

UNDERSØGELSE
AF
SOLVARMEANLÆG
FRA
THERMO DYNAMICS LTD

SIMON FURBO
KLAUS ELLEHAUGE

MAJ 1994

MEDDELELSE NR. 260

Laboratoriet for Varmeisolering
Danmarks Tekniske Universitet

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD	1
RESUME	2
SUMMARY	3
1. INDLEDNING	4
2. KOMPONENTAFPRØVNING	6
2.1 Solfanger	6
2.2 Solfangerkreds	13
2.3 Varmelager	19
3. AFPRØVNING AF ANLÆG	27
3.1 Beskrivelse af anlægget.	27
3.2 Målesystem og afprøvningsbetingelser	32
3.3 Målte og beregnede ydelser samt driftserfaringer	33
3.4 Beregnet årsydelse	42
4. VURDERING AF ANLÆGGET	44
5. KONKLUSION	44
REFERENCER	45

FORORD

Denne rapport beskriver arbejdet, som er gennemført under projektet: "Undersøgelse af billigt canadisk solvarmeanlæg", j.nr.51181/92-0082.

Projektet, som er finansieret af Energistyrelsen, er gennemført på Laboratoriet for Varmeisolering, DTU med deltagelse af medarbejderne:

Simon Furbo, civilingenør, Ph.D.

Klaus Ellehauge, civilingenør

Martin Dandanell, maskinarbejder

Poul Dedenroth, maskinarbejder

Lars Kæstel Jørgensen, elektronikmekaniker

Hamid Jalali, teknisk assistent

Anne Rasmussen, korrespondent

Bodil Fauerskov, korrespondent

Ann Johnsen, kontorelev

RESUME

Det canadiske firma Thermo Dynamics Ltd markedsfører et lille solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning benævnt Solar Boiler system.

Anlægget, som er designet både efter tømmesystem- og lowflow-princippet, er meget billigt.

I anlægget overføres varmen fra solfangerkredsen til brugsvandet i varmtvandsbeholderen ved hjælp af en ekstern varmeveksler, og som solfangerkreds benyttes den flexible såkaldte "life-line", som medvirker til at anlægget er let at installere.

Anlæggets komponenter er afprøvet i indendørs prøvestande. Solfangerens effektivitet er målt i laboratoriets solsimulator, mens de termiske forhold for "life-linen" er undersøgt både teoretisk og eksperimentelt i laboratoriets lagerprøvestand. Varmtvandsbeholderen og varmeveksleren er ligeledes afprøvet i lagerprøvestanden.

Endelig er solvarmeanlægget afprøvet i laboratoriets prøvestand for solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning. Anlæggets ydelse er målt under de samme forhold som ydelserne for 5 danske markedsførte solvarmeanlæg er målt under.

På basis af undersøgelserne er anlæggets egnethed under danske forhold vurderet.

SUMMARY

The Solar Boiler system, which is a small DHW solar heating system marketed by the Canadian company Thermo Dynamics Ltd, was investigated.

The system makes use of both the drain back principle and the low flow principle. The heat from the solar collector loop is transferred to the domestic water of the hot water tank by means of an external heat exchanger. A flexible so-called "life-line", which is used as the solar collector loop of the system facilitate the installation.

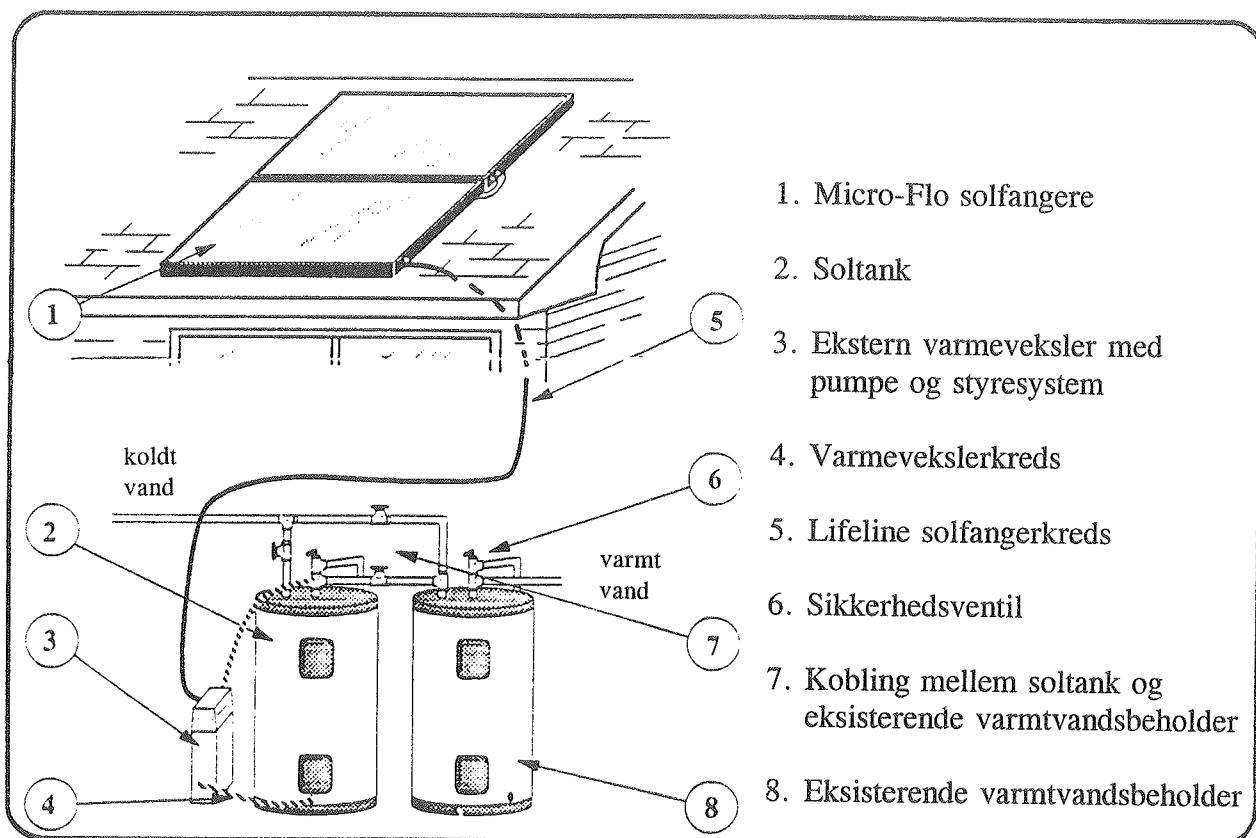
The components of the system were tested in indoor test facilities. The efficiency of the solar collector was measured in the solar simulator test facility of the Thermal Insulation Laboratory. The "life-line" was investigated theoretically as well as experimentally in a test facility for heat storages. The hot water tank and the heat exchanger were tested in the heat storage test facility as well.

The solar heating system was tested side-by-side with five marketed Danish solar heating systems under realistic conditions in a test facility for small DHW solar heating systems. The thermal performance of the system can therefore be compared to the thermal performances of the Danish systems.

Based on the investigations the suitability of the system is estimated for Danish conditions.

1. INDLEDNING

Figur 1 viser en principskitse af Solar Boiler systemet, som består af to solfangerelementer, en "lifeline" som solfangerkreds, en pumpe, en ekstern varmeveksler og en varmtvandsbeholder.



Figur 1. Principskitse af Solar Boiler system.

Soltanken er en billig standard varmtvandsbeholder, som er forsynet med to elpatroner, en i bunden af beholderen og en i den øverste del af beholderen. Elpatronerne benyttes ikke, idet soltanken fungerer som en ren forvarmebeholder, som kobles sammen med en eksisterende varmtvandsbeholder. Årsagen til at beholderen med elpatronerne benyttes i anlægget er, at en varmtvandsbeholder uden elpatroner i Canada er dyrere end en varmtvandsbeholder med elpatroner. Forklaringen herpå er at varmtvandsbehøldere med elpatroner masseproduceres.

De af Thermo Dynamics Ltd oplyste priser for anlæggets komponenter ved køb af et anlæg, samt en typisk forbrugerpris for anlægget i Canada fremgår af tabel 1.

2,78 m ² solfangerelement med indbygget føler	411 Cd \$	2080 kr.
2,78 m ² solfangerelement	386 Cd \$	1950 kr.
Varmeveksler med pumpe og styrresystem	827 Cd \$	4180 kr.
270 l isoleret soltank	235 Cd \$	1190 kr.
Installationsudstyr	24 Cd \$	120 kr.
Lifeline	6,5 Cd \$/ft	110 kr./m
Total	1883 Cd \$ + 6,5 Cd \$/ft	9530 kr. +110 kr/m
Typisk forbrugerpris for 5,6 m ² installeret solvarmeanlæg i Canada	2700 Cd \$	14000 kr.

Tabel 1. Pris for Solar Boiler systemet.

2. KOMPONENTAFPRØVNING

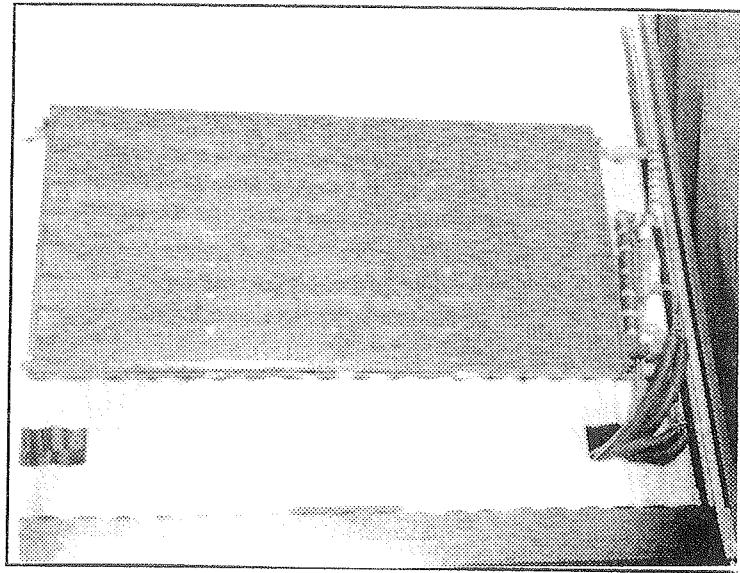
2.1 Solfanger

Dimensionerne af anlæggets solfangerelement, hvis absorber består af 8 seriekoblede sunstrips, fremgår af tabel 2.

Udvendige dimensioner	2,48 m x 1,20 m x 0,08 m
Vægt (tom)	45 kg
Solfangervæskeindhold	0,7 l
Udvendigt areal	2,98 m ²
Transparent areal	2,78 m ²

Tabel 2. Data for det afprøvede Micro-Flo solfangerelement.

Solfangerelementet er afprøvet i laboratoriets solsimulator [1] ved hjælp af de på laboratoriet normalt anvendte prøvemетодer [2]. Et foto af solfangeren i prøvestanden er vist på figur 2. Som solfangervæske blev en 50% (vægt) propylenglycol/vand blanding benyttet under afprøvningen.



Figur 2. Det afprøvede solfangerelement i prøvestanden.

De målte effektiviteter baseret på det transparente areal ved normale massestrømme fremgår af tabel 3.

Bestrålingsstyrke G W/m ²	Massestrøm kg/s	Lufttemperatur T _a °C	Indløbstemperatur T _i °C	Temperaturstigning over solfangeren K	Effektivitet η
847	0,0542	27,7	26,2	8,69	0,703
	0,0543	27,7	26,2	8,69	0,704
	0,0543	27,7	26,2	8,68	0,703
	0,0542	27,7	26,2	8,64	0,699
871	0,0543	28,2	45,4	7,30	0,602
	0,0542	28,2	45,4	7,31	0,602
	0,0542	28,2	45,4	7,30	0,601
	0,0543	28,2	45,5	7,29	0,601
871	0,0548	27,4	73,5	4,94	0,422
	0,0548	27,5	73,5	4,95	0,423
	0,0548	27,8	73,5	4,96	0,423
	0,0547	27,7	73,5	4,93	0,421
875	0,0565	28,0	90,0	3,51	0,313
	0,0565	28,0	90,1	3,53	0,315
	0,0565	28,0	90,1	3,52	0,313
	0,0565	28,0	90,1	3,53	0,315

Tabel 3. Målte solfangereffektiviteter ved en solfangerhældning på 67,5° fra vandret og en vindhastighed langs det transparente dæklag på 5 m/s. Det benyttede solfangerareal er 2,78 m².

Måleresultaterne kan sammenfattes således, at solfangerens effektivitet ved en solfangerhældning på 67,5° fra vandret kan bestemmes af udtrykket:

$$\eta = 0,72 - 4,58 \times (T_m - T_a)/G - 0,015 \times (T_m - T_a)^2/G$$

hvor T_m er middelvæsketemperaturen i solfangeren, °C

T_a er lufttemperaturen, °C

G er bestrålingsstyrken, W/m².

Solfangerens målte varmetabskoefficient ved forskellige solfangerhældninger fremgår af tabel 4. Disse målinger kan sammenfattes således, at solfangerens varmetabskoefficient ved en solfangerhældning s fra vandret, ks kan bestemmes af udtrykket:

$$ks/k_{45^\circ} = 1,041 - 0,001 \times s$$

Solfangerhældning fra vandret s °	Massestrøm kg/s	Air temperature T _a °C	Indløbstemperatur T _i °C	Temperaturfald over solfangeren K	Varmetabskoefficient k W/m ² K
67,5	0,0555	23,3	73,5	3,30	5,09
	0,0555	23,3	73,6	3,30	5,09
	0,0554	23,2	73,5	3,30	5,08
	0,0555	23,2	73,6	3,30	5,09
45,0	0,0556	23,2	74,0	3,40	5,21
	0,0557	23,1	74,0	3,40	5,21
	0,0556	23,1	74,0	3,41	5,22
	0,0556	23,1	74,0	3,41	5,21
22,5	0,0550	23,2	72,7	3,41	5,30
	0,0552	23,2	72,8	3,41	5,30
	0,0551	23,1	72,8	3,40	5,29
	0,0552	23,2	72,7	3,41	5,31

Tabel 4. Målte varmetabskoefficienter ved en vindhastighed langs det transparente dæktag på 5 m/s. Det benyttede solfangerareal er 2,78 m².

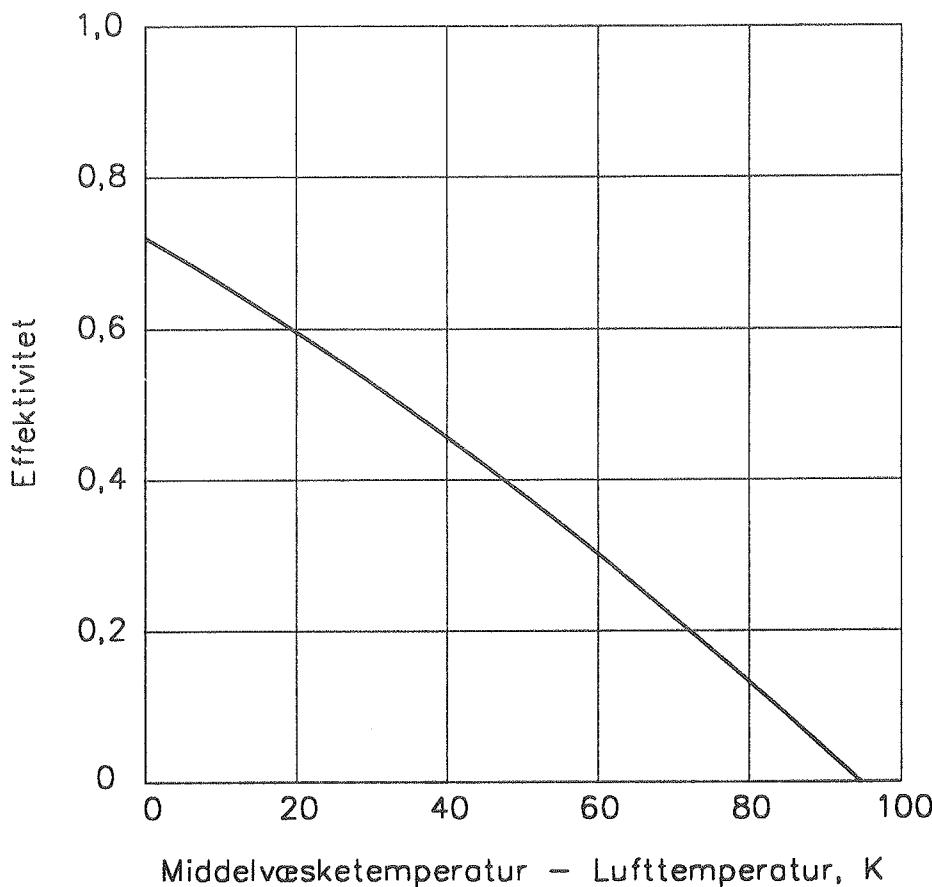
Ved at benytte korrektionen for hældningen fås følgende udtryk for effektiviteten:

$$\eta = 0,72 - 4,67 \times (T_m - T_a)/G - 0,015 \times (T_m - T_a)^2/G$$

Forudsætningerne for dette udtryk er:

- Effektiviteten er baseret på det transparente areal 2,78 m².
- Solfangerens hældning er 45°.
- Solstrålingen består udelukkende af direkte stråling.
- Indfaldsvinklen er mindre end 30°.
- Vindhastigheden langs det transparente dæktag er 5 m/s.
- Solfangervæsken er propylenglycol (50%).
- Massestrømmen er ca. 0,02 kg/s m² solfanger.

Figur 3 viser solfangereffektiviteten ved en bestrålingsstyrke på 800 W/m² bestemt af det oven for angivne udtryk. Solfangereffektiviteten adskiller sig ikke nævneværdigt fra effektiviteterne af de danske markedsførte solfangere.



Figur 3. Solfangereffektiviteten ved en bestrålingsstyrke på 800 W/m^2 og en solfangerhældning på 45° .

Solfangereffektiviteten blev også målt ved små massestrømme. Måleresultaterne fremgår af tabel 5. Resultaterne præsenteres ved hjælp af en korrektionsfaktor for volumenstrømmen F_f . F_f benyttes til at bestemme effektiviteten ved små volumenstrømme ud fra effektiviteten ved en normal volumenstrøm:

$$F_f = \frac{\eta_{\text{lowflow}}}{\eta_{\text{normalflow}}}$$

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

I [3] er det detaljeret beskrevet, hvorledes F_f bestemmes på basis af måleresultater. Størrelserne af F_f bestemt ud fra målingerne fremgår af tabel 6.

Størrelserne af F_f for 8 danske markedsførte solfangere er angivet i [4]. Disse størrelser samt størrelsen af F_f for Micro-Flo solfangeren fremgår af figur 4. Det ses at størrelsen af F_f for den canadiske solfanger er tæt på størrelsen af F_f for de danske solfangere.

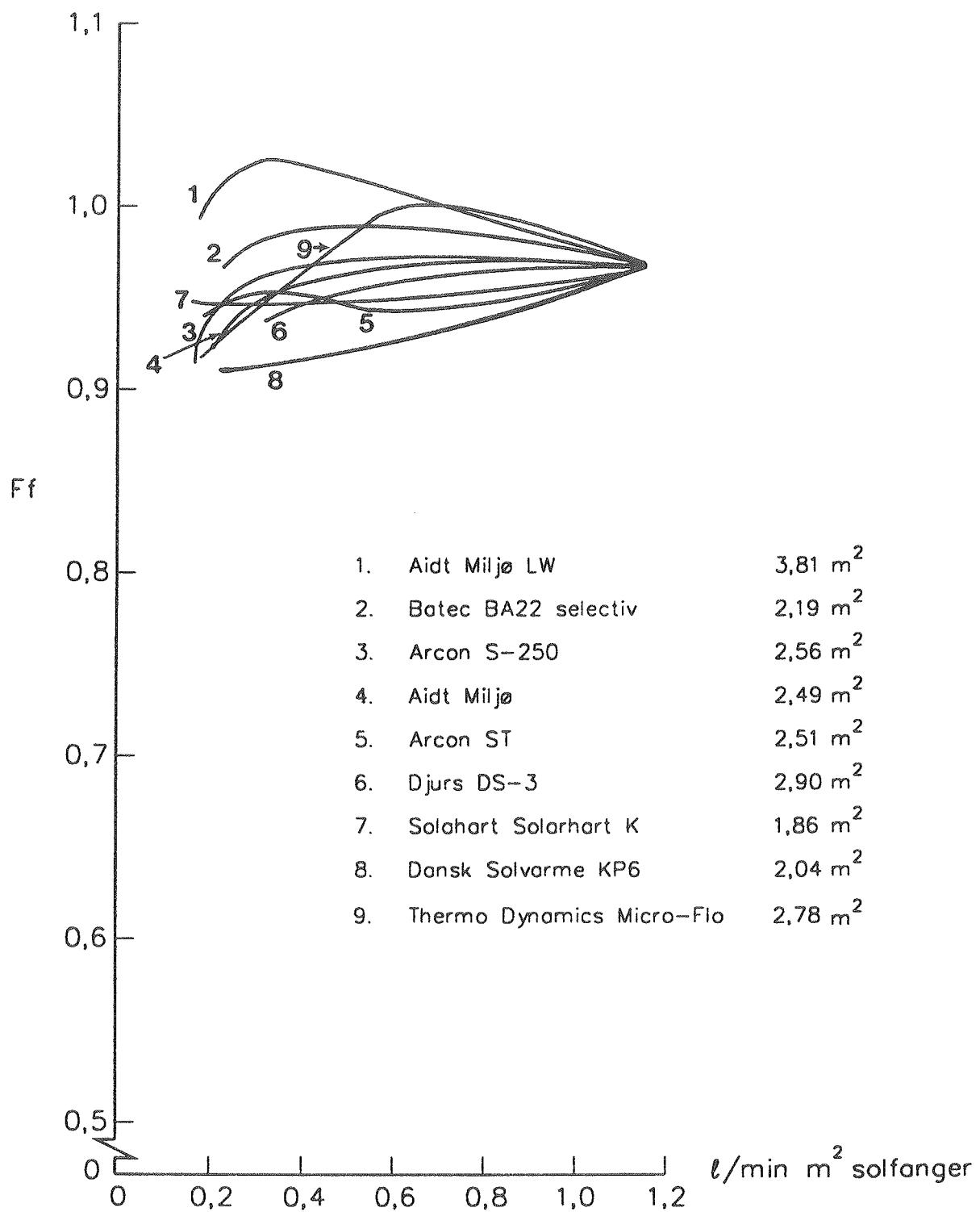
Endelig blev tryktabet over solfangeren bestemt med vand ved 25°C som solfangervæske for forskellige massestrømme. Måleresultaterne fremgår af figur 5, som viser tryktabet over solfangeren som funktion af massestrømmen.

Bestrålungs-styrke G W/m ²	Massestrøm kg/s	Air temperature T _a °C	Inlet temperature °C	Temperature rise over collector K	Effektivitet η
846	0,0278	26,4	27,4	16,09	0,692
	0,0278	26,6	27,4	16,09	0,691
	0,0279	26,9	27,4	15,98	0,689
	0,0279	26,5	27,4	15,85	0,684
857	0,0140	26,2	23,3	29,38	0,628
	0,0140	26,3	23,3	29,33	0,630
	0,0140	26,3	23,3	29,25	0,628
	0,0140	26,3	23,3	29,34	0,627
861	0,0070	27,9	23,3	51,05	0,552
	0,0071	27,8	23,3	50,89	0,553
	0,0071	27,9	23,3	50,77	0,552
	0,0071	28,0	23,3	50,85	0,553

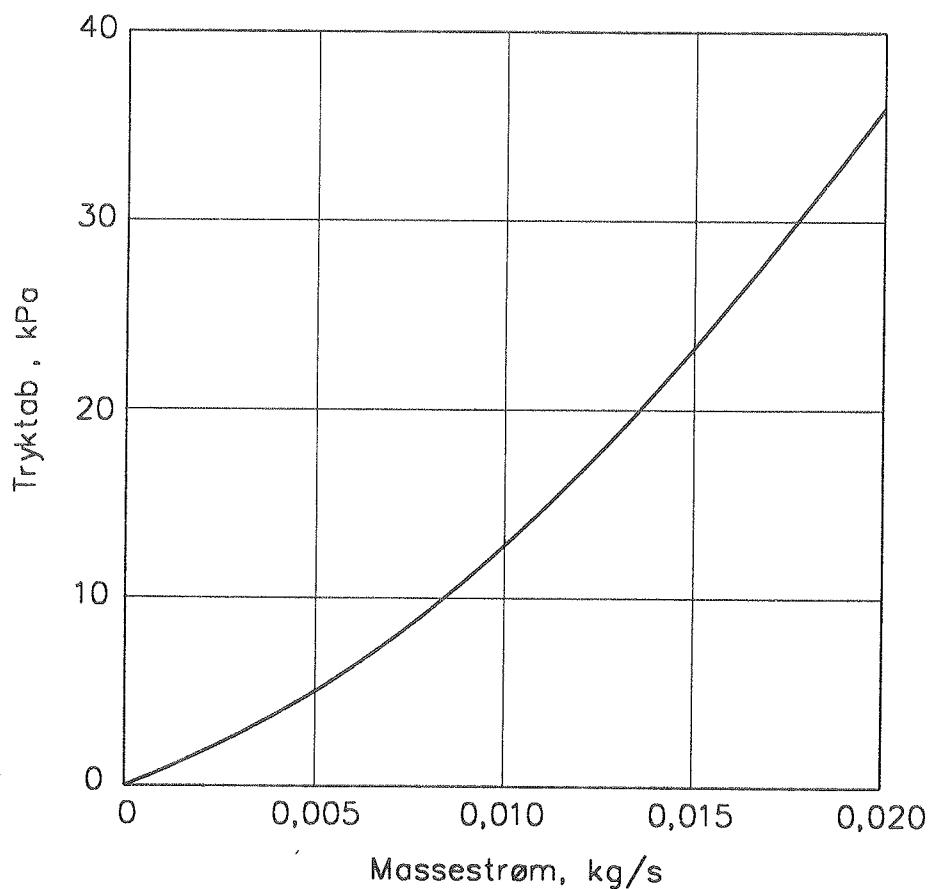
Tabel 5. Målte solfangereffektiviteter ved en solfangerhældning på 67,5° fra vandret og en vindhastighed langs det transparente dæklag på 5 m/s. Det benyttede solfangerareal er 2,78 m².

Massestrøm		Volumenstrøm	Integreret middel-væsketemperatur		Effektivitet	
kg/s	kg/sm ² solfanger	l/min m ² solfanger	T _m °C	T _m - T _a K	η	F _f
0,0279	0,0100	0,59	35,6	9,0	0,689	1,03
0,0140	0,0050	0,30	38,7	12,3	0,628	0,97
0,0071	0,0025	0,15	50,9	23,0	0,553	0,94

Tabel 6. F_f for forskellige volumenstrømme ved en solfangerhældning på 67,5° fra vandret og en vindhastighed langs det transparente dæklag på 5 m/s.



Figur 4. Korrektionsfaktor for volumenstrømmen F_f som funktion af volumenstrømmen for ni forskellige solfangere.



Figur 5. Tryktab over solfangeren med vand ved 25°C som solfangervæske som funktion af massestrømmen.

2.2 Solfangerkreds

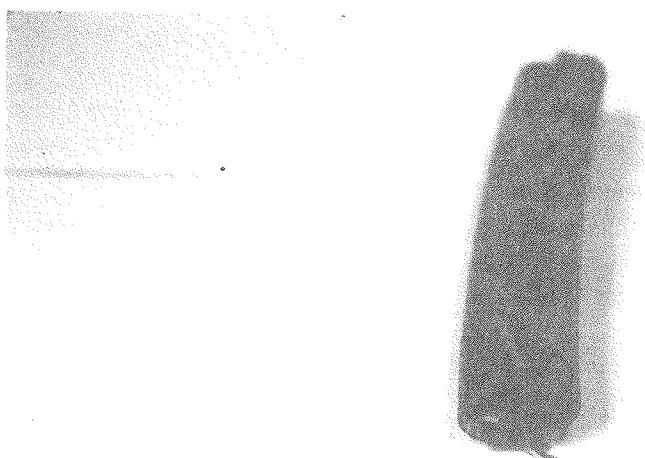
Anlæggets solfangerkreds er den såkaldte lifeline, som indeholder et 1/4" kobberrør til den varme solfangervæske fra solfangeren, et 5/16 " kobberrør til den koldere solfangervæske, som tilføres solfangeren fra varmeveksleren, to ledninger til anlæggets styresystem, glasfiberisolering og en udvendig PVC kappe. Figur 6 viser et tværssnit af lifelinens.



Figur 6. Tværssnit af lifeline.

Lifelinens totale diameter er 37 mm. Det lille rør med den varme solfangervæske er placeret i midten af lifelinens, mens det større koldere rør er placeret i yderkanten af lifelinens tværssnit. Herved reduceres varmetabet fra det varme rør mest muligt. Lifeline er forholdsvis flexibel, hvorved installationen af solfangerkredsen og anlæggetlettes.

Thermo Dynamics Ltd markedsførte indtil for to siden en billigere og mere flexibel lifeline baseret på to 8/6 mm nylondrøer, som var placeret tæt sammen og omgivet af en PVC kappe som eneste isolering, se figur 7. Desværre viste det sig, at der med tiden for det varme nylondrør opstod tæthedspøblemer, idet nylondrøret i mange installerede anlæg ikke kunne holde til de høje temperaturer, som opstår i varme sommerperioder med begrænset varmtvandsforbrug. Derfor blev den nye lifeline baseret på kobberrør udviklet og den gamle lifeline benævnes nu deadline!



Figur 7. Tværsnit af tidligere anvendt lifeline baseret på nylonrør.

Under normal drift for den nye lifeline tabes der varme fra det lille varme rør til omgivelserne og samtidig overføres varme fra det lille varme rør til det større koldere rør. Derfor blev der gennemført forsøg for at bestemme lifelinens varmetabskoefficient og varmeverkslingen mellem de to rør. Forsøgene blev udført i laboratoriets lagerprøvestand [5].

Under afprøvningerne blev vand anvendt som solfangervæske. Den afprøvede lifeline, som var placeret indendørs ved en omgivelsestemperatur på ca. 23°C, havde en total længde på 39,4 m.

Under varmetabsmålingen blev lifelinens ene ende koblet til prøvestanden mens den anden ende blev kortsluttet. Vandet fra prøvestanden tilføres det lille rør med en konstant høj temperatur. Ved enden af lifelinen blev vandet ført direkte fra det lille rør videre til lifelinens store rør uden et temperaturfald. På denne måde føres vandet retur til prøvestanden igennem det store rør.

Resultaterne af varmetabsmålinger ved to forskellige temperaturniveauer er angivet i tabel 7.

Volumenstrøm l/min	Lufttemperatur °C	Indløbstemperatur °C	Temperaturfald over lifelinens ved prøvestanden K	Lifelinens varmetab W	Lifelinens varmetabskoefficient W/K
0,91	23,0	61,7	6,36	396	11,2 0,28
0,95	22,0	89,9	11,29	726	11,7 0,30

Tabel 7. Målte varmetabskoefficenter for lifelinen.

Målingerne viste altså, at lifelinens varmetabskoefficient er ca 0,3 W/K pr. m lifeline.

Under normal drift er det store rør koldt. Varmetabet fra dette rør er derfor normalt lille. Endvidere vil der overføres varme fra det lille varme rør til det store kolde rør. I praksis vil lifelinens varmetabskoefficient derfor være mindre end de i tabellen angivne størrelser.

Under varmevekslingsforsøgene blev den ene ende af lifelinens koblet til prøvestanden og den anden ende til en varmeveksler, hvor vandet kan afkøles.

I forsøgene blev vandet fra prøvestanden tilført lifelinens lille rør med en konstant høj temperatur, og i den anden ende af lifelinens koblet til prøvestanden og den anden ende til en varmeveksler, hvor vandet kan afkøles. Temperaturerne af det cirkulerende vand blev målt i begge ender af lifelinens rør både i det lille og i det store rør.

Der blev gennemført forsøg med forskellige indløbstemperaturer, både for det lille og store rør. Der blev i forsøgene benyttet en volumenstrøm på 0,56 l/min. Dette er en volumenstrøm tæt på volumenstrømmen i solvarmeanlægget. Det målte varmetab for lifelinens rør blev for hvert forsøg sammenlignet med varmetabet beregnet med PC programmet HEAT 2, [6]. Lifelinens geometri, varmeledningsevnerne for lifelinens enkelte dele og de målte middelvæsketemperaturer i det varme og kolde rør blev benyttet som input til programmet. Tabel 8 angiver de målte stabile temperaturer for den 39,4 m lange lifeline og de målte og beregnede størrelser af lifelinens varmetab.

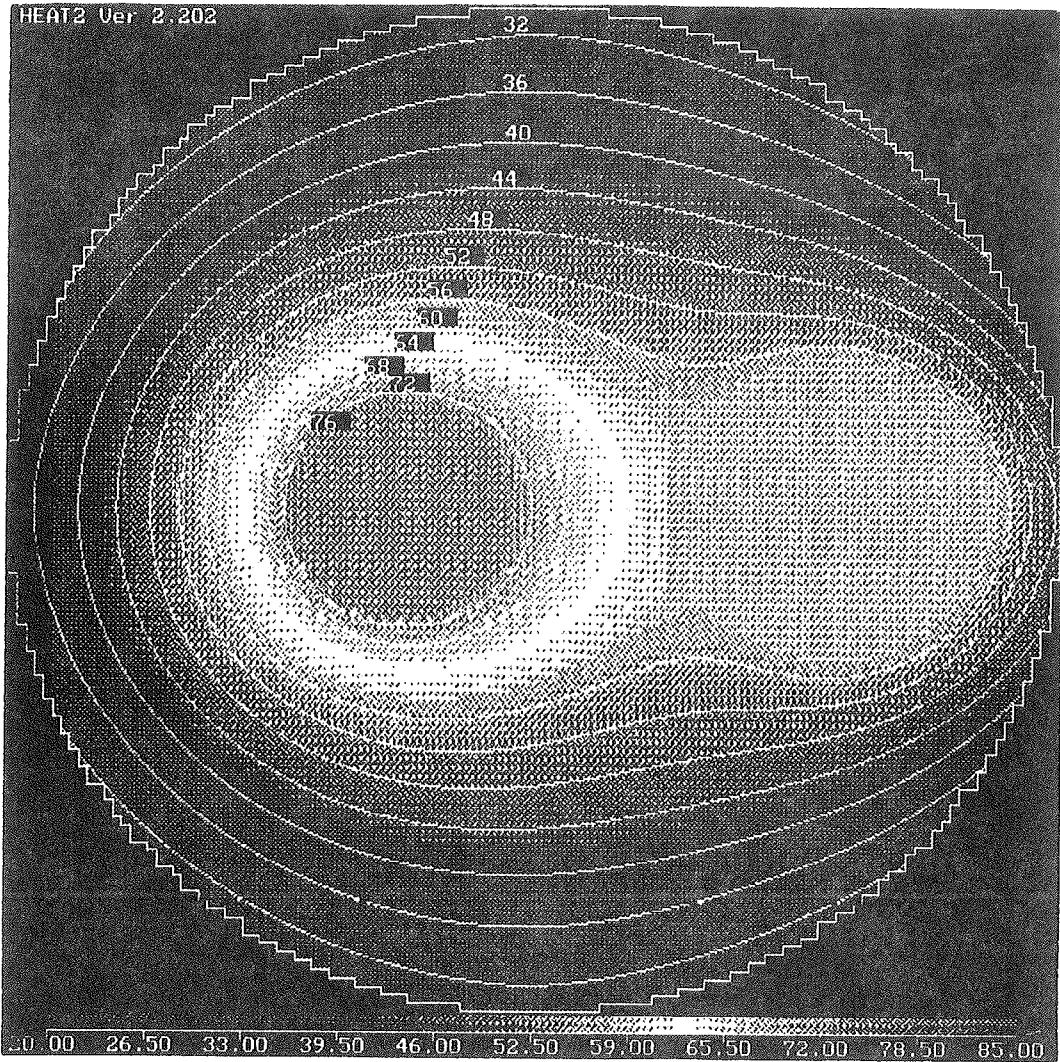
Volumenstrøm l/min	Fremløbstemperatur til lifelinens lille rør °C	Returtemperatur fra lifelinens lille rør °C	Fremløbstemperatur til lifelinens store rør °C	Returtemperatur fra lifelinens store rør °C	Lufttemperatur °C	Lifelinens varmetab		
						Målt W	Beregnet W/m	Beregnet W/m
0,56	39,9	36,8	21,8	23,0	20,5	75	1,9	1,9
0,56	60,9	54,3	19,5	22,5	21,2	140	3,5	3,5
0,56	60,4	55,4	40,9	39,0	21,7	265	6,7	6,6
0,56	80,1	70,2	19,4	24,1	18,3	200	5,1	5,4
0,56	80,3	71,9	41,9	41,1	22,2	355	9,0	8,9
0,56	80,0	73,0	61,9	55,9	19,8	500	12,7	12,1

Tabel 8. Målte stabile temperaturer og målte og beregnede varmetab for lifelinens for seks varmevekslingsforsøg.

Der er god overensstemmelse mellem de målte og beregnede varmetab. Derfor kan man benytte beregninger med HEAT 2 programmet til at bestemme varmeoverføringsevnen mellem lifelinens to rør og til at bestemme varmetabskoefficienten for hvert enkelt rør i forskellige driftssituationer.

Der blev gennemført en lang række beregninger med HEAT 2 programmet med forskellige middelvæsketemperaturer både i det lille varme rør og i det store kolde rør.

Figur 8 viser et eksempel på beregnede temperaturer inde i lifelinens rør. Resultaterne af beregningerne er sammenfattet i figur 9-11. Figur 9 og 10 viser varmetabskoefficienten for det lille varme rør og for det store kolde rør. Varmeresistancerne er vist som funktion af temperaturforskellene $T_{varm} - T_a$ og $T_{varm} - T_{kold}$, hvor T_{varm} er middelvæsketemperaturen i det



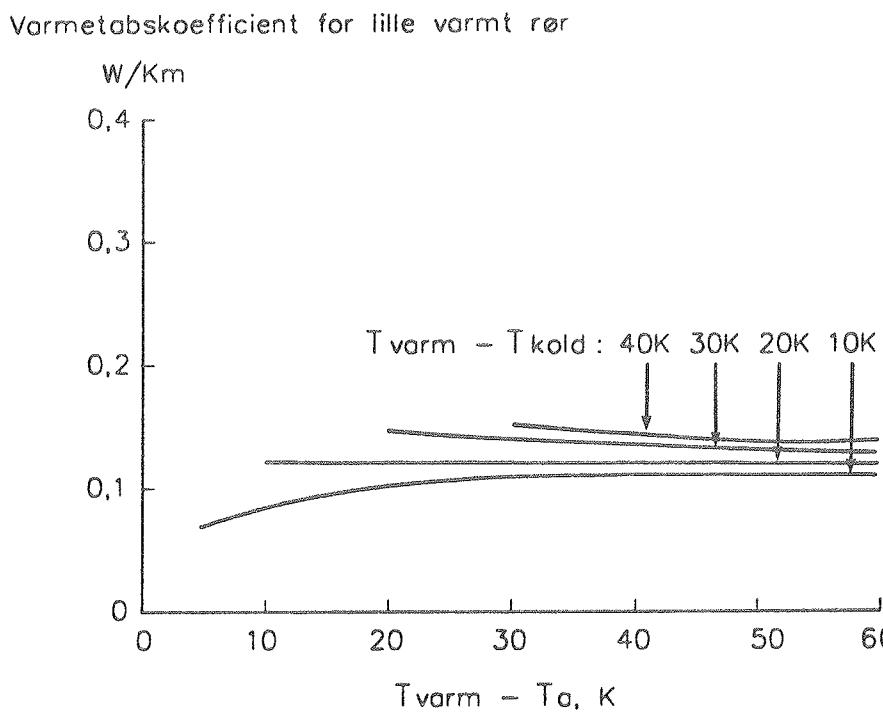
Figur 8. Temperaturer i et tværsnit af lifelinens beregnet med HEAT 2 programmet.

lille varme rør, T_a er lifelinens omgivelsestemperatur og T_{kold} er middelvæsketemperaturen i det store kolde rør. Figur 11 viser varmeoverføringsevnen mellem lifelinens to rør ligeledes som funktion af temperaturforskellene $T_{varm} - T_a$ og $T_{varm} - T_{kold}$.

Varmetabskoefficienten for det lille varme rør fra solfangeren har en rimelig lille størrelse, som ikke påvirkes afgørende af driftsbetingelserne. Varmetabskoefficienten for det store kolde rør til solfangeren er også rimelig lille. Størrelsen af denne varmetabskoefficient påvirkes stærkt af driftsbetingelserne. I perioder med høje solfangertemperaturer og lave varmelager-temperaturer er varmetabskoefficienten for det kolde rør negativ på grund af varmetransporten fra det varme rør.

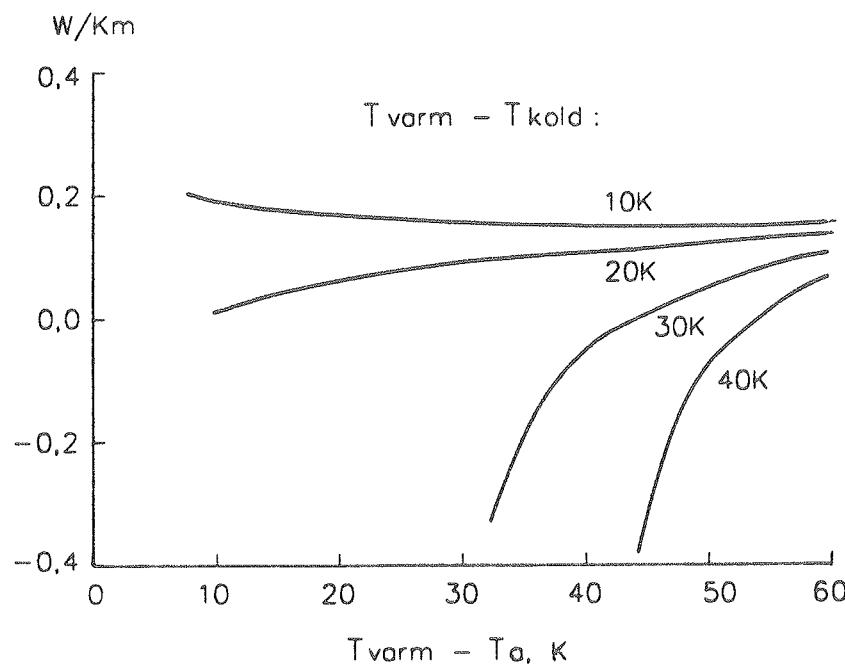
Varmeoverføringsevnen mellem lifelinens to rør påvirkes også stærkt af driftsbetingelserne. For solfangerkredse med normale længder er varmemængden, som overføres fra det varme til det kolde rør, normalt rimelig lille. Solfangervæskens indløbstemperatur til solfangeren forøges derfor normalt ikke afgørende på grund af varmevekslingen mellem de to rør, og varmevekslingen vil derfor ikke reducere anlægsydelsen nævneværdigt.

Alt i alt kan det konkluderes, at lifelinens varmeteknisk er en udmærket solfangerkreds.



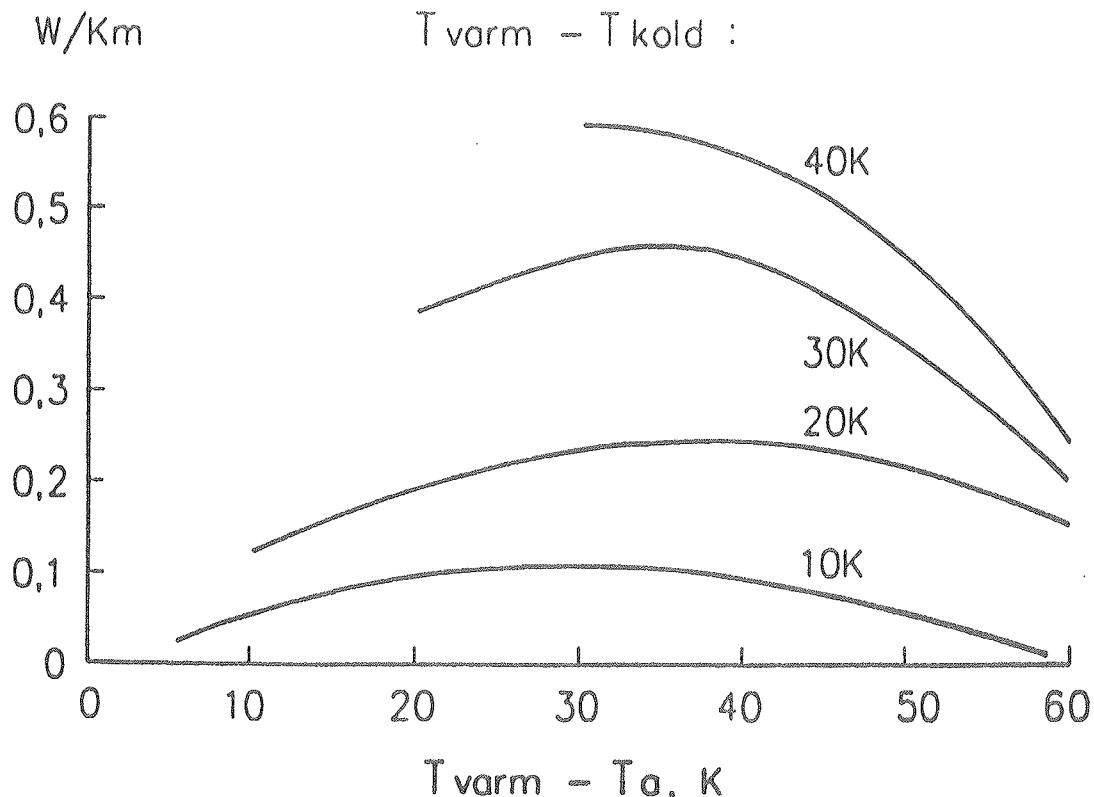
Figur 9. Varmetabskoefficient for lifelinens lille varme rør som funktion af temperaturforskellene $T_{varm} - T_a$ og $T_{varm} - T_{kold}$.

Varmetabskoefficient for det store kolde rør



Figur 10. Varmetabskoefficient for lifelinens store kolde rør som funktion af temperaturforskellene $T_{varm} - T_a$ og $T_{varm} - T_{kold}$.

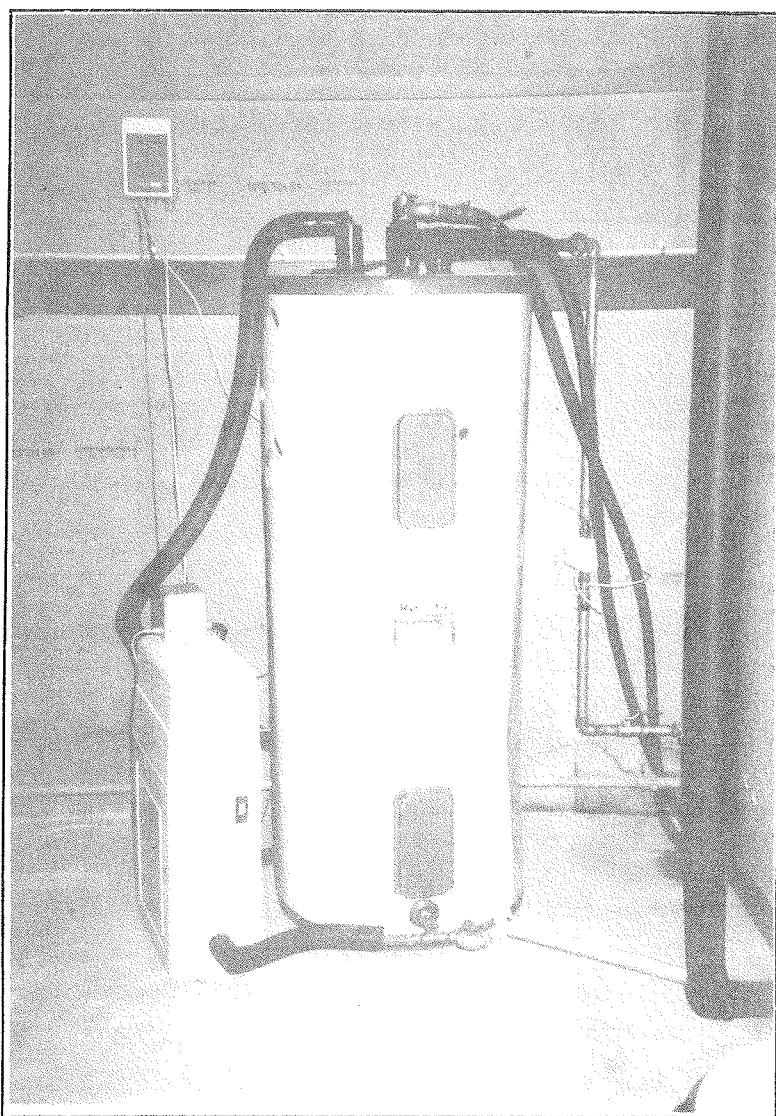
Varmeoverføringsevne mellem det lille varme rør
og det store kolde rør



Figur 11. Varmeoverføringsevnen mellem lifelinens to rør som funktion af temperaturforskellene $T_{varm} - T_a$ og $T_{varm} - T_{kold}$.

2.3 Varmelager

Varmelageret er en 270 l præisoleret standard varmtvandsbeholder i et kabinet. Varmtvandsbeholderen, som er forsynet med en anode, er emaljeret med det patenterede materiale Rheemglas. Beholderen kan klare tryk op til 10,4 bar. Varmen overføres fra lifelinen til varmtvandsbeholderen ved hjælp af en ekstern varmeveksler, som benævnes Solar Boiler Module og som er en del af en varmevekslerkreds. Brugsvand cirkulerer i denne varmevekslerkreds ved selvcirkulation fra bunden af varmtvandsbeholderen gennem varmeveksleren, hvor opvarmningen finder sted, videre tilbage til toppen af varmtvandsbeholderen. Figur 12 viser varmtvandsbeholderen og den eksterne varmeveksler unit, som også indeholder anlæggets styresystem.



Figur 12. Anlæggets varmelager og eksterne varmeveksler.

Varmelageret og varmeveksleruniten blev afprøvet i laboratoriets lagerprøvestand. Fremløbsrøret fra prøvestanden og returørret til prøvestanden var koblet til varmeveksleruniten på samme måde som lifelinen er koblet til varmeveksleruniten i solvarmeanlægget.

Der blev gennemført afprøvninger for at bestemme varmetabet af varmelageret samt varmeoverføringsevnen for varmeveksleren og volumenstrømmen i varmevekslerkredsen ved forskellige driftsforhold. Endvidere blev der gennemført en separat afprøvning for at klarlægge de dynamiske forhold for varmelageret.

Vand blev benyttet som solfangervæske i afprøvningerne. Solfangervæskens fremløbstemperatur til og returtemperatur fra varmeveksleren og brugsvandets fremløbstemperatur til og returtemperatur fra varmeveksleren blev målt. Desuden blev målt lagerets omgivelses temperatur, samt temperaturen i seks forskellige niveauer i varmtvandsbeholderen. Endelig blev solfangervæskens volumenstrøm målt.

Varmetabskoefficienten for varmelageret blev målt således, at solfangervæsken blev pumpet gennem varmeveksleren med en konstant høj fremløbstemperatur. Når forholdene er blevet stabile, er varmelagerets varmetab lig med den varmemængde, som solfangervæsken tilfører varmeveksleren. Resultaterne af varmetabsmålingen fremgår af tabel 9.

Volumenstrøm l/min	Solfangervæskens fremløbstemperatur til varmeveksleren °C	Temperaturforskell for solfangervæsken over varmeveksleren K	Omgivelses temperatur °C	Middel varmtvands beholdertemperatur °C	Varmelagerets varmetab W	Varmelagerets varmetabs koefficient W/K
1,02	75,6	3,38	22,7	71,1	235	4,9

Tabel 9. Volumenstrøm, stabile temperaturer og varmetab for varmelageret målt under varmetabsprøvningen.

Den målte varmetabskoefficient for varmelageret på 4,9 W/K er summen af varmetabskoefficienten for varmtvandsbeholderen, varmeveksleren og for varmevekslerkredsens to rør, som forbinder varmtvandsbeholderen og varmeveksleren.

Baseret på beregninger og skøn er fordelingen af varmetabskoefficienten bestemt som anført i tabel 10.

Del af varmelager	Varmetabskoefficient W/K
Varmtvandsbeholder	3,9
Rør fra varmtvandsbeholder til varmeveksler	0,1
Varmeveksler	0,6
Rør fra varmeveksler til varmtvandsbeholder	0,3
Total	4,9

Tabel 10. Skønnnet fordeling af varmelagerets varmetabskoefficient ved ca. 70°C.

Varmelagerets varmetabskoefficient er større end varmetabskoefficienterne for de fleste af de varmelagre, som markedsføres af de danske solfangerfabrikant. Anlæggets ydelse kan forøges ved at reducere varmelagerets varmetabskoefficient. Den store varmetabskoefficient er først og fremmest resultatet af varmevekslerkredsen og af kuldebroerne forårsaget af de tre rørtillslutninger i toppen af varmtvandsbeholderen.

Varmevekslerens varmeoverføringsevne og volumenstrømmen i varmevekslerkredsen blev bestemt for forskellige driftsforhold. Volumenstrømmen i varmevekslerkredsen bestemmes ved at opstille energibalancen for varmeveksleren. Der blev gennemført tre opvarmningsforsøg med forskellige konstante fremløbstemperaturer for solfangervæsken til varmeveksleren. Afprøvningsbetingelserne, de målte temperaturer, volumenstrømmen i varmevekslerkredsen og varmevekslerens varmeoverføringsevne er vist på figur 13-15 for de tre opvarmningsforsøg.

Både volumenstrømmen i varmevekslerkredsen og varmevekslerens varmeoverføringsevne påvirkes stærkt af driftsbetingelserne. Jo større effektilførslen til varmelageret er, des større bliver volumenstrømmen og varmeoverføringsevnen.

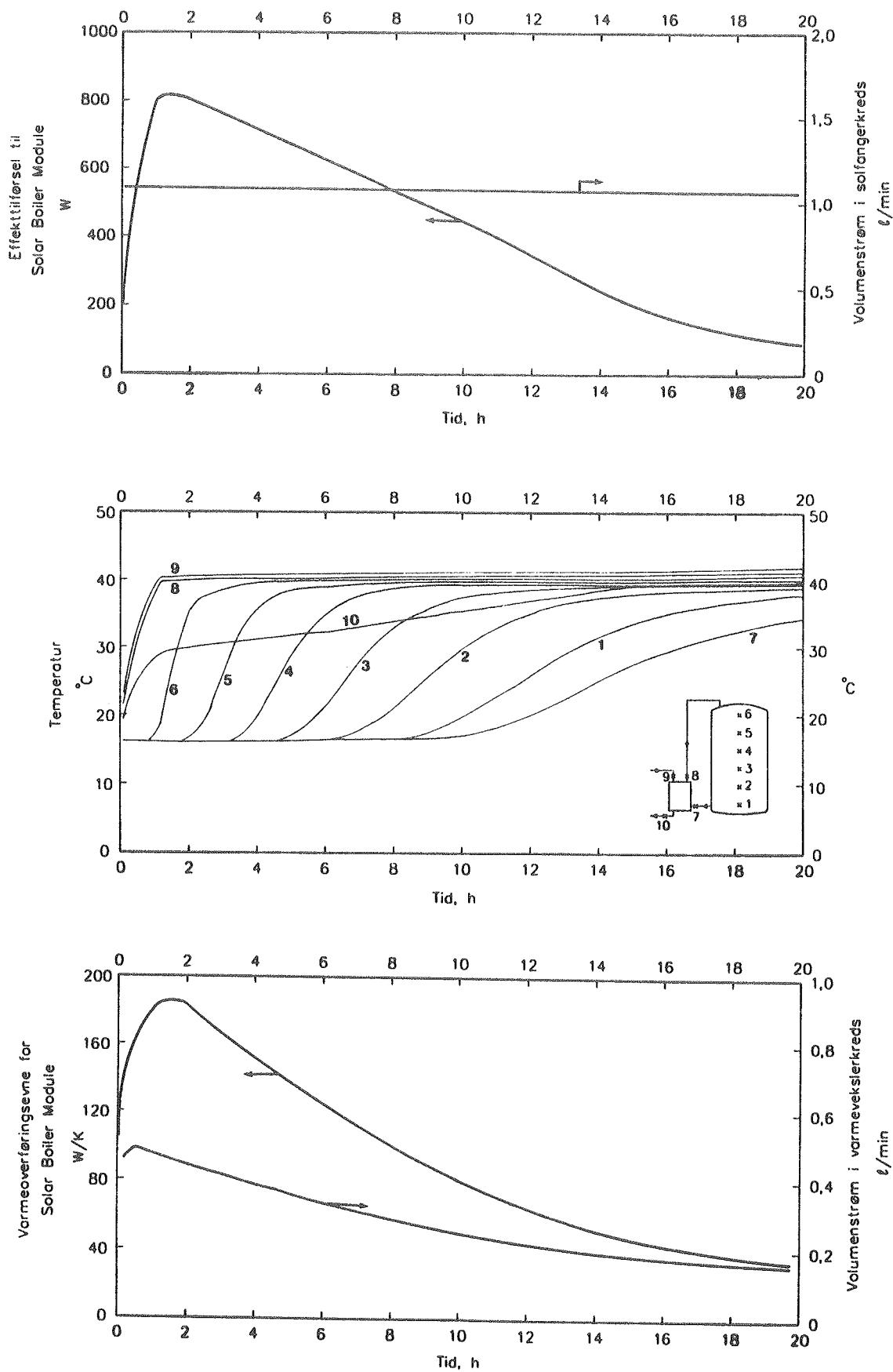
Navnlig i perioder med små effektilførsler til varmelageret er varmevekslerens varmeoverføringsevne kritisk lille for et solvarmeanlæg med et solfangerareal på 5,56 m². Den lille varmeoverføringsevne resulterer i for høje fremløbstemperaturer til solfangeren. Solvarmeanlæggets ydelse vil forøges hvis varmevekslerens varmeoverføringsevne gøres større.

De dynamiske forhold for varmelageret blev undersøgt i en forsøgsperiode med varierende fremløbstemperatur til varmeveksleren, se figur 16. Figuren viser forsøgsbetingelserne, de målte temperaturer, volumenstrømmen i varmevekslerkredsen og varmevekslerens varmeoverføringsevne igennem forsøgsperioden. Der blev tappet 40 l varmt vand fra lageret efter 4 h 35 minutter.

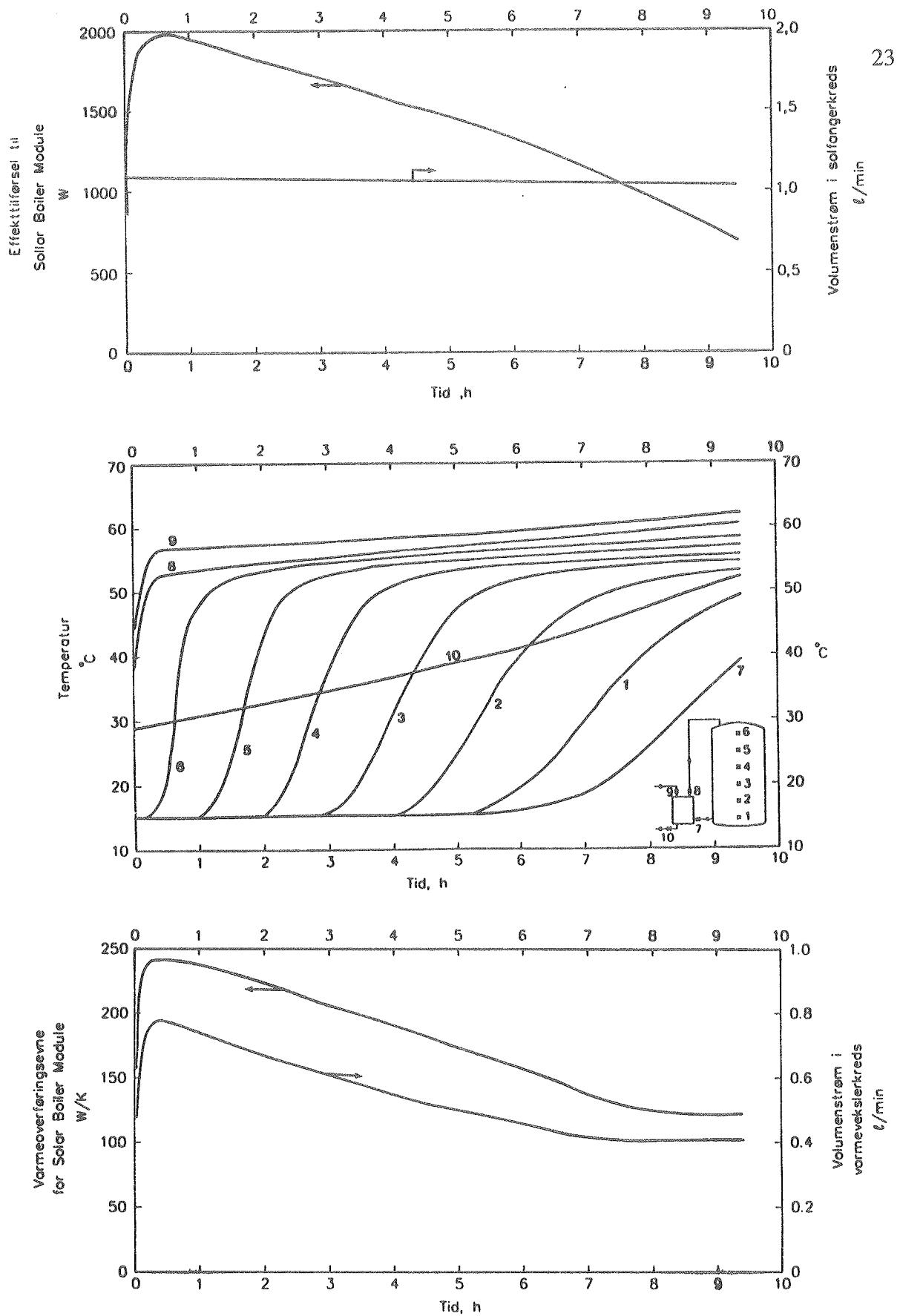
Volumenstrømmen i varmevekslerkredsen og varmevekslerens varmeoverføringsevne afhænger stærkt af driftsbetingelserne. Også i dette forsøg er varmevekslerens varmeoverføringsevne kritisk lille. Desuden ødelægges den fordelagtige temperaturlagdeling i varmtvandsbeholderen noget i perioder, hvor fremløbstemperaturen til varmeveksleren er lavere end temperaturen i toppen af varmtvandsbeholderen, idet relativt koldt vand fra varmevekslerkredsen i disse perioder tilføres toppen af tanken. Altså ødelægges lagerets fordelagtige temperaturlagdeling typisk om eftermiddagen og i perioder med skyer.

Endelig blev der gennemført et afkølingsforløb uden at solfangervæsken cirkuleres gennem varmeveksleren. Figur 17 viser de målte temperaturer. Varmevekslekredsen er forsynet med en ventil, som blev lukket 2 h 35 minutter efter forsøgets start. Af de målte temperaturer i varmevekslerkredsen fremgår det, at brugsvandet selvcirkulerer baglæns i varmevekslerkredsen så længe ventilen ikke er lukket. Varmetabet fra varmelageret er derfor meget stort i perioder uden solfangerdrift. Problemet kan løses ved i varmevekslerkredsen at anvende en kontraventil, som er specielt velegnet til selvcirkulerende kredse.

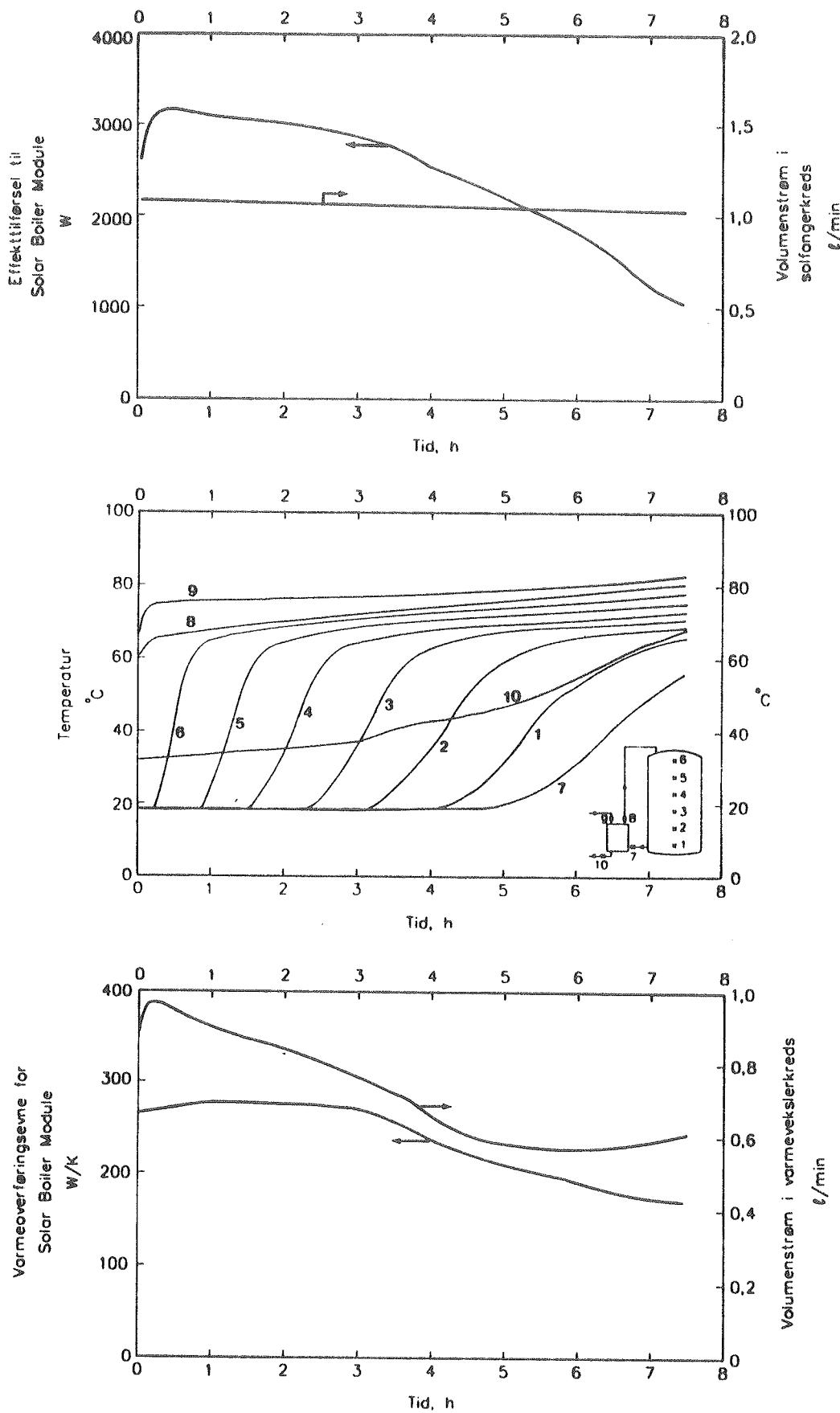
På basis af varmelageprøvningen kan det konkluderes, at varmevekslerens varmeoverførings-
evne er lidt for lille, at varmelagerets varmetabskoefficient er lidt for stor og at der er
baglæns cirkulation i varmevekslerkredsen i perioder uden solfangerdrift.



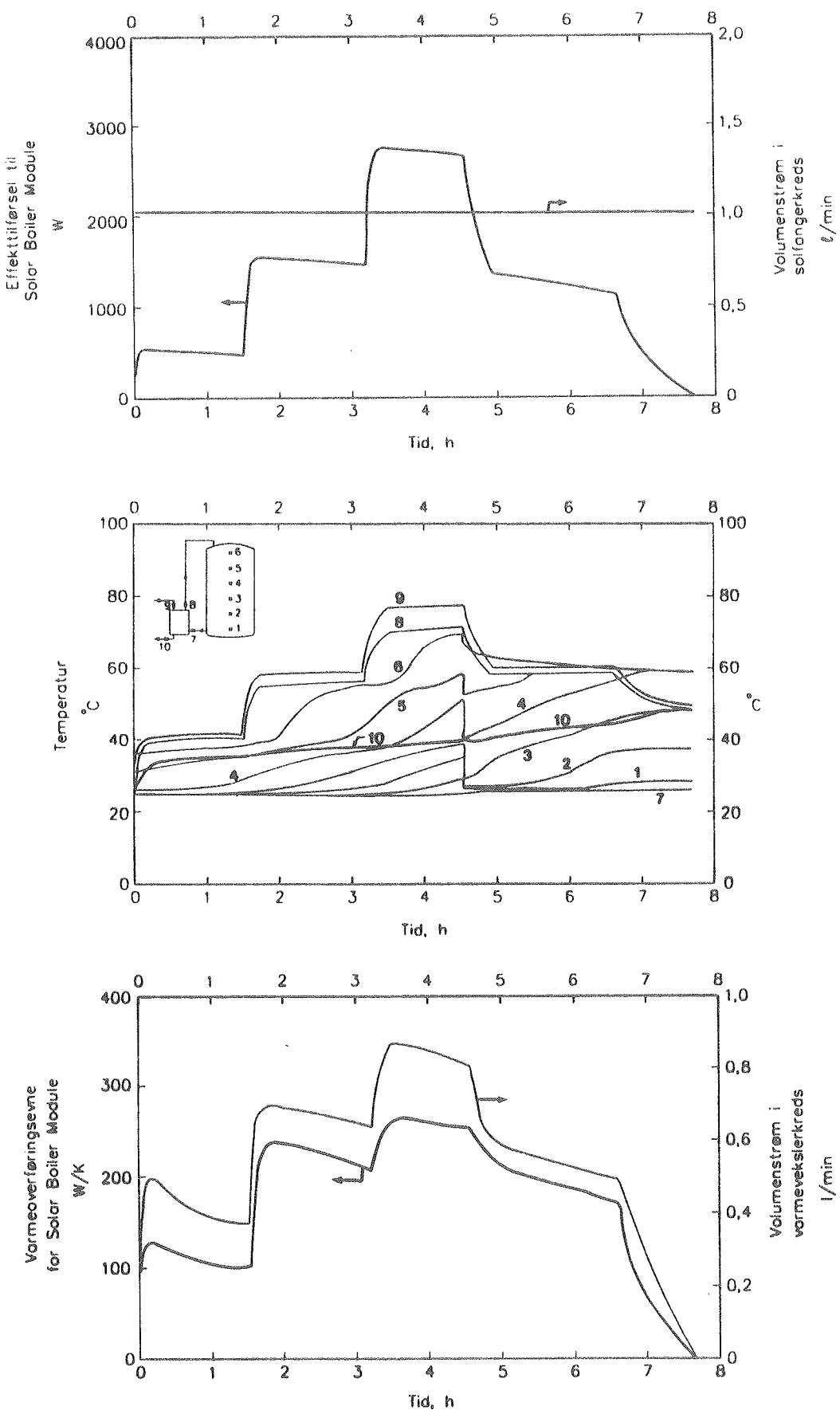
Figur 13. Forsøgbetingelser, målte temperaturer og varmeverkslerens målte varmeoverføringsvegne for et opvarmningsforløb med en fremløbstemperatur for solfangervæsken på ca. 40°C .



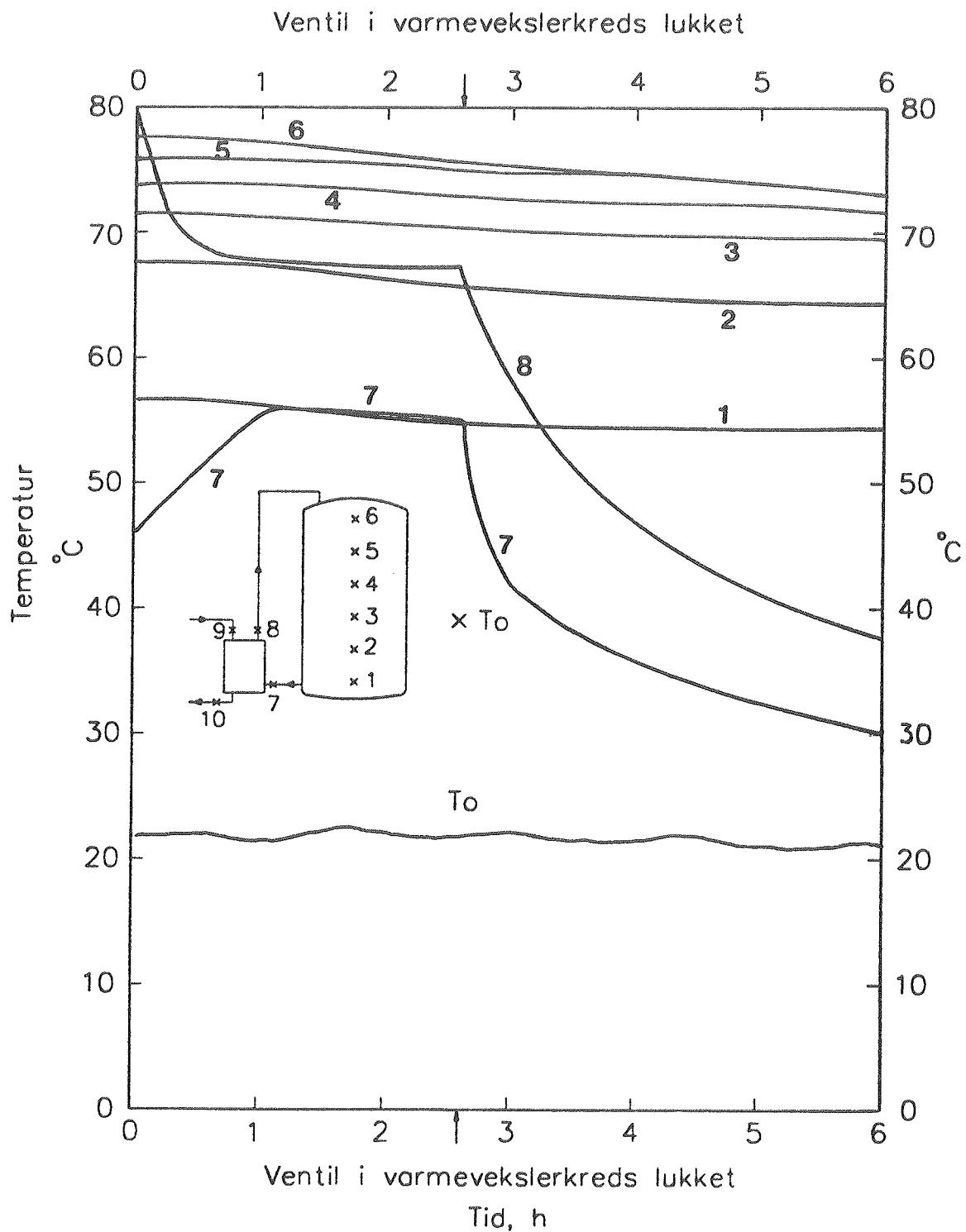
Figur 14. Forsøgsbetingelser, målte temperaturer og varmevekslerens målte varmeoverføringsevne for et opvarmningsforløb med en fremløbstemperatur for solfangervæsken på ca. 60°C .



Figur 15. Forsøgsbetingelser, målte temperaturer og varmevekslerens målte varmeoverføringsevne for et opvarmningsforløb med en fremløbstemperatur for solfangervæsken på ca. 80°C.



Figur 16. Forsøgsbetingelser, målte temperaturer og varmevekslerens målte varmeoverføringsevne for en forsøgsperiode med varierende fremløbstemperatur for solfangervæsken.



Figur 17. Målte temperaturer under et afkølingsforløb uden varmetilførsel til lageret.

3. AFPRØVNING AF ANLÆG

3.1 Beskrivelse af anlægget.

Solvarmeanlægget fra Thermo Dynamics Ltd og solvarmeanlægget fra det hollandske firma ZEN B.V. [7] blev opført og afprøvet i laboratoriets prøvestand for solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning [8]. I forvejen var der installeret 5 markedsførte danske solvarmeanlæg i prøvestanden. Derfor blev de to udenlandske solvarmeanlæg afprøvet under de samme realistiske forhold som de 5 danske anlæg blev afprøvet under.

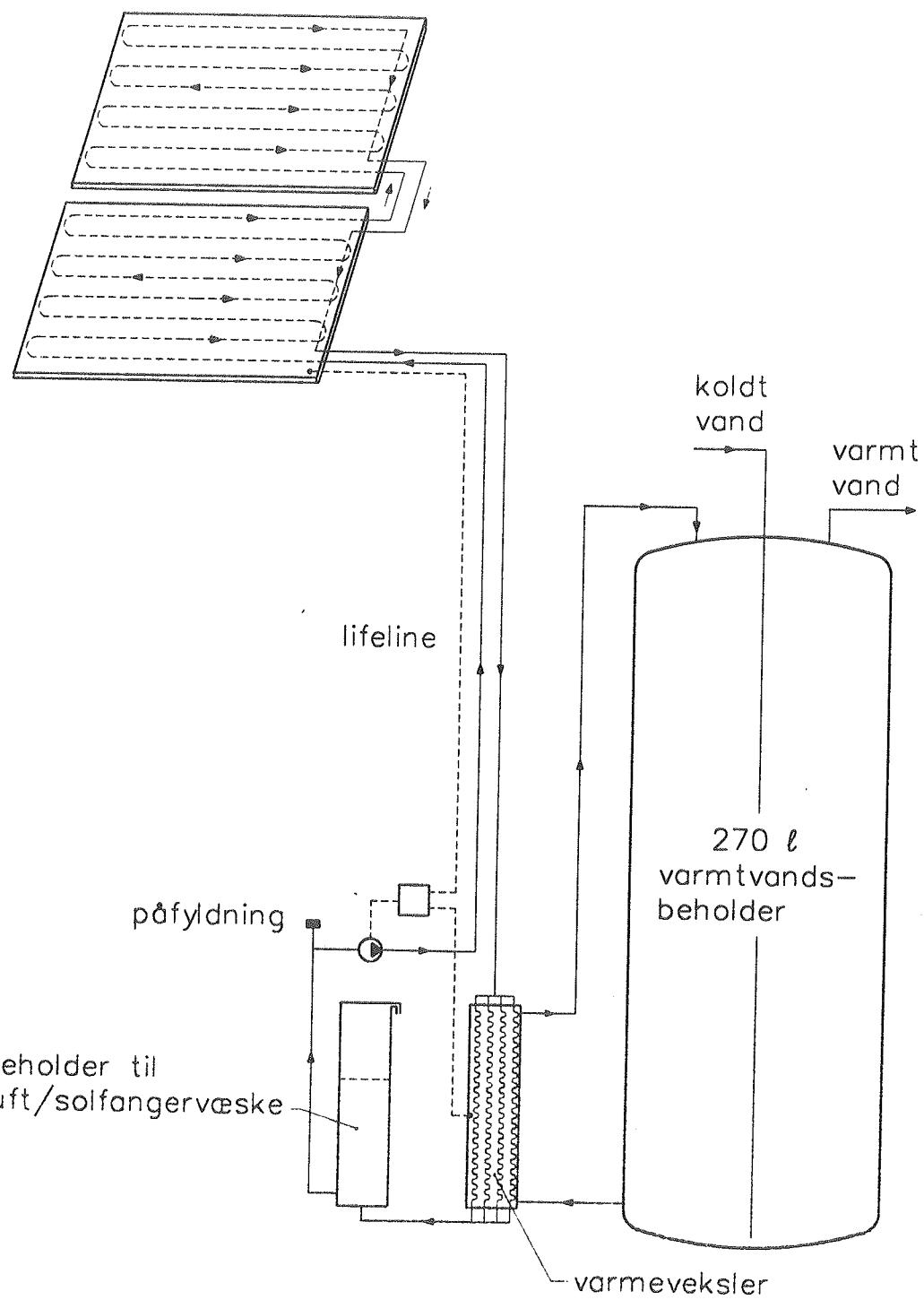
Begge de udenlandske anlægs solfangere blev placeret på et nyt stativ på forsøgsbygningens tag. Stativet, som vender 10° fra syd, har en hældning på 45° . Prøvestandens separate solfangerstav, som er placeret foran forsøgsbygningen, vender mod syd og har en hældning på 45° . Det vurderes, at det ingen nævneværdig betydning har for solvarmeanlæggernes ydelse, om solfangene, som det er tilfældet for de danske solfangere, er placeret på prøvestandens separate solfangerstav eller om de er placeret på det nye stativ på forsøgsbygningens tag, som det er tilfældet for de udenlandske solfangere.

Anlægget fra Thermo Dynamics Ltd består af to solfangerelementer med et totalt solfangerareal på $5,56 \text{ m}^2$, af det afprøvede varmelager med et vandvolumen på 270 l, af den afprøvede Solar Boiler Module, som foruden varmeveksleren indeholder et styresystem, en beholder til solfangervæsken og en cirkulationspumpe for solfangervæsken, og af 9 m af den afprøvede lifeline som solfangerkreds. Af de 9 m er 8 m beliggende indendørs og 1 m beliggende udendørs.

Figur 18 viser en principskitse af det afprøvede solvarmeanlæg. Som solfangervæske benyttes en 40% (vægt) propylenglycol/vand blanding. Hele anlægget indeholder 3,75 l solfangervæske, som ved leveringen er placeret i den omtalte beholder i Solar Boiler Module. Solfangerkredsen, som er åben, indeholder foruden solfangervæsken også luft. I perioder med solfangerdrift bør luften være placeret i beholderen i Solar Boiler Module. I perioder uden solfangerdrift bør solfangene og en del af lifelinien fyldes med luft og en stor del af solfangervæsken bør opholde sig i beholderen i Solar Boiler Module. På trods af at der tilsyneladende er tale om et tømmesystem, benyttes ikke vand som solfangervæske. Thermo Dynamics Ltd oplyser, at årsagen hertil er, at lifelinien ikke i alle anlæg kan installeres med tilstrækkelig hældning, således at solfangene ikke altid kan tømmes for solfangervæske i perioder uden solfangerdrift.

Højdeforskellen mellem forsøgsbygningens gulv, hvorpå varmtvandsbeholderen og Solar Boiler Module står, og toppen af det øverste solfangerelement er ca. 6 m.

Cirkulationspumpen er en højtrykspumpe med en separat motor. Typen er en såkaldt lamelpumpe, som er en roterende fortrængningspumpe med rotoren ekscentrisk anbragt i det cylindriske hus. Pumpens maksimale volumenstrøm i en rørkreds uden tryktab er ca. 1,5 l/min og pumpen sørger for cirkulation i rørkredsen sålænge tryktabet ikke overstiger ca. 55 mVS.

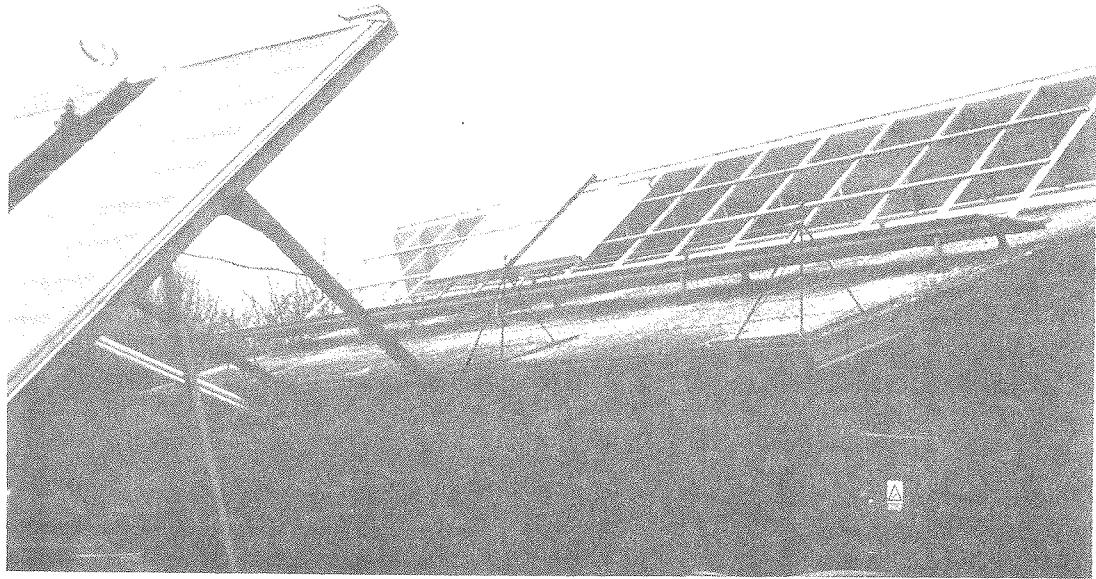


Figur 18. Principskitse af det afprøvede solvarmeanlæg.

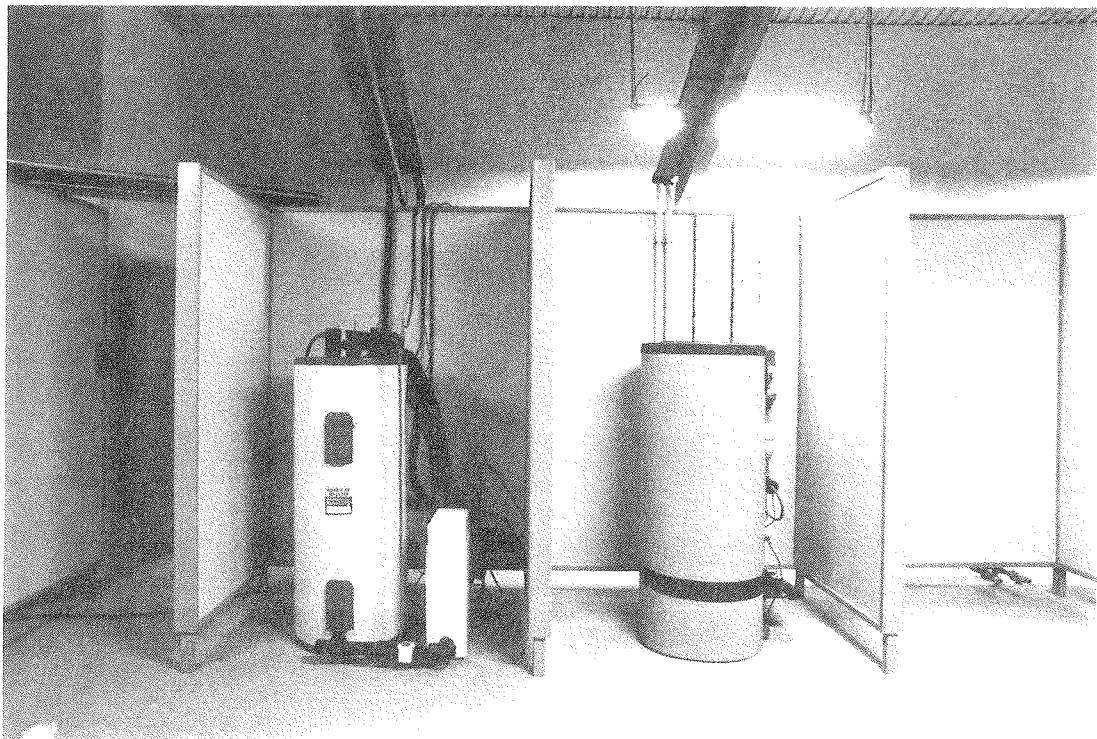
Pumpens effektforbrug, som er målt igennem længere perioder, er beliggende i intervallet fra 50 W til 60 W. Ved lave solfangertemperaturer, typisk om morgen, er effektforbruget størst. Ved høje solfangertemperaturer, typisk midt om dagen og om eftermiddagen, er effektforbruget mindst.

Styresystemet er et differenstermostatstyresystem med temperaturfølere nederst i det nederste solfangerelement umiddelbart ved lifelinens tilslutning og i varmeveksleren. Starttemperatur-differensen og stoptemperaturdifferensen kan indstilles enten til $18^{\circ}\text{F}/5^{\circ}\text{F}$ svarende til $10\text{ K}/2,78\text{ K}$ eller til $9^{\circ}\text{F}/4^{\circ}\text{F}$ svarende til $5\text{ K}/2,22\text{ K}$. Begge indstillinger blev benyttet igennem måleperioden. Desuden kan styresystemet stoppe pumpen hvis temperaturen i varmeveksleren eller solfangeren bliver for høj. Disse muligheder blev dog ikke benyttet i det afprøvede anlæg.

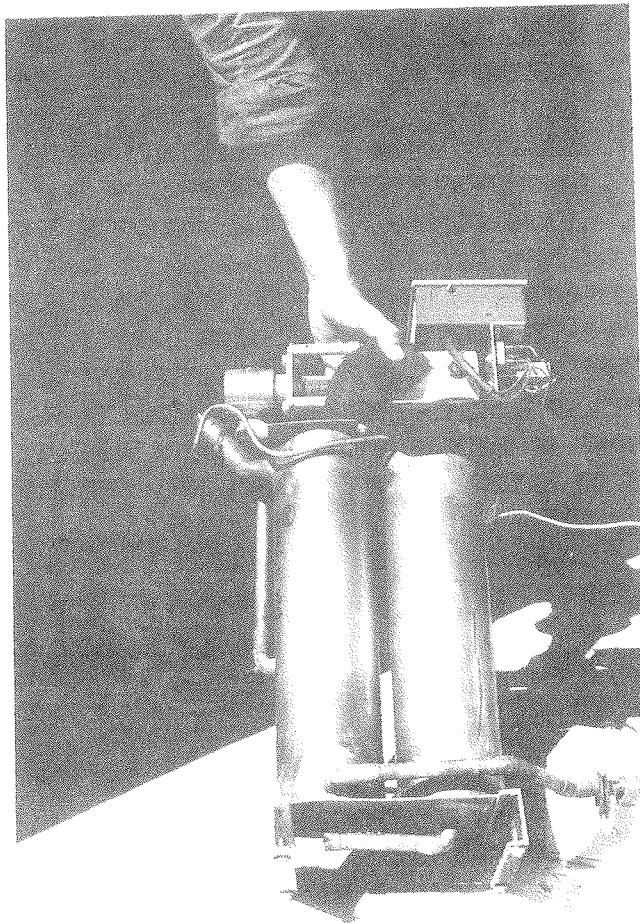
Figur 19, 20, 21 og 22 viser fotos af anlæggets solfangere, varmelager, af indholdet af Solar Boiler Module og af anlæggets pumpe og styresystem.



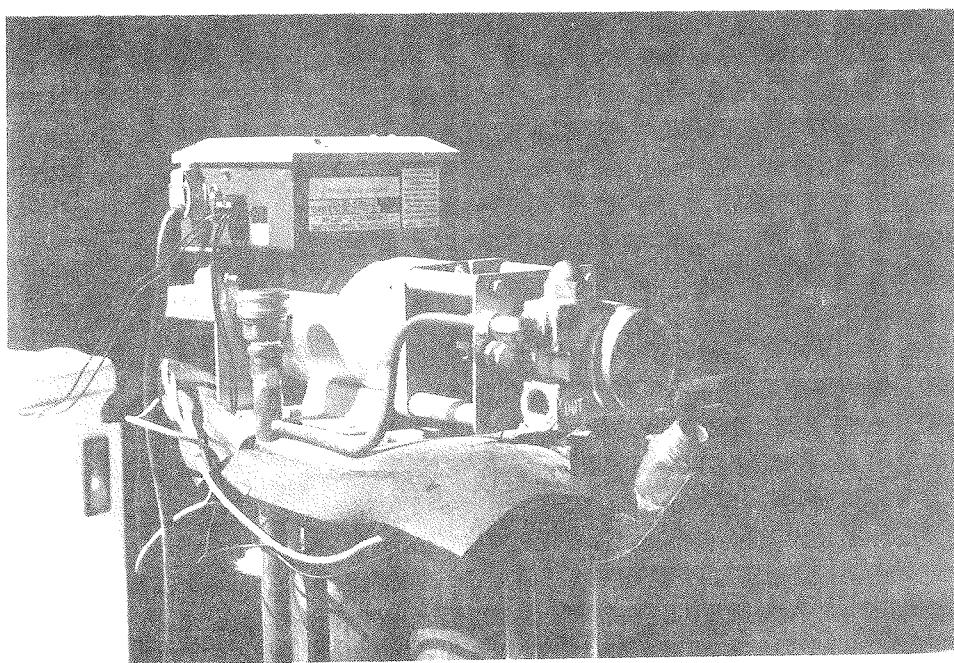
Figur 19. Det afprøvede solvarmeanlægs solfangerelementer (til venstre) på det nye solfangerstativ.



Figur 20. Solvarmeanlæggets varmelager og varmeveksler (til venstre). Til højre ses varmelageret fra det hollandske firma ZEN B.V.



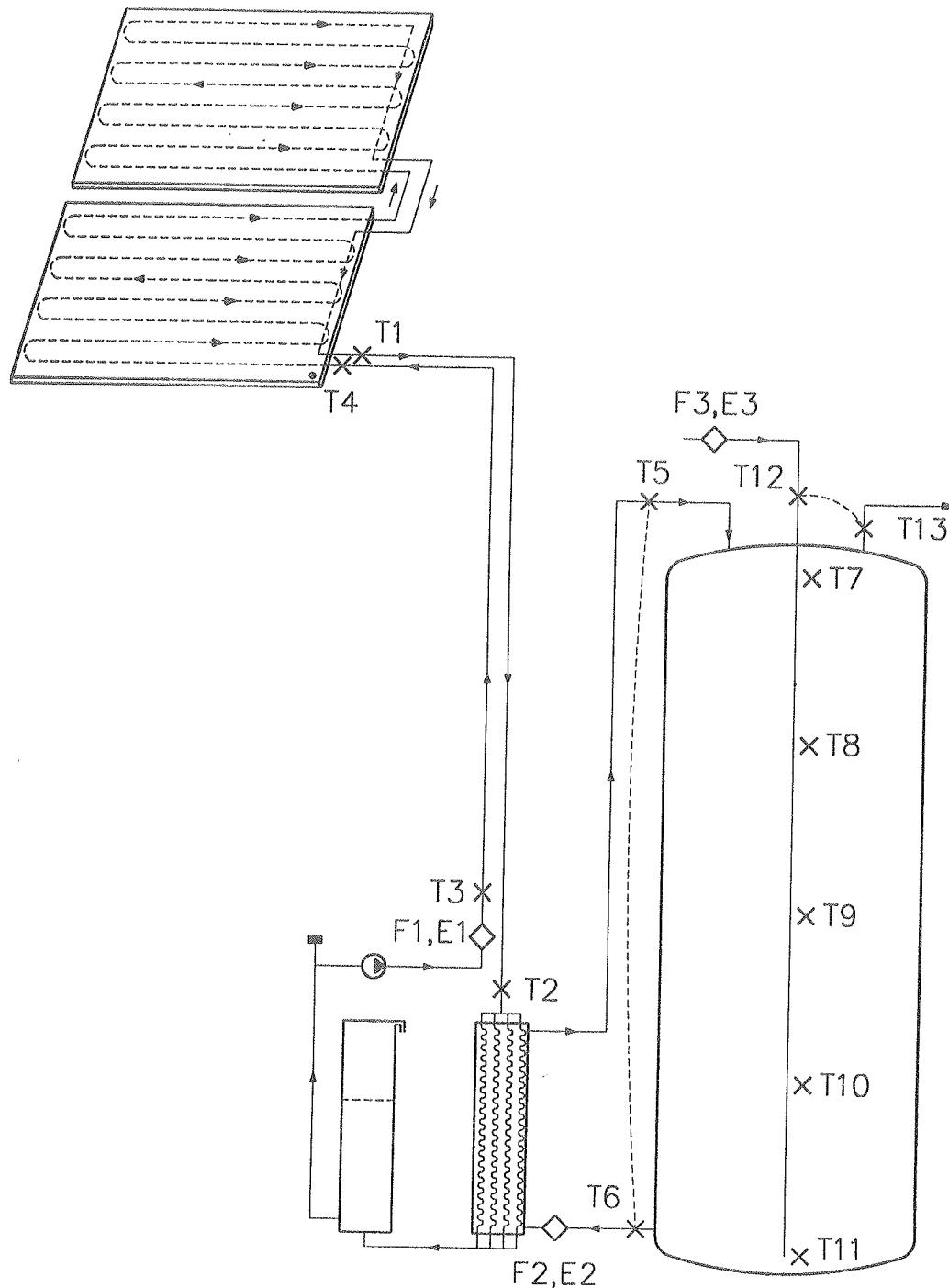
Figur 21. Varmeveksler (til venstre), beholder til luft/solfangervæske (til højre) samt pumpe og styresystem.



Figur 22. Pumpe og styresystemets kontrolboks.

3.2 Målesystem og afprøvningsbetingelser.

Målesystemet og måleprocedurerne, som blev benyttet ved afprøvningen af anlægget, er beskrevet i [8]. På figur 23 er vist hvilke temperaturer, volumenstrømme og energimængder, der måles i anlægget. Varmelagerets temperaturmålepunkter er placeret som vist på figuren.



Figur 23. Målte temperaturer, flow og energimængder.

Temperaturerne måles med termoelementer af kobber-konstantan type TT. Varmelagerets termoelementer er placeret i en glasstav i varmtvandsbeholderen.

Flowene i solfangerkredsen, i varmevekslingskredsen og i tappekredsen måles ved hjælp af Clorius Combimeter 1,5 EPD energi- og flowmålere. Forskellene mellem solfangervæskens fremløbstemperatur til og returtemperatur fra Solar Boiler Module, mellem det kolde og varme vand i varmevekslingskredsen og mellem koldtvandstemperaturen og temperaturen af det tappede varme vand fra varmtvandsbeholderen måles ved hjælp af kobber/konstantan termosøjler med 5 elementer for at opnå en god målenøjagtighed. Energimængderne, som overføres fra solfangervæsken til Solar Boiler Module, som ved selvcirkulation i varmevekslingskredsen overføres fra Solar Boiler Module til varmtvandsbeholderen og som tappes fra varmtvandsbeholderen, bestemmes ud fra de målte flow og temperaturforskelle samt ud fra solfangervæskens og vandets varmefylde og massefylde.

Vejrdata måles som angivet i [8], som også indeholder en beskrivelse af målenøjagtigheden og af kontrollen af målesystemet.

Under afprøvningerne blev der tappet varmt vand fra anlægget 4 gange dagligt, kl. 7⁰⁰, kl. 12⁰⁰, kl. 17⁰⁰ og kl. 19⁰⁰.

Anlæggets varmelager er en forvarmebeholder, som udelukkende opvarmes af solfangerne. Eftervarmningen antages at foregå i en eksisterende varmtvandsbeholder. Hvis temperaturen af det tappede vand er mindre end 45°C tappes der 50 l vand ved den enkelte tapning. Hvis temperaturen af det tappede vand er højere end 45°C tappes der en energimængde på 2 kWh ved den enkelte tapning.

3.3 Målte og beregnede ydelser samt driftserfaringer.

Der foreligger målinger på anlægget fra 23. december 1993 til 20. maj 1994.

I samme periode er der blevet målt på et anlæg fra det hollandske firma ZEN B.V. Det hollandske anlæg er beskrevet i [7]. Det har en solfanger på 2,7 m² og et to-delt lager på i alt 225 liter. Anlægget er ikke et low flow anlæg, men har tømning af solfangerkredsen. Anlægget har i modsætning til anlægget fra Thermo Dynamics Ltd kørt med el-back up i hele perioden, således at det supplerende varmelagervolumen er holdt på 50 °C.

Tabel 11 angiver målte energistrømme for det canadiske og hollandske anlæg.

Bruttoydelsen er energimængden overført fra solfangeren, medens nettoydelsen er den udnyttede solvarme, d.v.s brugsvandsforbruget - tilskudsenergi. Da anlægget fra ZEN B.V. har kørt med el-back-up, medens dette ikke har været tilfældet med anlægget fra Thermo Dynamics Ltd er der forskel på de tappede vandmængder fra anlæggene.

Til simulering af anlægssydelsen er der opbygget en beregningsmodel med solvarmesimuleringsprogrammet EMGP3. EMGP3 [9] er et modulært opbygget solvarmesimuleringsprogram, hvor anlægskonfigurationen af brugeren opbygges ved hjælp af moduler, som simulerer anlæggets enkeltdeler.

Antal dage med måling	Thermo Dynamics Ltd.			ZEN B.V.		
	Tappet vand- mængde	Brutto- ydelse	Netto- ydelse	Tappet vand- mængde	Brutto- ydelse	Netto- ydelse
	liter	kWh	kWh	liter	kWh	kWh
jan 31	5899		31	4626	18	-3
feb 28	5829		46	4482	30	12
mar 31	6008		119	4718	84	64
apr 30	4902	179	167	4150	123	99
maj 20	2847	170	133	2954	119	98

Tabel 11. Målte ydelser af canadisk og hollandsk anlæg

Figur 24 viser hvorledes EDB-modellen er opbygget til simulering af anlægget. De enkelte del-elementer i modellen er specificeret med de fysiske parametre, som er bestemt ved komponentafprøvningen som beskrevet tidligere i rapporten.

I modellen er indsats solfangerens effektivitetsligning korrigert for et væskeflow på ca 0,30 l/min m² og korrigert til en gennemsnitlig vindhastighed på 2 m/s. Solfangerens effektivitetsligning bliver herved:

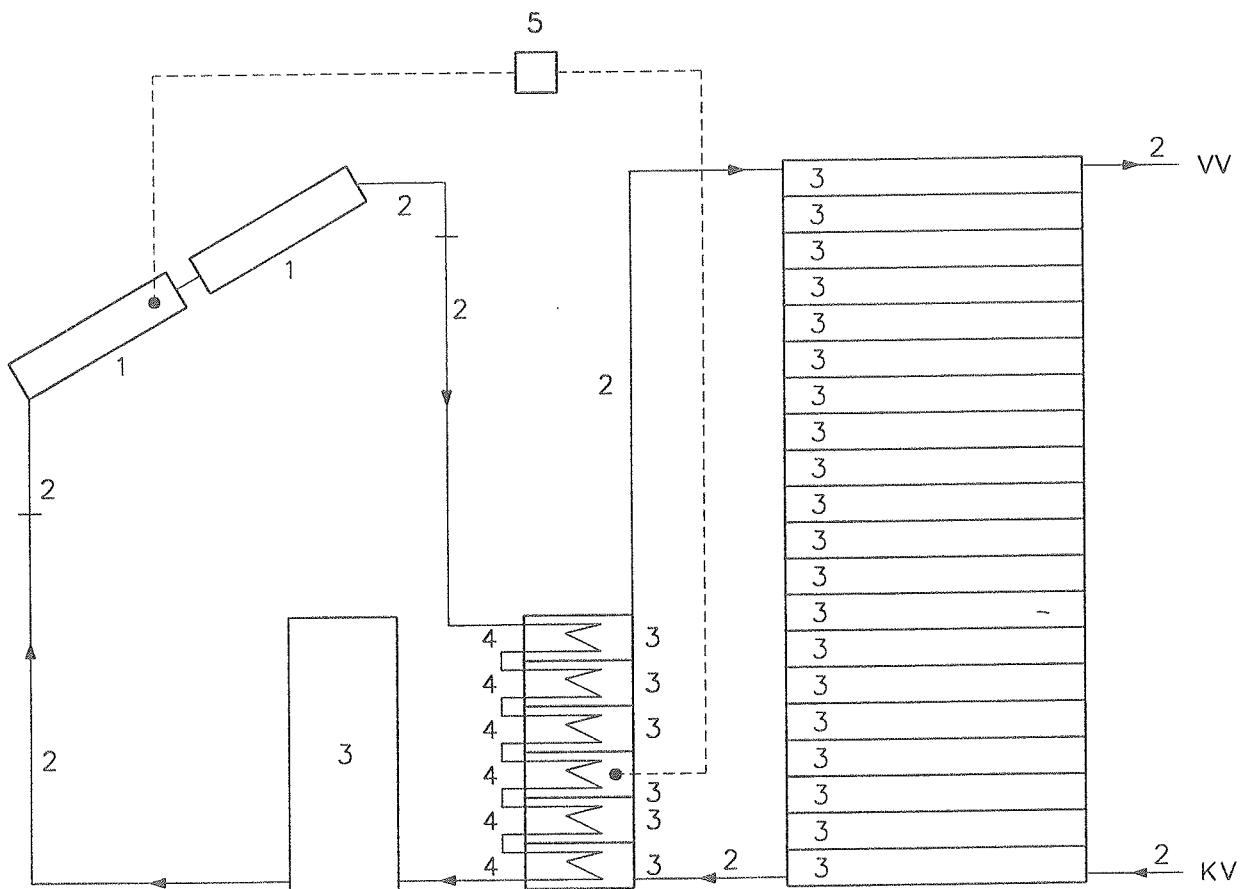
$$\eta = 0,698 - 4,34 \times (T_m - T_a)/G - 0,014 \times (T_m - T_a)^2/G$$

Selvom EMGP3 er fleksibel med hensyn til at opbygge en model af anlægget, som er nær de fysiske forhold, er der begrænsninger i forhold til det modellerede canadiske anlæg.

- I rørkredse regnes med et konstant flow.

D.v.s. det selvcirkulerende flow i sekundærkredsen kan ikke modelleres. Der regnes i stedet med, at der overføres varme fra varmeveksleren med et konstant flow, når det øverste af denne er varmere end det øverste af varmtvandsbeholderen. Som konstant flow er benyttet 50 l/h. Beregninger viste, at de beregnede anlægstemperaturer stemmer rimeligt overens med målte temperaturer, når anlægget simuleres på denne måde. I praksis har flowet varieret mellem 0 og 6 liter pr. 10 min.

I praksis har der endvidere været selvcirkulation af væsken i sekundærkredsen i perioder, hvor solfangerkredsen ikke har kørt. Denne selvcirkulation er ikke simulert, idet energioverførslen ved selvcirkulationen har været ubetydelig i måleperioden.



1. SOLFANGER ELEMENTER
2. RØR ELEMENTER
3. LAGER ELEMENTER
4. VARMEVEKSLER ELEMENTER
5. SOLFANGER STYRING

Figur 24. Anlægsopbygning taget i beregning med EMGP3-programmet.

I solfangerkredsen er ligeledes regnet med et konstant flow på 50 l/h. Flowet her er styret af en differenstermostat med samme start og stopdifferenser, som den aktuelt benyttede. I praksis har flowet i solfangerkredsen ligget mellem ca 4 og ca 18 liter pr 10 min, idet flowet indenfor 10 minutters perioden har været startet og stoppet.

- Det er ikke muligt at simulere påfyldning og tømning af rørrene i solfangerkredsen.

Det vurderes dog ikke, at dette forhold har nævneværdig indflydelse på de simulerede ydelser.

- Varmeoverføringsevnen i varmeveksleren regnes konstant, og det er således ikke muligt at simulere den varierende varmeoverføringsevne, således som den f.eks. er angivet på figur 16. I simuleringerne er anvendt en konstant værdi på 480 W/K. Denne værdi er højere end den målte, men er den værdi der tilpasser beregningerne bedst til målingerne af anlægget i drift.
- Modellen lider af "numerisk diffusion" ved simulering af temperaturlagdelingen i solvarmebeholderen og i varmeveksleren. Temperaturlagdelingen simuleres ved at opbygge beholderen af en række beholderlag, som udveksler varme hver gang der påtrykkes et flow på beholderen. I praksis vil der være tale om et temperaturskillelag, som bevæger sig op eller ned i beholderen. Simuleringerne vil derfor have tendens til at udjævne temperaturforskellene i beholderen, hvilket især ved low flow anlæg kan give anledning til simulerede ydelser, der er mindre end de målte.

For sammenligning af målte og beregnede ydelser er modellen opbygget således, at den regner på målte 10 minutters værdier af solindfald i solfangerplanet, samt på målte værdier for ude- og indetemperatur. Endvidere er benyttet de målte værdier for tappet vandmængde samt brugsvandets indløbstemperatur.

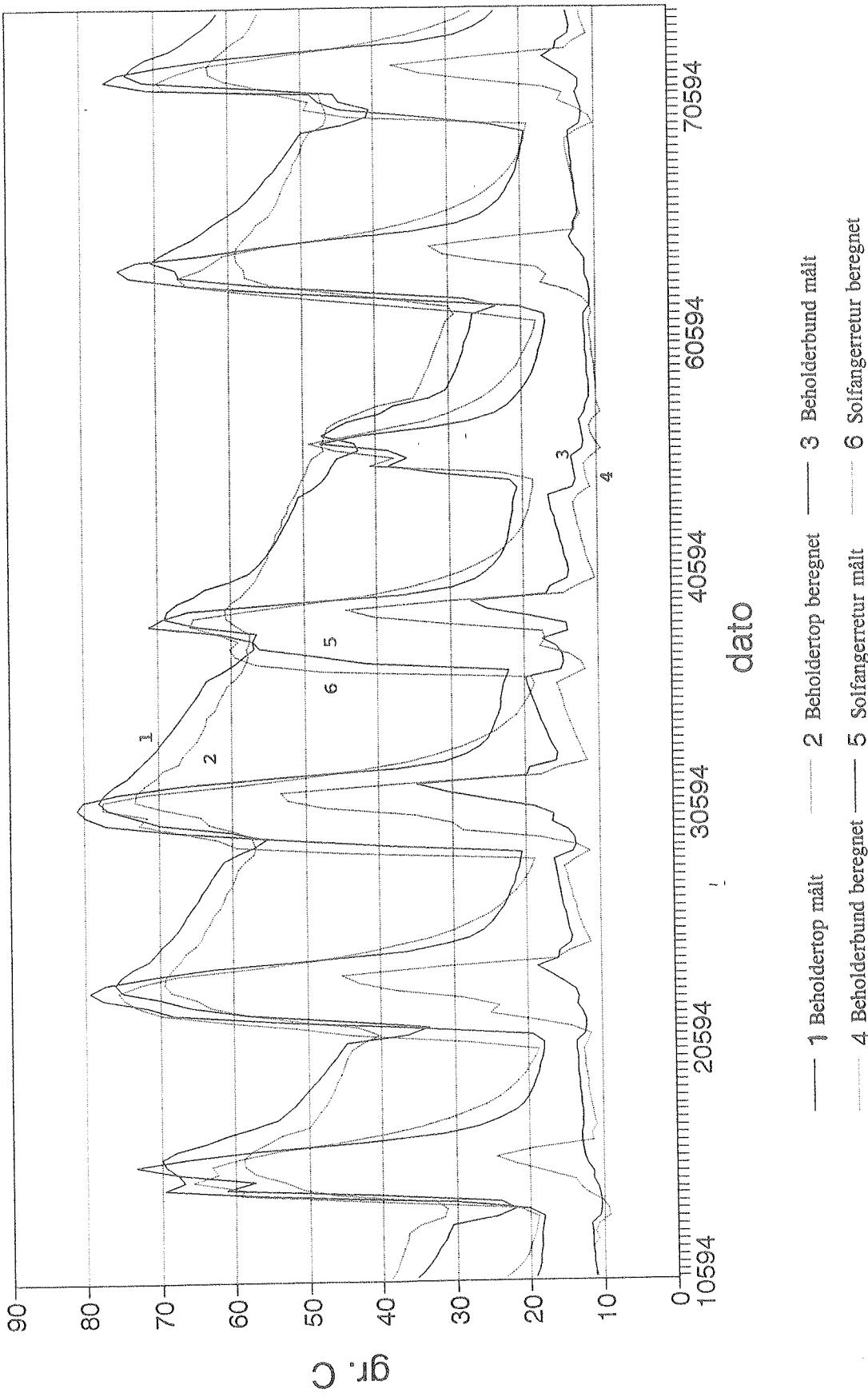
De beregnede ydelser og temperaturer er blevet sammenlignet i en måleperiode fra 12. april 1994 til 17. maj 1994.

På figur 25 og 26 er vist simulerede og beregnede temperaturer og energimængder. I betragtning af måleusikkerheder på op til 5 % og beregningsusikkerheder der varierer efter, hvor præcist man har kunnet beskrive anlægsopbygningen, vurderes der at være rimelig god overenstemmelse mellem målinger og beregninger.

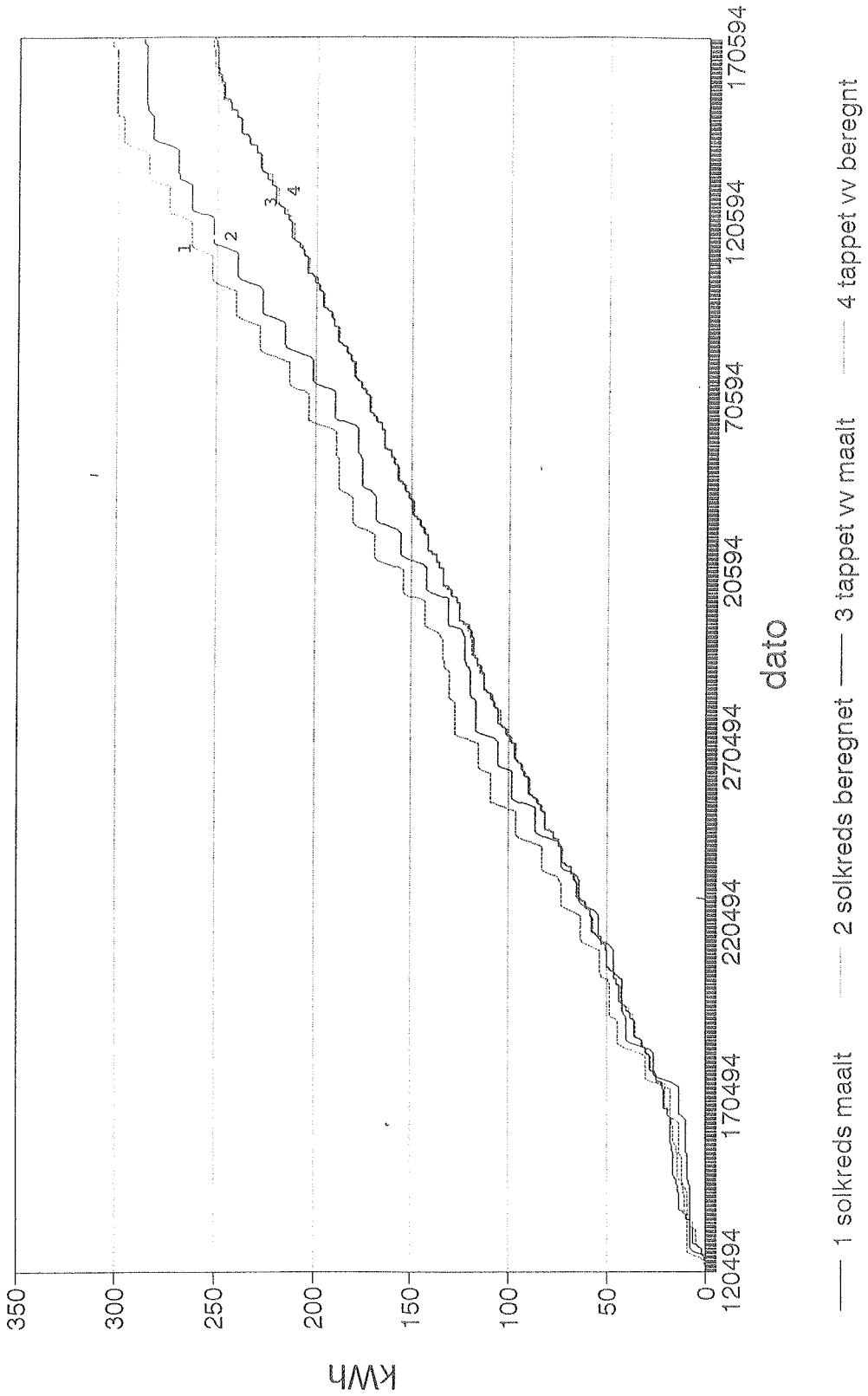
I tabel 12 er angivet målte og beregnede energimængder.

	Målt kWh	Beregnet kWh	Forskel kWh	%
Tappet varmt vand	252	252	0	0
Solenergi i solfanger-kreds	288	303	-15	-5,0
Tilført supplerende energi	0	0		
Udnyttet solenergi	252	252	0	0
Varmtab fra tank og veksler	36	51	-15	-29,4

Tabel 12. Målte og beregnede energistrømme (12. april til 17. maj 1994).



Figur 25. Beregnede og målte temperaturer.



Figur 26. Beregne og målte energimængder.

Den udnyttede solenergi er den tappede energi til varmt vand - supplerende energi, som i dette tilfælde har været 0 da der ikke har været back-up.

Varmebetab fra tank og veksler er energien tilført fra solfangerkredsen - udnyttet solenergi.

Det ses, at de beregnede energimængder i måleperioden stemmer rimeligt godt overens med de målte energimængder. Afvigelserne vurderes at ligge indenfor måle- og beregningsusikkerheden.

I forbindelse med afprøvningen blev der konstateret en række driftsproblemer, som kort omtales i det følgende.

Cirkulationspumpen styres på en uhensigtsmæssig måde, idet pumpen ofte stopper i perioder, hvor solfangerydelsen kunne have været forholdsvis stor. Uanset hvilken af styresystemets indstillinger af start- og stoptemperaturdifferensen, der benyttes, vil pumpen starte og stoppe utallige gange i løbet af en dag. Derved reduceres solfangernes varmeproduktion naturligvis. Problemet er mest udtalt, når start-/stoptemperaturdifferensen $18^{\circ}\text{F}/5^{\circ}\text{F}$ svarende til $10\text{ K}/2,78\text{ K}$ benyttes, men problemet er også stort, når start-/stoptemperaturdifferensen $9^{\circ}\text{F}/4^{\circ}\text{F}$ svarende til $5\text{ K}/2,22\text{ K}$ benyttes.

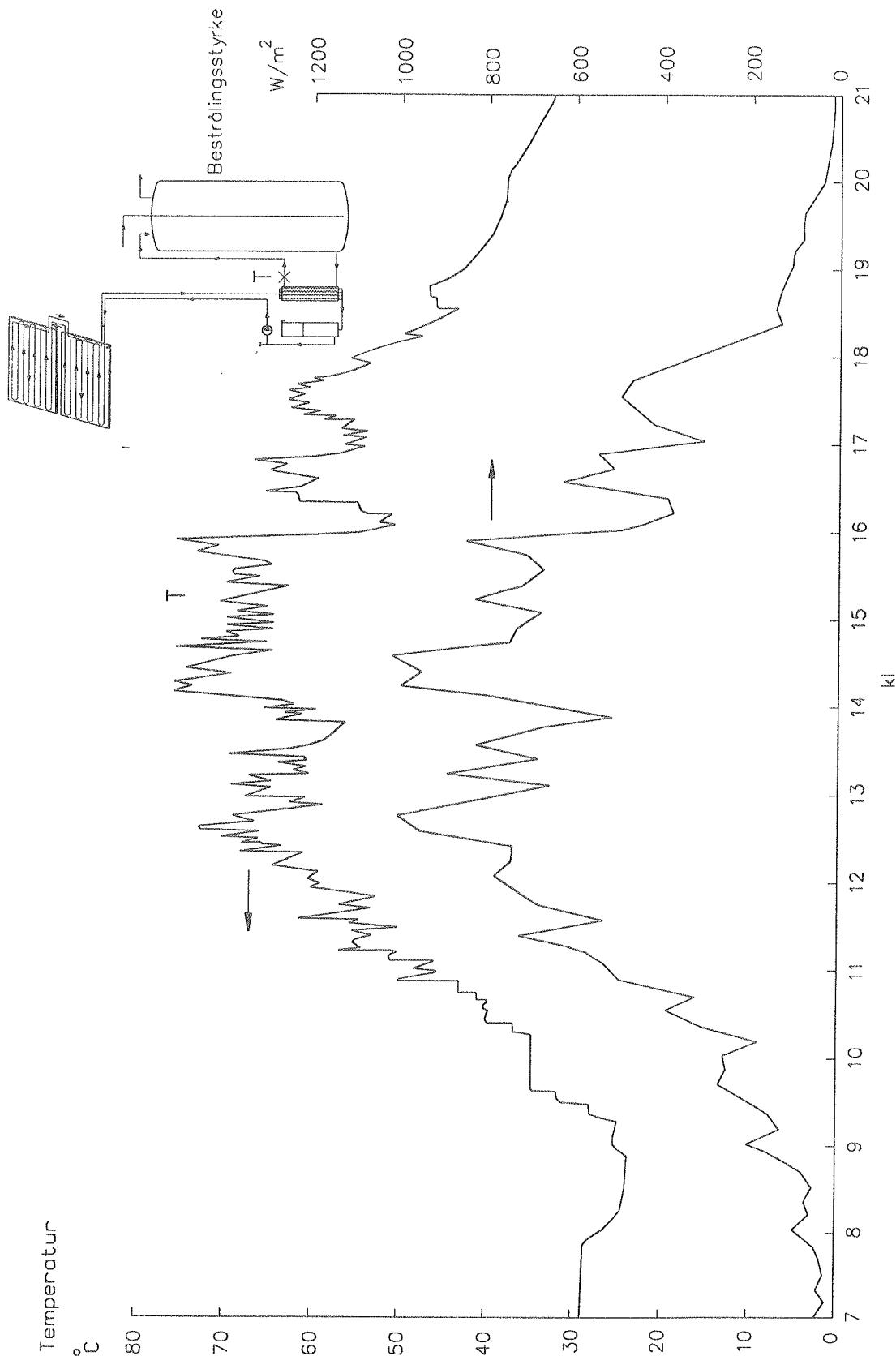
Dette fremgår af figur 27, som for den 23. juni 1994 viser den målte totale bestrålingsstyrke på solfangeren og den målte temperatur af brugsvandet umiddelbart efter, at det har passeret varmeveksleren i varmevekslerkredsen. De mange store temperaturudsving er udtryk for, at pumpen starter og stopper mange gange i løbet af dagen. Problemet er forårsaget af følerplaceringerne, den forholdsvis store stoptemperaturdifferens og varmevekslerens forholdsvis lille varmeoverføringsevne. Det anbefales at flytte varmelagerets temperaturføler fra varmeveksleren til bunden af varmtvandsbeholderen, hvor anlæggets laveste temperaturer forefindes.

Som omtalt i afsnit 2.3 selvcirkulerer brugsvandet baglæns i varmevekslerkredsen om natten, hvis varmelageret er varmt efter den foregående dag. Denne selvcirkulation resulterer sammen med det forholdsvis store varmetab fra varmtvandsbeholderen i, at varmelagerets varmetab er uhensigtsmæssigt stort og anlægsydelsen reduceres herved markant.

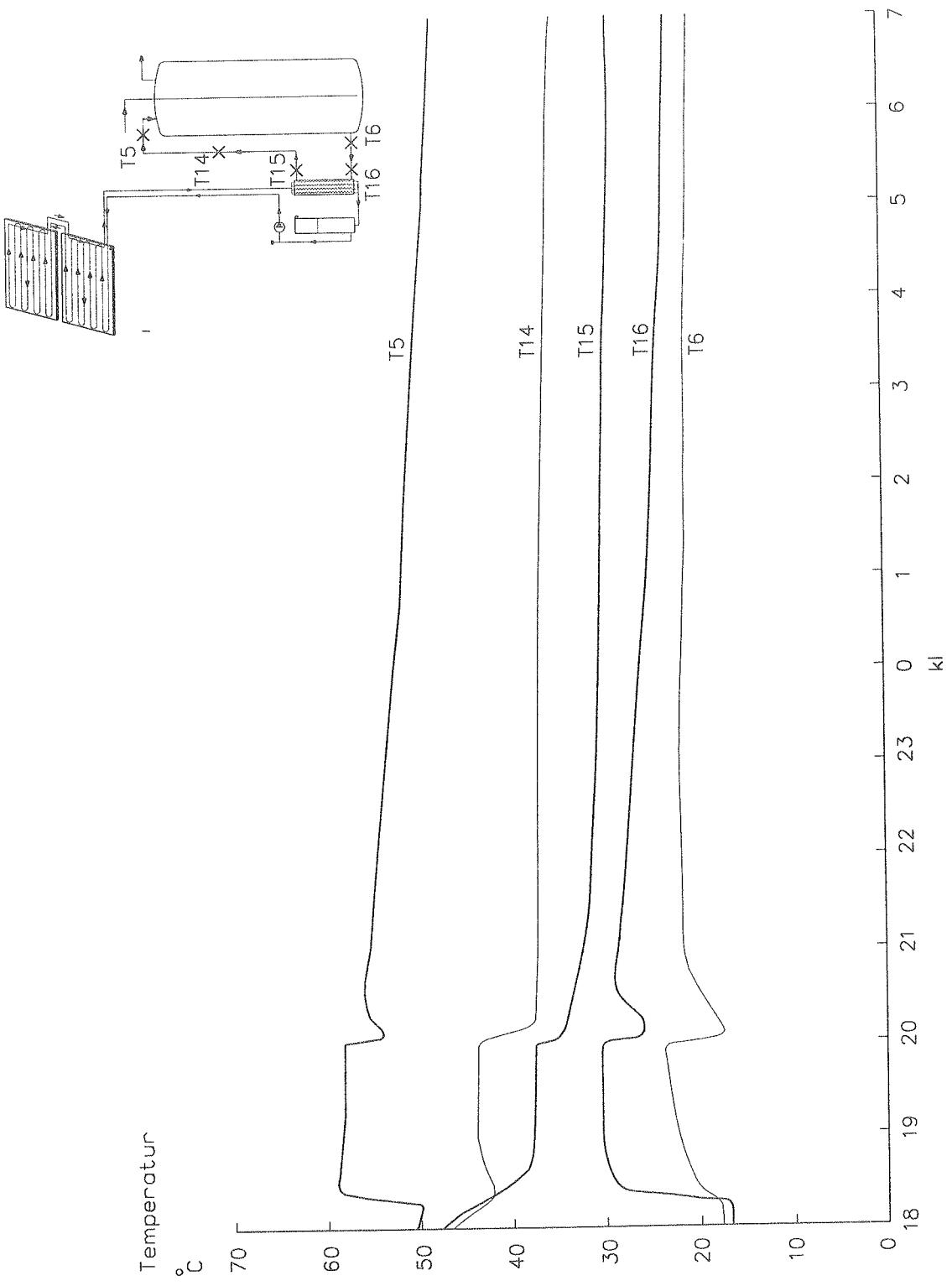
Figur 28 viser målte temperaturer i varmevekslerkredsen igennem natten mellem den 24. og 25. juni 1994. Selvcirkulationen starter kl. 18^{15} og varer hele natten. Der foretages en varmtvandstapning kl. 20.

Problemet med selvcirkulation kan løses ved i varmevekslerkredsen at anvende en kontraventil, som er specielt velegnet til selvcirkulerende kredse.

For at undersøge om solfangerkredsen tømmes for solfangervæske i perioder uden solfangerdrift, blev solfangernes og lifelinens indhold en tidlig morgen før solopgang kontrolleret. Den øverste solfanger indeholdt luft, den nederste solfanger indeholdt solfangervæske og en smule luft, mens lifeline indeholdt solfangervæske.



Figur 27. Målt total bestrålingsstyrke på solfangeren og målt temperatur af brugsvandet i varmevekslerkredsen umiddelbart efter varmeveksleren den 23. juni 1994. Indstilling af start-/stoptemperaturredifferensen: 9°F/4°F.



Figur 28. Målte temperaturer i varmevekslerkredsen den 24. og 25. juni 1994.

Solfangerkredsen er designet på en sådan måde, se figur 18, at luften, som i perioder med solfangerdrift bør være placeret i Solar Boiler Modules beholder, ikke tilføres lifelinen, når pumpen stoppes. De to forbindelser fra beholderen til den øvrige del af solfangerkredsen er nemlig placeret nederst i beholderen.

Hvorfor er en del af solfangerkredsen alligevel fyldt med luft i perioder uden solfangerdrift? Sandsynligvis transporterer der lidt luft med solfangervæskken rundt i solfangerkredsen i perioder med solfangerdrift, idet væskestanden i Solar Boiler Modules beholder sandsynligvis er i samme niveau som solfangervæskens fremløbsrør fra beholderen til pumpen. Når pumpen stoppes, vil denne luft samle sig i det øverste solfangerelement. På basis af undersøgelserne kan det konkluderes, at anlægget ikke fungerer som et tømmeanlæg.

3.4 Beregnet årsydelse

Anlæggets årsydelse med referenceårets vejrdata er beregnet med den opbyggede simuleringsmodel. Beregningerne er udført med en daglig tapning på 200 liter/døgn opvarmet fra 10 til 45 °C. Tapningerne finder sted i 3 lige store tapninger kl. 7.00, kl. 12.00 og kl. 20.00.

Den beregnede årsydelse er angivet i tabel 13. Til sammenligning er endvidere angivet den beregnede årsydelse for det hollandske anlæg fra ZEN B.V.

Endvidere er angivet den beregnede tilskudsydelse for de to anlæg.

For det canadiske anlæg beregnes tilskudsydelsen som den udnyttede solenergi (nettoydelse) - el-forbrug til pumpe (85 kWh). For det hollandske anlæg beregnes tilskudsydelsen på samme måde, men med et tillæg på 110 kWh, idet anlægget har indbygget el-backup og derved antages at kunne erstatte en el-vandvarmer (som antages at have et varmetab på 110 kWh/år).

Varmtvands-forbrug kWh	Thermo Dynamics Ltd.			ZEN B.V.			
	Solind-fald kWh	Brutto-ydelse kWh	Netto-ydelse kWh	Solind-fald kWh	Brutto-ydelse kWh	Netto-ydelse kWh	
jan	252	150	35	23	75	24	27
feb	228	332	89	75	166	60	60
mar	252	418	116	95	209	77	79
apr	244	746	215	174	373	148	139
maj	252	876	259	223	438	177	164
jun	244	981	275	224	490	204	180
Jul	252	873	268	225	436	188	172
aug	253	831	272	220	415	186	170
sep	244	595	214	181	298	137	137
okt	252	382	132	113	191	87	91
nov	243	216	68	51	108	46	50
dec	252	191	56	41	95	37	40
Sum	2970	6592	2000	1643	3296	1372	1308
Beregnet tilskudsydelse				1558			1342

Tabel 13. Beregnede årsydelser for det canadiske og hollandske anlæg.

4. VURDERING AF ANLÆGGET

Solvarmeanlægget, som er designet både efter tømmesystem- og low flow principippet, er billigt sammenlignet med danske markedsførte solvarmeanlæg.

Solvarmeanlæggets fleksible solfangerkreds, den såkaldte lifeline, har gode termiske egenskaber. Desuden letter lifelinen installationen af anlægget, hvorved anlægsprisen reduceres.

Anlæggets øvrige komponenter er ikke velegnede til at indgå i et anvanceret højtydende solvarmeanlæg: Varmevekslerens varmeoverføringsevne er forholdsvis lille, varmelagerets varmetab er forholdsvis stort, der optræder uønsket baglæns selvcirkulation i varmevekslerkredsen om natten med store varmetab til følge, styresystemet fungerer ikke optimalt og anlægget fungerer ikke som et tømmeanlæg.

På trods af at anlægget har et stort solfangerareal, at der er tale om et forvarmeanlæg og at anlægget udnytter det attraktive low flow princip, ligger anlæggets ydelse kun på linie med ydelserne af de danske markedsførte solvarmeanlæg, som tidligere er afprøvet i Laboratoriets prøvestand [10]. Årsagen hertil er de ovenfor nævnte mange småfejl.

Det kan konkluderes, at der er behov for at videreudvikle anlægget. Thermo Dynamics Ltd har da også videreudviklet anlægget siden starten af projektet. I dag markedsfører firmaet således et anlæg, som er forsynet med en solcelledrevet cirkulationspumpe. Desuden er varmeveksleren for tiden under videreudvikling [11].

5. KONKLUSION

Der er gennemført undersøgelser af et billigt solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning. Anlægget markedsføres i Canada af firmaet Thermo Dynamics Ltd.

Anlægget er designet både efter low flow- og tømmesystemprincipippet.

Anlæggets komponenter er afprøvet i indendørs prøvestande, og anlægget er afprøvet i en prøvestand under de samme forhold, som 5 markedsførte danske solvarmeanlæg tidligere er blevet afprøvet under.

Undersøgelserne viste, at anlæggets fleksible solfangerkreds, som muliggør en reduktion af installationsomkostningerne, har gode termiske egenskaber. Undersøgelserne viste desuden, at varmevekslerens varmeoverføringsevne er forholdsvis lille, at varmelagerets varmetab er forholdsvis stort, at der optræder uønsket baglæns selvcirkulation i varmevekslerkredsen om natten med store varmetab til følge, at styresystemet ikke fungerer optimalt og at anlægget ikke som påtænkt fungerer som et tømmeanlæg.

På trods af at anlægget har et stort solfangerareal, at anlægget er et forvarmeanlæg og at det attraktive low flow princip udnyttes, ligger anlæggets ydelse kun på linie med ydelserne af de danske markedsførte solvarmeanlæg. Årsagerne er de ovenfor nævnte småfejl.

Det kan konkluderes, at der er behov for at videreudvikle anlægget, og Thermo Dynamics

Ltd er allerede i gang med dette arbejde.

REFERENCER

- [1] "Solar Simulator Test Facility" S. Svendsen, Laboratoriet for Varmeisolering.
Fra Proceedings: "North Sun'92 Solar Energy at High Latitudes."
Trondheim, Norge, juni 1992.
- [2] "Solar Collectors-Part 1: Methods of test for the thermal Performance of Liquid Heating Collectors". ISO/DIS 9806-1, International Organization for Standardization, 1991.
- [3] "Low flow test procedure and results". Svend Svendsen.
Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 92-22, august 1992.
- [4] "Optimal udformning af low flow solvarmeanlæg". Simon Furbo.
Laboratoriet for Varmeisolering. Meddelelse nr. 238, december 1992.
- [5] "Varmelagring til solvarmeanlæg" Simon Furbo.
Laboratoriet for Varmeisolering. Meddelelse nr. 162, september 1984.
- [6] "HEAT 2. A Heat Transfer PC-program". Thomas Blomberg.
Department of Building Physics, Lund University, Sweden. April 1991.
- [7] "Undersøgelse af solvarmeanlæg fra ZEN B.V." Simon Furbo. Laboratoriet for Varmeisolering. Meddelelse nr. 261, maj 1994.
- [8] "Små markedsførte solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning - funktionsafprøvning og ydelsesmålinger. Opbygning af prøvestand". Klaus Ellehauge. Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 93-37, december 1993.
- [9] "Simulation of Thermal Systems. A Modular Program with an Interactive Preprocessor (EMGP3)". Willie L. Dutré. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/Boston/London, 1991.
- [10] "Små markedsførte solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning - funktionsafprøvning og ydelsesmålinger. Sammenfatning af måle- og simuleringerresultater". Klaus Ellehauge. Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 94-12, marts 1994.
- [11] "Overall Heat Transfer Coefficient Measured and Calculated for Two Different Coil Heat Exchangers". Charlotte Gudum. Department of Mechanical Engineering, Technical University of Nova Scotia, Maj 1994.

