenes drift.	42
8. Udvikling af pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm.	46
9. Konklusion.	49
Summary.	50
Referencer.	51
Bilag 1: "Is low flow operation an advantage for solar heating systems?".	
Bilag 2: Poster præsenteret på ISES Solar World Congress i Hamborg i september 1987.	

Resume.

Tre små solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning er opført på laboratoriets forsøgsareal. Det første anlæg er et pumpedrevet referenceanlæg med en indbygget varmevekslerspiral i en varmtvandsbeholder. Det andet anlæg er et selvcirkulerende anlæg og det tredje er et pumpedrevet anlæg med en kappebeholder og en lille volumenstrøm. Referenceanlægget er identisk med hovedparten af de anlæg, som markedsføres i dag.

De tre anlæg blev afprøvet under de samme driftsbetingelser. Målingerne viste, at det selvcirkulerende anlæg yder omtrent 10% mere end referenceanlægget og at det pumpedrevne anlæg med kappebeholderen og en volumenstrøm på omtrent $0,1 - 0,2 \text{ l/min m}^2$ solfanger yder omtrent 20% mere end referenceanlægget. Merydelserne er gældende både i perioder med og uden drift af de elpatroner, som alle varmelagrene er forsynet med.

Resultaterne var så overraskende, at der blev foretaget ekstra målinger med solfangerne for referenceanlægget og det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm ombyttede. Disse målinger gav samme forskelle - man kan derfor stole på resultaterne.

Anlæg med små volumenstrømme er altså særdeles attraktive, og på basis af de gennemførte undersøgelser må det anbefales, at der iværksættes forsknings- og udviklingsarbejde for at udvikle optimale anlæg med små volumenstrømme.

1. Indledning.

Selvcirkulerende solvarmeanlæg kan have en højere ydelse end "traditionelle" pumpeanlæg, se f.eks. [1]. Desværre kan selvcirkulerende anlæg kun benyttes få steder i Danmark, idet lageret skal placeres højere end eller på højde med solfangeren. En lagerplacering på et uisolaret loftrum må frarådes, idet der er risiko for frostsprængning i brugsvandskredsen. Desuden er det ofte besværligt at installere en varmtvandsbeholder på loftet. I Danmark er selvcirkulerende anlæg derfor hovedsageligt begrænset til rene sommeranlæg og til nybyggeri, hvor varmelageret kan placeres i en opvarmet del af boligen.

Det er derfor i dette projekt undersøgt, om det er muligt at overføre de mekanismer, som resulterer i den høje ydelse for et selvcirkulerende anlæg til et pumpedrevet solvarmeanlæg. Dette er forsøgt ved at benytte en meget lille volumenstrøm i solfangerkredsen.

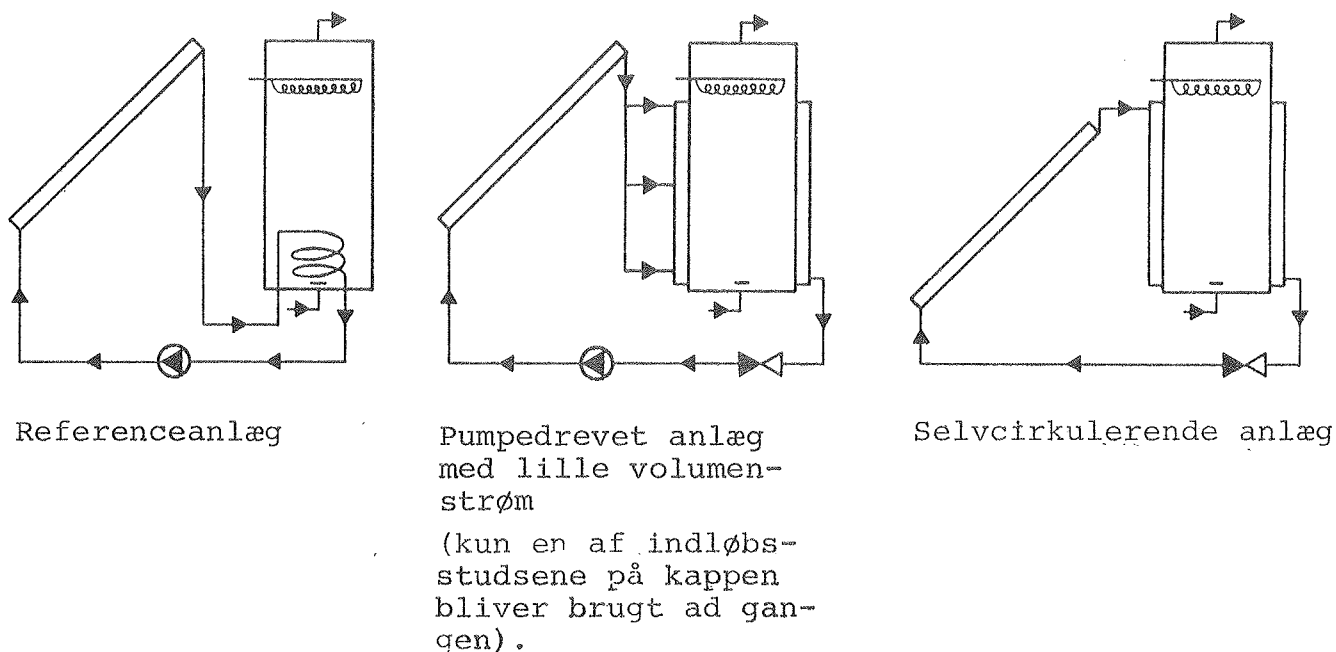
Da der ikke er udført direkte eksperimentelle sammenligninger mellem ydelsen for "traditionelle" solvarmeanlæg, selvcirkulerende solvarmeanlæg og pumpedrevne solvarmeanlæg med en lille volumenstrøm i solfangerkredsen under ensartede prøvningsbetingelser, blev der opført tre sådanne anlæg til brugsvandsopvarmning.

Der blev installeret et styresystem, så varmtvandsforbruget er det samme for de 3 anlæg.

Anlæggene blev forsynet med måleudstyr, så det er muligt både at måle anlæggenes ydelser og at følge anlæggenes virkemåde. Målingerne blev gennemført i sommeren 1987 med forskellige driftsstrategier og varmtvandsforbrug.

2. Udformning af de tre små brugsvandsanlæg.

Tre små solvarmeanlæg blev opført på laboratoriets forsøgsareal: et referenceanlæg, et pumpedrevet anlæg med lille volumenstrøm, i solfangerkredsen og et selvcirkulerende anlæg. En skematisk illustration af de tre anlæg er vist på figur 1.



Figur 1. Skematisk illustration af de tre afprøvede solvarmeanlæg.

Hvert solvarmeanlæg består af to type KPV solfangerelementer fra Islev Solvarme ApS. Solfangerne er placeret på forsøgssopstillingens tag. Solfangerens absorber er en kanalplade af rustfrit stål med en selektiv MAXORB-foliebelægning. Absorberens kanaler er langsgående på en sådan måde, at solfangervæsken, som transporteres fra bunden til toppen af absorberen, køler hele absorberens tværsnitsareal. Det samlede solfangerareal for hvert anlæg er $3,9 \text{ m}^2$, solfangerne vender mod syd og solfangerhældningen er 45° . Hvert solfangerelement indeholder et solfangervæskevolumen på 1,6 l svarende til $0,8 \text{ l/m}^2$ solfanger.

Anlæggenes varmelagre er placeret i et uisolaret rum under forsøgssopstillingens tagryg. Beholderne, som er placeret i sam-

me niveau som solfangerne, er beskyttet mod vind og vejr. Som solfangervæske benyttes i alle tre anlæg en 50% propylenglycol-vand blanding.

Varmelageret er i alle tre anlæg en opretstående cylinderformet varmtvandsbeholder fra Sdr. Højrup Maskinfabrik A/S. I referenceanlægget benyttes en varmtvandsbeholder med en indbygget varmevekslerspiral, i de to andre anlæg benyttes en kappebeholder. Varmtvandsbeholderens volumen er 197 l, diameteren er 46 cm og højden er 120 cm.

Varmevekslerspiralen i referenceanlæggets varmtvandsbeholder er placeret i beholderens nederste sjattedel. Varmevekslerens materiale er kobber, spirallængden er 9 m og spiralens udvendige og indvendige diameter er henholdsvis 10 mm og 8,4 mm.

En kappe omgiver en del af varmtvandsbeholderen i det selvcirkulerende anlæg og i det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm. Kappevolumenet er 27 l. Kappens diameter er 51 cm og kappehøjden er 84 cm. Kappens øverste del er placeret 1/5 fra toppen af varmtvandsbeholderen og den nederste del er placeret 1/10 fra bunden af varmtvandsbeholderen.

Alle tre varmtvandsbeholdere er forsynet med en elpatron på omtrent 1000W. Varmelegemet er placeret 1/5 af beholderhøjden fra toppen af beholderen. Beholderne er isoleret med 5 cm mineraluld med undtagelse af beholderbundene, som er uisolerede.

Solfangerkredsen i referenceanlægget og i anlægget med lille volumenstrøm består af omtrent 5 m 12/10 mm kobberrør, mens solfangerkredsen i det selvcirkulerende solvarmeanlæg består af omtrent 5 m 18/16 mm kobberrør. Som rørisolering benyttes i alle tre anlæg 20 mm polyethylencelleplast.

Pumperne i referenceanlægget og det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm er styret af en differenstermostat med en temperaturføler placeret øverst på absorberen og en temperaturføler placeret i bunden af varmtvandsbeholderen. Pumpen startes når temperaturforskellen mellem toppen af absorberen og bunden af varmtvandsbeholderen bliver 5 K. Pumpen stoppes igen når temperaturforskellen mellem toppen af absorberen og bunden af varmtvandsbeholderen bliver mindre end 0,5 K - dog benyttes andre

stopdifferenser i de perioder, hvor der benyttes ekstreme volumenstrømme i solfangerkredsen således at pumpen først stoppes når solfangerudbyttet bliver mindre end omtrent 50W.

I referenceanlægget og i det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm benyttes en 3-trins Grundfos cirkulationspumpe type UPS 15-35x20. I de fleste perioder er pumpens trin 1, svarende til et effektforbrug på 35W for pumpen, benyttet.

Alle tre anlæg er forsynet med en åben ekspansionsbeholder i solfangerkredsen.

Som det fremgår af figur 1 kan solfangervæsken i det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm tilføres varmelageret i toppen, i midten og i bunden af kappen. Hvert af de tre indløb til kappen er forsynet med en manuelt betjent ventil, således at anlægget kan afprøves med solfangervæsken tilført et niveau i kappen ad gangen.

I alle tre anlæg er de to solfangerelementer parallelkoblede i solfangerkredsen. Solfangerkredsene i de to pumpedrevne anlæg er hver forsynet med tre Taco-Settere. Herved kan volumenstrømmen i solfangerkredsen reguleres nøjagtigt. Desuden kan det kontrolleres, at gennemstrømningen igennem hvert anlægs to solfangerelementer er den samme.

Koldt vand tilføres under tapningerne til bunden af beholderne, mens varmt vand tappes fra toppen af beholderne.

Et automatisk tappesystem er opbygget. Hver tapning startes med en blindtapning for at sikre, at der igennem alle tapningerne holdes en konstant lav koldtvandstemperatur. Efter blindtapningen tappes en beholder ad gangen, først referenceanlægget, derefter det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm og til sidst det selvcirkulerende anlæg. Tappeproceduren bestående af blindtapning, tapning af de tre anlæg og korte pauser mellem tapningen af de tre beholdere har en varighed på omtrent $\frac{1}{2}$ time. Antallet af daglige tapninger og tappetidspunkterne kan vælges efter behov.

Under tapningen af hvert af de tre anlæg føres det tappede vand til en opsamlingsbeholder. Opsamlingsbeholderen er forsynet med

en nøjagtig niveaumåler. Så snart et ønsket vandvolumen er tappet fra lageret afbrydes tapningen.

Tappesystemet er også forsynet med en elektronisk energimåler, Combimeter type E50 fra ISS Clorius. Ved hjælp af energimåleren måles den tappede energi under hver tapning. Så snart en ønsket energimængde er tappet fra lageret afbrydes tapningen.

Under hver tapning tappes derfor enten et ønsket vandvolumen, hvis lagertemperaturen er lille eller en ønsket energimængde, hvis lagertemperaturen er høj. Tappesystemet gør det derfor muligt at simulere varmtvandsforbrug på en realistisk og ensartet måde for de tre anlæg.

Anlæggene og tappesystemet blev opført af Arne Skovslund, Haarlev Installationsforretning ApS. Varmelagrene og rørsystemerne blev isoleret af Carl Chr. Frost Isolering, Holte.

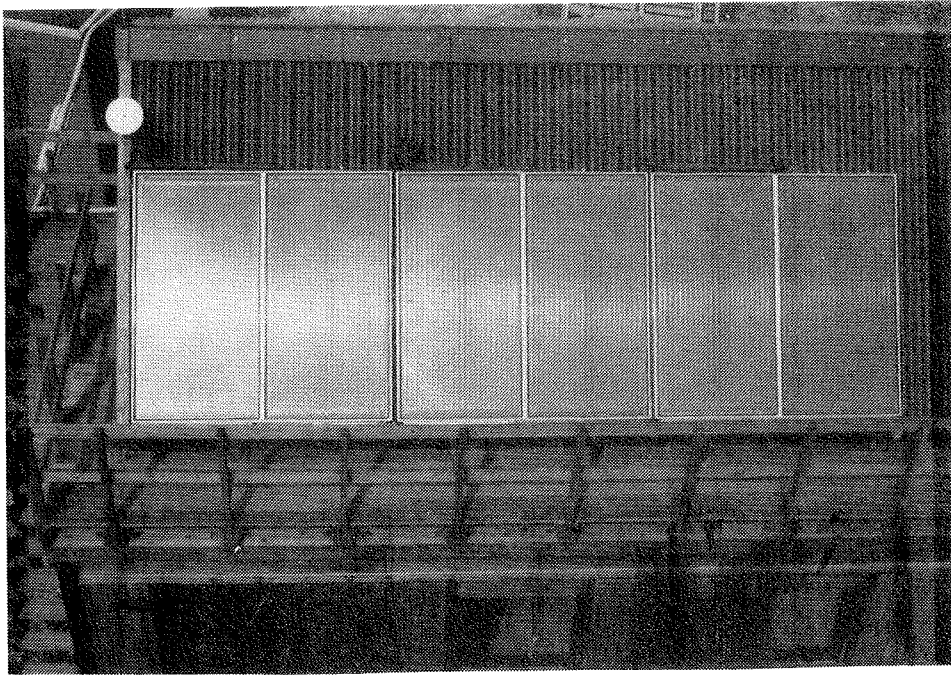
Referenceanlæggets solfangere er placeret yderst til venstre på taget, solfangerne for det pumpedrevne anlæg med lille varme-strøm er placeret i midten og solfangerne for det selvcirkulerende anlæg er placeret længst til højre på taget.

Anlæggene var opført, tappesystemet var indkørt og målesystemet, som omtales i afsnit 3, var kontrolleret i slutningen af maj måned. Forsøgene startede derfor på dette tidspunkt.

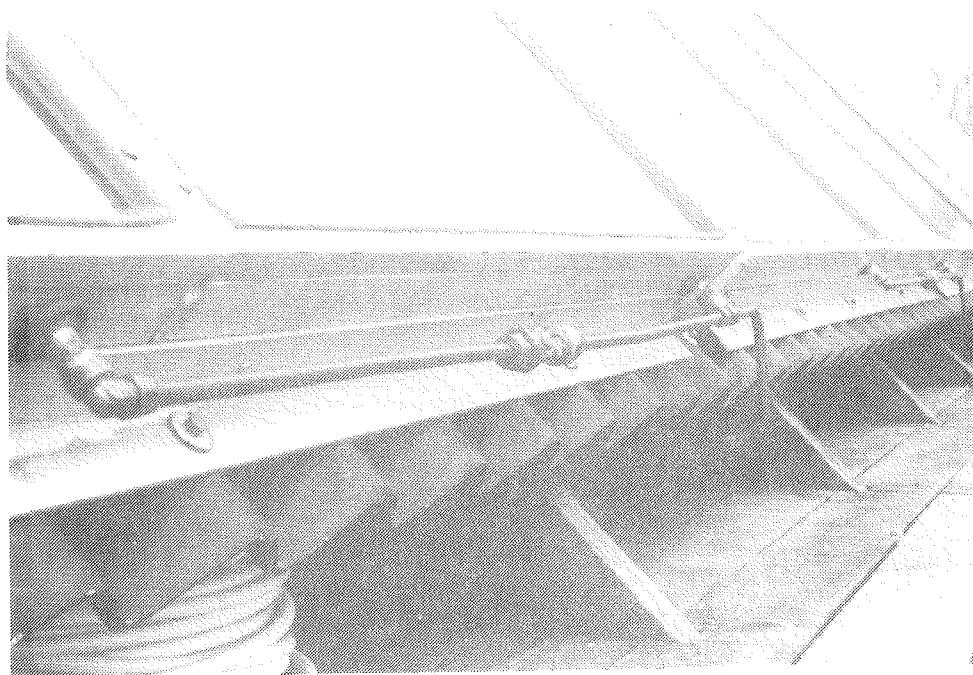
Måleresultaterne viste, at der er en uventet stor forskel mellem ydelsen for referenceanlægget og ydelsen for det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm.

For at undersøge, om forskellen skyldes utilsigtede forskelle i solfangereffektiviteten for de benyttede solfangere i de to anlæg blev der foretaget en ombygning af solfangerkredsene for de to pumpedrevne anlæg. Ombygningen muliggør en flexibel kobling mellem solfangerne og varmelagrene. Solfangerne for de to anlæg kan ombyttes, således at referenceanlægget med spiralbeholderen kan kobles til de midterste solfangere og det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm kan kobles til de solfangerne, som normalt er koblet til referenceanlægget. Ombygningen blev foretaget i perioden 5 - 8. august.

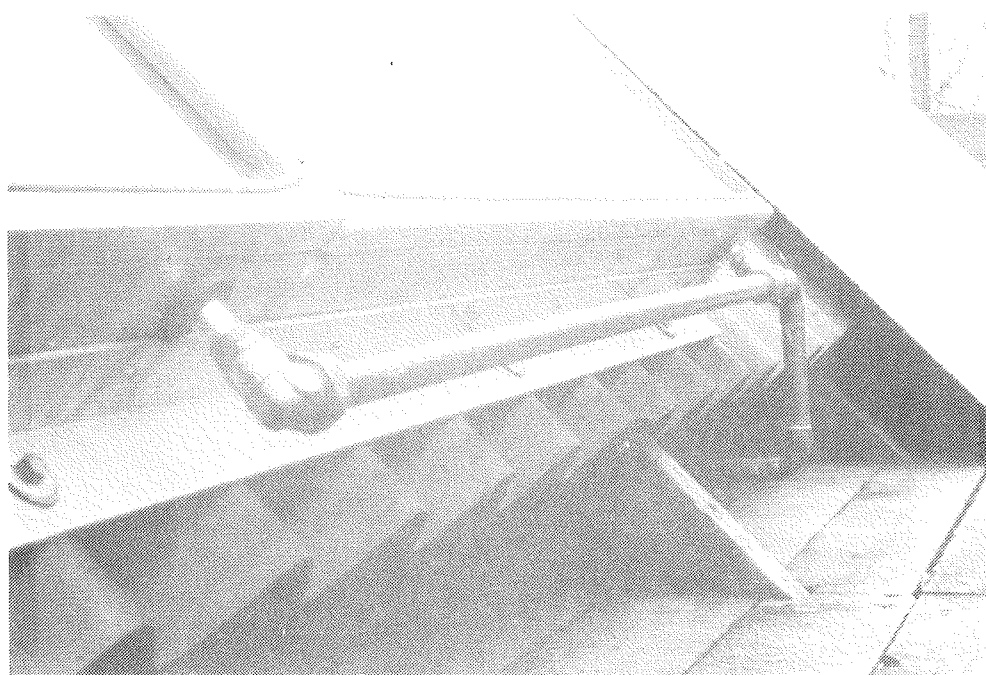
Figur 2 - 10 viser dele af de tre anlæg og figur 11 og 12 viser dele af tappesystemet.



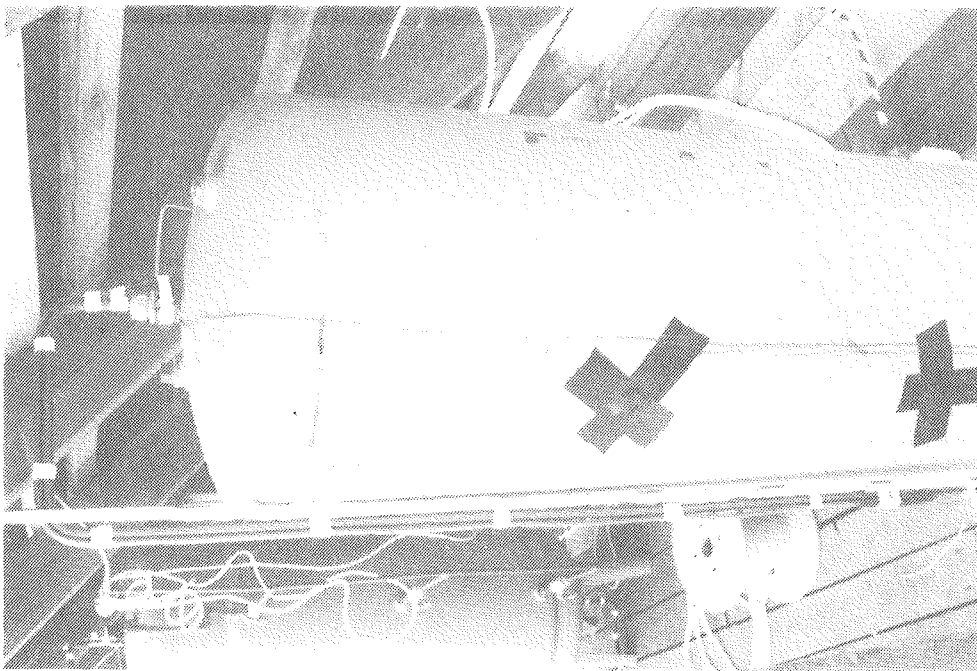
Figur 2. De tre anlægs 6 solfangerelementer placeret på forsøgshuset. Til venstre referenceanlægget, i midten det pumpedrevne anlæg med kappebeholderen og til højre det selvcirkulerende anlæg.



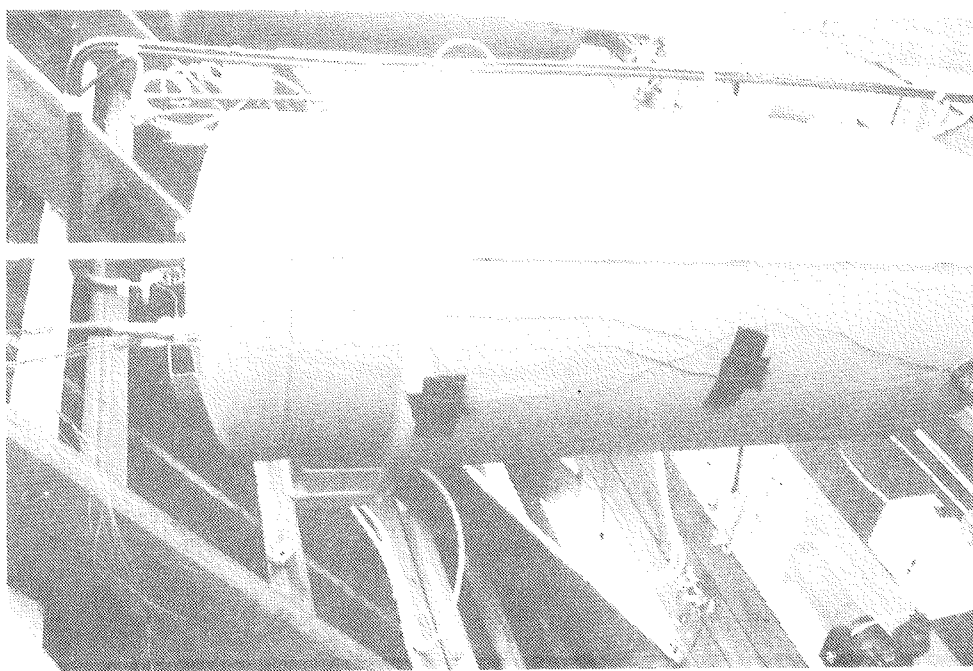
Figur 3. Solfangerkredsene under installation for de to pumpedrevne anlæg ovenfor og nedenfor solfangerne med de åbne ekspansionsbeholdere og Taco-settere til kontrol af volumenstrømfordelingen.



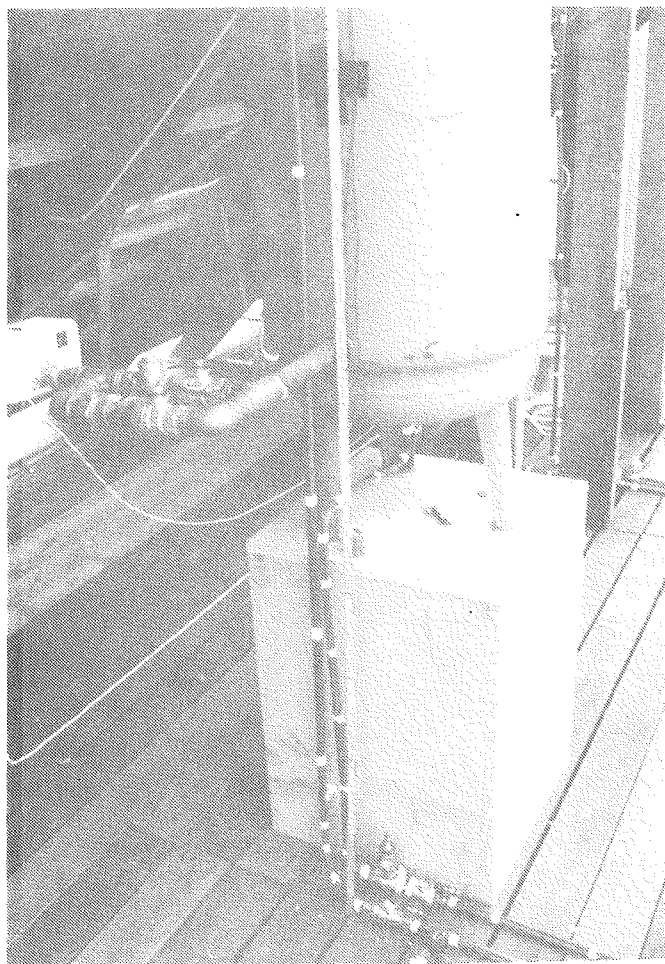
Figur 4. Solfangerkredsen under installation for det selvcirkulerende anlæg ovenfor og nedenfor solfangerne.



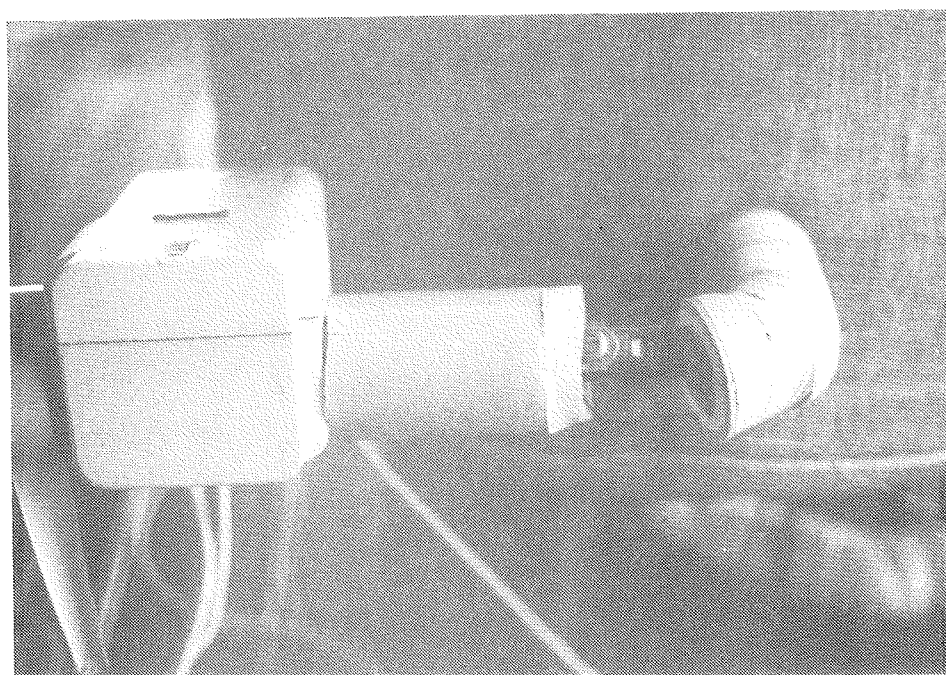
Figur 5. Referenceanlæggets varmtvandsbeholder under installation.



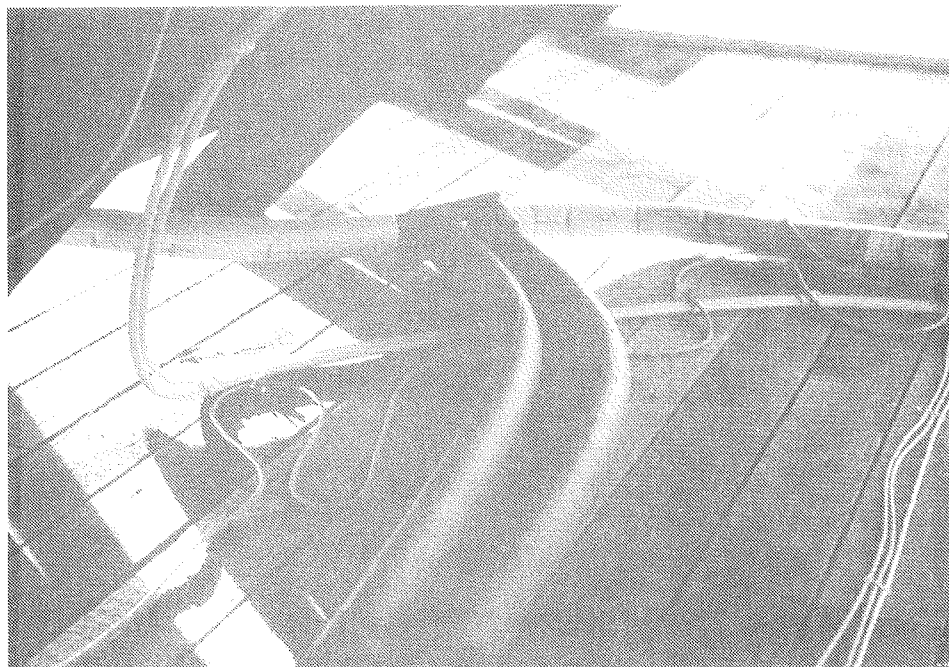
Figur 6. Kappebeholderen for det pumpe-drevne anlæg med lille volumenstrøm under installation.



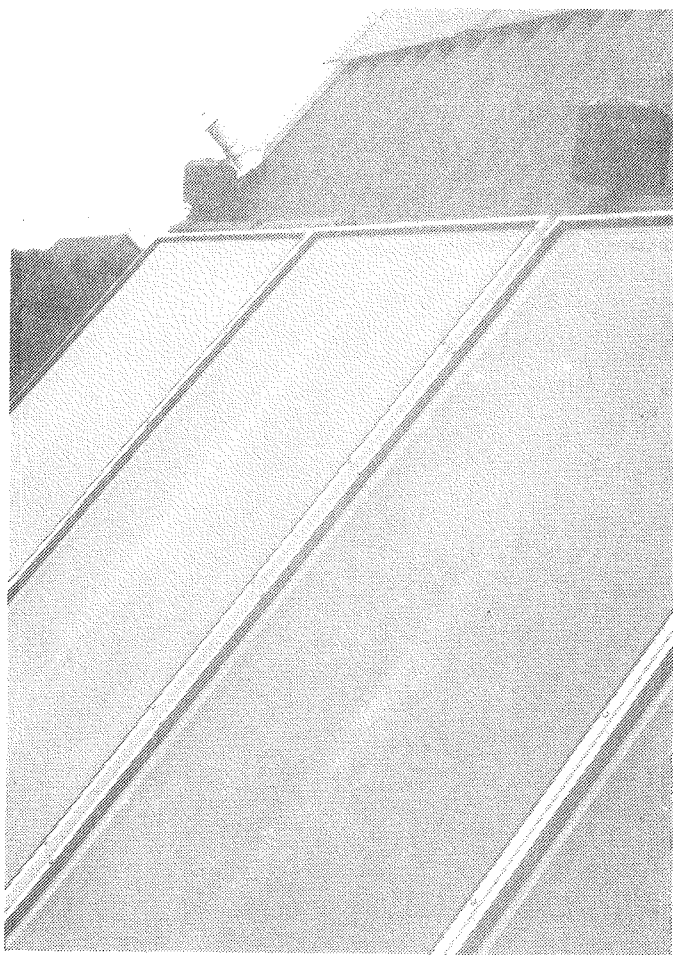
Figur 7. Kappebeholderen for det selvcirkulerende anlæg under installation. Beholderen er placeret om-trent 70 cm højere end de øvrige beholdere.



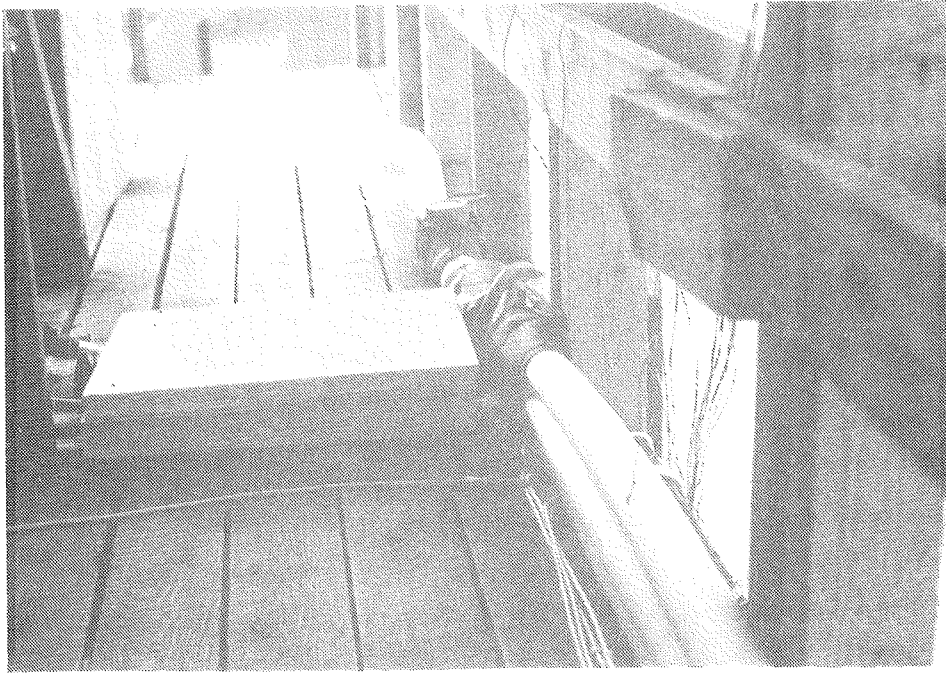
Figur 8. Taco-setter til kontrol af volumenstrøm og energimåleren i solfangerkredsen for det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm.



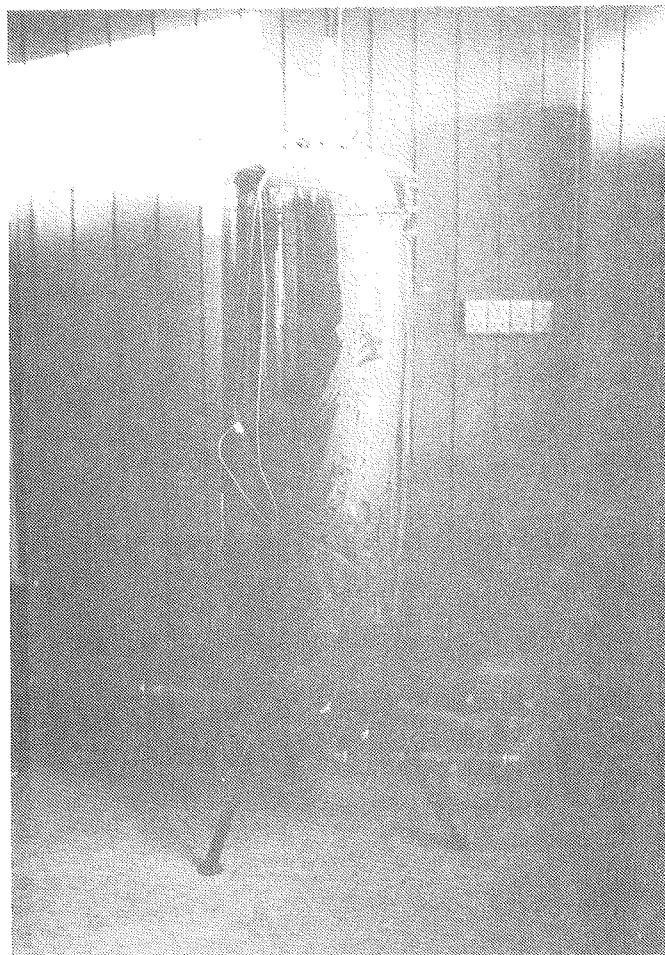
Figur 9. En del af de isolerede solfangerkredse i de to pumpedrevne anlæg efter ombygningen, som muliggør en flexibel kobling mellem solfangerne og varmelagrene.



Figur 10. De to pumpedrevne anlægs isolerede åbne ekspansionsbeholdere.



Figur 11. Det isolerede koldt vandstilførselsrør og de isolerede varmt vandstapningsrør fra anlæggene.



Figur 12. Opsamlingsbeholderen med niveaumåler.

3. Målesystem.

Ved hjælp af måleudstyret er det muligt detaljeret at følge de tre anlægs drift. Under driften måles hele tiden i hvert anlæg volumenstrømmen i solfangerkredsen og effekten, som overføres fra solfangerkredsen til varmelageret ved hjælp af en kalibreret elektronisk energimåler, Combimeter type E50 fra ISS Clorius. De summerede størrelser af volumenstrømmen og effekttillførslen i form af energimængden registreres også.

Som nævnt i afsnit 2 måles den tappede vandmængde og energimængde under hver tapning fra hvert anlæg ved hjælp af en kalibreret elektronisk energimåler, Combimeter type E50 fra ISS Clorius. Desuden måles som kontrolforanstaltning de tappede vandvolumener ved hjælp af tre almindelige vingehjulsmålere.

Varmelagrenes elpatroners energiforbrug måles ved hjælp af time-tællere og ved hjælp af effektmålinger fra tid til anden igennem forsøgsperioden.

Cirkulationspumpernes driftstid registreres ved hjælp af timetællere.

Det totale solindfald på solfangerne registreres ved hjælp af et solarimeter og udelufttemperaturen registreres ved hjælp af et termoelement igennem hele forsøgsperioden.

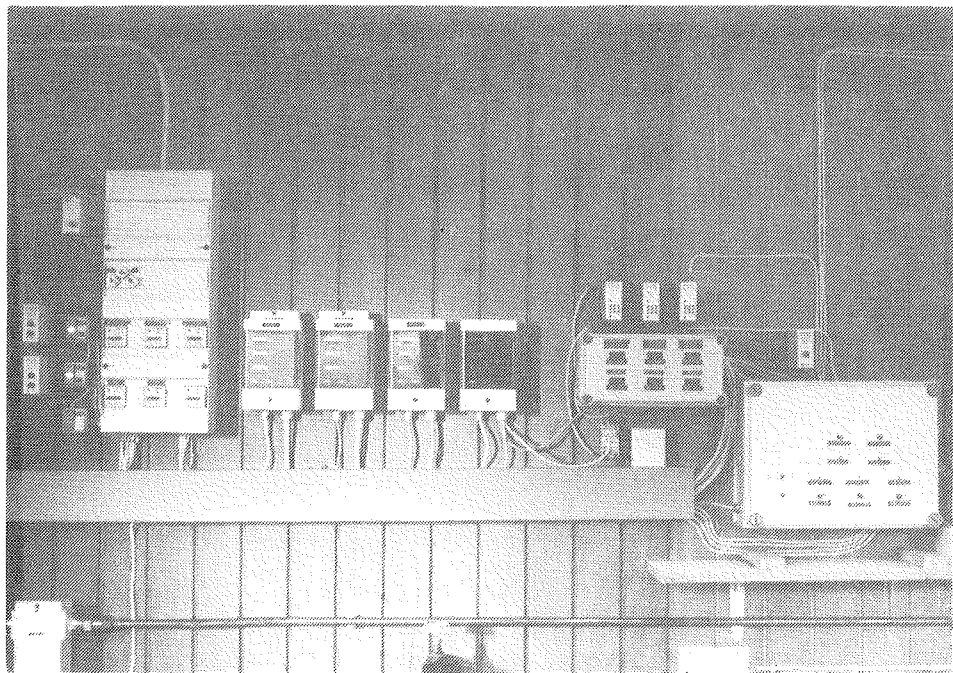
Endelig måles de vigtigste anlægstemperaturer ved hjælp af termoelementer igennem hele forsøgsperioden. Temperaturerne følges i forskellige niveauer i varmtvandsbeholderne og temperaturerne i solfangerkredsen før og efter solfangeren registreres ligeledes.

Før forsøgsperioden startede blev energimålerne og volumenstrømmålerne kalibreret og igennem forsøgene blev varmelagrenes varmebalance fra tid til anden kontrolleret.

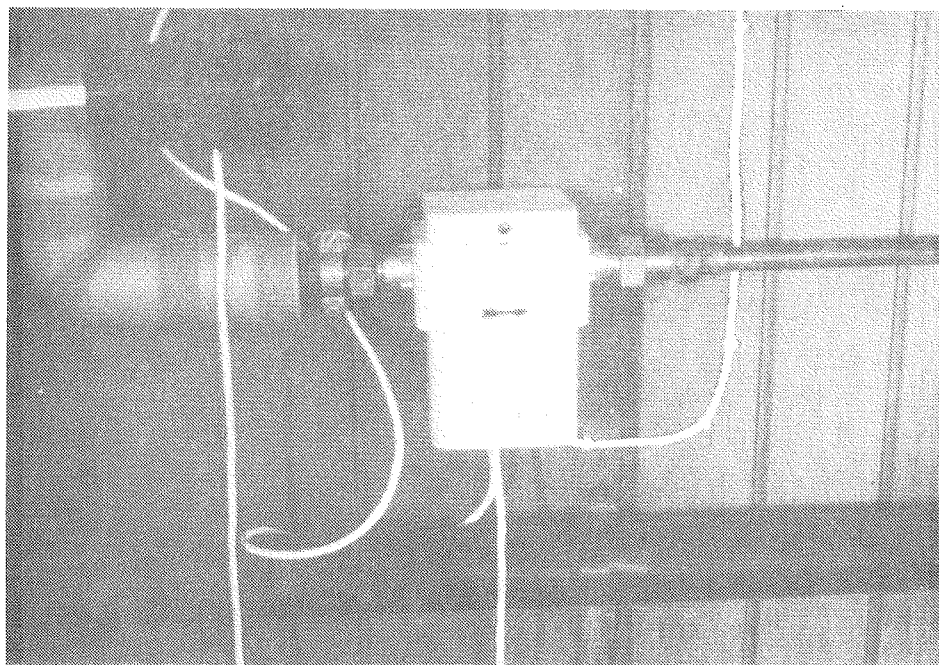
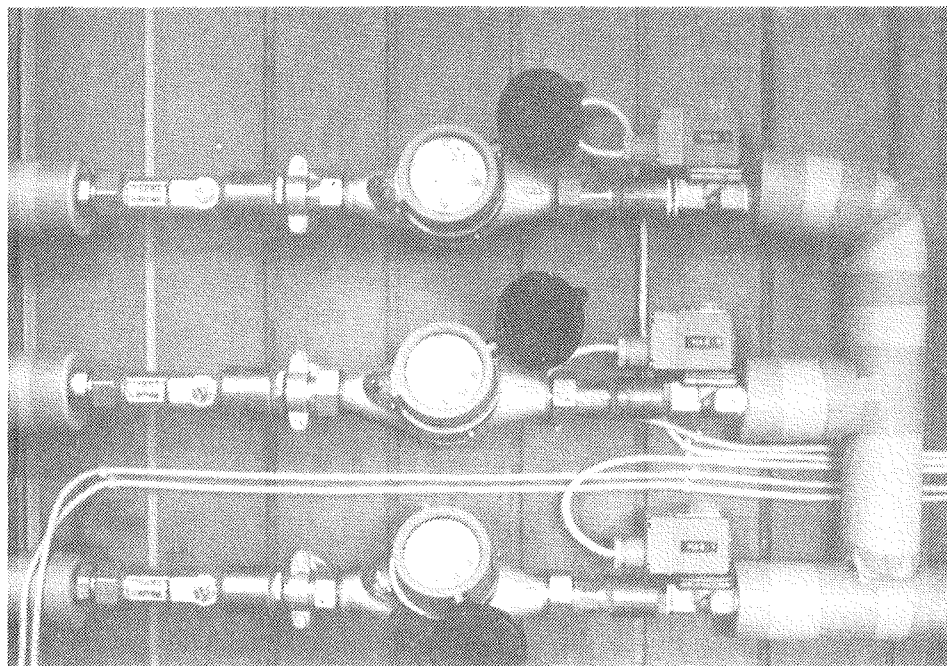
Alle øjebliksmålingerne opsamles af en 30 kanal skriver. Det er derfor både nemt at indstille volumenstrømmen i solfangerkredsen som man ønsker og nemt at studere hvert enkelt anlægs virkemåde.

De summerede volumenmængder og energimængder aflæses manuelt en gang dagligt.

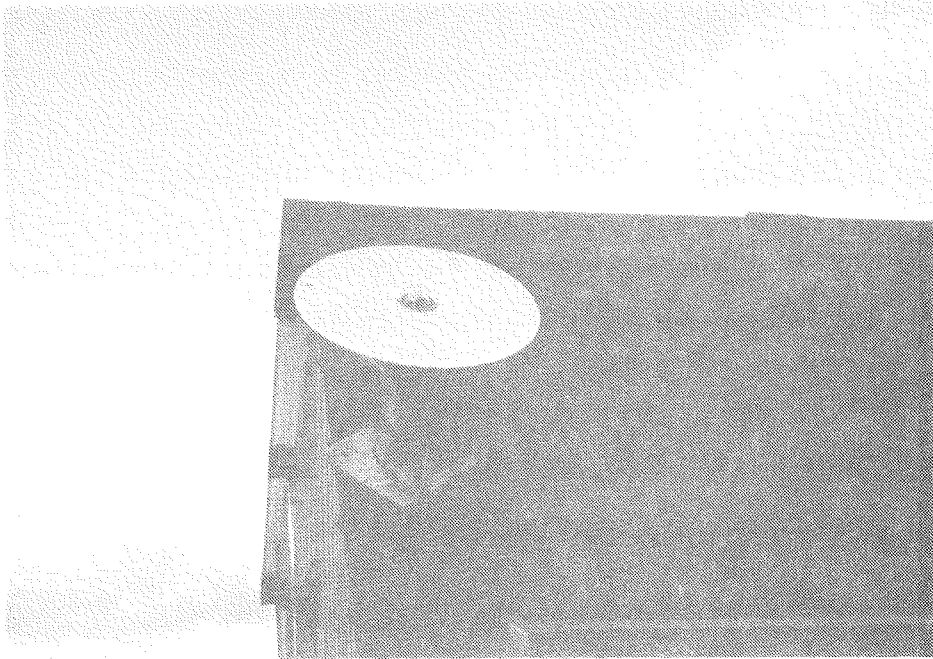
Figur 13-16 viser dele af måle- og kontrolsystemet.



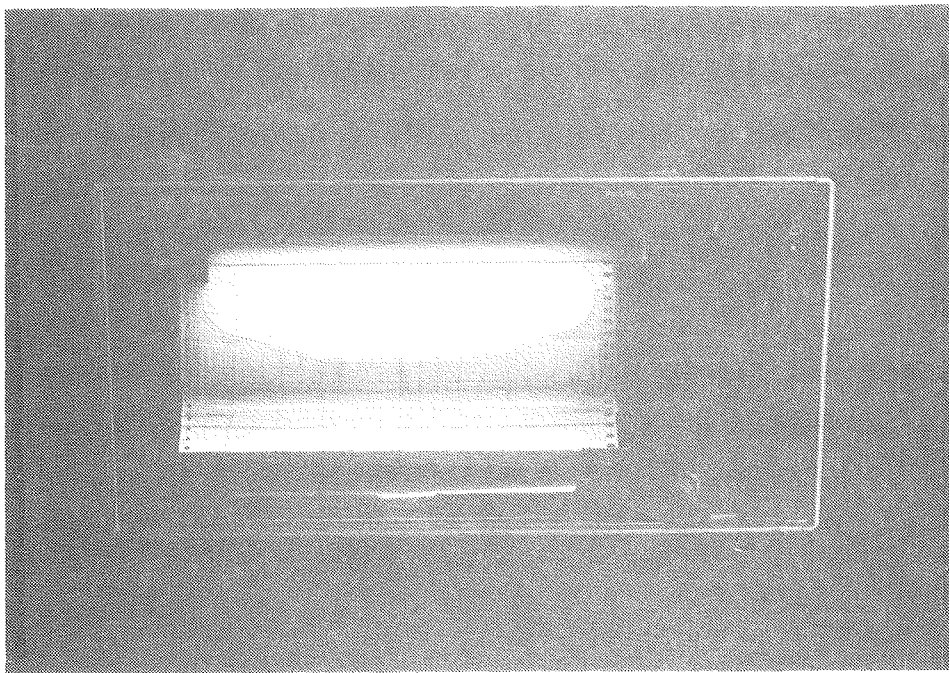
Figur 13. Kontrol- og målesystem med fra venstre mod højre: Timetællere for elpatroner og pumper, kWh-målere for solfangerkredsene og for varmtvandstapningerne, automatiske og manuelle styringspaneler for varmtvandstapningen.



Figur 14. Magnetventiler, volumenstrømmålere og Taco-settere for varmtvandstapning for hver af de tre anlæg, og nederst det fælles benyttede Combi-meter, som måler energien tappet fra hvert anlæg.



Figur 15. Solarimeteret til registrering af solindfald.



Figur 16. 30 kanal skriveren til opsamling af alle øjebliksmålinger.

4. Prøvebetingelser.

De tre anlæg blev afprøvet under de samme betingelser: solindfaldet på solfangerne og varmtvandsforbruget er det samme for alle anlæggene. Et antal gange pr. dag tappes 50 l varmt vand fra hvert varmelager. Ved at tappe en så stor vandmængde få gange pr. dag i stedet for at tappe mindre vandmængder flere gange dagligt reduceres måleunøjagtigheden til et minimum. Tapningerne foretages på samme tidspunkt (inden for $\frac{1}{2}$ time) for alle tre anlæg, og koldtvandstemperaturen er den samme. Koldtvandstemperaturen er omkring 14°C .

Hvis varmtvandstemperaturen er lavere end 50°C tappes 50 l fra lageret. Hvis varmtvandstemperaturen er højere end 50°C tappes en energimængde svarende til 50 l vand ved 50°C . Dette svarer til en realistisk tapning, hvor koldt vand opblandes med varmt vand, hvis tappetemperaturen er for høj.

Når varmtvandsforbruget er 150 l/dag startes tapningerne kl. 8^{00} , kl. 12^{00} og kl. 18^{00} . Når varmtvandsforbruget er 200 l/dag suppleres med en tapning kl. 19^{00} , og er varmtvandsforbruget 250 l/dag suppleres yderligere med en tapning kl. 20^{00} .

I perioder, hvor varmelagrenes elpatroner er i drift, svarende til en sommerperiode tilfører elpatronen varme til lageret, hvis temperaturen i toppen af varmelageret er mindre end 52°C .

Der blev gennemført en række forsøg med forskellige driftsstrategier for hvert enkelt anlæg. Igennem hvert forsøg, som typisk har en varighed på 5-7 dage, blev driftsstrategien for hvert enkelt anlæg fastholdt. Før hver prøveperiode blev alle varmelagrene helt tømt for varme ved at 250 l blev tappet fra hver varmtvandsbeholder. Herved sikres ensartede startbetingelser for de tre anlæg. Ydelsen for anlæggene bliver naturligvis her ved lavere end under normal drift, men sammenligningen mellem ydelserne for de tre anlæg bliver mere retfærdig.

5. Måleresultater.

Før anlægsmålingerne blev påbegyndt blev et solfangerelement magen til anlæggenes solfangerelementer effektivitetsprøvet i den kunstige sol. Som solfangervæske blev en 50% vand/propylen-glycol blanding benyttet. Solfangerens effektivitet blev ved en volumenstrøm på 1,2 l/min m² solfanger fundet til:

$$\eta = 0,79 - 3,4 \cdot \frac{T_m - T_a}{I} - 0,016 \cdot \frac{(T_m - T_a)^2}{I}$$

Solfangerens effektivitet blev desuden målt ved en række lavere volumenstrømme. Disse måleresultater fremgår af tabel 1.

Massestrøm	Volumenstrøm	Intensitet	Omgivelses-temperatur	Indløbs-temperatur	Udløbs-temperatur	Solfanger-effektivitet
kg/s	l/minm ²	I W/m ²	T _a °C	T _i °C	T _u °C	η
0,0198	0,61	921	23,0	54,7	69,9	0,61
0,0102	0,31	921	23,6	49,2	77,7	0,59
0,0048	0,15	915	23,6	40,3	95,6	0,55
0,0028	0,09	930	23,3	26,8	113,8	0,50

Tabel 1. Måleresultater fra solfangerprøvning i kunstig sol med små volumenstrømme.

I [2] angives, at solfangerens middelvæsketemperatur T_m kan beregnes ved hjælp af indløbstemperaturen T_i og udløbstemperaturen T_u for solfangeren ved hjælp af formlen:

$$T_m = \alpha \cdot T_u + (1-\alpha) \cdot T_i, \text{ hvor}$$

$$\alpha = - \frac{\dot{m} \cdot c_p}{U} + \frac{1}{1 - e^{-U/\dot{m} \cdot c_p}}, \text{ hvor}$$

$\dot{m}$ er solfangervæskens massestrøm, kg/s m² solfanger

c_p er solfangervæskens varmekapacitet, J/kg K

U er solfangerens varmetabskoefficient, W/m²K

Benyttes den målte varmetabskoefficient ved 1,2 l/min m², altså

U = 3,4 + 0,016 · (T_m - T_a) W/m²·K, i ovennævnte formler kan

T_m beregnes ved iteration.

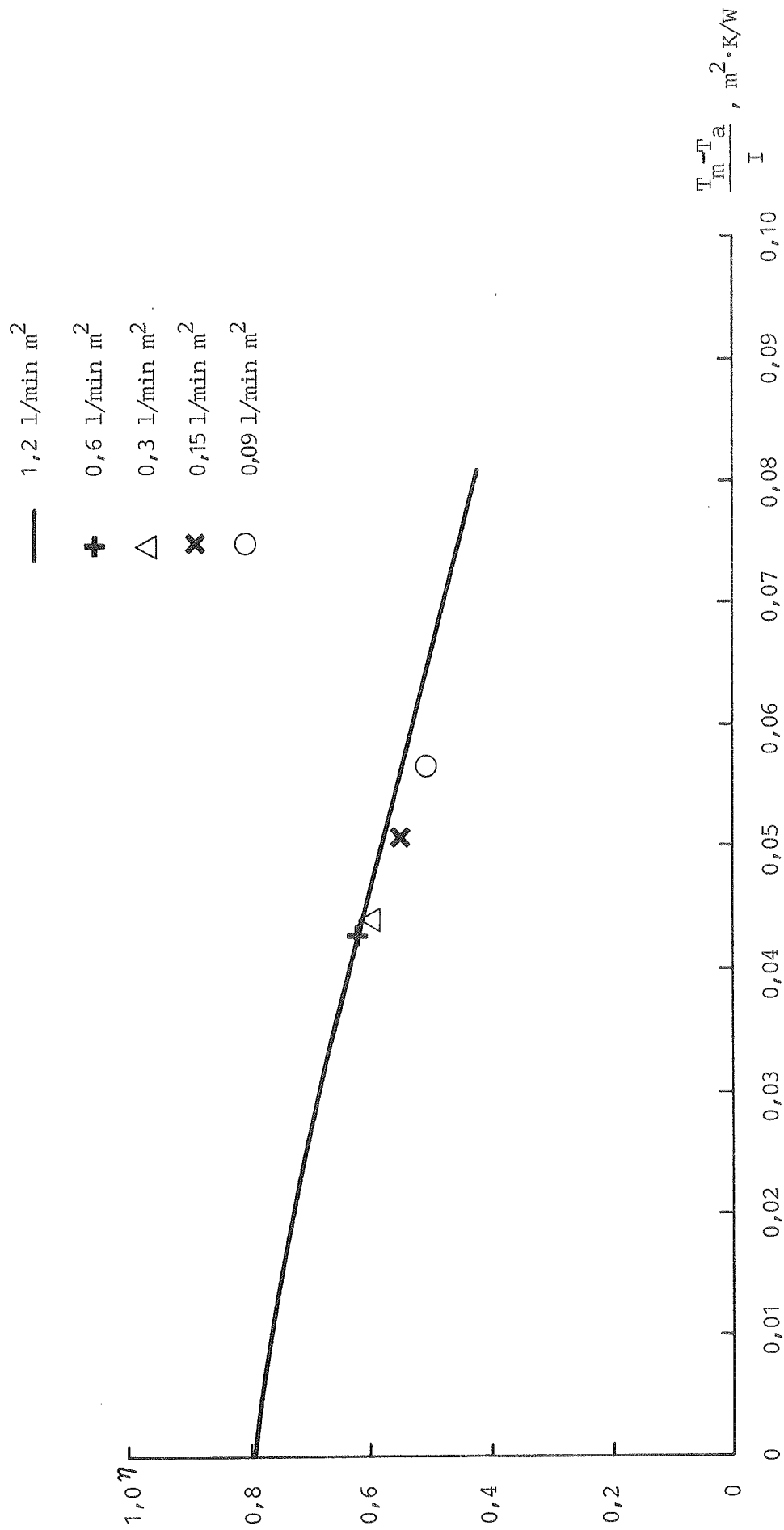
T_m er således fundet for de 4 målinger med lille volumenstrøm, og resultaterne fremgår af figur 17. Det ses, at den målte solfangereffektivitet i den kunstige sol kun reduceres lidt når volumenstrømmen reduceres, i hvert fald ned til $0,1 \text{ l/min m}^2$.

Der skal dog tages en række forbehold i forbindelse med ovennævnte undersøgelse. Den benyttede teori forudsætter, at varmetabskoefficienten for solfangeren er jævnt fordelt over hele solfangerens højde. Dette er som bekendt ikke tilfældet på grund af kanttabene for oven og for neden. Endvidere afhænger bestemmelsen af solfangerens middelvæsketemperatur som beskrevet af solfangerens varmetabskoefficient, som faktisk ikke kendes når volumenstrømmen er lille. X-axe værdierne for målepunkterne på figur 17 er derfor bestemt med nogen unøjagtighed. Endelig kan den lidt skæve lysintensitetsfordeling fra den kunstige sol måske bevirke, at den målte solfangereffektivitet er anderledes end den ville være udendørs, hvor solindfaldet er fuldstændigt ensartet. Det skal også her nævnes, at solfangereffektivitetens afhængighed af volumenstrømmen vil variere fra solfangertype til solfangertype. Det ligger uden for dette projekts rammer at undersøge disse forhold nærmere.

Der blev gennemført målinger i en række perioder med forskellige driftsstrategier for de enkelte anlæg. I de fleste perioder benyttedes en volumenstrøm på $1,6 - 2,0 \text{ l/min}$ svarende til $0,4 - 0,5 \text{ l/min m}^2$ solfanger for referenceanlægget, mens der i de fleste perioder benyttedes en volumenstrøm på $0,4 - 0,6 \text{ l/min}$ svarende til $0,1 \text{ l/min m}^2$ solfanger for det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm. Normalt benyttedes kappens øverste indløb i det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm.

Tabel 2 giver en oversigt over de gennemførte måleperioder og perioder uden forsøg forårsaget af forskellige problemer. For hver forsøgsperiode er det daglige varmtvandsforbrug anført hvis det er forskelligt fra 150 l/dag . Desuden er eventuel elpatron-drift og volumenstrømmen for referenceanlægget og det pumpedrevne anlæg med kappebeholderen, flow 1 og flow 2 angivet. Endvidere er eventuelle væsentlige afvigelser fra de normale driftsstrategier anført.

Forsøgene har kun været afbrudt af få og rimeligt kortvarige perioder med problemer.



Figur 17. Målte solfangereffektiviteter.

MAJ			JUNI			JULI			AUGUST			SEPTEMBER			OKTOBER			NOVEMBER		
F 1	L 2	S 3	M 1	T 2	O 3	O 1	T 2	L 1	L 1	T 1	T 1	T 1	F 2	I 1	I 1	F 2	S 1	M 2	O 4	
M 4	T 5	O 6	T 3	F 4	L 4	F 3	F 3	M 3	M 3	O 2	O 2	O 2	T 3	L 3	L 3	T 3	T 3	T 3	T 3	
L 5	F 6	M 7	L 6	M 6	M 6	M 6	M 6	T 4	T 4	F 4	F 4	F 4	S 4	M 5	M 5	S 4	M 5	M 5	M 5	
T 7	L 8	S 7	L 7	T 7	T 7	T 7	T 7	O 5	O 5	L 5	L 5	L 5	T 5	T 6	T 6	T 5	T 6	T 6	T 6	
F 8	M 8	F 9	M 8	L 9	L 9	L 9	L 9	28	28	S 6	S 6	S 6	T 6	T 7	T 7	T 6	T 7	T 7	T 7	
L 9	T 9	M 9	M 9	O 9	O 9	O 9	O 9	F 7	F 7	M 7	M 7	M 7	T 7	T 8	T 8	T 7	T 8	T 8	T 8	
S 10	O 10	T 10	T 9	F 10	F 10	F 10	F 10	S 9	S 9	T 8	T 8	T 8	T 8	T 9	T 9	T 8	T 9	T 9	T 9	
M 11	T 11	L 11	L 11	L 11	L 11	L 11	L 11	M 10	M 10	T 10	T 10	T 10	T 10	T 11	T 11	T 10	T 11	T 11	T 11	
T 12	F 12	L 12	F 12	L 12	L 12	L 12	L 12	T 11	T 11	F 11	F 11	F 11	S 11	S 11	S 11	S 11	M 12	M 12	M 12	
O 13	L 13	S 13	L 13	M 13	M 13	M 13	M 13	O 12	O 12	L 12	L 12	L 12	T 12	T 13	T 13	T 12	T 13	T 13	T 13	
T 14	F 14	M 14	F 14	T 14	T 14	T 14	T 14	F 13	F 13	M 14	M 14	M 14	T 13	T 14	T 14	T 13	T 14	T 14	T 14	
F 15	M 15	T 15	M 15	O 15	O 15	O 15	O 15	F 14	F 14	T 15	T 15	T 15	T 14	T 15	T 15	T 14	T 15	T 15	T 15	
L 16	T 16	O 16	T 16	F 16	F 16	F 16	F 16	L 15	L 15	T 16	T 16	T 16	T 15	T 16	T 16	T 15	T 16	T 16	T 16	
S 17	O 17	L 17	O 17	T 17	T 17	T 17	T 17	S 16	S 16	O 16	O 16	O 16	T 16	T 17	T 17	T 16	T 17	T 17	T 17	
M 18	T 18	F 18	T 18	L 18	L 18	L 18	L 18	M 17	M 17	F 17	F 17	F 17	T 17	T 18	T 18	T 17	T 18	T 18	T 18	
T 19	F 19	L 19	F 19	M 19	M 19	M 19	M 19	T 18	T 18	L 18	L 18	L 18	T 18	T 19	T 19	T 18	T 19	T 19	T 19	
O 20	L 20	S 20	L 20	T 20	T 20	T 20	T 20	O 19	O 19	F 19	F 19	F 19	T 19	T 20	T 20	T 19	T 20	T 20	T 20	
T 21	F 21	M 21	F 21	L 21	L 21	L 21	L 21	M 20	M 20	T 20	T 20	T 20	T 20	T 21	T 21	T 20	T 21	T 21	T 21	
L 22	S 22	O 22	L 22	M 22	M 22	M 22	M 22	T 21	T 21	L 21	L 21	L 21	T 21	T 22	T 22	T 21	T 22	T 22	T 22	
T 23	F 23	M 23	T 23	L 23	L 23	L 23	L 23	O 22	O 22	F 22	F 22	F 22	T 22	T 23	T 23	T 22	T 23	T 23	T 23	
S 24	L 24	T 24	S 24	F 24	F 24	F 24	F 24	M 24	M 24	T 24	T 24	T 24	T 23	T 24	T 24	T 23	T 24	T 24	T 24	
M 25	T 25	O 25	M 25	L 25	L 25	L 25	L 25	T 25	T 25	F 25	F 25	F 25	T 24	T 25	T 25	T 24	T 25	T 25	T 25	
T 26	F 26	M 26	T 26	L 26	L 26	L 26	L 26	O 26	O 26	L 26	L 26	L 26	T 25	T 26	T 26	T 25	T 26	T 26	T 26	
O 27	L 27	S 27	O 27	M 27	M 27	M 27	M 27	T 27	T 27	F 27	F 27	F 27	T 26	T 27	T 27	T 26	T 27	T 27	T 27	
T 28	F 28	M 28	T 28	L 28	L 28	L 28	L 28	O 28	O 28	L 28	L 28	L 28	T 27	T 28	T 28	T 27	T 28	T 28	T 28	
F 29	L 29	T 29	F 29	M 29	M 29	M 29	M 29	T 28	T 28	F 28	F 28	F 28	T 28	T 29	T 29	T 28	T 29	T 29	T 29	
L 30	S 30	O 30	L 30	F 30	F 30	F 30	F 30	M 30	M 30	T 29	T 29	T 29	T 29	T 30	T 30	T 29	T 30	T 30	T 30	
S 31	T 31	F 31	S 31	L 31	L 31	L 31	L 31	O 31	O 31	L 31	L 31	L 31	T 30	T 31	T 31	T 30	T 31	T 31	T 31	
19 arbejdsdage ekskl. 5 lørdage			20 arbejdsdage ekskl. Grundlovsdag og 4 lørd.			23 arbejdsdage ekskl. 4 lørdage			21 arbejdsdage ekskl. 5 lørdage			22 arbejdsdage ekskl. 4 lørdage			22 arbejdsdage ekskl. 5 lørdage			21 arbejdsdage ekskl. 4 lørdage		

Tabel 2. Oversigt over gennemførte måleperioder i 1987.

Prøvebetingelserne og de målte anlægsydelse i forsøgsperioderne er anført i de følgende tre tabeller.

I nogle af perioderne er der ikke målt på det selvcirkulerende anlæg. Dette skyldes dels indkøringsvanskeligheder for tappesystemet, dels at en del af tappesystemet i perioder er benyttet i forbindelse med et andet af laboratoriets projekter. Dette var nødvendigt for at få projektet til at hænge sammen økonomisk, idet Teknologirådet ikke bevilgede hele det ansøgte beløb.

I de første driftsperioder var tappesystemet ikke helt færdigt. I disse perioder, som er markeret med 2) i tabellerne, blev der ved hver tapning tappet 50 l vand uanset temperaturen af det tappede vand.

Tabel 3 viser resultaterne for de normale driftsstrategier i forskellige perioder med og uden elpatrondrift. Det er muligt direkte at sammenligne ydelsen for de 3 anlæg i hver forsøgsperiode ved at studere den i tabellen angivne relative ydelse, som er forholdet mellem nettoydelsen for solvarmeanlægget og nettoydelsen for referenceanlægget.

Der er ikke taget hensyn til pumpeenergien for anlæggene. Pumpene, som er installeret i solfangerkredsene, er uisolerede. De forårsager derfor et forøget varmetab i solfangerkredsen. Dette forøgede varmetab formodes at balancere med den tilførte pumpeenergi.

Det ses, at den relative ydelse for anlæggene ikke varierer meget fra periode til periode. I gennemsnit har ydelsen i perioder med elpatrondrift for det selvcirkulerende anlæg været 11% højere end ydelsen for referenceanlægget, mens ydelsen for det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm har været 23% højere end ydelsen for referenceanlægget. I perioder uden elpatrondrift har den gennemsnitlige merydelse været på 9% for det selvcirkulerende anlæg og 19% for det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm. For det selvcirkulerende anlæg er resultaterne både fra tabel 3 og 4 medtaget.

Fordelene ved det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm synes således at være en anelse større i perioder med elpatrondrift end i perioder uden elpatrondrift.

Resultaterne var så overraskende, at det blev besluttet at foretage den i afsnit 2 beskrevne ombygning af solfangerkredsene

Periode	Varmtvands- forbrug k/day	Elpatron i drift?	Referenceanlæg					Pumpeanlæg med lille volumenstrøm						Selvcirkulerende anlæg		
			Volumenstrøm l/min m ² sol- fanger	Drifttid for pumpe h	Elpatronens energifor- brug kWh	Energi tap- pet fra la- ger kWh	Relativ ydel- se * kWh	Solfangerens indløb til kappen	Volumenstrøm l/min m ² sol- fanger	Drifttid for pumpe h	Elpatronens energifor- brug kWh	Energi tap- pet fra la- ger kWh	Relativ ydel- se * kWh	Elpatronens energifor- brug kWh	Energi tap- pet fra la- ger kWh	Relativ ydel- se * kWh
8/7 20 ⁰⁰ - 17/7 20 ⁰⁰	150	ja	0,4	82	17,6	58,9	1,00	top	0,1	87	9,4	58,9	1,20	11,7	58,9	1,14
14/8 22 ⁰⁰ - 20/8 10 ⁰⁰	150	ja	0,4	42	20,3	33,6	1,00 ¹⁾	top	0,1	42	17,5	33,6	1,21	18,8	33,6	1,11
7/10 14 ⁰⁰ - 13/10 9 ⁰⁰	150	ja	0,5	28	22,3	33,9	1,00	top	0,1	26	19,3	33,9	1,27	20,7	33,9	1,14
29/6 22 ⁰⁰ - 3/7 13 ⁰⁰	150 ²⁾	ja	0,5	43	4,8	27,1	1,00	top	0,1	33	3,5	31,5	1,26	4,9	30,1	1,13
24/7 16 ⁰⁰ - 30/7 16 ⁰⁰	200	ja	0,4	45	28,3	49,8	1,00	top	0,1	45	23,8	49,9	1,21	26,5	50,1	1,10
30/7 17 ⁰⁰ - 5/8 14 ⁰⁰	250	ja	0,4	52	42,9	61,0	1,00	top	0,1	54	38,3	61,0	1,25	41,4	61,0	1,08
26/10 14 ⁰⁰ - 31/10 24 ⁰⁰	150	nej	0,4	27	0	11,0	1,00	top	0,1	28	0	13,4	1,22	0	12,5	1,14
19/6 11 ⁰⁰ - 22/6 11 ⁰⁰	150 ²⁾	nej	0,4	31	0	11,5	1,00	top	0,1	31	0	13,7	1,19	0	12,5	1,09
24/6 9 ⁰⁰ - 29/6 14 ⁰⁰	150 ²⁾	nej	0,5	44	0	24,7	1,00	top	0,1	46	0	28,8	1,17	0	26,4	1,07
27/5 0 ⁰⁰ - 31/5 24 ⁰⁰	150 ²⁾	nej	0,4	45	0	19,4	1,00	top	0,1	45	0	23,1	1,15	-	-	-
20/11 9 ⁰⁰ - 23/11 9 ⁰⁰	150	nej	0,4	8	0	4,4	1,00	top	0,1	6	0	5,1	1,16	0	4,7	1,06

*) relativ ydelse: Nettoydelse for solvarmeanlægget/Nettoyedelse for referenceanlægget.

1) Solfangere for referenceanlæg og pumpeanlæg med lille volumenstrøm ombyttet.

2) Uanset temperaturen af det tappede vand.

Tabel 3. Måleresultater for perioder med normale driftsstrategier.

for referenceanlægget og det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm. Efter ombygningen er det muligt at ombytte solfangerne for referenceanlægget og for det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm. Som det ses af tabel 3 ændrer ombytningen af solfangerne ikke resultatet - eventuelle forskelle i solfangerne eller i solfangerplaceringen har derfor ingen indflydelse på resultatet.

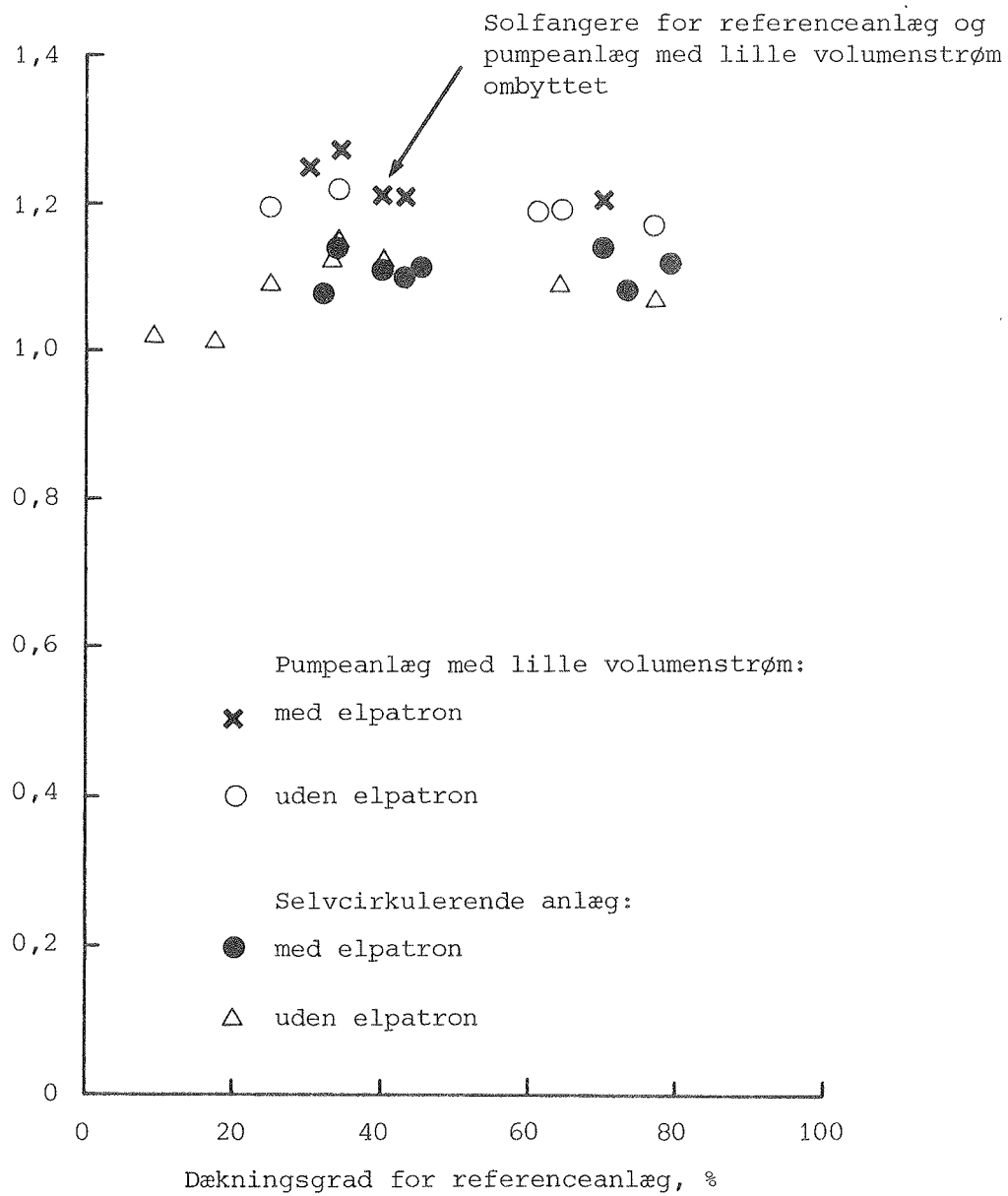
Figur 18 viser resultaterne fra tabel 3, 4 og 5 med volumenstrømmen i referenceanlægget lig $0,4 - 0,5 \text{ l/min m}^2$ og volumenstrømmen i det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm lig $0,1 \text{ l/min m}^2$ solfanger. Den relative ydelse for det selvcirkulerende anlæg og det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm er for hver forsøgsperiode vist som funktion af dækningsgraden for referenceanlægget. Den relative ydelse ændres ikke meget når referenceanlæggets dækningsgrad ændres mellem 30% og 80%, Dog synes den relative ydelse at aftage lidt for voksende dækningsgrader. Dette vil naturligvis specielt gælde når referenceanlæggets dækningsgrad kommer tæt på 100%. Ved 100% dækningsgrad for referenceanlægget vil dækningsgraden for de øvrige anlæg også blive 100%, hvorfor de relative ydelser bliver lig med 1,00.

For små dækningsgrader er vist 2 måleresultater for det selvcirkulerende anlæg. Anlægsydelsen er her næsten den samme som referenceanlæggets ydelse. Det skyldes, at målepunkterne stammer fra perioder i november med mange dage uden solfangerdrift. Det bør her nævnes, at det ikke er sikkert at anlægsydelse er ens i solrige perioder med små dækningsgrader, d.v.s. i sommerperioder med et stort varmtvandsforbrug.

Af tabellerne bemærkes det endvidere, at driftstiderne for pumperne i de to pumpedrevne anlæg stort set er ens.

Tabel 4 og figur 19 viser måleresultater for perioder med normal driftsstrategi for referenceanlægget og med varierende volumenstrøm i det pumpedrevne anlæg med kappebeholderen. Det ses, at volumenstrømmen i det pumpedrevne anlæg med kappebeholderen har meget stor betydning for anlægsydelsen. Jo større volumenstrømmen er des mindre bliver anlægsydelsen. En volumenstrøm på omtrent $0,1 - 0,2 \text{ l/min m}^2$ resulterer i en meget høj ydelse. Ved en volumenstrøm for det pumpedrevne anlæg med kappebeholderen på omtrent 1 l/min m^2 vil referenceanlægsydelsen og ydelsen for det pumpedrevne anlæg med kappebeholderen omtrent være den samme.

Relativ ydelse = Nettoydelse for solvarmeanlægget
/Nettoydelse for referenceanlægget



Figur 18. Relative ydelser for pumpeanlægget med lille volumenstrøm og det selvcirkulerende anlæg som funktion af dækningsgraden for referenceanlægget.

Periode	Varmtvands- forbrug l/dag	Elpatron i drift?	Referenceanlæg					Pumpeanlæg med lille volumenstrøm						Selvcirkulerende anlæg		
			Volumenstrøm l/min m² sol- fanger	Drifttid for pumpe h	Elpatronens energifor- brug kWh	Energil tap- pet fra la- ger kWh	Relativ ydel- se * kWh	Solfanger vas- kens indløb til kappen	Volumenstrøm l/min m² sol- fanger	Drifttid for pumpe h	Elpatronens energifor- brug kWh	Energil tap- pet fra la- ger kWh	Relativ ydel- se * kWh	Elpatronens energifor- brug kWh	Energil tap- pet fra la- ger kWh	Relativ ydel- se * kWh
21/9 14 ⁰⁰ - 25/9 10 ⁰⁰	150	ja	0,4	16	11,9	21,3	1,00	top	0,2	13	9,4	21,3	1,26	-	-	-
30/9 15 ⁰⁰ - 7/10 16 ⁰⁰	150	ja	0,4	46	7,3	34,9	1,00	top	0,25	43	3,8	34,9	1,13	3,9	34,9	1,12
26/8 18 ⁰⁰ - 31/8 17 ⁰⁰	150	ja	0,4	38	15,0	30,5	1,00	top	0,4	27	12,0	30,5	1,19	-	-	-
8/9 16 ⁰⁰ - 12/9 16 ⁰⁰	150	ja	0,4	20	10,3	23,6	1,00	top	0,6	13	8,1	23,6	1,17	-	-	-
20/8 12 ⁰⁰ - 26/8 14 ⁰⁰	150	ja	0,4	47	10,1	36,9	1,00	top	0,8	25	8,9	36,9	1,04	8,0	36,9	1,08
16/10 14 ⁰⁰ - 21/10 13 ⁰⁰	150	nej	0,4	26	0	11,9	1,00	top	0,2	23	0	13,8	1,17	0	13,2	1,12
21/10 14 ⁰⁰ - 26/10 13 ⁰⁰	150	nej	0,4	16	0	10,0	1,00	top	0,4	13	0	11,3	1,13	0	11,3	1,13
10/11 9 ⁰⁰ - 19/11 16 ⁰⁰	150	nej	0,4	15	0	4,9	1,00	top	0,65	7	0	4,7	0,96	0	5,0	1,02
4/6 0 ⁰⁰ - 10/6 20 ⁰⁰	150 ²⁾	nej	0,4	49	0	21,7	1,00	top	0,8	29	0	23,7	1,09	-	-	-

* Relativ ydelse: Nettoydelse for solvarmeanlægget/Nettoydelse for referenceanlægget.

2) Uanset temperaturen af det tappede vand.

Tabel 4. Måleresultater for perioder med normale driftsstrategier for referenceanlægget og med varierende volumenstrøm for det pumpe-drevne anlæg med lille volumenstrøm.

Periode	Varmtvands- forbrug l/day	Elpatron i drift?	Referenceanlæg					Pumpearlæg med lille volumenstrøm						Selvcirkulerende anlæg		
			Volumenstrøm l/min m ² sol- fanger	Drifttid for pumpe h	Elpatronens energifor- brug kWh	Energil tap- pet fra la- ger kWh	Relativ ydel- se * kWh	Solfanger- væs- kens indløb til kappen	Volumenstrøm l/min m ² sol- fanger	Drifttid for pumpe h	Elpatronens energifor- brug kWh	Energil tap- pet fra la- ger kWh	Relativ ydel- se * kWh	Elpatronens energifor- brug kWh	Energil tap- pet fra la- ger kWh	Relativ ydel- se * kWh
8/8 11 ⁰⁰ - 12/8 21 ⁰⁰	150	ja	0,1	44	16,8	29,3	1,00 ¹⁾	top	0,1	42	11,0	29,3	1,46	12,3	29,3	1,36
25/9 11 ⁰⁰ - 30/9 9 ⁰⁰	150	ja	0,2	32	11,5	29,0	1,00	top	0,1	33	4,9	29,0	1,38	-	-	-
12/9 23 ⁰⁰ - 21/9 9 ⁰⁰	150	ja	0,6	56	24,4	48,4	1,00	top	0,1	49	18,1	48,4	1,26	-	-	-
20/7 9 ⁰⁰ - 24/7 14 ⁰⁰	150	ja	0,4	39	15,1	27,4	1,00	bund	0,1	40	15,5	27,4	0,97	13,8	27,4	1,11
31/10 19 ⁰⁰ - 9/11 9 ⁰⁰	150	nej	0,4	19	0	8,3	1,00	midte	0,1	20	0	8,0	0,96	0	8,4	1,01
11/6 0 ⁰⁰ - 15/6 24 ⁰⁰	150 ²⁾	nej	0,2	34	0	20,6	1,00	top	0,8	17	0	23,7	1,15	-	-	-

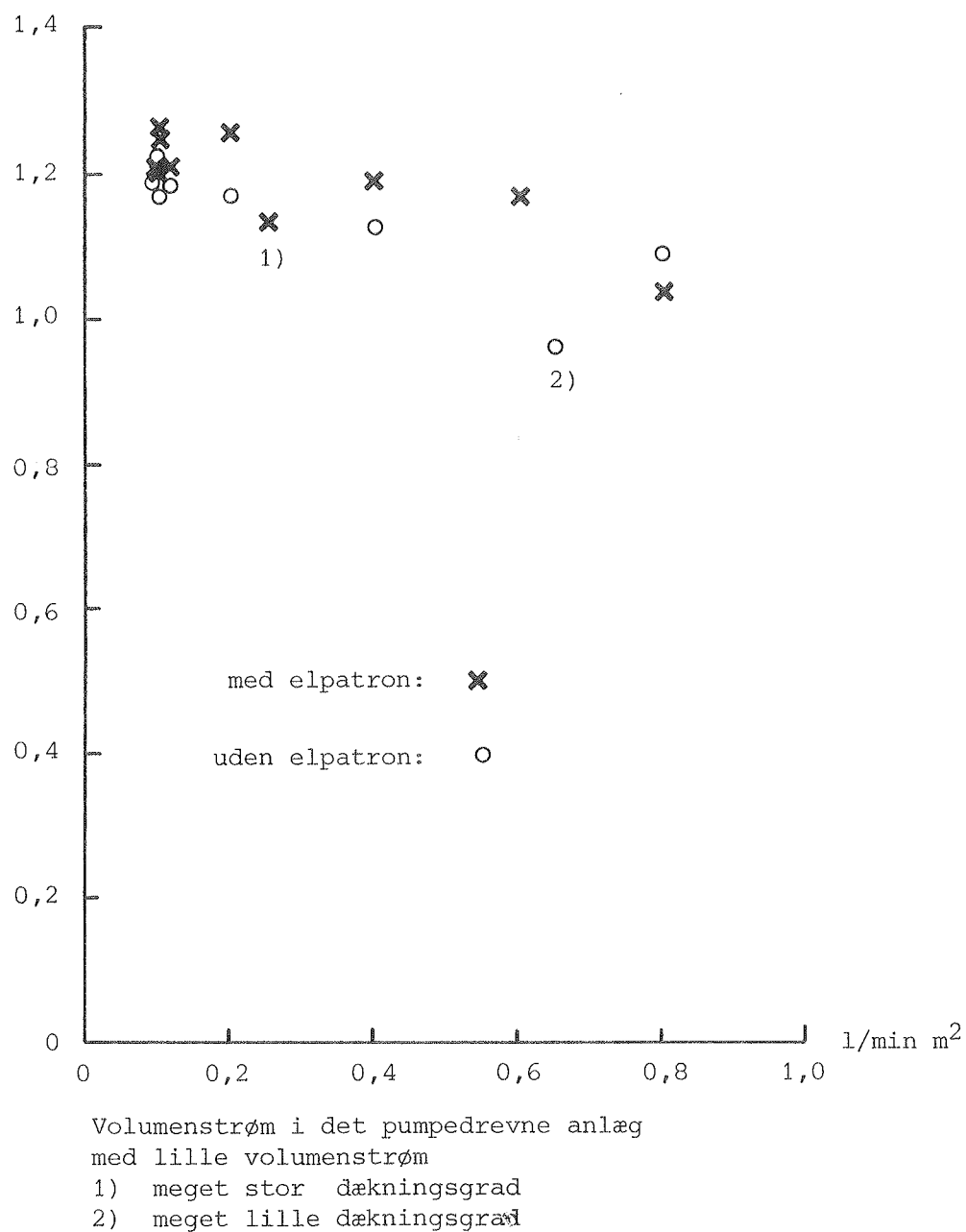
* Relativ ydelse: Nettoydelse for solvarmeanlægget/Nettoydelse for referenceanlægget.

1) Kogning i referenceanlæg.

2) Uanset temperaturen af det tappede vand.

Tabel 5. Måleresultater for perioder med normal driftsstrategi for det pumpe-
drevne anlæg med lille volumenstrøm og med varierende volumenstrøm
for referenceanlægget samt perioder med specielle driftsstrategier.

Nettoyedelse for det pumpedrevne anlæg
med kappebeholder/Nettoyedelse for re-
ferenceanlægget



Figur 19. Målt relativ ydelse for det pumpedrevne anlæg
med lille volumenstrøm som funktion af volumen-
strømmen i det pumpedrevne anlæg med lille vo-
lumenstrøm. Referenceanlæggets volumenstrøm
er 0,4 l/min m².

Tabel 5 og figur 20 viser måleresultater for perioder med normal driftsstrategi for det pumpedrevne anlæg med kappebeholderen og med varierende volumenstrøm for referenceanlægget. Det ses, at referenceanlæggets ydelse - i modsætning til anlægget med kappebeholderen - reduceres hvis volumenstrømmen bliver mindre. Hvis volumenstrømmen er større end $0,4 \text{ l/min m}^2$ forøges anlægsydelsen ikke yderligere når volumenstrømmen forøges.

Bliver volumenstrømmen for lille opstår der kogning i solfangeren. Ved volumenstrømmen $0,1 \text{ l/min m}^2$ opstod der kogning i referenceanlægget på en solrig dag. Faren for kogning er størst i referenceanlægget, idet fremløbstemperaturen til solfangeren for referenceanlægget er væsentlig højere end i anlægget med kappebeholderen. Der er ikke opstået kogning i pumpeanlægget med lille volumenstrøm igennem afprøvningsperioderne. Dette skyldtes dels at varmtvandsforbruget har været relativt stort, dels at det har været en kold og solfattig sommer.

Før anlæg med små volumenstrømme markedsføres bør det sikres, at anlæggets udformning og den benyttede volumenstrøm sikrer, at der ikke opstår kogning i solfangeren - selv ikke i varme og solrige perioder uden varmtvandsforbrug.

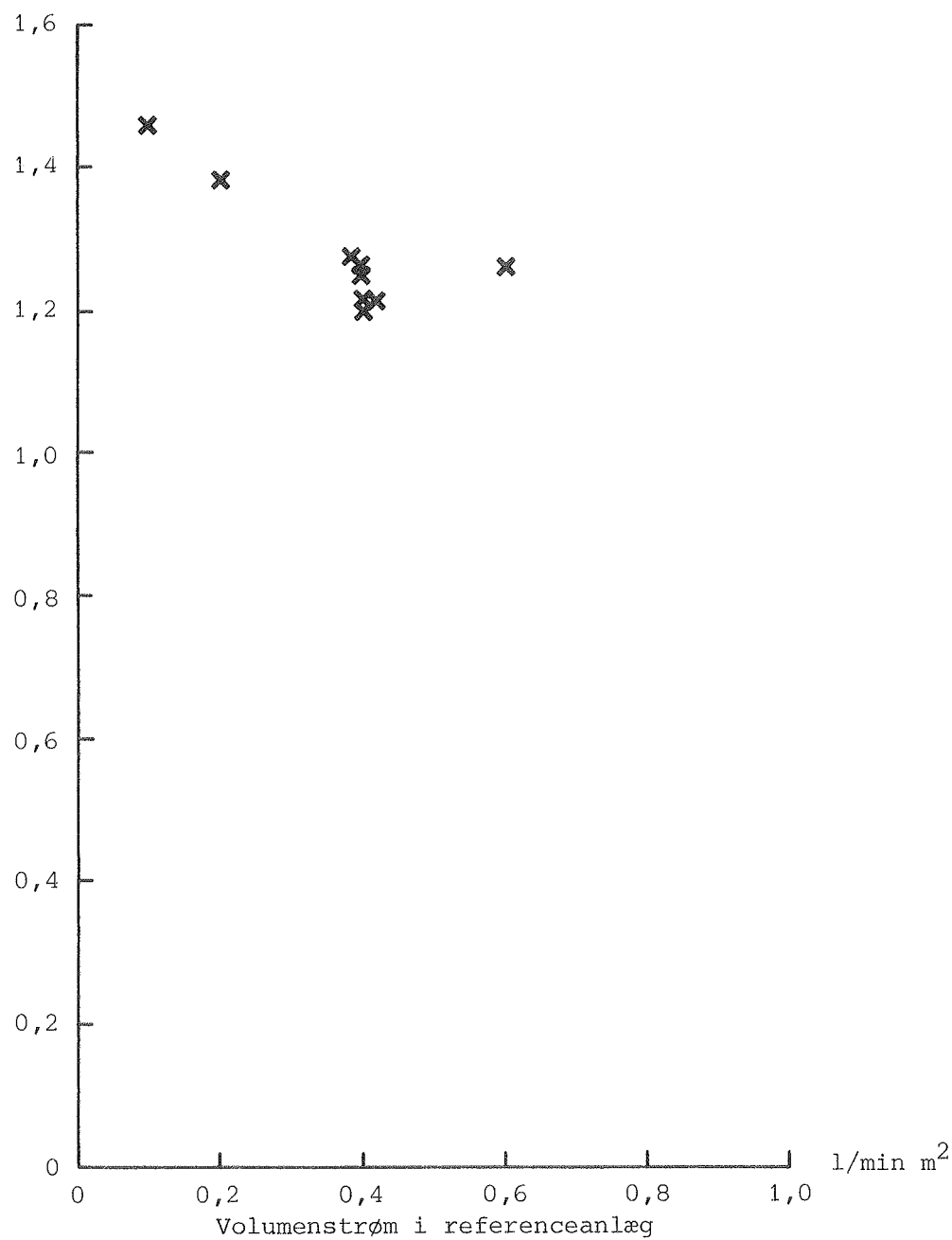
Udfra målingerne ses det, at de benyttede normale volumenstrømme, i referenceanlægget $0,4 - 0,5 \text{ l/min m}^2$ og i anlægget med kappebeholderen $0,1 \text{ l/min m}^2$, er rimelige valg.

Af tabel 5 ses endvidere, at det er væsentligt at solfangervæskens i anlægget med kappebeholderen fra solfangeren føres til toppen af kappen.

Anlægsydelse og dækningsgraderne synes umiddelbart at være små. Dette skyldes imidlertid den kolde og solfattige sommer, som vi har haft i 1987.

For at undersøge om anlæggene under de vejrbetingelser, som de har været udsat for har en ydelse som svarer til forventningerne er der med det i [3] udviklede program gennemført beregninger med referenceanlæggets data, referenceårets vejrdato og den normalt benyttede driftsstrategi, det vil blandt andet sige et dagligt varmtvandsforbrug ved 50°C på 150 l .

Nettoyedelse for det pumpedrevne anlæg
med kappebeholder/Nettoyedelse for re-
ferenceanlægget



Figur 20. Målt relativ ydelse for det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm som funktion af referenceanlæggets volumenstrøm i perioder med elpatrondrift. Volumenstrøm i det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm: 0,1 l/min m².

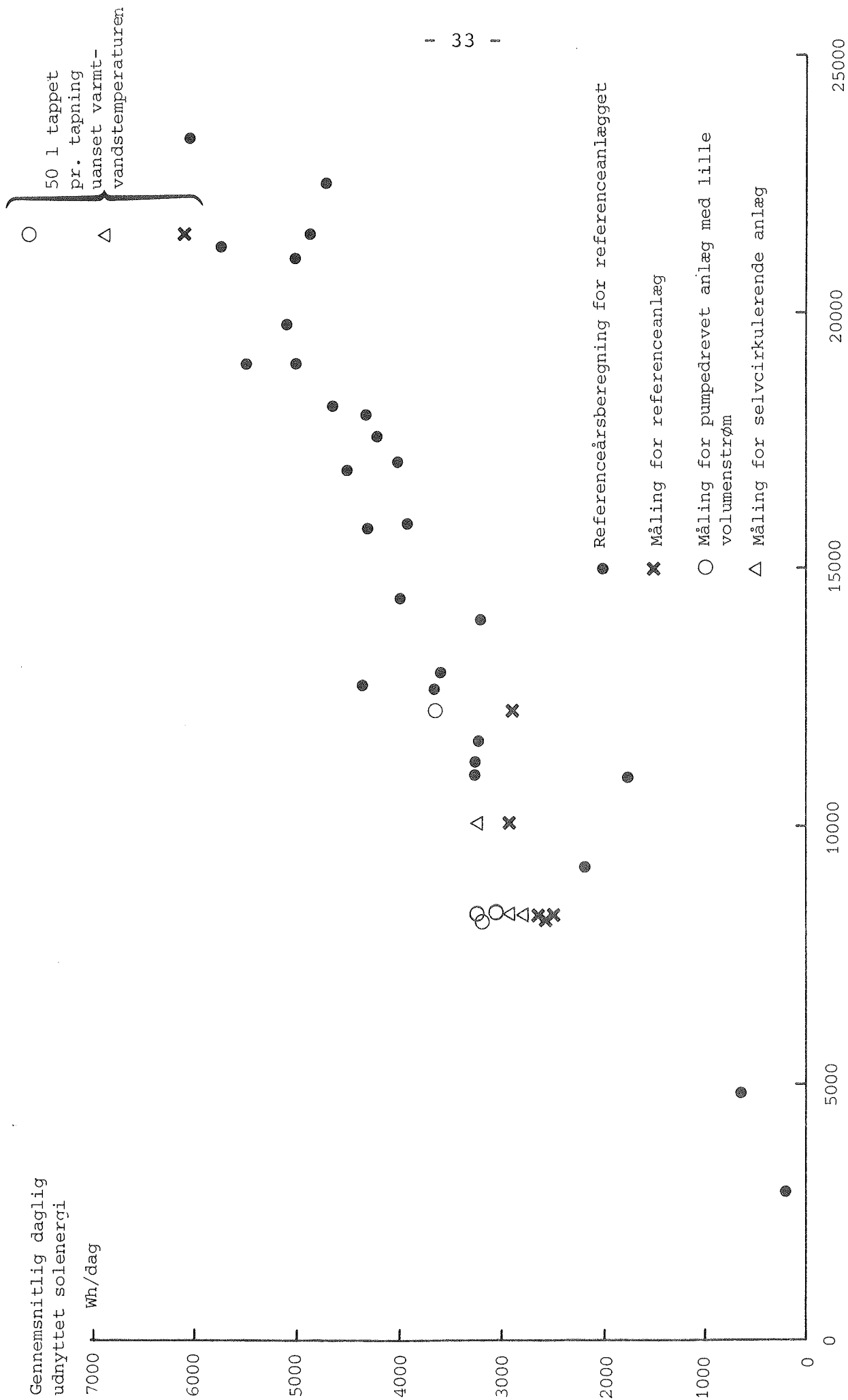
Beregningerne med referenceåret viser, at anlægget i omtrent 1 måned kan dække varmtvandsforbruget 100%. Da der ikke for referenceanlægget i 1987 har været perioder med 100% dækning opdeles den resterende del af referenceårsperioden fra 1. april til 4. november i 27 perioder hver med 1 uges varighed. Som nævnt kan varmtvandsforbruget i ingen af disse 27 perioder dækkes 100% uden elpatronens hjælp. Beregningerne er udført både med og uden elpatrondrift, og for hver af de 27 uger er den beregnede gennemsnitlige daglige udnyttede solenergi vist som funktion af den gennemsnitlige daglige indstrålede energi på solfangerne på figur 21 og 22, henholdsvis for perioder med og uden elpatrondrift. Desuden er målepunkterne for perioder med normale driftsstrategier for de tre anlæg vist. Perioder med volumenstrømme mellem 0,4 og 0,6 l/min m² solfanger for referenceanlægget og perioder med volumenstrømme på 0,1 - 0,2 l/min m² solfanger for det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm er medtaget.

Der er kun forholdsvis få målepunkter angivet på figurerne. Dette skyldes udfald i solindfaldsmålingerne.

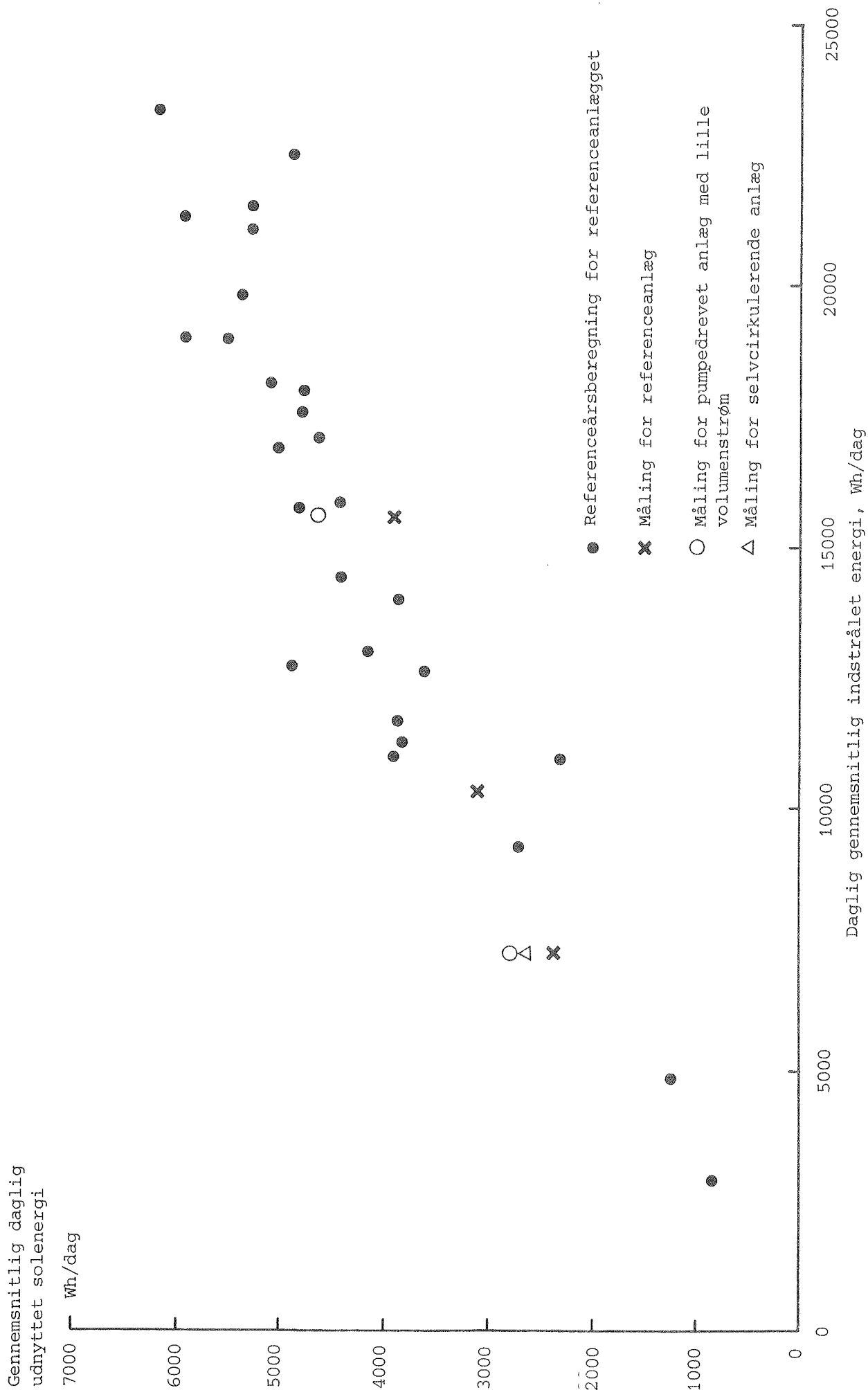
Det bør i forbindelse med vurderingen af måleresultaterne huskes, at varmelagrene ved starten af hver forsøgsperiode blev helt tømt for varme, mens varmelageret i referenceårsberegningerne ved starten af de valgte uger godt kan indeholde varmt vand. Endvidere skal sommerens lave udetemperaturer huskes. Det kan derfor forventes, at referenceanlæggets målte størrelser af udnyttet solenergi ligger en smule lavere end de beregnede værdier.

Det bemærkes, at de fleste målepunkter har små x-axe-værdier, idet solindfaldet har været lille i de fleste perioder. Der er forholdsvis store variationer i de beregnede punkter, og det vil ikke være let at indtegne én ret linie i koordinatsystemet. De målte ydelser for referenceanlægget ligger pænt blandt de beregnede punkter. Der er således intet der tyder på at referenceanlægget ikke har levet op til forventningerne.

Målepunkterne for det selvcirkulerende anlæg og for det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm ligger i overkanten af de beregnede punkter. Der er derfor tale om en reel forbedring af ydelsen for disse anlæg i forhold til referenceanlægget.



Figur 21. Beregnede og målte størrelser for den gennemsnitlige daglige udnyttede solenergi som funktion af den daglige gennemsnitlige indstrålede energi i perioder med el-patrondrift.



Figur 22. Beregnede og målte størrelser for den gennemsnitlige daglige udnyttede solenergi som funktion af den daglige gennemsnitlige indstrålede energi i perioder uden el-patrondrift.

Anlæggenes virkemåde blev som nævnt fulgt gennem alle driftsperioderne. Blandt andet blev anlægstemperaturerne målt.

På figur 23 er de mest interessante anlægstemperaturer og effekten, som overføres fra solfangerne til varmelageret, vist for alle tre anlæg den 24. juni. Den 24. juni var en typisk sommerdag med mange drivende skyer som resulterer i mange og store variationer i solindfaldet igennem hele dagen.

Volumenstrømmen i referenceanlægget varierede mellem 1,5 og 2,0 l/min, størst om eftermiddagen med de relativt høje solfangervæsketemperaturer. Volumenstrømmen pr. m² solfanger varierede således mellem 0,4 og 0,5 l/min m². Volumenstrømmen i det pumpedrevne anlæg med kappebeholderen var omtrent 0,4 l/min svarende til omtrent 0,1 l/min m². Det tager omtrent 8 min for solfangervæsken at passere solfangeren i dette anlæg. Volumenstrømmen i det selvcirkulerende anlæg varierede meget igennem dagen. Volumenstrømvariationerne fulgte nøje solindfaldets variationer. Når solindfaldet er størst er volumenstrømmen størst. Volumenstrømmen varierede mellem 0 og 0,6 l/min.

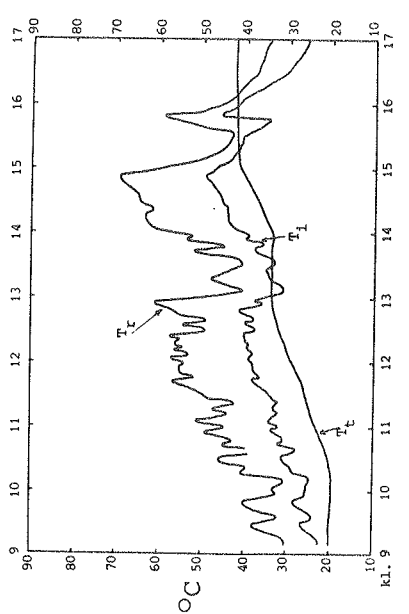
Temperaturerne og effekterne viser de tre anlægs virkemåde i en periode uden elpatrondrift. Det bemærkes, at varmtvandstapningen er foretaget omtrent kl. 13⁰⁰.

Opvarmningen i solfangerne er meget stor i det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm og i det selvcirkulerende anlæg. Solfangervæsken, som tilføres varmelageret, er meget varm og kun den øverste del af varmtvandsbeholderen opvarmes. Der etableres derfor meget hurtigt høje brugsvandstemperaturer i toppen af lageret og der etableres en stor temperaturlagdeling i varmelageret.

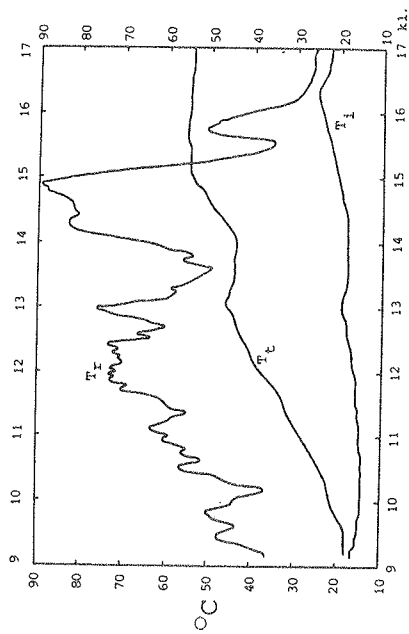
Modsat forholder det sig i referenceanlægget. Her holdes solfangervæskens returtemperatur fra solfangerne relativ lav på grund af den store volumenstrøm. Hele varmtvandsbeholderens volumen opvarmes til samme temperaturniveau, og temperaturen i toppen af varmtvandsholderen vokser derfor meget langsommere end i de to andre anlæg.

I referenceanlægget stiger indløbstemperaturen for solfangervæsken til solfangeren jævnt igennem hele dagen på grund af

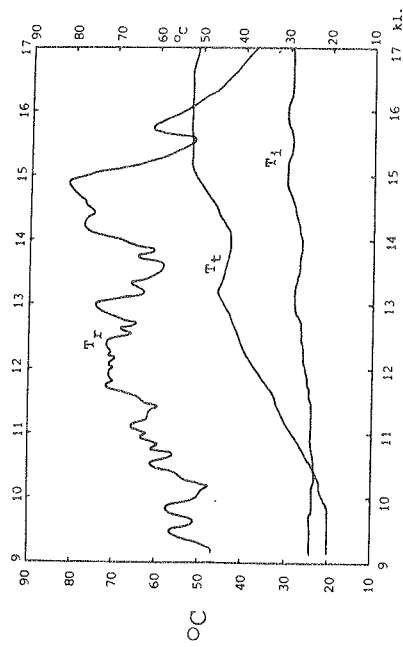
Referenceanlæg



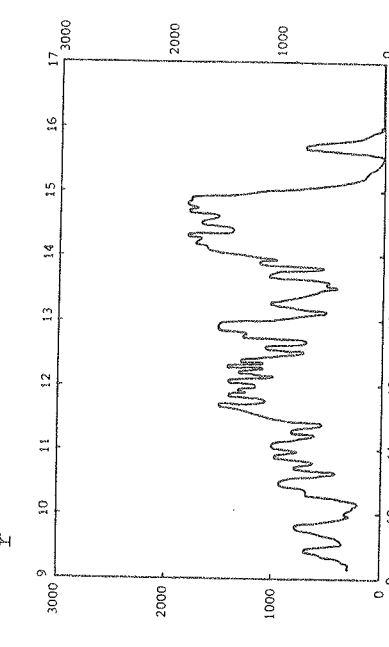
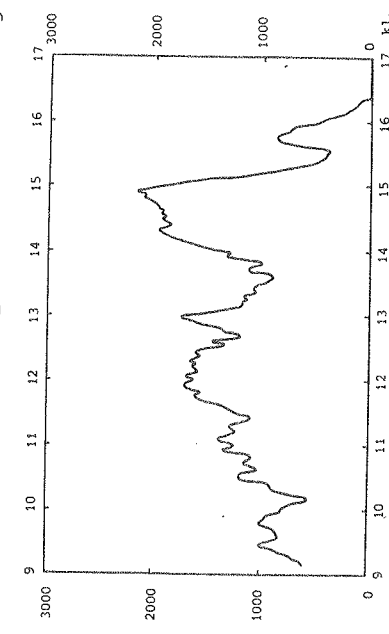
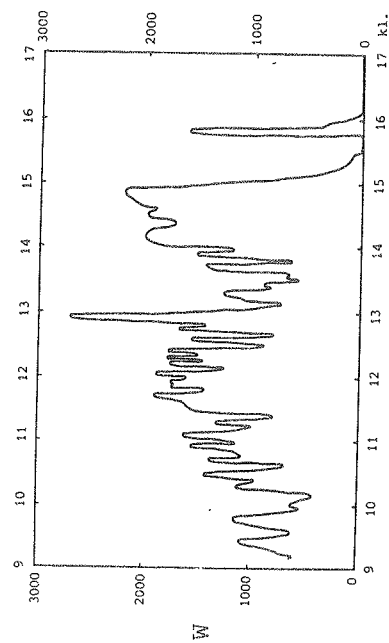
Pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm



Selvcirculerende anlæg



Temperaturen i toppen af varmelageret: T_t
 Solfangervæskens indløbstemperatur til solfangeren: T_i
 Solfangervæskens returtemperatur fra solfangeren: T_r



Effekttilførsel fra solfangerne til varmelageret.

Figur 23. Målte anlægstemperaturer og effekttilførsler fra solfangerkredsen til varmelageret den 24. juni 1987.

den stigende lagertemperatur i bunden af lageret. Solfangernes indløbstemperaturer for anlæggene med kappebeholderne forbliver derimod igennem hele dagen meget lave. Dette skyldes, at lagertemperaturen i bunden af beholderne i disse anlæg er lav igennem hele dagen.

De højeste temperaturer i toppen af kappebeholderne nås omtrent kl. 15⁰⁰. Efter kl. 15⁰⁰ reduceres disse temperaturer ikke nævneværdigt selv om der i lang tid tilføres solfangervæske ved en lavere temperatur til varmelageret. Dette skyldes, at solfangervæsken på grund af den lille volumenstrøm kun veksler lidt varme med varmtvandsbeholderen i den øverste del af kappen. Dette forhold vil ændres, hvis volumenstrømmen bliver for stor.

Endvidere bemærkes det, at solfangervæskens returtemperatur fra solfangerne for alle anlæggene varierer kraftigt som følge af solindfaldets variationer. I referenceanlægget varierer solfangervæskens indløbstemperatur til solfangerne også, omend ikke så kraftigt som returtemperaturen.

Solfangervæsketemperaturernes variationer resulterer i variationer i effekterne, som tilføres varmelagrene. Det ses, at der for de tre anlæg er store forskelle på størrelsen af disse variationer. Variationerne er meget store for referenceanlægget med den relativ store volumenstrøm. Variationerne for det selvcirkulerende anlæg er lidt mindre og variationerne er mindst for det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm. Forskellen mellem det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm og det selvcirkulerende anlæg skyldes at volumenstrømmen i det selvcirkulerende anlæg varierer meget igennem dagen. Ved store solindfald stiger volumenstrømmen hurtigt og ved små solindfald falder volumenstrømmen hurtigt igen.

Man kan forestille sig, at variationerne i den producerede solvarmeeffekt i sig selv har indflydelse på "den øjeblikkelige solfangereffektivitet" og dermed på solfangerudbyttet. Måske forøges "den øjeblikkelige solfangereffektivitet" hvis solfan-

gervæsken passerer solfangeren så langsomt, at luftbevægelsesmønsteret mellem absorberen og dæklaget ikke ændres nævneværdigt selv om solindfaldet ændres på grund af drivende skyer.

Disse forhold er ikke undersøgt nærmere i dette projekt, men det er klart, at der for de tre anlæg er tale om tydelige forskelle mellem virkemåden for såvel varmelager som solfanger. I denne forbindelse bør det nævnes, at den valgte dag er repræsentativ for anlæggenes virkemåde. I 1987 var der således kun een dag helt uden hurtige og store variationer i solindfaldet.

Der er behov for grundige undersøgelser for at klarlægge, hvorledes solfangerudbyttet afhænger af variationer i solindfaldet og af volumenstrømmen. Solfangerudformningen og solfangerens varmekapacitet formodes at have stor betydning i denne forbindelse.

I perioder med elpatrondrift virker anlæggene som i perioder uden elpatrondrift - blot holdes den øverste del af varmelagrene varmt ved hjælp af elpatronen, hvis solen skinner for lidt. Temperaturlagdelingen, som etableres under solfangernes drift i kappebeholderen, bevirker at elpatronens drifttid i anlæggene med kappebeholderne reduceres i forhold til elpatronens drifttid i referenceanlægget.

Varmeoverføringsevnen for varmevekslerspiralen i referenceanlæggets varmtvandsbeholder varierer også meget igennem forsøgsperioderne, idet perioderne har meget forskellige driftsbetingelser. Eksempelvis varierede den målte varmeoverføringsevne for varmevekslerspiralen den 24. juni mellem 70 og 140 W/K afhængig af effekttilførslen, volumenstrømmen og lagertemperaturen. I gennemsnit var varmeoverføringsevnen den 24. juni 110 W/K svarende til 28 W/K m² solfanger. Udbyttet fra solvarmeanlægget vil ikke øges nævneværdigt ved at gøre varmevekslerspiralen længere end 9 m, se f.eks. [3] eller [4].

6. Vurdering af måleresultater.

Målingerne har vist, at det selvcirkulerende anlæg yder omtrent 10% mere end referenceanlægget og at det pumpedrevne anlæg med kappebeholderen og en volumenstrøm på omtrent $0,1 - 0,2 \text{ l/min m}^2$ solfanger yder omtrent 20% mere end referenceanlægget. Merydelserne er gældende både i perioder med og i perioder uden elpatrondrift.

Ovennævnte overraskende resultater, som er checket ved at ombytte solfangerne for referenceanlægget og det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm, er målt under de samme prøvningsbetingelser med een kalibreret energimåler. Der er derfor ikke tale om målefejl - man kan stole på resultaterne.

Referenceanlæggets ydelse er lige så stor som det kan forventes ifølge et detaljeret beregningsprogram, hvor varmelagerssimuleringsmodellen er valideret ved hjælp af forsøg. Der er derfor tale om reelle ydelsesforbedringer for anlæggene med kappebeholderne.

Der eksisterer i dag ikke validerende beregningsprogrammer, som simulerer de termiske forhold for kappebeholdere. Med en forholdsvis grov simuleringsmodel er der gennemført beregninger, som viser at ydelsen for et "referenceanlæg" og et "kappebeholderanlæg med lille volumenstrøm" stort set er den samme, [5]. Der er derfor behov for at udvikle og med forsøg at validere en matematisk model, som detaljeret simulerer driften af en kappebeholder, således at det bliver muligt at beregne de højere anlægsydelse. Dette er nødvendigt i forbindelse med udviklingen af optimale anlæg med små volumenstrømme.

Årsagen til at det selvcirkulerende anlægs ydelse er mindre end det pumpedrevne anlægs ydelse er sandsynligvis, at perioder med relativt lavt solindfald udnyttes relativt dårligt, idet volumenstrømmen i disse perioder er så lille, at ydelsen reduceres mærkbart. I visse perioder, hvor solfangeren stadig kan producere varme, er volumenstrømmen endog gået helt i stå. Naturligvis spiller det også ind, at solfangerkredsens varmetab og kapacitetstab er størst i det selvcirkulerende anlæg, idet rørdimensionerne er størst i dette anlæg.

Andre selvcirkulerende anlæg vil have andre ydelser. Hvis tryktabene i solfangerkredsen er mindre og højdeforskellene i solfangerkredsen er større end i det afprøvede anlæg, kan ydelsen måske ligge på højde med eller endog over ydelsen af det pumpe-drevne anlæg med en konstant lille volumenstrøm.

Der er med andre ord behov for yderligere undersøgelser, således at den optimale styring af volumenstrømmen i det pumpe-drevne anlæg med kappebeholderen kan findes.

Der kan nævnes en række årsager til at det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm yder mere end referenceanlægget. Den førstnævnte årsag formodes at være af størst betydning, den næstnævnte formodes at være næstvigtigst osv:

- Varmelagerudformningen. I kappebeholderen opbygges temperaturlagdeling under solfangerdrift. Der etableres derfor hurtigt direkte anvendelige temperaturer i toppen af varmtvandsbeholderen. I spiralbeholderen opvarmes hele vandvolumenet derimod til samme temperaturniveau - eventuelle temperaturforskelle i lageret udjævnes under solfangerdriften.
- Temperaturniveauet i solfangerne er forskelligt i de to anlæg igennem hele dagen. Det er imidlertid vanskeligt at vurdere i hvilket anlæg temperaturniveauet er lavest i størstedelen af dagen. Sidst om eftermiddagen er temperaturniveauet dog lavest i anlægget med lille volumenstrøm, idet returtemperaturen fra solfangeren her normalt bliver forholdsvis lav. Solfangerydelsen er derfor størst sent om eftermiddagen for anlægget med lille volumenstrøm. Drifttiden er omtrent den samme for de to anlæg.
- Solfangereffektiviteten afhænger af volumenstrømmen. Dette kan imidlertid ikke forklare, at anlæg med små volumenstrømme yder mere end anlæg med almindelige volumenstrømme, tværtimod. Derimod kan variationerne i solindfaldet måske resultere i at solfangerens "øjeblikseffektivitet" forøges, hvis temperaturlagdelingen i solfangeren er stor, dvs. hvis volumenstrømmen er lille. Måske udnyttes et varierende solindfald bedst i en solfanger med lille volumenstrøm. Der er behov for grundige under-

søgelse for at belyse disse forhold, som naturligvis vil være forskellige fra solfanger til solfanger, blandt andet vil absorberens udformning og solfangerens varmekapacitet have betydning i denne forbindelse.

- Varmetabet og kapacitetstab fra solfangerkredsen og solfangeren er størst for referenceanlægget, dels fordi både solfangernes fremløbs- og returrør er varme når solfangeren er i drift, dels fordi de hurtige og pludselige temperaturvariationer i solfangerkredsen er størst for dette anlæg.
- Varmelagringskapaciteten for kappebeholderen er større end for spiralbeholderen på grund af det større solfangervæskeindhold. Dette har dog ingen nævneværdig betydning for forskellen mellem de to anlægs ydelser.

Sammenfattende må det konkluderes, at der er behov for grundige undersøgelser af kappebeholderes og solfangeres virkemåde ved små volumenstrømme. Endvidere er der behov for undersøgelser for at klarlægge, hvorledes volumenstrømmen bedst styres i anlægget med lille volumenstrøm.

7. Erfaringer fra anlæggenes drift.

Anlæggene var i drift fra den 27. maj til den 23. november, i alt i 181 dage eller næsten i et halvt år. I en del af tiden var der problemer, blandt andet måle- og tappeproblemer. Varigheden af de gennemførte forsøgsperioder med målinger var derfor i alt kun 147 dage.

Forsøgsperioden var usædvanlig kold og solfattig. Eksempelvis var juni måned den solfattigste juni og sommeren den koldeste siden man påbegyndte registreringerne. I perioden juni-oktober var det totale solindfald på solfangerne 460 kWh/m^2 . I referenceåret er det tilsvarende totale solindfald 660 kWh/m^2 på en sydvendt 45° hældende flade. Solindfaldet har således kun været 70% af det normale i afprøvningsperioden og udelufttemperaturen har også været koldere end normalt.

I forsøgsperiodernes 147 dage har referenceanlæggets nettoydelse været 440 kWh svarende til 110 kWh/m^2 solfanger og nettoydelsen for det pumpedrevne anlæg med kappebeholderen har været 520 kWh svarende til 130 kWh/m^2 solfanger. Den gennemsnitlige dækningsgrad af varmtvandsforbruget har været henholdsvis 47% og 56%. I denne forbindelse bør det huskes, at varmelagerets varmeindhold ved slutningen af hver forsøgsperiode ikke er medregnet i ydelsen og at anlæggene ikke har været styret optimalt i alle forsøgsperioderne. Anlæggenes ydelser ville derfor under normal drift være væsentligt større end angivet her.

Anlæggenes ydelser har været tilfredsstillende og det forventes ikke, at de relative ydelser for anlæggene ville være væsentligt anderledes, selv om vejret havde været normalt.

På trods af de ugunstige vejrforhold kan anlæggene altså yde en meget stor del af varmtvandsforbruget.

I hele perioden 27. maj - 23. november har der kun været få dage uden solfangerdrift, som det fremgår af tabel 6. I perioden maj-september var der eksempelvis kun 3 dage uden solfangerdrift. Tankevækkende, det kolde og solfattige vejr taget i betragtning.

Dato	Totalt solindfald på solfanger,	Maximal solinten- sitet på solfan- geren,	Tidspunkt og varighed for det maximale sol- indfald	
	Wh/m ²	W/m ²	kl	min
lørdag 18/7	410	130	15 ⁰⁰	2
torsdag 30/7	410	90	10 ³⁰	5
lørdag 12/9	310	80	9 ⁰⁰	4
fredag 23/10	200	30	16 ⁰⁰	10
lørdag 24/10	190	50	14 ⁰⁰	5
søndag 1/11	260	80	12 ⁰⁰	3
onsdag 4/11	230	80	10 ⁰⁰	5
lørdag 7/11	250	200	14 ⁵⁰	1
mandag 9/11	140	30	12 ⁰⁰	120
onsdag 11/11	140	40	13 ⁴⁰	2
torsdag 12/11	120	40	11 ¹⁵	1
fredag 13/11	280	210	11 ³⁰	1
mandag 16/11	110	20	12	120
tirsdag 17/11	250	200	12 ¹⁰	1
torsdag 19/11	120	70	11 ⁴⁰	1
søndag 22/11	220	70	10 ³⁰	10

Tabel 6. Dage uden solfangerdrift.

Ved beregning af solvarmeanlægs årlige ydelser benyttes normalt referenceårets vejrdata som forudsætning. Referenceåret har konstante solintensiteter for hver time i hele året. I virkeligheden er der store variationer i solintensiteten i langt de fleste af årets dagtimer.

Beregningerne kan derfor vise, at solintensiteten ikke er tilstrækkelig til at solfangerne kan producere varme, mens solintensiteten i virkeligheden i en del af den pågældende time kan være så høj, at solfangeren let kan producere varme. Solvarmeanlægs ydelser beregnes derfor systematisk for lavt når referenceårets timebaserede vejrdata benyttes. Gennemførte undersøgelser, [5] og [6], viser, at for australske forhold beregnes solvarmeanlægs ydelser omtrent 5% for lavt, hvis der benyttes timeværdier for vejrdata i stedet for at der benyttes øjebliksværdier. Forskellen må formodes at være større for danske forhold, hvor der er flere perioder, hvor solfangerens effektivitet ligger tæt på den grænse, hvor der netop kan produceres varme.

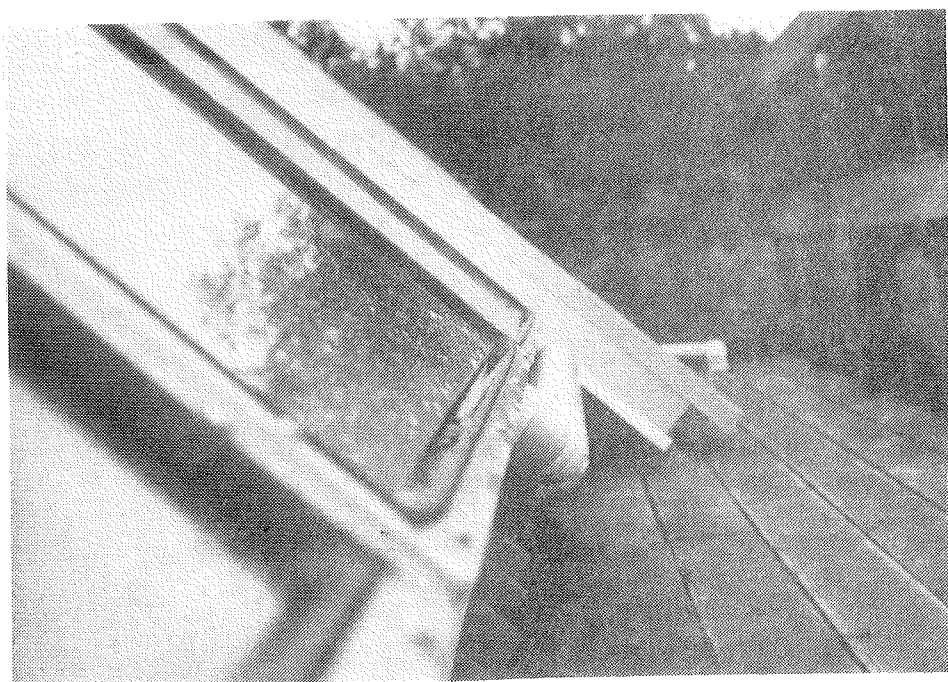
Ovennævnte forhold spiller naturligvis særligt ind når der foretages beregninger for at belyse forskellige styresystemers egnethed. Det vurderes, at referenceårets timebaserede vejrdata ikke er velegnede til sådanne undersøgelser.

Der er altså behov for bedre referenceår med information om variationerne i solintensiteten. Behovet for sådan et referenceår styrkes, hvis de i afsnit 6 omtalte varierende "øjeblikseffektiviteter" for solfangerne igennem en periode med varierende solindfald viser sig at have betydning for solfangerudbyttet.

I øvrigt blev det bemærket, at den benyttede solfanger ikke er regntæt. Efter regnfulde perioder er der meget store fugtmængder i solfangerne. Vand trænger blandt andet ind nederst i solfangeren, idet vandet ikke løber af solfangeren, men opsamles oven over tætningslisten, se figur 24. Figuren viser også to våde solfangerne en morgen efter en regnvejrsdag.

Disse forhold har reduceret anlæggenes ydelser, men det vurderes, at reduktionen i ydelserne stort set har været den samme for alle tre anlæg. Værre er det, at solfangerens holdbarhed formodentlig vil reduceres mærkbart. Solfangernes tætnings-

lister har allerede efter $\frac{1}{2}$ år taget meget stor skade. Prøvestationen for Solvarmeanlæg bør hurtigst muligt tage disse forhold op.



Figur 24. Solfangerelement efter et regnvejr (øverst) og solfangerelementer om morgenen efter en regnvejrsdag.

8. Udvikling af pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm.

De gennemførte undersøgelser har vist, at det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm er særdeles attraktivt. Ved udformningen af et sådant anlæg bør der imidlertid tages en række specielle hensyn, som ikke har så stor betydning for udformningen af referenceanlæg. Der bør således tages hensyn til risikoen for kogning i solfangeren, selvcirkulation i solfangerkredsen, fejlstyring af cirkulationspumpen og fejllindstilling af volumenstrømmen. Hvert af ovennævnte hensyn omtales i det følgende.

Som nævnt i afsnit 5 opstod der ikke kogning i det pumpedrevne anlæg med lille volumenstrøm under afprøvningerne. Dette skyldes dels det dårlige vejr, dels at der normalt dagligt blev tappet 150 l varmt vand fra varmelageret. I solrige perioder uden varmtvandsforbrug vil der optræde kogning i solfangeren med den nuværende anlægsudformning. Jo mindre volumenstrømmen er des større er risikoen for kogning.

Selve anlægsudformningen bør derfor sikre, at der ikke kan opstå kogning i anlægget. Dette kan f.eks. sikres:

- ved at vælge solfangerkredsens rørdimension således, at volumenstrømmen er stærkt afhængig af solfangervæskens temperatur. Volumenstrømmen skal altså være lille ved lave temperaturer og stor ved høje temperaturer.
- ved ikke at isolere og eventuelt forlænge røret, hvor solfangervæskens transporteres fra varmelageret til solfangeren.
- ved ikke at isolere den nederste del af varmelageret.

Anlægsydelsen reduceres formodentlig ikke nævneværdigt af ovennævnte tre foranstaltninger, som tilmed billiggør anlægget. Naturligvis bør det ved forsøg med den endelige anlægsudformning klarlægges, at kogningsproblemet er løst.

I anlæg, hvor varmen overføres fra solfangerne til varmelageret i bunden af varmelageret, er det ikke kritisk om pumpen stoppes i perioder, hvor solintensiteten ikke er tilstrækkelig til at der kan produceres varme i solfangerne. Det er heller ikke kritisk om anlægget er forsynet med en kontraventil som forhindrer selvcirkulation i solfangerkredsen i perioder, hvor solfangertemperaturen er lavere end lagertemperaturen.

I anlæg med små volumenstrømme stiller disse forhold sig anderledes. I disse anlæg er det vigtigt at pumpen ikke er i drift i perioder med utilstrækkeligt solindfald, idet der herved kan tappes betydelige varmemængder fra kappebeholderen. Det er derfor formodentlig ikke umiddelbart muligt at benytte et simpelt og billigt styresystem i disse anlæg som det f.eks. i form af en ur- eller lysfølerstyring er muligt i referenceanlæg, [3] , [8]. Ligeledes må det sikres, at der ikke opstår selvcirkulation om natten i solfangerkredsen. Dette sikres eventuelt ved at der indbygges en kontraventil i solfangerkredsen, eller måske kan rørdimensionen vælges så lille, at selvcirkulationen slet ikke kommer i gang på grund af det store tryktab. Det bør naturligvis ved forsøg undersøges, hvor små rørene skal være for at forhindre selvcirkulation.

Endelig skal det nævnes, at det er meget vigtigt at volumenstrømmen i anlæg med små volumenstrømme kan indstilles rimeligt korrekt. Eventuelt bør solfangerkredsen forsynes med en indstillingsventil og en volumenstrømmåler. Imidlertid kan pumpen, rørdimensionen og rørlængden måske vælges således, at den korrekte volumenstrøm opnås uden brug af ventil og volumenstrømmåler. Forsøg bør naturligvis klarlægge, om dette er muligt i praksis.

Det er vanskeligt at vurdere, hvor høj prisen for et markedsført pumpedrevet anlæg med lille volumenstrøm vil være i forhold til prisen for et markedsført referenceanlæg.

Følgende forhold kan billiggøre anlægget:

- kappebeholdere er billigere end spiralbeholdere.
- der kan benyttes mindre rør og isolering i solfangerkredsen.
- installationen bliver lidt nemmere.

Følgende forhold kan fordyre anlægget:

- en åben solfangerkreds i et anlæg med en normal kappebeholder er ikke sikret mod korrosion.
- anvendelse af mere solfangervæske.
- der er brug for et mere avanceret styresystem.
- eventuel anvendelse af kontraventil og udstyr til kontrol af volumenstrømmen.

I [5] nævnes, at anlæg med lille volumenstrøm kan forventes at blive omtrent 10% billigere end referenceanlæg. Dette er dog

usikkert, og først når solfangerfabrikanter markedsfører begge anlægstyper kan der drages konklusioner på dette område.

I denne forbindelse bør det huskes, at der for anlæg med lille volumenstrøm er et stort behov for udviklingsarbejde, således at anlægsudformningen kan optimeres. Måske kan både solfanger og varmelager udformes mere hensigtsmæssigt end det er tilfældet i det afprøvede anlæg. Styresystemet for pumpen og volumenstrømmen kan sandsynligvis også forbedres. I forsøgsperioderne er der således kun benyttet konstante volumenstrømme. Måske kan anlægsydelsen forbedres yderligere, hvis volumenstrømmen afhænger af solindfaldet og/eller af temperaturniveauet. Eventuelt kan en ny solcelledreven pumpe, som Grudfos netop har markedsført, komme på tale. Herved vil volumenstrømmen blive direkte afhængig af solintensiteten. Der er i det hele taget en række muligheder for udformningen af styresystemet. I denne forbindelse bør man være opmærksom på van Koppens patent vedrørende styringsmæssige principper for solvarmeanlæg, [9].

9. Konklusion.

Tre små solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning er afprøvet under de samme driftsbetingelser: Et pumpedrevet referenceanlæg med en indbygget varmevekslerspiral i en varmtvandsbeholder, et selvcirkulerende anlæg og et pumpedrevet anlæg med en kappebeholder og en lille volumenstrøm. Referenceanlægget er identisk med hovedparten af de anlæg, som markedsføres i dag.

Målingerne viste, at det afprøvede selvcirkulerende anlæg yder omtrent 10% mere end referenceanlægget, og at det pumpedrevne anlæg med kappebeholderen og en volumenstrøm på omtrent $0,1 - 0,2 \text{ l/min m}^2$ solfanger yder omtrent 20% mere end referenceanlægget.

Ovennævnte overraskende resultater viser, at anlæg med små volumenstrømme er særdeles attraktive og at der er mulighed for store forbedringer af rentabiliteten af markedsførte solvarmeanlæg. I denne forbindelse er der behov for yderligere forskning for at klarlægge varmelagres og solfangeres termiske egenskaber i forbindelse med små volumenstrømme. Desuden er der behov for at klarlægge hvorledes pumpen og volumenstrømmen bedst styres i sådanne anlæg. Endvidere er der behov for at udvikle et nyt referenceår, som indeholder information om variationerne i solintensiteten inden for den enkelte time.

Naturligvis er der først og fremmest behov for støtte til den enkelte solfangerfabrikant, således at der kan iværksættes et målrettet udviklingsarbejde for at udvikle optimale anlæg med små volumenstrømme.

Summary.

The thermal performance of three different small solar heating systems for domestic hot water supply has been measured under the same conditions. A pumped reference system with a normal volume flow rate, a pumped system using a low volume flow rate and a thermosyphon system have been tested. The reference system is identical with most of the systems marketed today in Denmark.

The pumped system using low flow performs about 20% better than the reference system and about 10% better than the thermosyphon system.

Pumped systems using low volume flow rate are therefore attractive, and research and development should be initiated in order to develop optimum designed solar heating systems using a low volume flow rate.

Referencer.

- [1] "Selvcirkulerende solvarmeanlæg i Lyngby - resultater og erfaringer fra et års målinger". Søren Østergård Jensen, Laboratoriet for Varmeisolering, meddelelse nr. 172, januar 1986.
- [2] "Termisk-dynamisk simulering af solvarmeanlæg med sæsonlagring". Peter Berg, Laboratoriet for Varmeisolering, meddelelse nr. 190, 1988.
- [3] "Varmelagring til solvarmeanlæg". Simon Furbo, Laboratoriet for Varmeisolering, meddelelse nr. 162, september 1984.
- [4] "Solvarme. Vejledning i projektering og udførelse af anlæg". Teknologisk Institut. April 1978.
- [5] "Solar water heater with low flow". Henrik Lawaetz & Jan Erik Nielsen. TI, September 1987.
- [6] "Collector utilizability for instantaneous solar radiation". H. Suehrcke and P.G. Mc Cormick. Department of Mechanical Engineering. University of Western Australia. Australia, September 1987.
- [7] Samtale med H. Suehrcke, Department of Mechanical Engineering. University of Western Australia, September 1987.
- [8] "Solar heating system for domestic hot water supply for a one family house". Simon Furbo and Svend Erik Mikkelsen, Thermal Insulation Laboratory. North Sun '86 congress, Copenhagen, June 1986.
- [9] "Forprojekt vedrørende flydeslange til varmelagre". Simon Furbo, Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 86-2, marts 1986.

Bilag 1

"Is low flow operation an advantage for solar heating systems?"

Paper præsenteret på ISES Solar World Congress i Hamborg i september 1987.

IS LOW FLOW OPERATION AN ADVANTAGE FOR SOLAR HEATING SYSTEMS?

Simon Furbo and Svend Erik Mikkelsen

Thermal Insulation Laboratory, Building 118, Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby, Denmark

ABSTRACT

The thermal performance of three different small solar heating systems for domestic hot water supply has been measured under the same conditions. A reference system with a normal volume flow rate, a pumped system using a low volume flow rate, and a thermosyphon system have been tested.

The pumped system using low flow performs about 20% better than the reference system and 10% better than the thermosyphon system.

KEYWORDS

Experiments, DHW-systems, thermosyphon, pumped systems, low flow, normal flow, thermal performance, comparison.

BACKGROUND

Thermosyphon solar heating systems or pumped low flow systems can have a very high thermal performance. Some investigations show that much higher thermal performance can be obtained for low flow systems than for "normal" systems.

However, to our knowledge, no direct experimental comparison of the thermal performance for such different systems had been carried out under the same test conditions. Therefore, in the spring of 1987, a test facility was built in order to compare the thermal performance of different small solar heating systems for domestic hot water supply.

The test facility makes it possible to test three small systems under the same conditions: the solar irradiance on the collectors and the hot water consumption are the same. By means of the monitoring system the thermal performance and the thermal behaviour of the systems are measured.

THE THREE TESTED SYSTEMS

Three small solar heating systems for domestic hot water supply were tested in the summer of 1987: a reference system, a pumped system using low flow, and a thermosyphon system. A schematical illustration of the systems is shown in fig. 1.

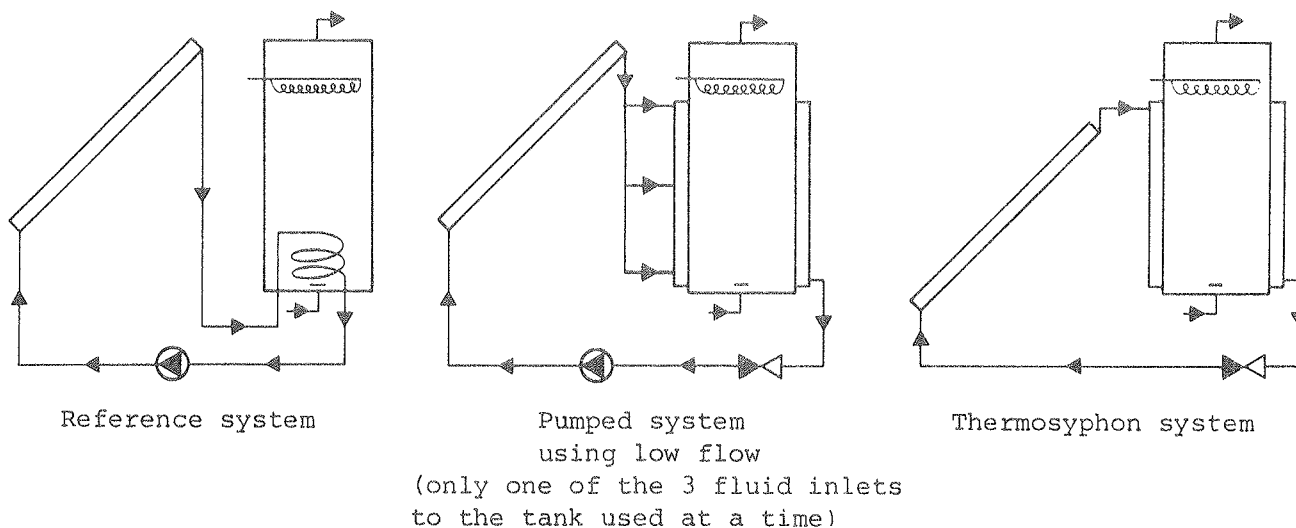


Fig. 1. Schematical illustration of the three systems tested.

Each system has two solar collector panels from the company Islev Solvarme ApS, with a selective welded channel plate as the absorber. The solar collectors, which have a total area of 3.9 m² for each system, are tilted 45° and faced south. The measured efficiency of the solar collector for small angles of incidence is: $\eta = 0.79 - 3.4 \cdot \frac{T_m - T_a}{I} - 0.016 \cdot \frac{(T_m - T_a)^2}{I}$. Each panel includes a solar collector fluid volume of 1.6 l.

The heat storages of the systems are placed in a weather protected uninsulated roof space at the same level as the solar collectors. The solar collector fluid is a 50% glycol/water solution for all three systems.

The heat storages in all three systems are 197 l cylindrical hot water tanks with a diameter of 46 cm and a height of 120 cm. In the reference system a 9 m 10/8.4 mm copper heat exchanger spiral is situated at the bottom sixth of the tank. In the two other systems a steel mantle is welded around part of the surface of the tank. The upper part of the mantle, which has a diameter of 51 cm and a length of 84 cm, is situated one fifth from the top of the tank, and the lower part is situated one tenth from the bottom. A 1000 W electric heating element is situated at the upper fifth part of each tank. The heat storages are insulated with 5 cm of mineral wool except for

the bottoms which are uninsulated. 5 m 12/10 mm copper pipes are used in the solar collector loops in the reference system and in the pumped system using low flow, while 5 m 18/16 mm copper pipes are used in the thermosyphon system.

The start temperature difference between the top of the absorber and the bottom of the hot water tank is 5 K, and the stop temperature difference between the top of the absorber and the bottom of the hot water tank is 0.5 K for the reference system and the pumped low flow system. The thermosyphon system has no control system.

Manually operated valves in the solar collector loop makes it possible to test the pumped system using low flow in the periods where the solar collector fluid enters the heat storage at the top, at the middle or at the bottom of the mantle.

TEST CONDITIONS AND MONITORING SYSTEM

The three systems are tested under the same conditions: the solar irradiance on the collectors and the hot water consumption is the same. A certain number of times each day 50 l of hot water is tapped from the heat storages. The tappings take place at the same time for all three systems, and the cold water temperature is the same. If the hot water temperature is lower than 50°C, 50 l is tapped. If the hot water temperature is higher than 50°C, an energy quantity corresponding to 50 l at 50°C is tapped. In testing periods, with the electric heating element in operation, heating power is supplied to the heat storage if the temperature of the top of the tank is lower than 52°C.

The monitoring system makes it possible to follow in detail the operation of the three systems. The following quantities are measured during the operation: the volume flow rates in the solar collector loops, the heating powers transported from the collectors to the heat storages, the water volume and energy tapped from each heat storage for each tapping, the energy supplies from the electric heating elements in the heat storages, and the solar irradiance on the solar collectors. Further, the most important temperatures in each system and the ambient air temperature are measured.

CONCLUSION

A number of test periods with different operation conditions have been carried out. The operation conditions and the measured thermal performance in each test are given in table 1.

A direct comparison of the thermal performance of the three systems in the different test periods is possible by means of the performance ratio between the net utilized solar energy for the actual system and the net utilized solar energy for the reference system. The ratio is given in the table.

As long as the solar collector fluid enters the top of the mantle in the pumped low flow system, this system performs about 20% better than the reference system and about 10% better than the thermosyphon system, regardless of the hot water consumption, the solar fraction and whether the electric heating element is in operation or not.

Test period	Hot water consumption l/day	Electric heating element in operation?	Reference System						Pumped Low Flow System						Thermosyphon System		
			Volume flow rate l/min/m ² solar collector	Operation time of the pump h	Energy supply from the elec- tric heating element, kWh	Energy tapped from the heat storage, kWh	Performance ratio #	Solar collector fluid inlet to the mantle	Volume flow rate l/min/m ² solar collector	Operation time of the pump h	Energy supply from the elec- tric heating element, kWh	Energy tapped from the heat storage, kWh	Performance ratio #	Energy supply from the elec- tric heating element, kWh	Energy tapped from the heat storage, kWh	Performance ratio #	
8/7-87 8pm- 11/7-87 8pm	150	yes	0.4	82	17.6	58.9	1.00	top	0.1	87	9.4	58.9	1.20	11.7	58.9	1.14	
14/8-87 10pm- 20/8-87 10am	150	yes	0.4	42	20.3	33.6	1.00 ¹⁾	top	0.1	42	17.5	33.6	1.21 ¹⁾	18.8	33.6	1.11	
29/6-87 10pm- 3/7-87 1pm	150 ²⁾	yes	0.5	43	4.8	27.1	1.00	top	0.1	33	3.5	31.5	1.26	4.9	30.1	1.13	
24/7-87 4pm- 30/7-87 4pm	200	yes	0.4	45	28.3	49.8	1.00	top	0.1	45	23.8	49.9	1.21	26.5	50.1	1.10	
30/7-87 5:30pm- 5/8-87 2pm	250	yes	0.4	52	42.9	61.0	1.00	top	0.1	54	38.3	61.0	1.25	41.4	61.0	1.08	
19/6-87 11am- 22/6-87 11am	150 ²⁾	no	0.4	31	0	11.5	1.00	top	0.1	31	0	13.7	1.19	0	12.5	1.09	
24/6-87 9am- 29/6-87 2pm	150 ²⁾	no	0.5	44	0	24.7	1.00	top	0.1	46	0	28.8	1.17	0	26.4	1.07	
27/5-87 0am- 31/5-87 12pm	150 ²⁾	no	0.4	45	0	19.4	1.00	top	0.1	45	0	23.1	1.19	-	-	-	
26/8-87 6pm- 31/8-87 5pm	150	yes	0.4	38	15.0	30.5	1.00	top	0.4	27	12.0	30.5	1.19	-	-	-	
8/9-87 4pm- 11/9-87 4pm	150	yes	0.4	19	7.7	17.8	1.00	top	0.6	13	5.8	17.8	1.19	-	-	-	
20/8-87 12am- 26/8-87 2pm	150	yes	0.4	47	10.1	36.9	1.00	top	0.8	25	8.9	36.9	1.04	8.0	36.9	1.08	
4/6-87 0am- 10/6-87 8pm	150 ²⁾	no	0.4	49	0	21.7	1.00	top	0.8	29	0	23.7	1.09	-	-	-	
8/8-87 11am- 12/8-87 9pm	150	yes	0.1	44	16.8	29.3	1.00 ³⁾	top	0.1	42	11.0	29.3	1.46	12.3	29.3	1.36	
11/6-87 0am- 15/6-87 12pm	150 ²⁾	no	0.2	34	0	20.6	1.00	top	0.8	17	0	23.7	1.15	-	-	-	
20/7-87 9am- 24/7-87 2pm	150	yes	0.4	39	15.1	27.4	1.00	bottom	0.1	40	15.5	27.4	0.97	13.8	27.4	1.11	

TABLE 1. Test Results

* Performance ratio: Net utilized solar energy
/net utilized solar energy for reference system.

2) Regardless of the hot water
temperature.

1) Solar collectors for reference system and
pumped low flow system interchanged.

3) Reference system boiling.

The reasons for the differences in the thermal performance are partly the heat storage design, partly the volume flow rate.

In the systems with a hot water tank with a mantle welded around part of the surface of the tank, thermal stratification in the tank is built up during operation. In this way high temperatures are reached fast in the top of the hot water tank. In the reference system with a hot water tank with a built-in heat exchanger spiral situated at the bottom of the tank, temperature differences are equalized during operation resulting in long operation times before high temperatures are reached at the top of the tank. The thermal stratification in the heat storage improves the thermal performance of the system.

The temperature levels in the solar collectors are different for each system. Further, during operation the power produced by the solar collectors fluctuates as a result of the fluctuations of the solar irradiance.

Low volume flow rates result in smooth and small fluctuations in the power produced by the solar collectors, while large volume flow rates result in rapid and large fluctuations. It is still not clear if these differences give rise to differences in the thermal performance of the collectors.

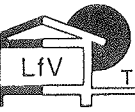
A constant volume flow rate of 0.1 l/min per m² solar collector results in a good thermal performance. However, it is still not clear whether a higher performance can be obtained if the volume flow rate is controlled in a more advanced way.

Bilag 2

Poster præsenteret på ISES Solar World Congress
i Hamborg i september 1987

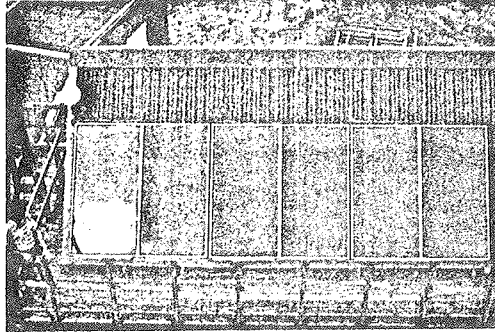
IS LOW FLOW OPERATION AN ADVANTAGE FOR SOLAR HEATING SYSTEM ?

SIMON FURBO AND SVEND ERIK MIKKELSEN



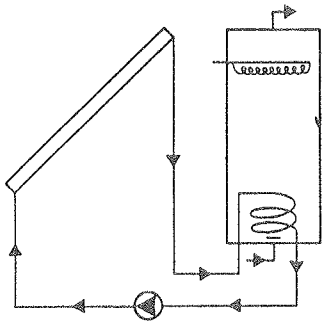
THERMAL INSULATION LABORATORY • Technical University of Denmark, Building 118, DK-2800 Lyngby, Telephone: (+45 2)883511

SOLAR HEATING
SYSTEMS FOR DHW-SUPPLY
HAVE BEEN TESTED

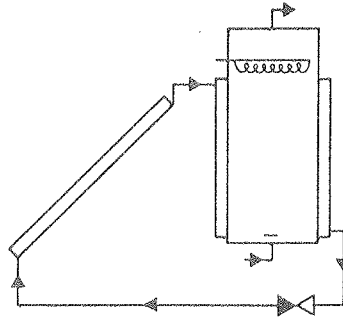


MESSAGE CORNER

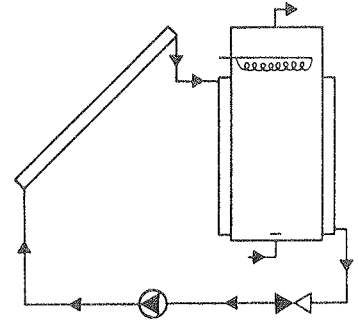
REFERENCE SYSTEM



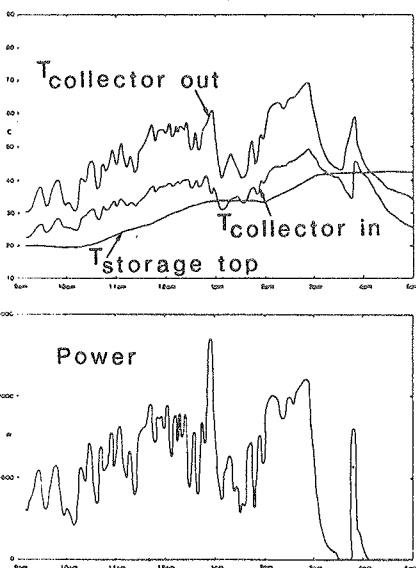
THERMOSYPHON SYSTEM



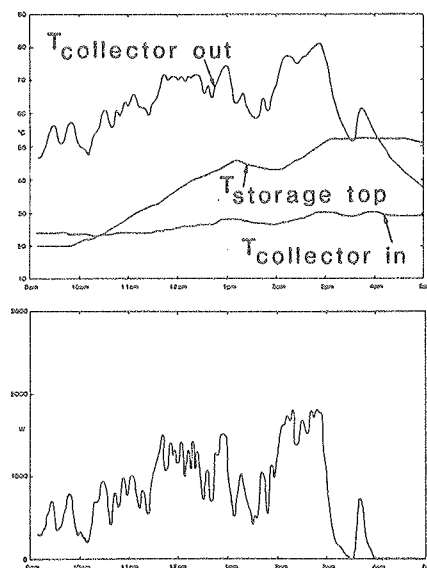
PUMPED LOW FLOW SYSTEM



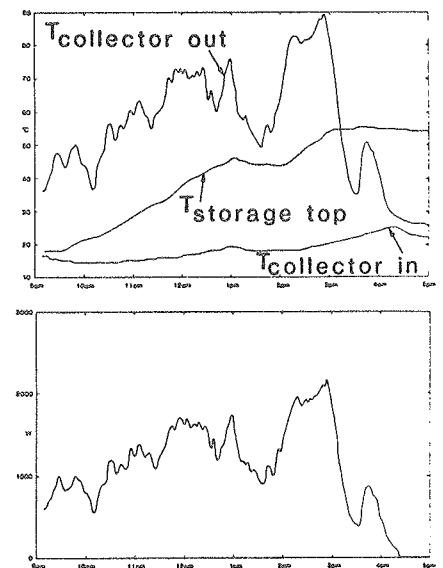
TEMPERATURES AND HEATING POWER TRANSPORTED TO THE HEAT STORAGE ON A TYPICAL DAY:



MEASURED
RELATIVE
PERFORMANCE
DURING 1987 : 100%



110%



120%

WHY ARE LOW FLOW SYSTEMS SO GOOD ?

