

UNDERSØGELSE AF SOLVARMEANLÆGGET
SOLKIT FRA SCHWEIZ

SIMON FURBO

JULI 1995

MEDDELELSE NR. 278

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD	2
RESUMÉ	3
SUMMARY	4
1. INDLEDNING	5
2. KOMPONENTAFPRØVNING	7
2.1 Solfanger	7
2.2 Solfangerkreds	13
2.3 Varmelager.	19
3. AFPRØVNING AF ANLÆG	27
3.1 Beskrivelse af anlægget	27
3.2 Målesystem og afprøvningsbetingelser	30
3.3 Målte og beregnede ydelser samt driftserfaringer	32
3.4 Beregnet årsydelse	36
4. ÅRSYDELSER FOR FORSKELLIGE AFPRØVEDE SOLVARMEANLÆG	37
5. KONKLUSION	46
REFERENCER	47

FORORD

Denne rapport beskriver arbejdet, som er gennemført under projektet: "Undersøgelse af det avancerede solvarmeanlæg Solkit fra Schweiz", j.nr.51181/94-0013.

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

Simon Furbo, civilingeniør, Ph.D.
Lise Boye-Hansen, civilingeniør
Ole Holck, civilingeniør
Martin Dandanell, maskinarbejder
Poul Dedenroth, maskinarbejder
Lars Kæstel Jørgensen, elektronikmekaniker
Hamid Jalali, teknisk assistent
Anne Rasmussen, korrespondent
Ann Johnsen, kontorelev

RESUMÉ

I 1992-1993 udviklede Prøvestationen for Solenergi i Schweiz, SPT-ITR, et avanceret solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning. Solvarmeanlægget, som benævnes Solkit, markedsføres i dag i Schweiz og Tyskland af firmaet Bürgenmeier-Krismer Solartechnik.

Anlægget, som er designet efter low flow princippet, har et varmelager bestående af en trykløs tank, hvori en varmtvandsbeholder er neddykket. Solfangervæsken tilføres den trykløse tank gennem et lodret indløbsrør med en række udløbshuller i forskellige niveauer. På denne måde tilføres solfangervæsken den trykløse tank i det niveau, hvor solvarmen kan overføres til brugsvandet i varmtvandsbeholderen.

Som solfangerkreds benyttes den flexible såkaldte "flextube", 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 "flextuben" er undersøgt både teoretisk og eksperimentelt i laboratoriets lagerprøvestand. Varmelageret er også 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 en række danske og udenlandske markedsførte solvarmeanlæg tidligere er målt under.

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

SUMMARY

In the period of 1992-1993 an advanced DHW solar heating system was developed at SPF-ITR, Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle in Rapperswil, Switzerland. The solar heating system, which is called Solkit, is today marketed in Switzerland and Germany by the Swiss company Bürgenmeier-Krismer Solartechnik.

The solar heating system is based on the low flow principle. The heat storage consists of a pressureless tank in which a hot water tank is located. The solar collector fluid is transferred to the pressureless tank through a vertical pipe with holes in different levels. In this way the solar collector fluid is transferred to the pressureless tank in the level where the heat from the solar collector can be transferred to the domestic water of the hot water tank.

A flexible so-called "flectube", which is used as the solar collector loop of the system, facilitates the installation.

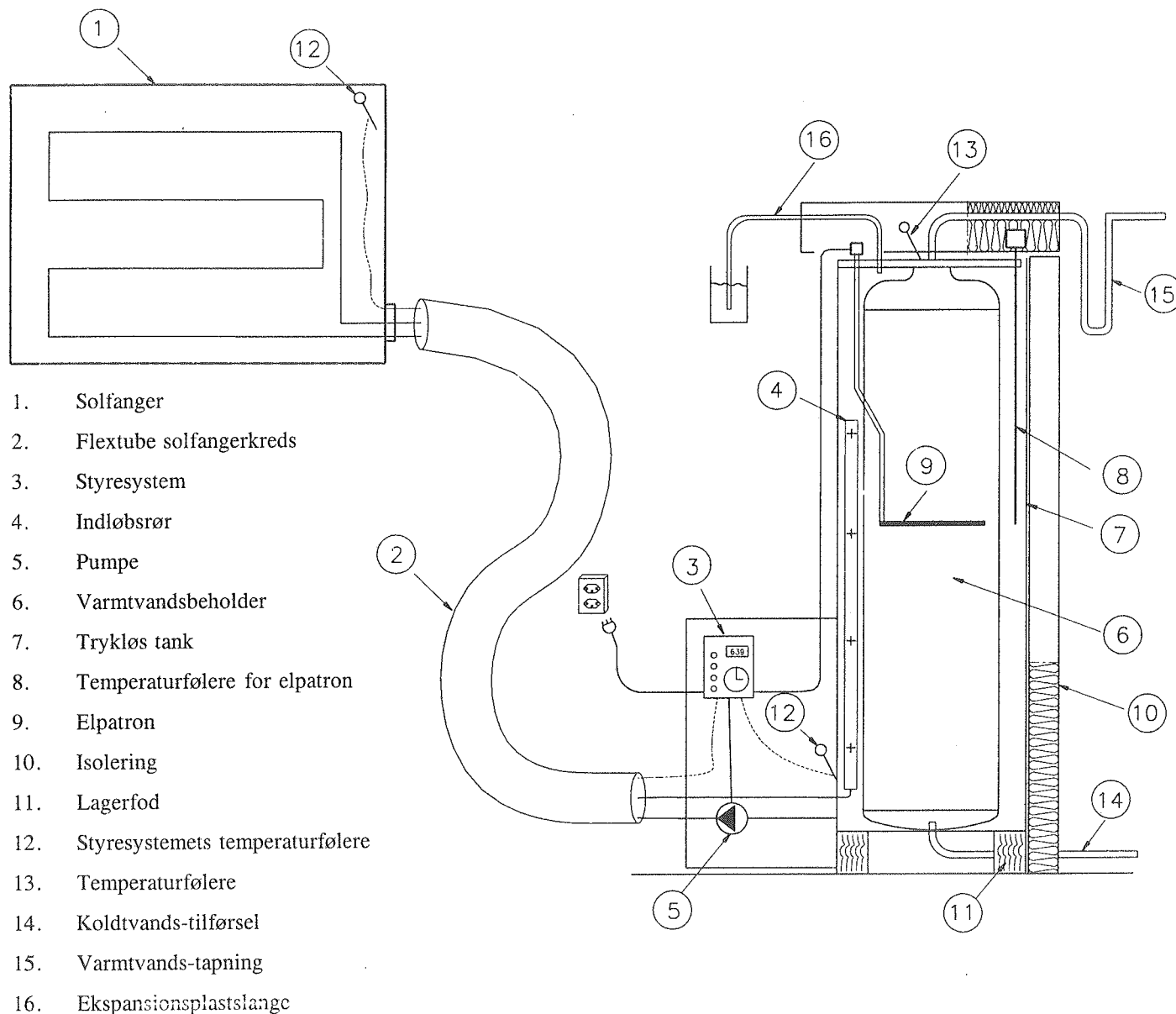
The components of the system were tested in indoor test facilities. The efficiency of the solar collector was measured in the solar simulator test facility of the Thermal Insulation Laboratory. The "flectube" was investigated theoretically as well as experimentally in a test facility for heat storages. The heat storage was also tested in the heat storage test facility.

The solar heating system was tested side-by-side with different marketed 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 different Danish and foreign systems.

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

1. INDLEDNING

Figur 1 viser en principskitse af Solkit systemet, som består af et solfangerelement, en "flectube" som solfangerkreds, en pumpe, og et varmelager.



Figur 1. Principskitse af Solkit systemet.

Varmelageret består af en varmtvandsbeholder, som er neddykket i en trykløs tank. Som solfangervæske benyttes en 33 % ethylenglykol/vand-blanding, som fylder den trykløse tank, solfangerkredsen og solfangerne. Anlægget er åbent, idet et plastrør fra toppen af den trykløse tank føres ud til en opsamlingsbeholder. En lille pumpe cirkulerer langsomt solfangervæsken gennem solfangerkredsen, og solfangervæsken tilføres den trykløse tank gennem et indløbsrør med en række udløbshuller i forskellige niveauer. På denne måde tilføres solfangervæsken den trykløse tank i det niveau, hvor solvarmen kan overføres til brugsvandet i varmtvandsbeholderen. Herved udnyttes low flow princippet til at opbygge en stor fordelagtig temperaturlagdeling i varmelageret.

Varmelageret er forsynet med en elpatron placeret i midten af den trykløse tank. Et styresystem sørger for, at elpatronen opvarmer den øverste halvdel af varmelageret, når energiindholdet i den øverste halvdel af varmelageret er mindre end en på forhånd bestemt størrelse.

De oplyste priser for anlæggets komponenter samt en typisk forbrugerpris for anlægget i Schweiz fremgår af tabel 1, [1].

Det skal bemærkes, at den anvendte solfangervæske, en ethylenglykol/vand-blanding, ikke er godkendt som solfangervæske i Danmark.

4,36 m ² solfangerelement med indbygget føler	1125,00 SFr	5300 kr
Materiale til fastgørelse af solfanger	84,20 SFr	400 kr
405 l isoleret varmelager bestående af 276 l rustfri stål varmtvandsbeholder neddykket i en trykløs rustfri ståltank med elpatron og 129 l 33 % ethylenglykol/vand-blanding	1302,70 SFr	6140 kr
Solfangerkreds 15 flextube	195,00 SFr	920 kr
Ekstra materiale til solfangerkredsen	147,35 SFr	690 kr
Pumpe	320,00 SFr	1510 kr
Styresystem	322,50 SFr	1520 kr
Total	3496,75 SFr	16490 kr
Installation, transport, markedsføring, fortjeneste, moms	4598,75 SFr	21680 kr
Forbrugerpris	8095,50 SFr	38170 kr

Tabel 1. Pris for Solkit systemet.

2. KOMPONENTAFPRØVNING

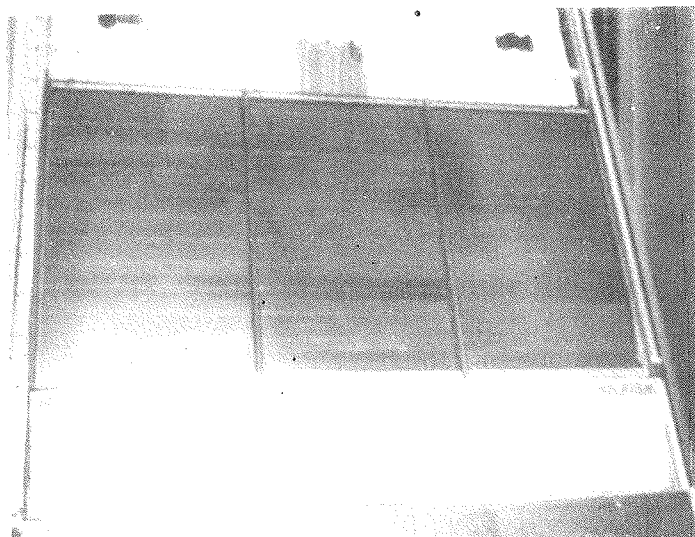
2.1 Solfanger

Dimensionerne af anlæggets solfangerelement, hvis absorber består af 12 vandretliggende, seriekoblede, selektive kobberlameller, fremgår af tabel 2.

Udvendige dimensioner	3,005 m x 1,600 m x 0,125 m
Vægt (tom)	114 kg
Solfangervæskeindhold	1,5 l
Udvendigt areal	4,81 m ²
Transparent areal	4,36 m ²

Tabel 2. Data for det afprøvede Solkit solfangerelement.

Solfangerelementet er afprøvet i laboratoriets solsimulator [2] ved hjælp af de på laboratoriet normalt anvendte prøvemethoder [3]. Et foto af solfangeren i prøvestanden er vist på figur 2. Som solfangervæske blev en 33% (vægt) ethylenglykol/vand blanding benyttet under afprøvningen.



Figur 2. Det afprøvede solfangerelement i prøvestanden.

De målte effektiviteter baseret på det transparente areal ved en massestrøm på ca. 0,011 kg/s m² solfanger fremgår af tabel 3. Dette flow er lavere end de flow, som normalt benyttes i forbindelse med standardprøvninger af solfangere.

Bestrålingsstyrke	Massestrøm	Lufttemperatur	Indløbs-temperatur	Temperaturstigning over solfangeren	Effektivitet
G		T _a	T _i		η
W/m ²	kg/s	°C	°C	K	
903	0,0497	29,0	26,4	16,37	0,758
	0,0496	28,9	26,4	16,43	0,759
	0,0497	28,9	26,4	16,36	0,758
	0,0497	29,0	26,4	16,28	0,754
907	0,0498	27,2	45,1	14,00	0,654
	0,0494	27,2	45,1	14,07	0,652
	0,0491	27,2	45,1	14,15	0,652
	0,0492	27,2	45,1	14,13	0,653
908	0,0497	28,4	73,1	10,75	0,510
	0,0497	28,4	73,1	10,74	0,509
	0,0495	28,4	73,1	10,76	0,508
	0,0497	28,4	73,1	10,72	0,509
889	0,0490	28,3	89,9	8,33	0,402
	0,0493	28,3	89,9	8,34	0,405
	0,0491	28,3	89,9	8,36	0,404
	0,0491	28,3	89,9	8,30	0,401

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 4,36 m².

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

$$\eta = 0,79 - 4,61 \times (T_m - T_a)/G - 0,009 \times (T_m - T_a)^2/G$$

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, k_s kan bestemmes af udtrykket:

$$k_s/k_{45^\circ} = 1,0358 - 0,00079 \times s$$

Solfangerhældning fra vandret	Massestrøm	Lufttemperatur	Indløbs- temperatur	Temperaturfald over solfangeren	Varmetabs- koefficient
s		T _a	T _i		k
°	kg/s	°C	°C	K	W/m ² K
67,5	0,0497	22,1	73,0	5,05	4,47
	0,0500	21,9	73,0	5,03	4,46
	0,0498	22,1	73,0	5,04	4,46
	0,0497	22,3	73,0	5,04	4,48
45,0	0,0497	22,9	73,0	5,04	4,53
	0,0499	23,0	73,0	5,02	4,54
	0,0497	22,9	73,0	5,03	4,52
	0,0497	23,0	73,1	5,03	4,53
22,5	0,0501	23,3	73,1	5,07	4,63
	0,0502	23,3	73,1	5,06	4,63
	0,0502	23,2	73,1	5,06	4,62
	0,0503	23,3	73,1	5,05	4,64

Tabel 4. Målte varmetabskoefficienter ved en vindhastighed langs det transparente dæklag på 5 m/s. Det benyttede solfangerareal er 4,36 m².

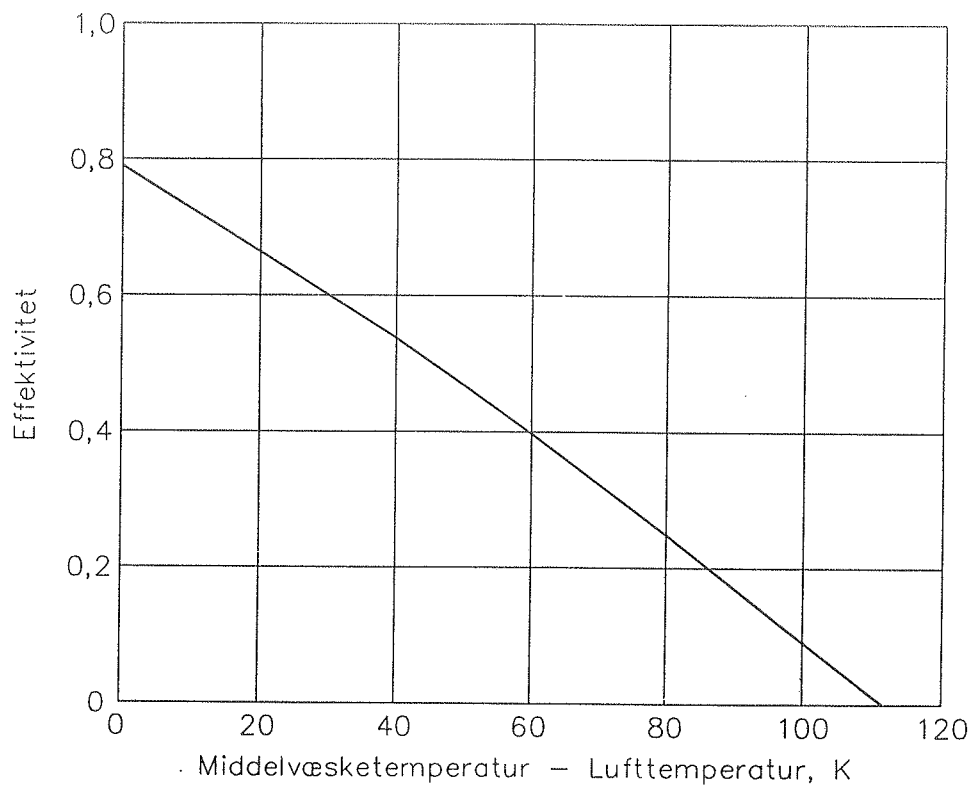
Ved at benytte korrektionen for hældningen fås følgende udtryk for effektiviteten:

$$\eta = 0,79 - 4,69 \times (T_m - T_a)/G - 0,009 \cdot (T_m - T_a)^2/G$$

Forudsætningerne for dette udtryk er:

- Effektiviteten er baseret på det transparente areal 4,36 m².
- Solfangerens hældning er 45°.
- Solstrålingen består udelukkende af direkte stråling.
- Indfaldsvinklen er mindre end 30°.
- Vindhastigheden langs det transparente dæklag er 5 m/s.
- Solfangervæsken er ethylenglykol (33 %).
- Massestrømmen er ca. 0,011 kg/s m² solfanger.

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



Figur 3. Solfangereffektiviteten ved en bestrålingsstyrke på 800 W/m² og en solfangerhældning på 45°.

Solfangereffektiviteten blev også målt ved mindre massestrømme. Måleresultaterne fremgår af tabel 5. Solfangereffektiviteterne ved små volumenstrømme angives normalt ved hjælp af en korrektionsfaktor for volumenstrømmen F_r .

Bestrålings- styrke G W/m ²	Massestrøm kg/s	Lufttemperatur T _a °C	Indløbs- temperatur °C	Temperaturstigning over solfangeren K	Effektivitet η
897	0,0427	28,4	25,7	18,68	0,748
	0,0426	28,4	25,7	18,76	0,751
	0,0426	28,4	25,7	18,79	0,751
	0,0427	28,5	25,7	18,78	0,752
900	0,0218	30,0	26,6	33,71	0,690
	0,0218	30,0	26,6	33,75	0,691
	0,0218	29,9	26,6	33,79	0,692
	0,0218	30,1	26,6	33,76	0,691
897	0,0109	28,8	26,5	57,43	0,594
	0,0109	28,9	26,6	57,48	0,594
	0,0109	28,9	26,5	57,53	0,595
	0,0109	29,0	26,5	57,49	0,594

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 4,36 m².

F_f er defineret som forholdet mellem effektiviteten ved en lille volumenstrøm og effektiviteten ved den normalt anvendte volumenstrøm på 1,2 l/min. pr. m² solfanger under de samme betingelser, dvs. ved den samme middelsolfangervæsketemperatur og ved den samme bestrålingsstyrke:

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

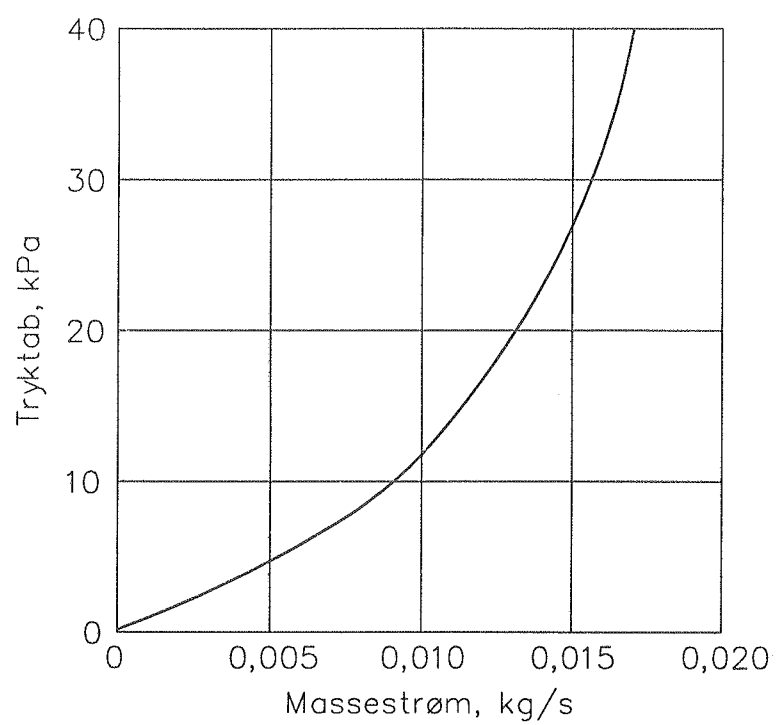
I [4] er det detaljeret beskrevet, hvorledes F_f bestemmes på basis af måleresultater. Solkit-solfangeren blev afprøvet ved en volumenstrøm på 0,65 l/min. pr. m² solfanger og ikke ved den normalt anvendte volumenstrøm på 1,2 l/min. pr. m² solfanger. Derfor er F_f for denne solfanger bestemt som forholdet mellem effektiviteten ved en lille volumenstrøm og effektiviteten ved en volumenstrøm på 0,65 l/min. pr. m² solfanger. Størrelsen af F_f bestemt ud fra målingerne fremgår af tabel 6.

Massestrøm		Volumenstrøm	Integreret middel- væsketemperatur		Effektivitet	
			T_m	$T_m - T_a$	η	F_f
kg/s	kg/sm ² solfanger	l/min m ² solfanger	°C	K		
0,0427	0,0098	0,56	35,3	6,9	0,751	1,01
0,0218	0,0050	0,29	44,2	14,2	0,691	0,98
0,0109	0,0025	0,14	57,7	28,8	0,594	0,96

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.

Det ses, at solfangereffektiviteten kun reduceres lidt, når volumenstrømmen reduceres. Størrelserne af F_f for 8 danske markedsførte solfangere er angivet i [5]. Størrelsen af F_f for Solkit-solfangeren adskiller sig ikke nævneværdigt fra størrelserne af F_f for de danske markedsførte solfangere. På basis af afprøvningen kan det konkluderes, at Solkit-solfangeren - ligesom de danske solfangere - er velegnet til at indgå i et low flow anlæg.

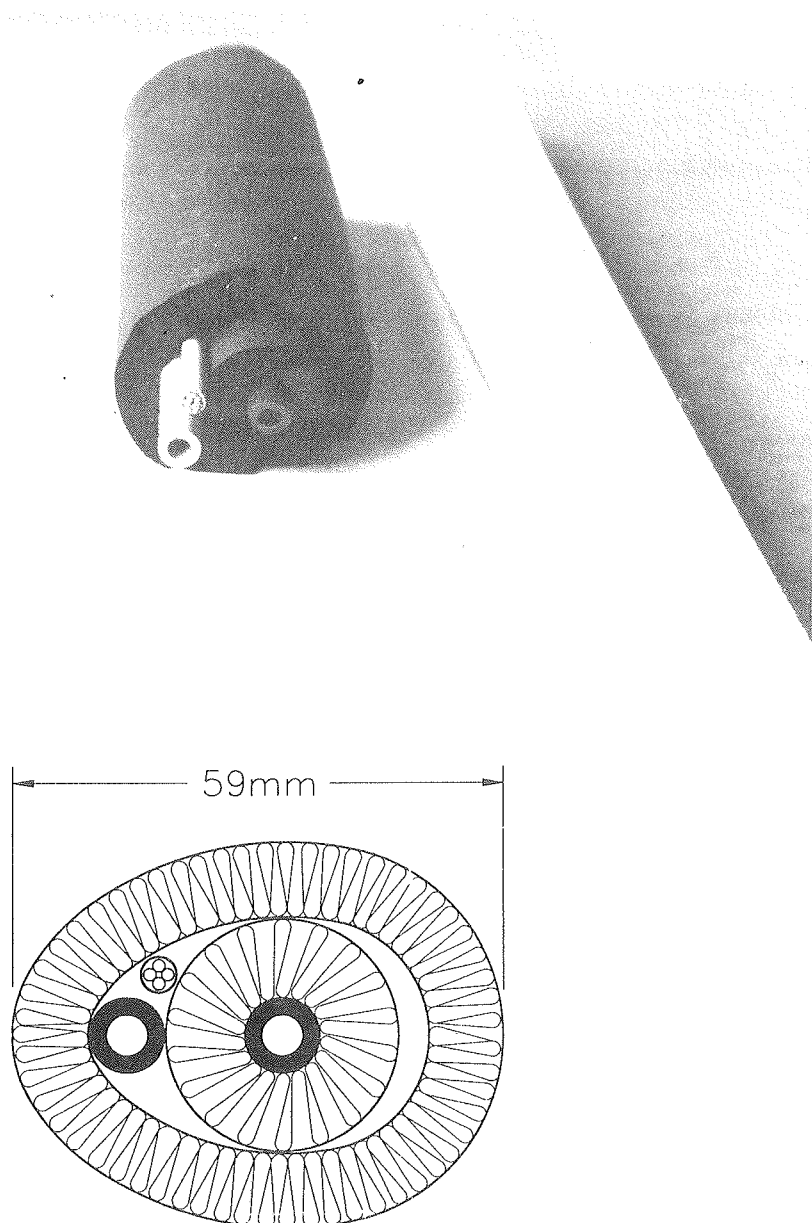
Endelig blev tryktabet over solfangeren bestemt med vand ved 26°C som solfangervæske for forskellige massestrømme. Måleresultaterne fremgår af figur 4, som viser tryktabet over solfangeren som funktion af massestrømmen.



Figur 4. Tryktab over solfangeren med vand ved 26°C som solfangervæske som funktion af massestrømmen.

2.2 Solfangerkreds

Anlæggets solfangerkreds er den såkaldte flextube, som indeholder to små silikoneslanger til solfangervæsken, en ledning til anlæggets styresystem og "Insul tube" isolering omkring silikoneslangerne. Figur 5 viser et foto og en skitse af flextubens tværsnit. I midten af flextuben er placeret en rød silikoneslange til den varme solfangervæske fra solfangeren. Slangens indre og ydre diameter er henholdsvis 5 mm og 9 mm. Slangen er direkte isoleret med 9 mm "Insul tube", som er en syntetisk gummi. Uden for denne isolering er placeret en grå 5/9 mm silikoneslange til den koldere solfangervæske, som tilføres solfangeren fra varmelageret. Yderst er placeret endnu et lag bestående af 9 mm "Insul tube". Flextubens tværsnit er som det ses på figuren ikke helt cirkulært. Da det varme rør er placeret i midten af flextuben, og det koldere rør er placeret i yderkanten af flextubens tværsnit, bliver varmetabet fra det varme rør mindst muligt.



Figur 5. Tværsnit af flextube.

Flextuben er meget flexibel, hvorved installationen af solfangerkredsen og anlægget lettes. Som nævnt i [6] markedsfører det canadiske firma Thermo Dynamics Ltd også en flexibel solfangerkreds. Den canadiske solfangerkreds, som er baseret på to kobberør, glasfiber-isolering og en PVC-kappe, er ca. 80% dyrere end flextuben. Der er netop i Canada iværksat arbejde med det formål at udvikle en billigere flexibel solfangerkreds.

Under normal drift for flextuben tabes der varme fra den varme slange til omgivelserne, og samtidig overføres der varme fra den varme slange til den koldere slange. Derfor blev der gennemført forsøg for at bestemme flextubens varmetabskoefficient og varmevekslingen mellem de to slanger. Forsøgene blev udført i laboratoriets lagerprøvestand [7].

Under afprøvningerne blev vand anvendt som solfangervæske. Den afprøvede flextube, som var placeret indendørs ved en omgivelsestemperatur på ca. 23°C, havde en total længde på 29,6 m.

Under varmetabsmålingen blev flextubens ene ende koblet til prøvestanden mens den anden ende blev kortsluttet. Vandet fra prøvestanden tilføres den røde silikoneslange med en konstant høj temperatur. Ved enden af flextuben blev vandet ført direkte fra den røde slange videre til flextubens grå silikoneslange uden et temperaturfald. På denne måde føres vandet retur til prøvestanden igennem den grå slange.

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

Volumen- strøm	Luft- temperatur	Indløbs- temperatur	Temperaturfald over flex- tuben ved prøvestanden	Flextubens varmetab	Flextubens varme- tabskoefficient	
l/min	°C	°C	K	W	W/K	W/Km
0,84	22,0	61,3	4,45	256	6,9	0,23
1,28	22,9	92,1	5,70	493	7,4	0,25

Tabel 7. Målte varmetabskoefficienter for flextuben.

Målingerne viste altså, at flextubens varmetabskoefficient er ca. 0,25 W/K pr. m flextube.

Under normal drift er den grå slange kold. Varmetabet fra denne slange er derfor normalt lille. Endvidere vil der overføres varme fra den røde varme slange til den grå kolde slange. I praksis vil flextubens varmetabskoefficient derfor være mindre end de i tabellen angivne størrelser.

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

I forsøgene blev vandet fra prøvestanden tilført flextubens røde slange med en konstant høj temperatur, og i den anden ende af flextuben blev vandet tilført flextubens grå slange med en konstant lav temperatur. Temperaturerne af det cirkulerende vand blev målt i begge ender

af flextuben - både i den røde og i den grå slange.

Der blev gennemført forsøg med forskellige indløbstemperaturer, både for den røde og grå slange. Der blev i forsøgene benyttet en volumenstrøm på ca. 0,66 l/min. Dette er en volumenstrøm tæt på volumenstrømmen i solvarmeanlægget. Det målte varmetab for flextuben blev for hvert forsøg sammenlignet med varmetabet beregnet med PC-programmet HEAT 2, [8]. Flextubens geometri, varmeledningsevnerne for flextubens enkelte dele og de målte middelvæsketemperaturer i den varme og kolde slange blev benyttet som input til programmet. Tabel 8 angiver de målte stabile temperaturer for den 29,6 m lange flextube og de målte og beregnede størrelser for flextubens varmetab.

Volumen- strøm	Fremløbs- temperatur til flextubens røde slange	Retur- temperatur fra flextubens røde slange	Fremløbs- temperatur til flextubens grå slange	Retur- temperatur fra flextubens grå slange	Luft- temperatur	Flextubens varmetab		
						Målt	Beregnet	
l/min	°C	°C	°C	°C	°C	W	W/m	W/m
0,68	40,4	38,8	19,6	20,5	24,7	35	1,1	1,0
0,65	60,2	56,3	18,5	20,1	24,9	100	3,4	2,8
0,67	60,6	57,6	41,0	40,4	22,8	165	5,6	5,9
0,64	79,6	73,5	20,2	22,1	18,6	190	6,4	6,4
0,66	80,3	75,2	42,8	42,6	23,1	240	8,0	8,1
0,66	80,2	75,7	59,7	57,6	22,3	295	10,0	10,3

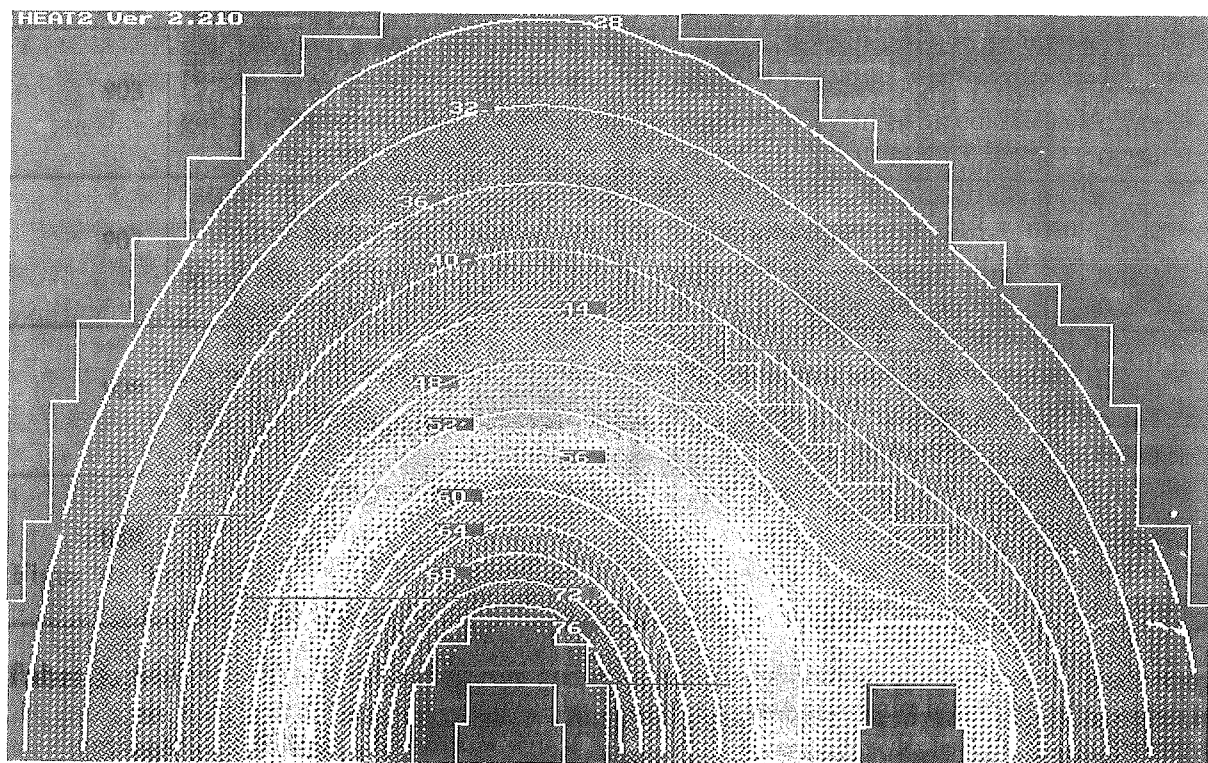
Tabel 8. Målte stabile temperaturer og målte og beregnede varmetab for flextuben for seks varmevekslingsforsøg.

I de fleste af forsøgene er der god overensstemmelse mellem de målte og beregnede varmetab. I enkelte af forsøgene er der dog forholdsvis store forskelle mellem målte og beregnede varmetab. Det er altså særdeles vanskeligt at beregne temperaturerne i flextuben korrekt i alle tilfælde. Det skyldes sandsynligvis først og fremmest, at flextuben er så flexibel, at luften mellem de to isoleringsringe ikke har samme tværsnit i hele flextubens længde. Desuden vil de varmeoverførmingsmæssige forhold i luftmellemlommene variere alt efter, hvorledes flextuben er installeret, og hvorledes flextuben vender. Eksempelvis må det forventes, at måleresultaterne vil være noget anderledes end angivet i tabel 8, hvis flextuben var installeret anderledes. De angivne måleresultater er derfor behæftet med en relativ stor usikkerhed. Det vurderes derfor, at det er rimeligt at benytte beregninger med HEAT 2 programmet til at bestemme varmeoverførmelse mellem flextubens to slanger og til at bestemme varmetabskoefficienten for hver enkelt slange i forskellige driftssituationer.

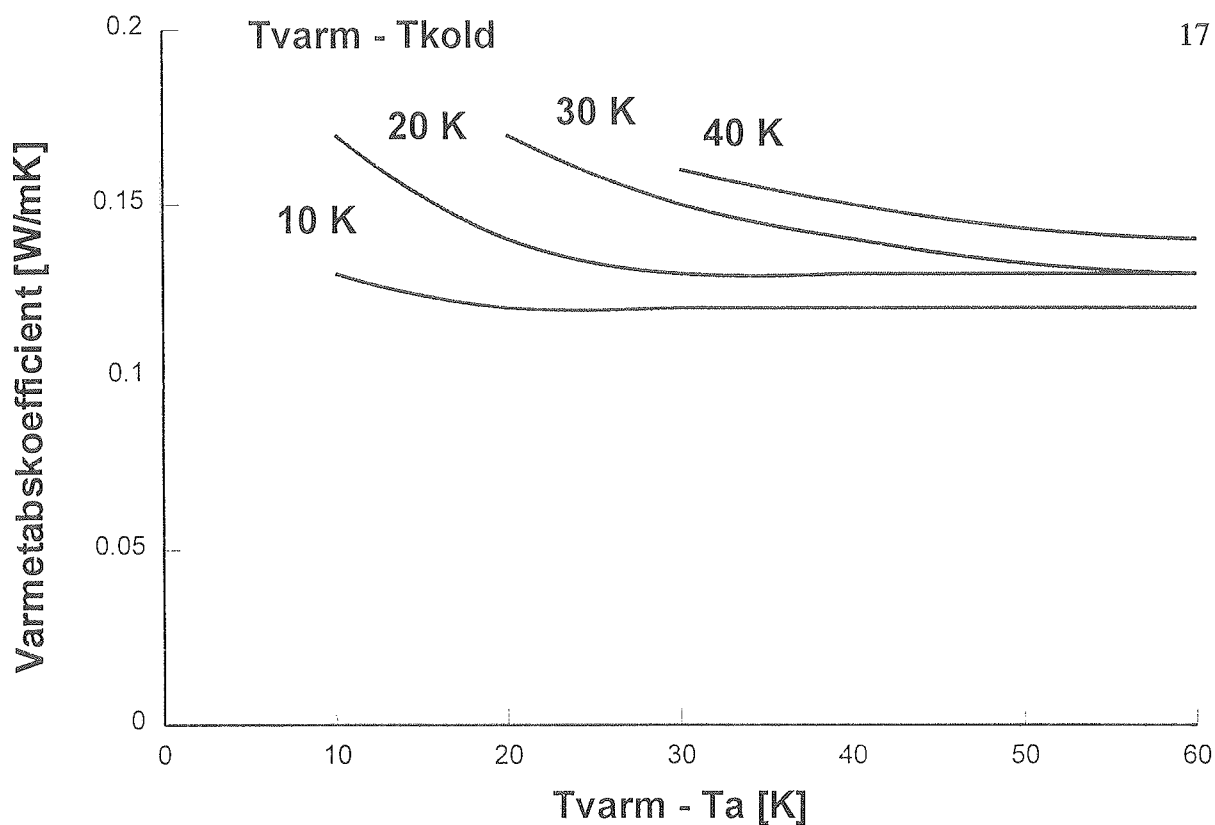
Der blev gennemført en lang række beregninger med HEAT 2 programmet med forskellige middelvæsketemperaturer både i den røde varme slange og i den grå kolde slange.

Figur 6 viser et eksempel på beregnede temperaturer inde i flextuben. Kun halvdelen af flextubens tværsnit er vist, idet temperaturforholdene i de to halvdele er ens, da flextuben er symmetrisk om midterlinjen. Resultaterne af beregningerne er sammenfattet i figur 7-9. Figur 7 og 8 viser varmetabskoefficienten for den røde varme slange og for den grå kolde slange.

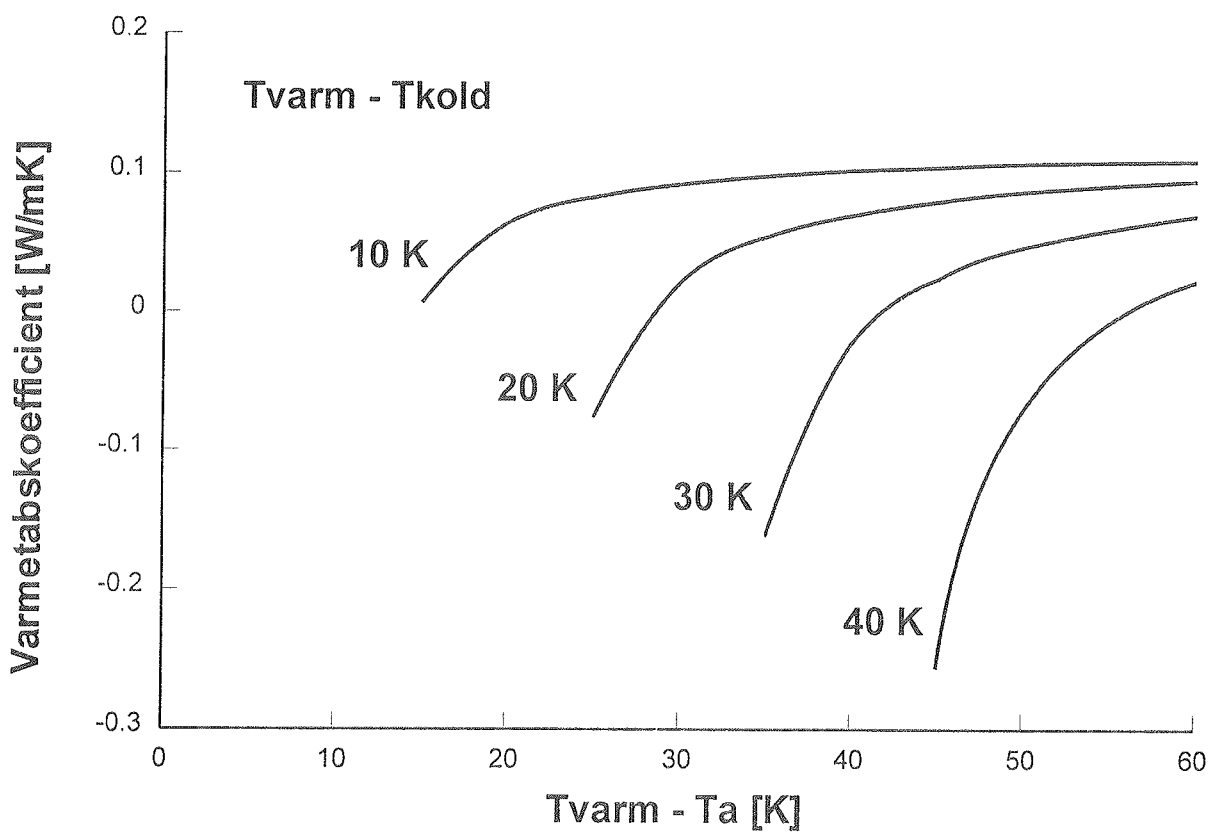
Varmetabskoefficienterne er vist som funktion af temperaturforskellene $T_{\text{varm}} - T_a$ og $T_{\text{varm}} - T_{\text{kold}}$, hvor T_{varm} er middelvæsketemperaturen i den røde varme slange, T_a er flex tubens omgivelsestemperatur og T_{kold} er middelvæsketemperaturen i den grå kolde slange. Figur 9 viser varmeoverføringsevnen mellem flex tubens to slanger ligeledes som funktion af temperaturforskellene $T_{\text{varm}} - T_a$ og $T_{\text{varm}} - T_{\text{kold}}$.



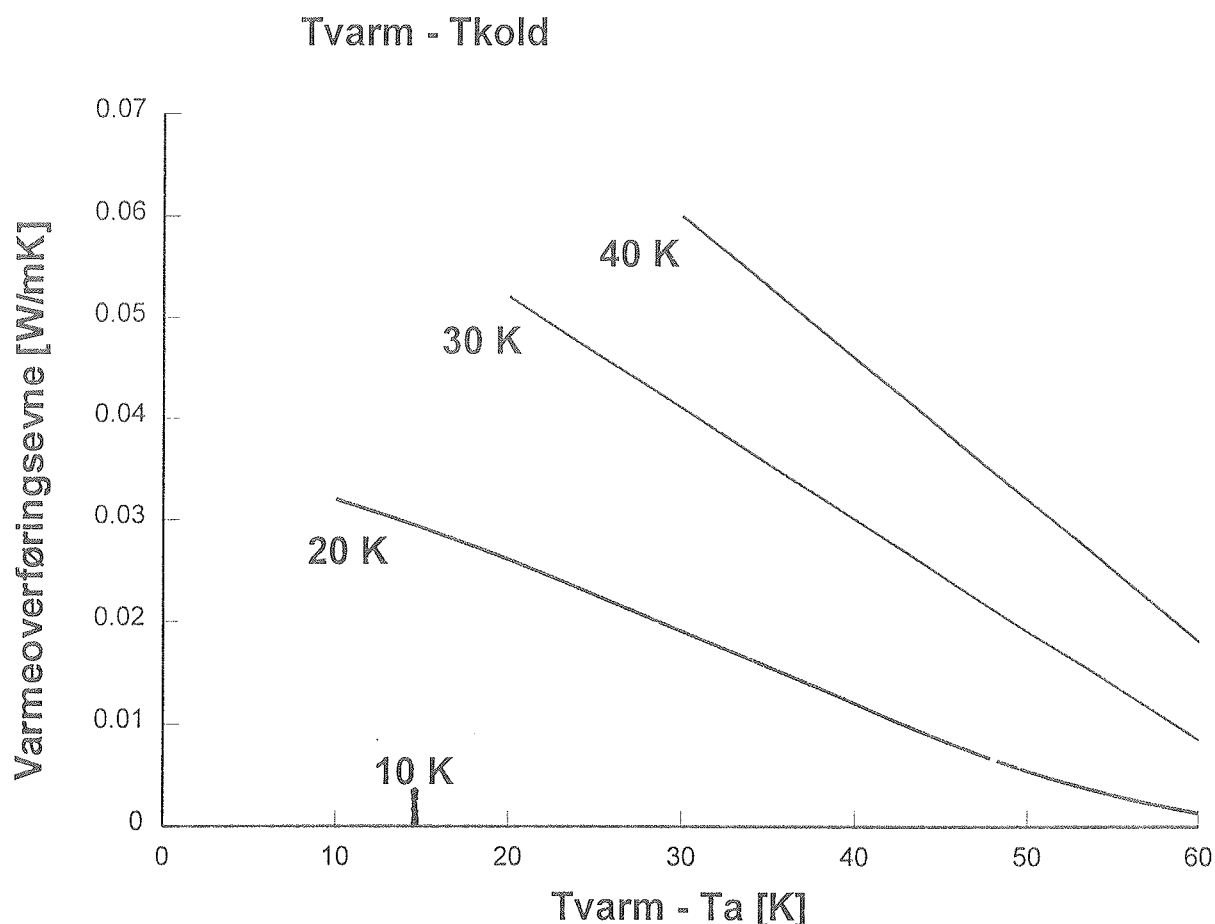
Figur 6. Temperaturer i et tværsnit af flex tuben beregnet med HEAT 2 programmet.



Figur 7. Varmetabskoefficienten for flextubens røde varme slange som funktion af temperaturforskellene $T_{\text{varm}} - T_a$ og $T_{\text{varm}} - T_{\text{kold}}$.



Figur 8. Varmetabskoefficienten for flextubens grå kolde slange som funktion af temperaturforskellene $T_{\text{varm}} - T_a$ og $T_{\text{varm}} - T_{\text{kold}}$.



Figur 9. Varmeoverføringsevnen mellem flextubens to slanger som funktion af temperaturforskellene $T_{\text{varm}} - T_{\text{a}}$ og $T_{\text{varm}} - T_{\text{kold}}$.

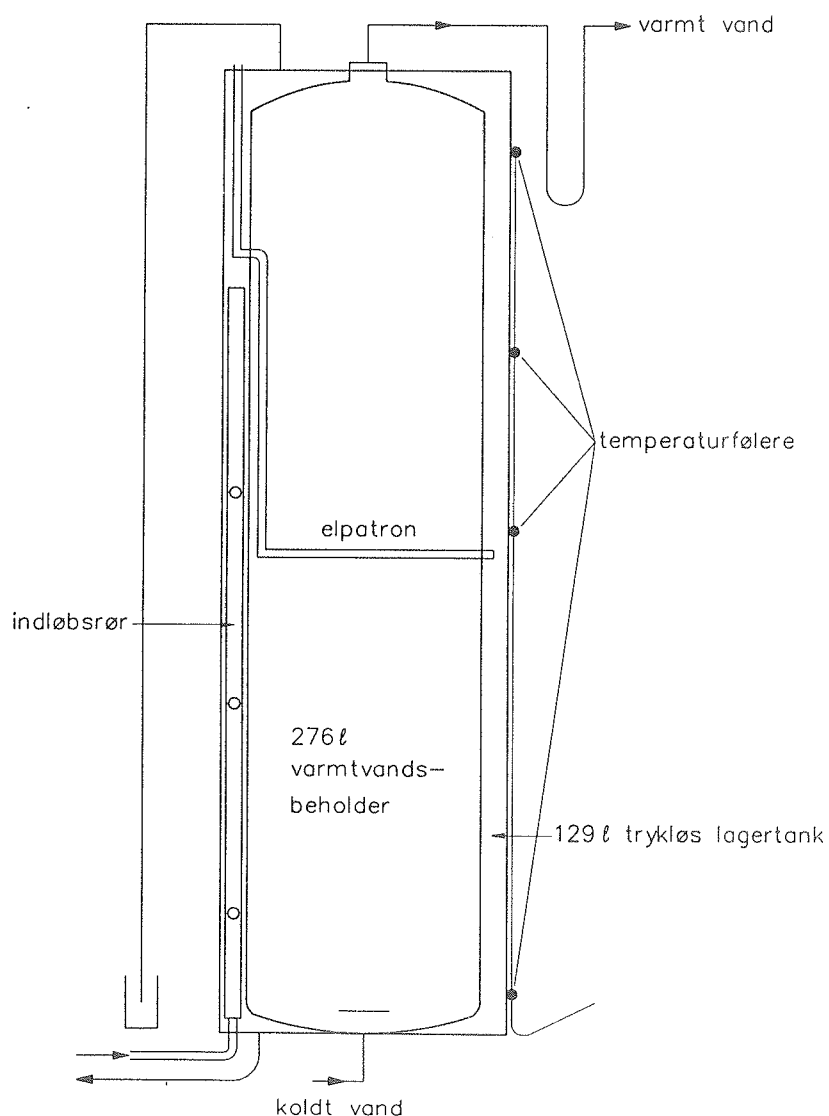
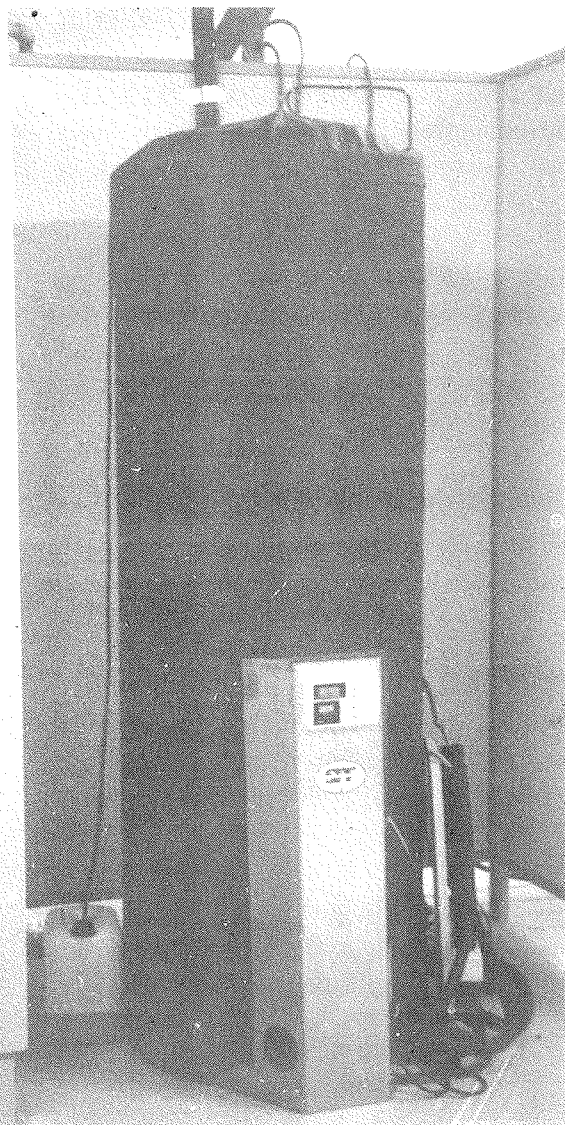
Varmetabskoefficienten for den røde varme slange fra solfangeren har en rimelig lille størrelse, som ikke påvirkes afgørende af driftsbetingelserne. Varmetabskoefficienten for den grå kolde slange til solfangeren er også rimelig lille. Størrelsen af denne varmetabskoefficient påvirkes stærkt af driftsbetingelserne. I perioder med høje solfangertemperaturer og lave varmelagertemperaturer er varmetabskoefficienten for den grå kolde slange negativ på grund af varmetransporten fra den varme slange.

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

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

2.3 Varmelager.

Varmelageret består af en trykløs tank, hvori en varmtvandsbeholder er neddykket. Figur 10 viser henholdsvis et foto og en principskitse af varmelageret.



Figur 10. Foto og principskitse af anlæggets varmelager.

Varmtvandsbeholderens volumen er 276 l og den trykløse tank indeholder foruden varmtvandsbeholderen 129 l solfangervæske. Både varmtvandsbeholderen og den trykløse tank er af rustfrit stål og varmelageret vejer uden vand og solfangervæske 50 kg.

Solfangervæsken tilføres den trykløse tank gennem et indløbsrør med en række indløbshuller i forskellige niveauer. Indløbshullerne er forsynet med klapper, som åbnes når solfanger-

væsken inde i røret er tungere end solfangervæsken uden for røret. På denne måde tilføres solfangervæsken den trykløse tank omtrent i det niveau, hvor solvarmen kan overføres til brugsvandet i varmtvandsbeholderen. Herved opbygges der en stor fordelagtig temperaturlagdeling i varmelageret under solfangerens drift.

Varmelageret er forsynet med en elpatron til at opvarme den øverste del af varmelageret i solfattige perioder, hvor solfangeren ikke kan dække hele varmtvandsbehovet. Elpatronen, som har en effekt på 1760 W, er placeret i midten af den trykløse tank. Varmelageret er forsynet med tre temperaturfølere på ydersiden af den øverste halvdel af den trykløse tank, se figur 10. Et avanceret styresystem beregner på basis af lagertemperaturerne, som måles med disse temperaturfølere, varmeindholdet i varmelagerets øverste halvdel. Hvis varmeindholdet er mindre end en på forhånd bestemt størrelse sørger elpatronen for at opvarme den øverste del af varmelageret indtil det ønskede varmeindhold er nået. Dette styresystem sikrer, at elpatronen kun tilføres energi når der er behov for det. Hvis en solrig periode fx efterfølges af en solfattig periode, kan der efter nogen tid være meget høje temperaturer og dermed et stort varmeindhold øverst i varmelageret samtidigt med, at der i midten af varmelageret i elpatronens niveau er så koldt, at elpatronen ville opvarme varmelageret, hvis elpatronen var forsynet med en normal termostatstyring. Altså vil elpatronens avancerede styresystem reducere elpatronens energiforbrug.

Varmelageret er isoleret med PURskum dækket af et bomuldsklæde. Isoleringstykkelsen er 15 cm for toppen, 10 cm for siderne og 5 cm for bunden af varmelageret.

Varmelageret blev afprøvet i laboratoriets lagerprøvestand. Varmetabskoefficienten blev målt, der blev gennemført opvarmningsforsøg og forsøg for at klarlægge de dynamiske forhold for varmelageret. En 31 % (vægt%) ethylenglycol/vand-blanding blev benyttet som solfangervæske. Solfangervæskens fremløbstemperatur til og returtemperatur fra varmelageret blev målt. Desuden blev målt lagerets omgivelsestemperatur, samt temperaturen i syv forskellige niveauer i varmtvandsbeholderen og i otte forskellige niveauer i den trykløse tank. Endelig blev solfangervæskens volumenstrøm målt.

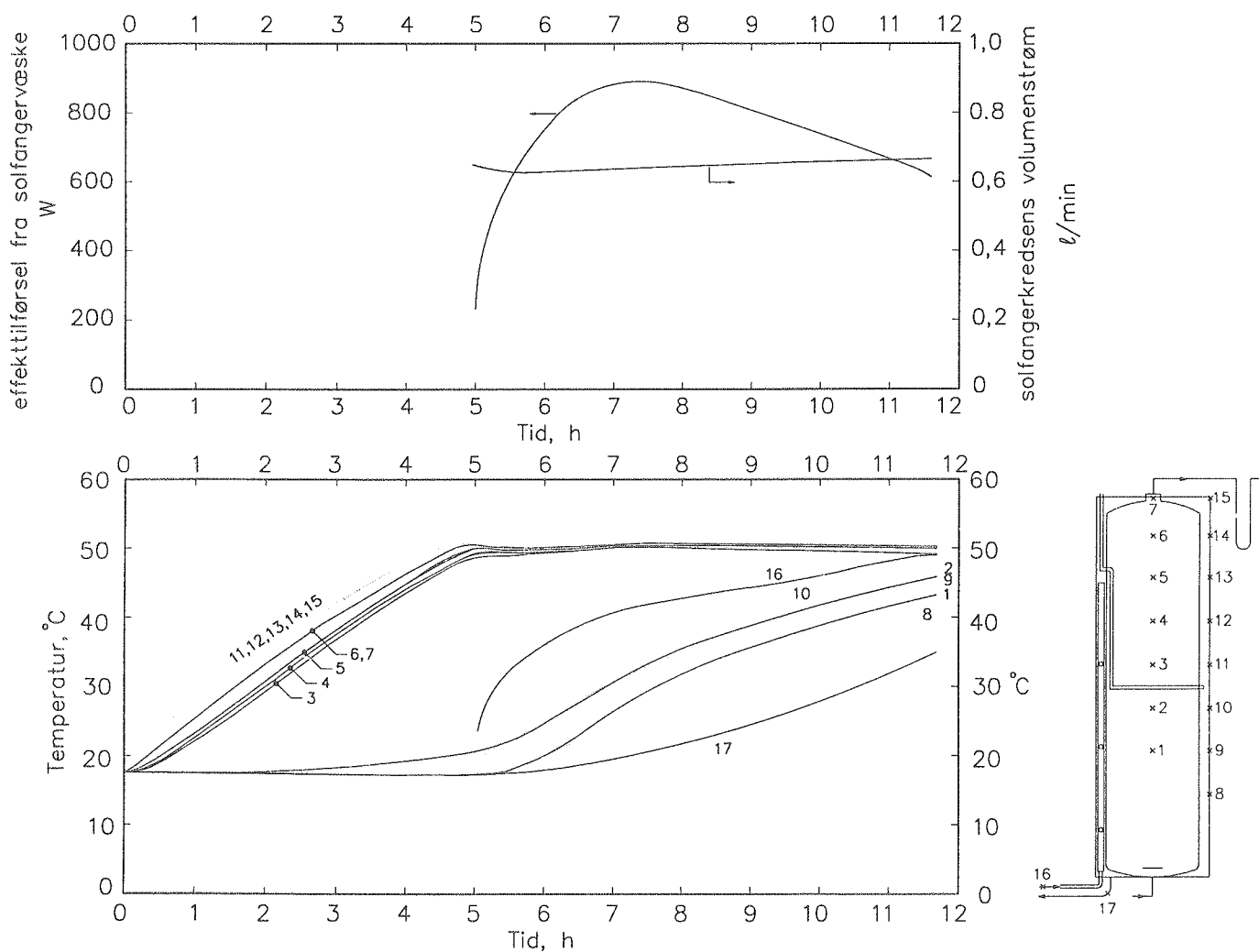
Varmetabskoefficienten for varmelageret blev målt således, at solfangervæsken blev tilført varmelageret med en konstant høj fremløbstemperatur. Når forholdene er blevet stabile, er varmelagerets varmetab lig med den varmemængde, som solfangervæsken tilfører varmelageret. Resultatet af varmetabsmålingen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

Volumen- strøm	Solfangervæskens fremløbstemperatur til varmelageret	Temperaturforskel for solfangervæsken over varmelageret	Omgivelses- temperatur	Middelvarme- lagertemperatur	Varme- lagerets varmetab	Varmelagerets varmetabskoeff- ficient
l/min	°C	K	°C	°C	W	W/K
0,45	81,3	4,59	21,4	79,0	134	2,3

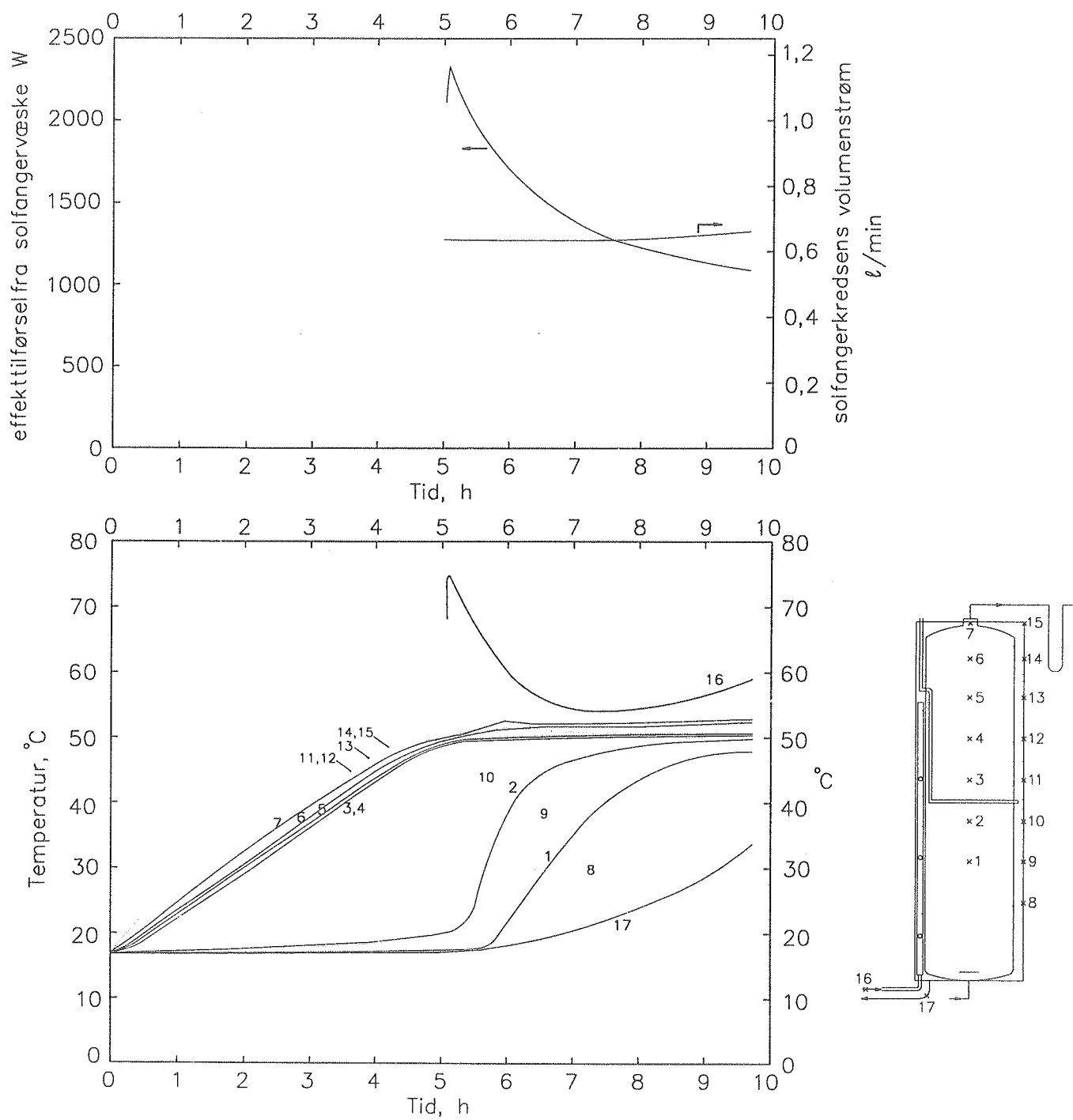
Tabel 9. Volumenstrøm, stabile temperaturer og varmetab for varmelageret målt under varmetabsprøvningen.

Varmelagerets varmetabskoefficient er mindre end varmetabskoefficienterne for de fleste af de varmelagre, som markedsføres af de danske solfangerfabrikanter. Dette er bemærkelsesværdigt, idet lagervolumenet er større end volumenet af de danske varmelagre. Årsagen til det lille varmetab er, at lageret er velisoleret og at varmelageret kun har én rørtilslutning i toppen, nemlig tapperøret til det varme vand. Dette rør er som det ses af figur 10 forsynet med en varmfælde, som reducerer varmetabet fra røret. Anlæggets ydelse afhænger meget af varmelagerets varmetabskoefficient. Derfor vil den lille varmetabskoefficient medvirke til, at anlægsydelsen bliver høj.

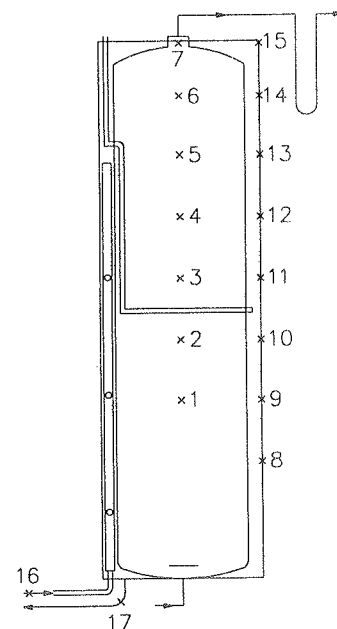
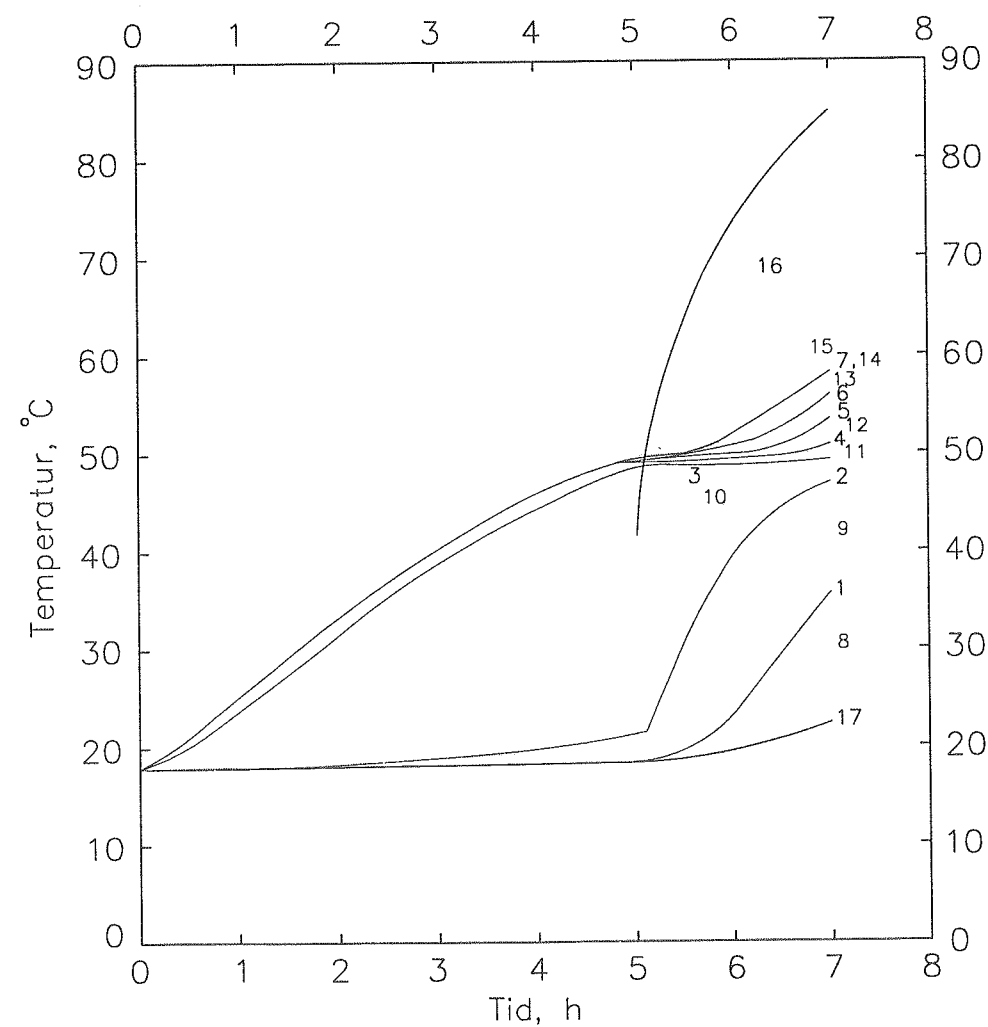
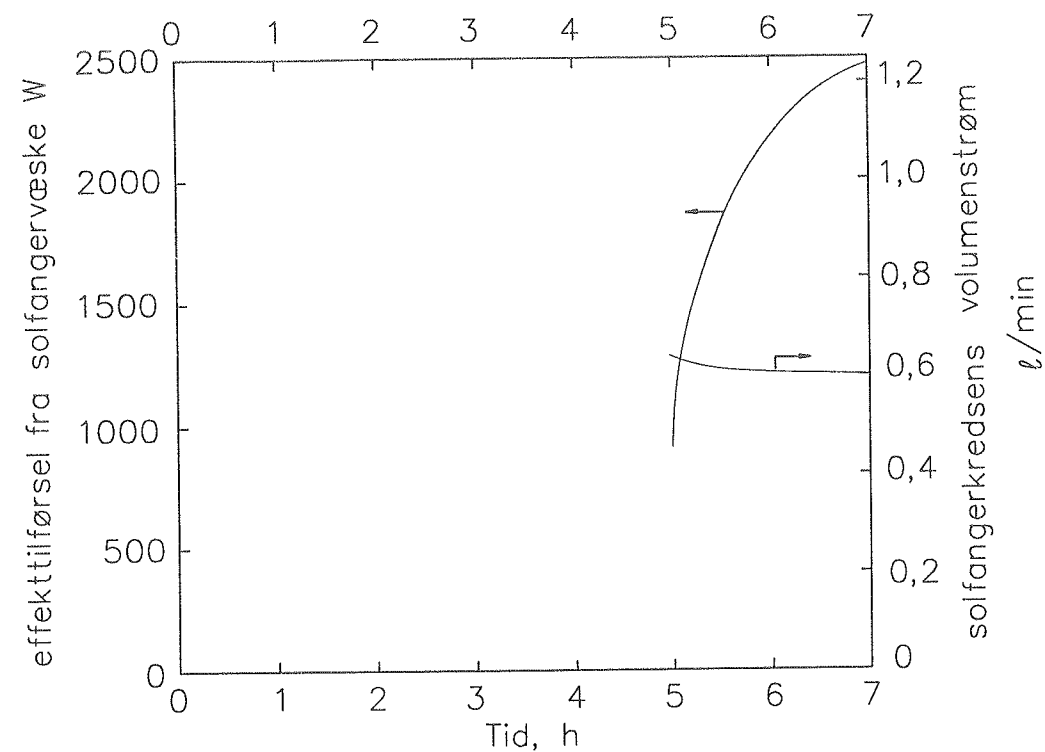
Der blev gennemført tre opvarmningsforsøg med forskellige effektilførsler fra solfangervæsken til varmelageret. Ved starten af hvert forsøg var hele varmelageret koldt, og igennem forsøgenes 5 første timer blev varmelageret udelukkende opvarmet af elpatronen. Efter 5 timer blev elpatronens drift stoppet samtidig med, at opvarmningen af varmelageret blev overtaget af solfangervæsken. De målte effektilførsler, volumenstrømme, temperaturer i varmtvandsbeholderen og i den trykløse tank og solfangervæskens fremløbs- og returtemperatur er vist på figur 11-13.



Figur 11. Temperaturer, effektilførsel og volumenstrøm for et opvarmningsforløb med en effektilførsel på ca. 750 W.



Figur 12. Temperaturer, effekttilførsel og volumenstrøm for et opvarmningsforløb med en effekttilførsel på ca. 1500 W.



Figur 13. Temperaturer, effekttilførsel og volumenstrøm for et opvarmningsforløb med en effekttilførsel på ca. 2200 W.

Det ses, at elpatronen kun opvarmer den del af varmelageret, som er beliggende over elpatronen. Endvidere ses, at der i perioder, hvor solfangervæsken opvarmer varmelageret, opbygges en stor temperaturlagdeling i varmelageret, og at de høje temperaturer i toppen af varmelageret ikke reduceres i perioder end en fremløbstemperatur, som er lavere end temperaturen i toppen af varmelageret.

For at klarlægge, om der skabes omrøring i varmelageret under varmtvandstapninger og for at undersøge, hvor hurtigt varmen overføres fra den trykløse tank til varmtvandsbeholderen, blev der gennemført et tappeforsøg med et tappeflow på ca. 6,2 l/min. Varmtvandstapningen startede umiddelbart efter en opvarmningsperiode, hvor solfangervæsken har opvarmet varmelageret.

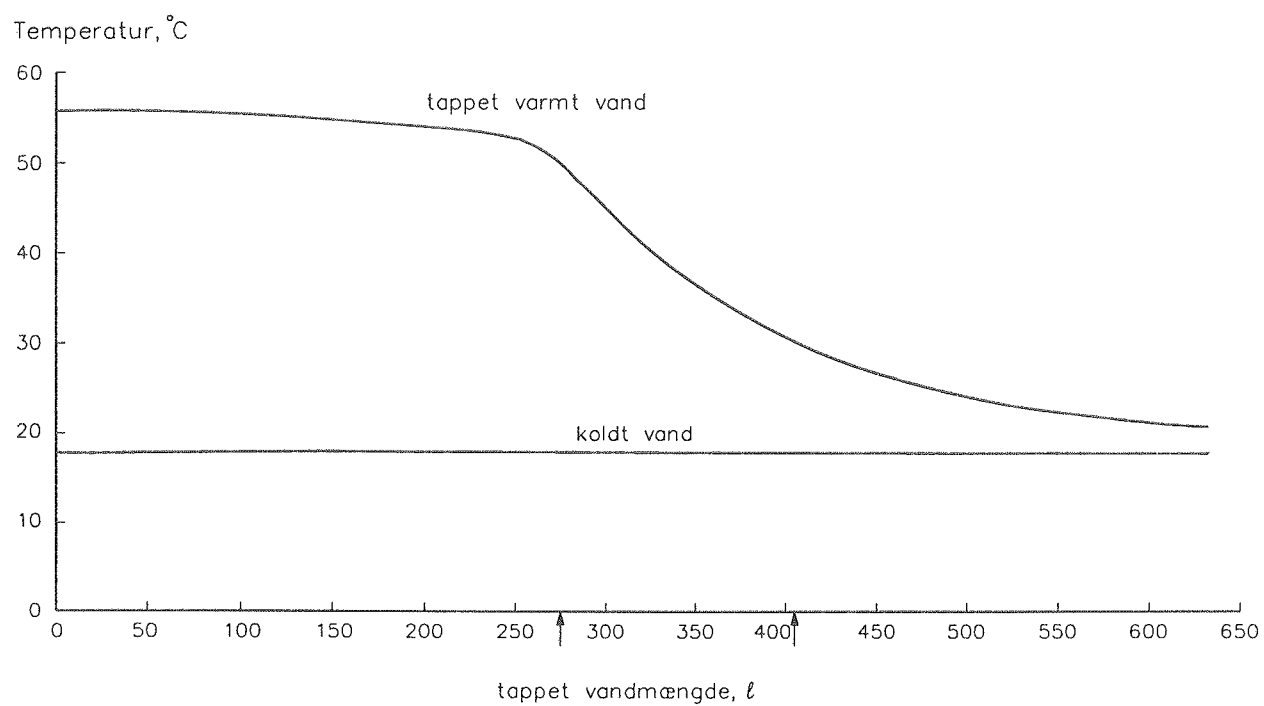
Figur 14 viser målte temperaturer for det kolde vand, som tilføres bunden af varmtvandsbeholderen og for det varme vand, som tappes fra toppen af varmtvandsbeholderen. Temperaturerne er vist som funktion af vandmængden, som er tappet fra varmelageret.

Det ses, at temperaturen af det tappede vand holder sig på et højt niveau indtil der er tappet 276 l, svarende til varmtvandsbeholderens volumen. Altså opstår der ikke nogen omrøring af betydning i varmtvandsbeholderen under varmtvandstapninger. Efter at varmtvandsbeholderens vandvolumen er tappet, falder temperaturen af det tappede vand forholdsvis langsomt. Altså er varmeoverføringen fra den trykløse tank til varmtvandsbeholderen forholdsvis stor.

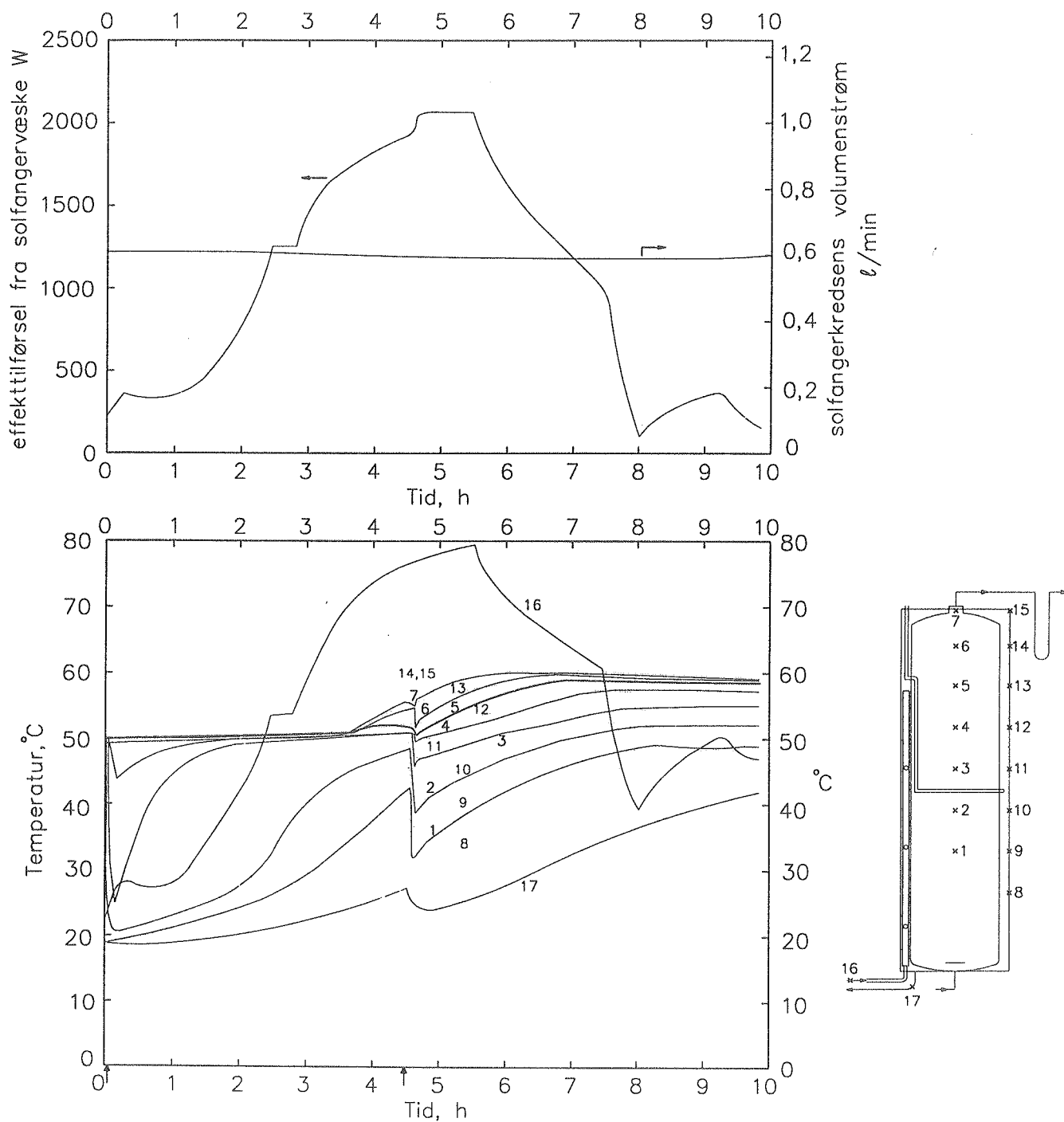
De dynamiske forhold for varmelageret blev undersøgt i en forsøgsperiode med varierende fremløbstemperatur til varmelageret, se figur 15. Figuren viser forsøgsbetingelserne og de målte temperaturer igennem forsøgsperioden. Der blev tappet 50 l varmt vand fra lageret umiddelbart efter starten af forsøget og efter 4 timer og 30 minutter.

Det ses, at der opbygges en stor temperaturlagdeling i varmelageret under solfangerens drift og under varmtvandstapninger, at temperaturlagdelingen opretholdes i perioder med forholdsvis små fremløbstemperaturer for solfangervæsken, og at solfangervæsken får en stor afkøling gennem varmelageret.

På basis af varmelagerprøvningen kan det konkluderes, at varmelageret har en særdeles udmærket udformning, som i kombination med low flow princippet vil resultere i høje anlægsudgifter.



Figur 14. Målt temperatur af koldt vand og af varmt vand under tappeforsøg med et tappeflow på ca. 6,2 l/min.



Figur 15. Forsøgbetingelser og målte temperaturer for en forsøgsperiode med varierende fremløbstemperatur for solfangervæsken.

3. AFPRØVNING AF ANLÆG

3.1 Beskrivelse af anlægget

Solkit solvarmeanlægget blev opført og afprøvet i laboratoriets prøvestand for solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning [9]. Tidligere er der i den samme prøvestand afprøvet 7 markedsførte solvarmeanlæg, fem danske, et canadisk og et hollandsk anlæg [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [6], [21]. Solkit anlægget blev afprøvet under de samme realistiske forhold, som de 7 anlæg tidligere blev afprøvet under, og i 1995 blev Solkit anlægget desuden afprøvet samtidigt med 7 "nye" danske markedsførte solvarmeanlæg.

Solfangeren blev placeret på stativet på forsøgsbygningens tag. Stativet vender 10° fra syd og har en hældning på 45° .

Solvarmeanlægget består af det afprøvede solfangerelement med arealet $4,36 \text{ m}^2$, af det afprøvede varmelager med et totalt lagervolumen på 405 l, af et avanceret styresystem, af en cirkulationspumpe for solfangervæsken og af 8,5 m af den afprøvede flextube som solfangerkreds. Af de 8,5 m er 6 m beliggende indendørs og 2,5 m beliggende udendørs.

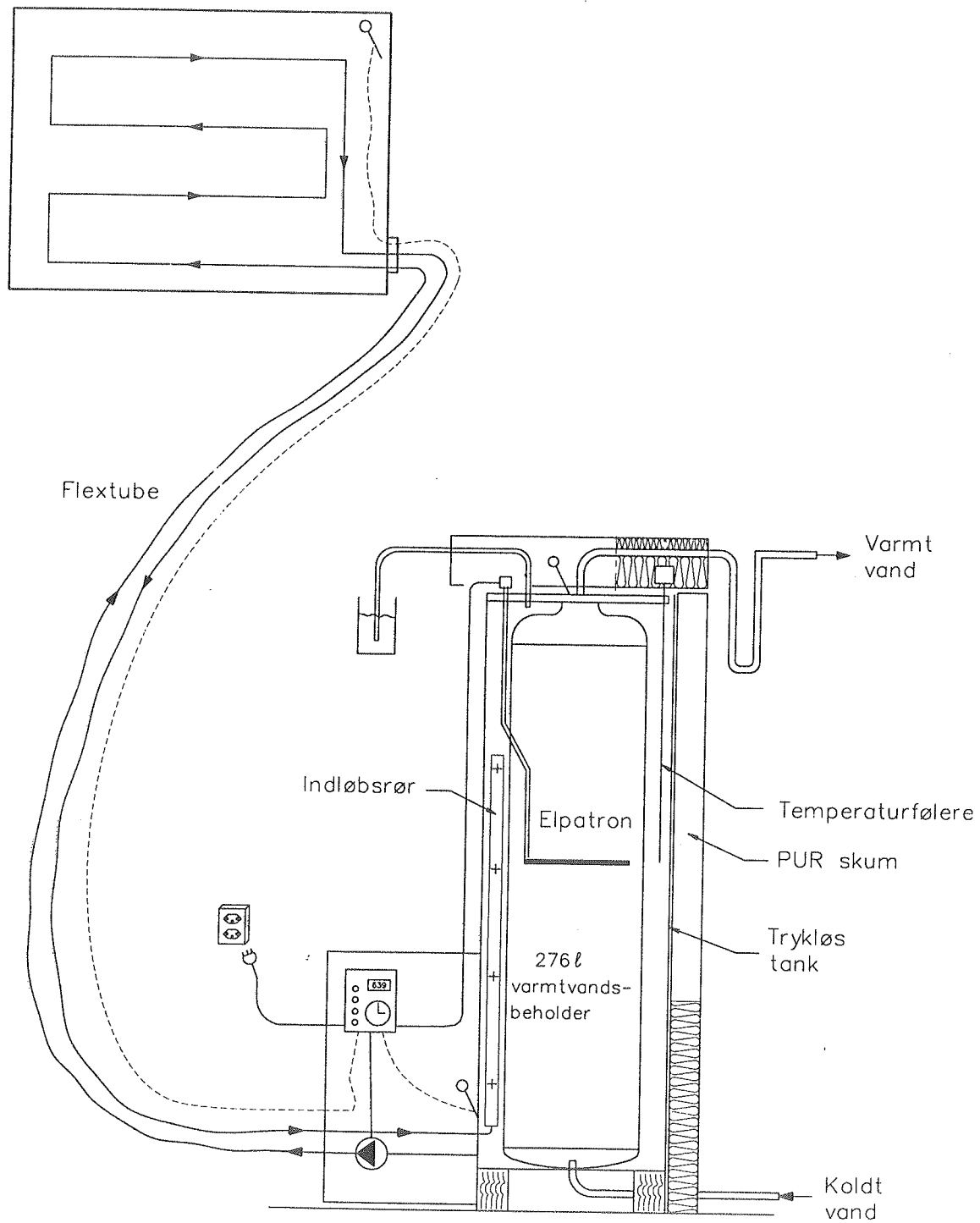
Figur 16 viser en principskitse af det afprøvede solvarmeanlæg. Som solfangervæske benyttes en 25% (vægt) ethylenglycol/vand blanding. Solfangerkredsen er åben, idet en plastslange fra toppen af den trykløse tank føres ud til en opsamlingsbeholder. Den øverste del af den trykløse tank optager derfor solfangervæskens udvidelse i solrige perioder. Højdeforskellen mellem forsøgsbygningens gulv, hvorpå varmelageret står, og toppen af solfangerelementet er ca. 6 m.

Cirkulationspumpen er en membran-pumpe. Pumpens maksimale volumenstrøm i en rørkreds uden tryktab er ca. 1,5 l/min, og pumpen sørger for cirkulation i rørkredsen så længe tryktabet ikke overstiger ca 41 m VS. Pumpens effektforbrug blev målt til 40 W. Volumenstrømmen i solfangerkredsen blev målt til ca. 0,8 l/min.

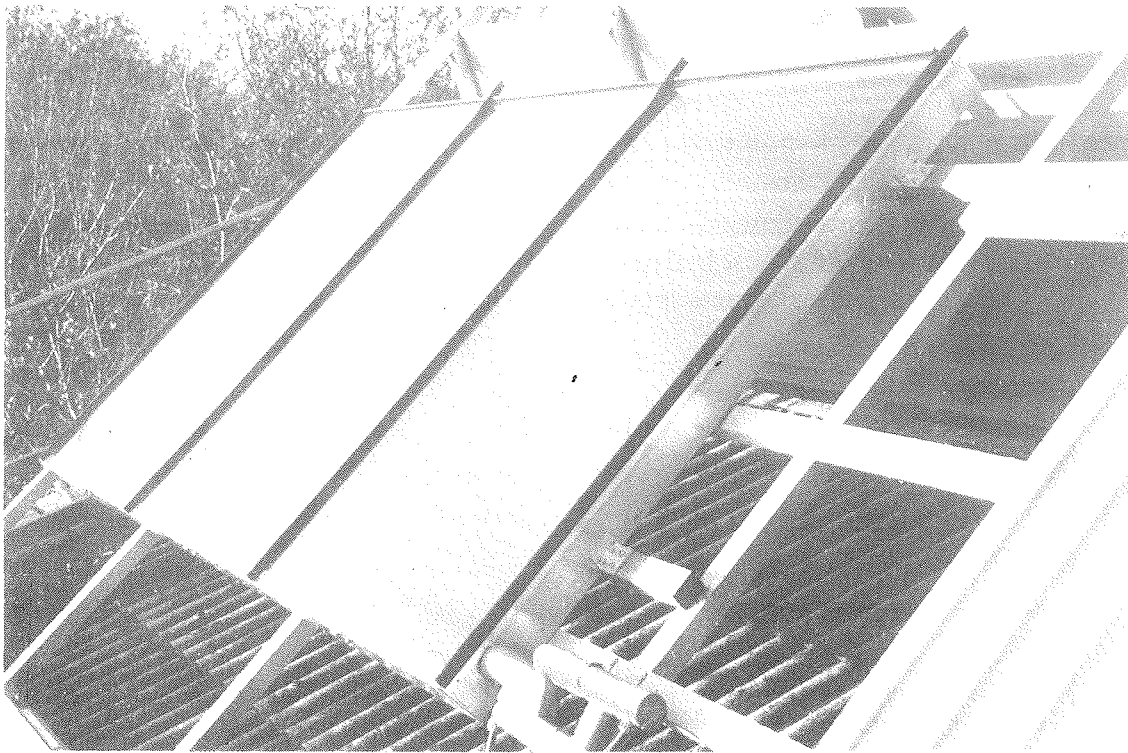
Styresystemet er et differenstermostatstyresystem med temperaturfølere i solfangeren og i bunden af den trykløse tank. Såvel start- som stoptemperaturdifferensen kan indstilles som det ønskes i intervallet fra 0 K til 20 K. Starttemperaturdifferensen er forindstillet til 5 K og stoptemperaturdifferensen til 2 K. Desuden stopper styresystemet pumpen hvis temperaturen i solfangeren overstiger 100°C . I sådanne solrige perioder uden varmtvandsforbrug fordamper solfangerens 1,5 l solfangervæske og presses gennem flextuben ned i den trykløse tank, hvor dampen kondenseres. Da pumpen ikke fører ny solfangervæske op i solfangeren forbliver solfangeren tom indtil solfangerens temperatur er faldet til 95°C , hvor styresystemet igen tillader pumpen at cirkulere solfangervæsken.

Som nævnt i afsnit 2.3 kan styresystemet ved hjælp af temperaturfølerne for den trykløse tank endvidere sørge for, at varmelagerets elpatron kun opvarmer toppen af varmelageret, når varmeindholdet i den øverste halvdel af varmelageret er mindre end en på forhånd bestemt størrelse. Denne mulighed er dog ikke benyttet under afprøvningen. Elpatronen sørgede under afprøvningen for, at temperaturen i den trykløse tank ud for elpatronen ikke blev lavere end 50°C . Styresystemets effektforbrug blev målt til 2,1 W.

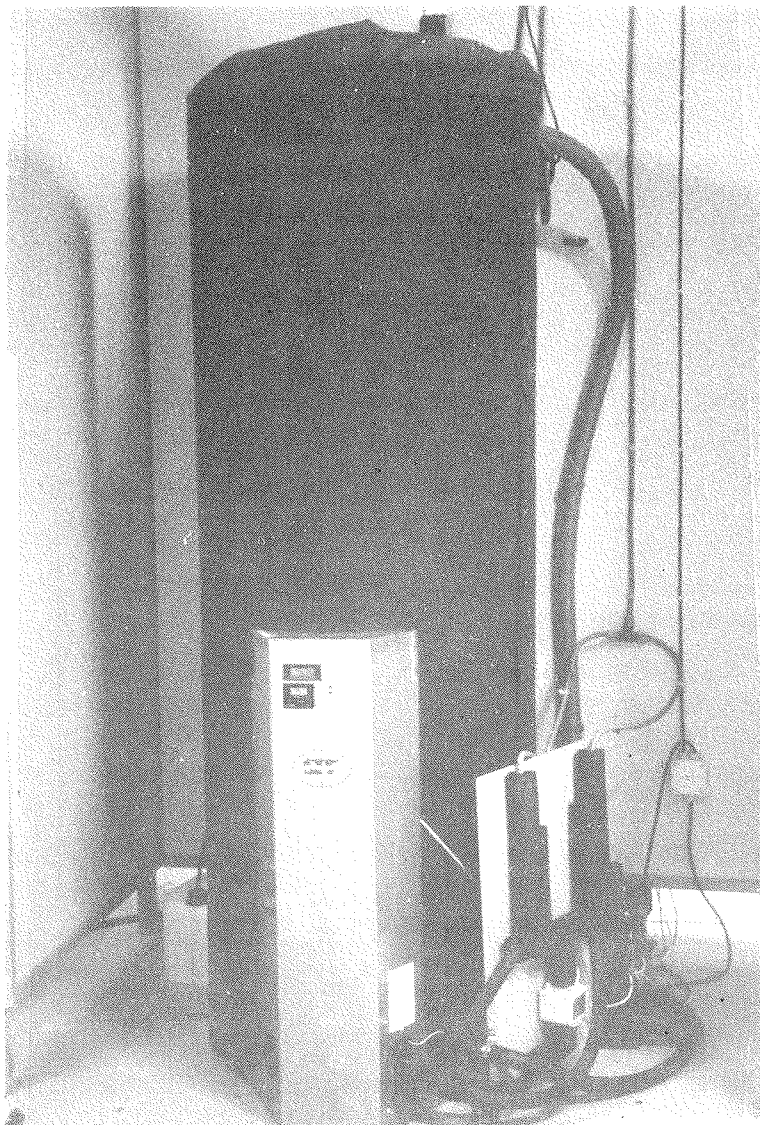
Figur 17 og 18 viser fotos af anlæggets solfanger og varmelager med styresystemet.



Figur 16. Principskitse af det afprøvede solvarmeanlæg.



Figur 17. Det afprøvede solvarmeanlægs solfangerelement på solfangerstativet.



Figur 18. Solvarmeanlæggets varmelager og styresystem.

Temperaturerne måles med termoelementer af kobber-konstantan, type TT. Varmelagerets termoelementer er placeret i en glasstav i varmtvandsbeholderen og udvendigt på den trykløse tank under isoleringsmaterialet.

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

Elpatronens energiforbrug blev målt ved hjælp af en kWh måler.

Vejrdata måles som angivet i [9], 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. Ved den enkelte tapning tappes der en energimængde på 2 kWh, svarende til 50 l vand opvarmet fra ca. 10°C til ca. 45°C.

Som nævnt i afsnit 3.1 er elpatronens termostat indstillet således, at elpatronen opvarmer toppen af varmelageret til ca. 50°C.

3.3 Målte og beregnede ydelser samt driftserfaringer

Der foreligger målinger på anlægget fra 1. november 1994 til 30. juni 1995. Tabel 10 angiver målte tappede vandmængder og energimængder for anlægget.

Måned	Antal dage med måling	Tappet vandmængde l	Bruttoydelse kWh	Nettoydelse kWh
November 94	30	5017	54	23
December 94	17	2702	15	0
Januar 95	26	3967	59	32
Februar 95	22	3197	50	37
Marts 95	-	-	-	-
April 95	30	3998	221	179
Maj 95	31	3984	267	218
Juni 95	30	4406	232	200

Tabel 10. Målte ydelser.

Bruttoydelsen er energimængden overført fra solfangerkredsen til varmelageret, mens nettoydelsen er den udnyttede solvarme, d.v.s. brugsvandsforbruget - energien til varmelagerets elpatron.

Den i [22] og [23] udviklede og validerede beregningsmodel for low flow anlæg baseret på en kappebeholder blev benyttet til at beregne solvarmeanlæggets ydelse. Varmelageret adskiller sig fra en kappebeholder ved at solfangervæsken tilføres "kappen" gennem indløbsrøret. Indløbsrøret sikrer, at solfangervæsken føres ind i varmelageret omtrent i det niveau, hvor solvarmen kan opvarme brugsvandet. Dette gælder specielt, når fremløbstemperaturen til varmelageret er forholdsvis lav. Temperaturlagdelingen i varmelageret opretholdes herved på en bedre måde end i en kappebeholder i perioder med forholdsvis lave fremløbstemperaturer til varmelageret, dvs. om eftermiddagen eller i overskyet vejr. I solrige perioder med forholdsvis høje fremløbstemperaturer til varmelageret opbygges temperaturlagdelingen i varmelageret til gengæld ikke lige så godt som i en kappebeholder. I modellen antager varmeoverføringskoefficienten mellem kappen og varmtvandsbeholderen forskellige størrelser i afhængighed af den vertikale afstand fra kappens top og af driftsbetingelserne. Størrelserne af varmeoverføringskoefficienterne mellem "kappen" og varmtvandsbeholderen blev i modellen ændret, så der er en god overensstemmelse mellem målte og beregnede temperaturer for de tre opvarmningsforløb og for det dynamiske forsøg omtalt i afsnit 2.3.

De ved komponentafprøvningerne bestemte karakteristika for solfangeren, for flexluben og for varmelageret blev benyttet som input for modellen.

Solfangerens effektivitetsligning bør korrigeres til en gennemsnitlig vindhastighed på ca. 2 m/s. Desuden kræver modellen, at effektivitetsudtrykket er lineariseret. Beregninger viste, at der opnås en god overensstemmelse mellem målte og beregnede ydelser og temperaturer, hvis følgende effektivitetsligning benyttes:

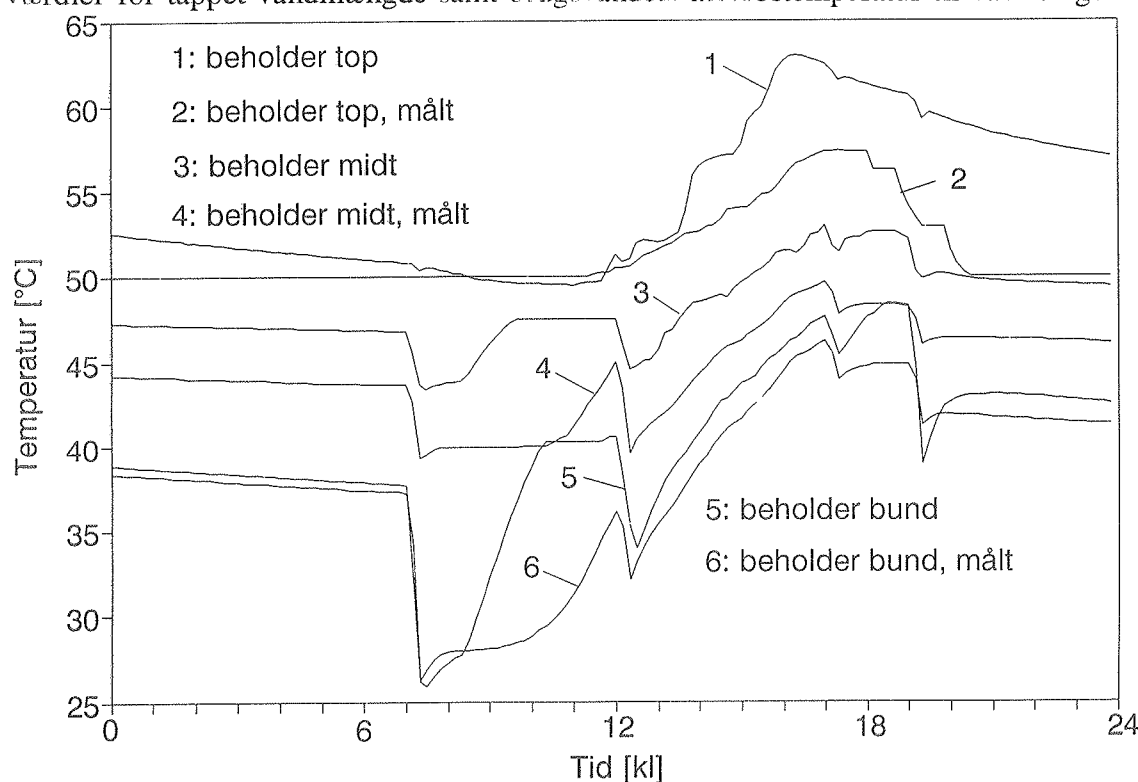
$$\eta = 0,79 - 4,60 \cdot (T_m - T_a)/G$$

Modellen er ikke i stand til at simulere forholdene for anlægget helt korrekt. For eksempel kan det nævnes, at:

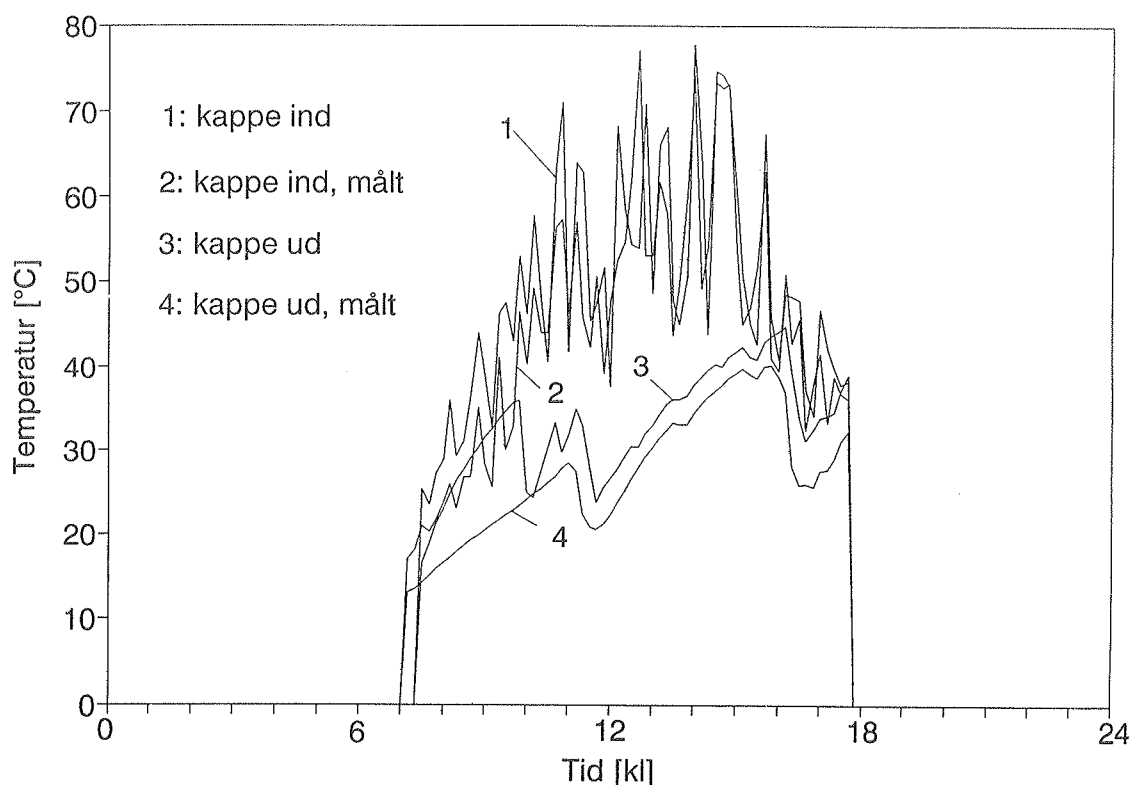
- der regnes med et konstant flow i solfangerkredsen på 0,8 l/min, selv om flowet i virkeligheden har varieret mellem 0,6 l/min og 1,0 l/min.
- der regnes med konstante varmetabskoefficienter for flexlubens varme og kolde slange på henholdsvis 0,14 W/K pr. m slange og 0 W/K pr. m slange, selv om varmetabskoefficienterne i virkeligheden varierer efter driftsforholdene som angivet på figur 7 og 8.

Anlæggets ydelse er beregnet i to måleperioder, en solfattig periode med en varighed på 7 døgn fra den 13. februar 1995 til den 19. februar 1995 og en solrig periode med en varighed på 15 døgn fra den 15. maj 1995 til den 29. maj 1995.

Temperaturer og ydelser er beregnet ved hjælp af målte 10 minutters værdier for solindfaldet på solfangeren og målte værdier for ude- og indetemperaturen. Endvidere er benyttet de målte værdier for tappet vandmængde samt brugsvandets indløbstemperatur til varmelageret.



Figur 20. Beregnede og målte temperaturer i varmtvandsbeholderen den 16. maj 1995.



Figur 21. Beregnede og målte fremløbstemperaturer til og returtemperaturer fra varmelageret i perioden med pumpedrift den 16. maj 1995.

Figur 20 viser for den 16. maj 1995 målte og beregnede temperaturer i varmtvandsbeholderen, og figur 21 viser for samme dag målte og beregnede temperaturer i solfangerkredsen i perioden med pumpen i drift. De temperaturkurver, som ikke er angivet med "målt" er beregnede. Det vurderes, at der er en rimelig god overensstemmelse mellem målte og beregnede temperaturer. Tabel 11 og 12 angiver målte og beregnede ydelser for anlægget i de to måleperioder.

Energimængde	Målt kWh	Beregnet kWh	Forskel	
			kWh	%
Tappet varmt vand	52,4	51,5	0,9	2
Solvarme tilført varmelageret	15,5	13,7	1,8	12
Tilført supplerende energi	43,6	42,4	1,2	3
Nettoydelse	8,8	9,1	-0,3	-3

Tabel 11. Målte og beregnede energimængder i perioden 13. februar 1995 - 19. februar 1995.

Energimængde	Målt kWh	Beregnet kWh	Forskel	
			kWh	%
Tappet varmt vand	116	111	5	4
Solvarme tilført varmelageret	145	135	10	7
Tilført supplerende energi	10	11	-1	-10
Nettoydelse	106	100	6	6

Tabel 12. Målte og beregnede energimængder i perioden 15. maj 1995 - 29. maj 1995.

Nettoydelsen er den tappede energimængde – den supplerende energi.

Det ses, at forskellen mellem målte og beregnede energimængder er små for begge perioder.

I betragtning af måleusikkerheder på op til 5% og en beregningsusikkerhed, der afhænger af hvor præcist modellen beskriver anlægget, vurderes det, at der er en rimelig god overensstemmelse mellem målinger og beregninger.

I forbindelse med afprøvningen optrådte der et alvorligt problem den 24. februar 1995, idet der pludselig opstod et lille hul i en af flextubens silikoneslanger. Lækagen opstod i den del af flextuben, som er placeret tæt på cirkulationspumpen mellem varmelagerets isolering og styresystemets panel. Desværre var hullet placeret således, at pumpen med stor kraft sprøjtede solfangervæske direkte over på pumpen. Herved blev pumpen helt våd, og efter ca. 1 time brændte pumpen af. En ny pumpe blev rekvireret fra Schweiz. Desværre var der lang leveringstid, og den nye pumpe blev derfor først installeret i anlægget den 27. marts 1995. Der blev derfor ikke målt på anlægget i perioden fra den 24. februar til den 27. marts 1995.

Siden den 27. marts 1995 har der ikke været problemer med flextuben. Årsagen til at hullet opstod kendes ikke, men sandsynligvis drejer det sig om en fabrikationsfejl for silikoneslangen. I Schweiz er der siden 1993 opført mere end 200 Solkit anlæg, uden at der er opstået problemer med flextuben.

Som nævnt var styresystemets starttemperaturdifferens og stoptemperaturdifferens forindstillet til henholdsvis 5 K og 2 K. Det blev konstateret, at disse forindstillinger bevirker, at pumpen ikke udelukkende er i drift i perioder, hvor solfangeren producerer varme. Pumpens driftstid er derfor unødvendig stor. Ydelsesmæssigt har dette dog ingen nævneværdig betydning, idet solfangervæsken i perioder uden solvarmeproduktion udelukkende cirkuleres gennem den nederste del af den trykløse tank. Der pumpes derfor ikke ret meget varme fra varmelageret ud i solfangerkredsen.

I øvrigt blev der under afprøvningen ikke konstateret flere driftsproblemer eller fejl ved anlægget.

3.4 Beregnet årsydelse

Anlæggets årsydelse med referenceårets vejrdata er beregnet med beregningsmodellen. 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. 7⁰⁰, kl. 12⁰⁰ og kl. 20⁰⁰.

Anlæggets beregnede årsydelse og tilskudsydelse er angivet i tabel 13. Tilskudsydelsen er nettoydelsen – elforbruget til pumpen + 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.

Periode	Varmtvandsforbrug kWh	Solindfald kWh	Bruttoydelse kWh	Nettoydelse kWh
Januar	252	118	45	21
Februar	228	260	106	82
Marts	252	328	127	102
April	244	585	231	180
Maj	252	687	269	231
Juni	244	769	285	231
Juli	252	685	276	234
August	252	652	277	229
September	244	467	219	189
Oktober	252	300	139	115
November	243	169	77	56
December	252	150	67	46
I alt	2970	5169	2118	1716
Beregnet Tilskudsydelse	1728			

Tabel 13. Anlæggets beregnede årsydelse.

Med den opstillede beregningsmodel blev der desuden udført en beregning af ydelsen for anlægget, hvis det var baseret på en kappebeholder. Kappebeholderen har samme udformning som Solkitanlæggets varmelager, dog er "kappen" ikke forsynet med et indløbsrør og solfangervæsken fra solfangeren føres altid ind i toppen af "kappen".

Den fordelagtige temperaturlagdeling i kappebeholderen opretholdes ikke i samme omfang som i varmelageret med indløbsrøret om eftermiddagen og i solfattige perioder.

Beregningerne viste, at Solkitanlæggets ydelse reduceres med ca. 10% hvis varmelageret erstattes af en kappebeholder.

4. ÅRSYDELSER FOR FORSKELLIGE AFPRØVEDE SOLVARMEANLÆG

Solkitanlægget blev afprøvet i prøvestanden under realistiske prøvningsbetingelser i perioden november 1994 - juni 1995. Som nævnt er der tidligere afprøvet 7 andre markedsførte solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning på samme måde [20], [21], [6]. De bestemte anlægsydelser for de 8 afprøvede anlæg er angivet i tabel 14. Nettoydelsen er den tappede fra varmelageret — energien til den supplerende energikilde.

Egnetheden af de forskellige anlæg bestemmes af anlæggenes ydelser, priser og statstilskud. Solkitanlægget yder mere end de øvrige anlæg. Forskellene mellem de årlige ydelser for de 8 anlæg er dog forholdsvis små. Det er vanskeligt umiddelbart at vurdere, om ydelsen af hvert enkelt anlæg er så stor, som det kan forventes, idet såvel solfangerareal som solfangereffektivitet varierer fra anlæg til anlæg. Figur 22 viser målte solfangereffektiviteter for de 8 anlægs solfangere.

Figur 23 viser den årlige nettoydelse pr. m^2 solfanger som funktion af dækningsgraden for de 8 afprøvede anlæg. Dækningsgraden er forholdet mellem nettoydelsen og varmtvandsenergiforbruget. Det ses, at forskellene mellem nettoydelse pr. m^2 solfanger for de 5 danske anlæg og det canadiske anlæg er små. Det hollandske anlæg og Solkitanlægget har de største nettoydelse pr. m^2 solfanger.

Ydelserne af forskellige "standard" solvarmeanlæg blev beregnet. Herved er det muligt at sammenligne ydelserne for de 8 afprøvede anlæg med ydelserne af forskellige standard anlæg.

Figur 24-27 viser nettoydelse pr. m^2 solfanger for de 8 afprøvede anlæg, og beregnede nettoydelse pr. m^2 solfanger for standard solvarmeanlæg, med to forskellige solfangertyper: Solfangeren med den ringeste effektivitet og en solfanger med en af de højeste effektiviteter. De to solfangere, som blev taget i beregning er LF4 solfangerelementet fra Aidt Miljø og ST solfangerelementet fra Arcon.

Kurverne i figurerne angiver altså beregnede ydelser for standardanlæggene. Beregningerne er udført med et dagligt varmtvandsforbrug på 200 l. Kurverne er fremkommet ved i beregningerne, at variere solfangerarealet.

Standardanlægget, som er taget i beregning på figur 24, er et normalt dansk anlæg med en velisoleret 295 l varmtvandsbeholder med en indbygget varmevekslerspiral i bunden af beholderen. Solfangervæsken cirkuleres gennem solfangerkredsen med et normalt flow på 1 l/min pr. m^2 . De øverste 49 l af beholderen er opvarmet af den supplerende energikilde. Af figur 24 ses det, at ydelserne af de 5 danske anlæg og det canadiske anlæg er forholdsvis små. Ydelserne af det hollandske anlæg og af Solkitanlægget er derimod forholdsvis høje.

Figur 25 viser forholdene for det samme standardanlæg. Blot er varmtvandsbeholderen nu forsynet med en kuldebro på 1 W/K i toppen af beholderen. Sådan en kuldebro reducerer anlægsydelsen stærkt. De fleste af de afprøvede anlægs varmelagre har forholdsvis store varmetab. Dette er hovedårsagen til de forholdsvis små anlægsydelser.

Standardanlægget i figur 26 er identisk med standardanlægget fra figur 24 bortset fra, at toppen af varmtvandsbeholderen ikke opvarmes af den supplerende energikilde. Der er altså

tale om et forvarmeanlæg. Herved forøges anlægsydelse. Som det fremgår af tabel 14 er det canadiske anlæg det eneste af de afprøvede anlæg som er et forvarmeanlæg.

Standardanlægget i figur 27 er et normalt low flow anlæg baseret på en kappebeholder. Anlægsydelsen forøges ved anvendelse af low flow princippet. Da Solkitanlægget er et low flow anlæg med en højeffektiv solfanger og et varmelager uden store kuldebroer i toppen, må det forventes, at anlægsydelsen er forholdsvis høj. Hovedårsagen til at Solkitanlæggets ydelse er mindre end ydelsen af low flow standardanlægget med den højeffektive solfanger er, at elpatronen i Solkitanlæggets varmelager er placeret så lavt, at elpatronen opvarmer den øverste halvdel af varmelageret.

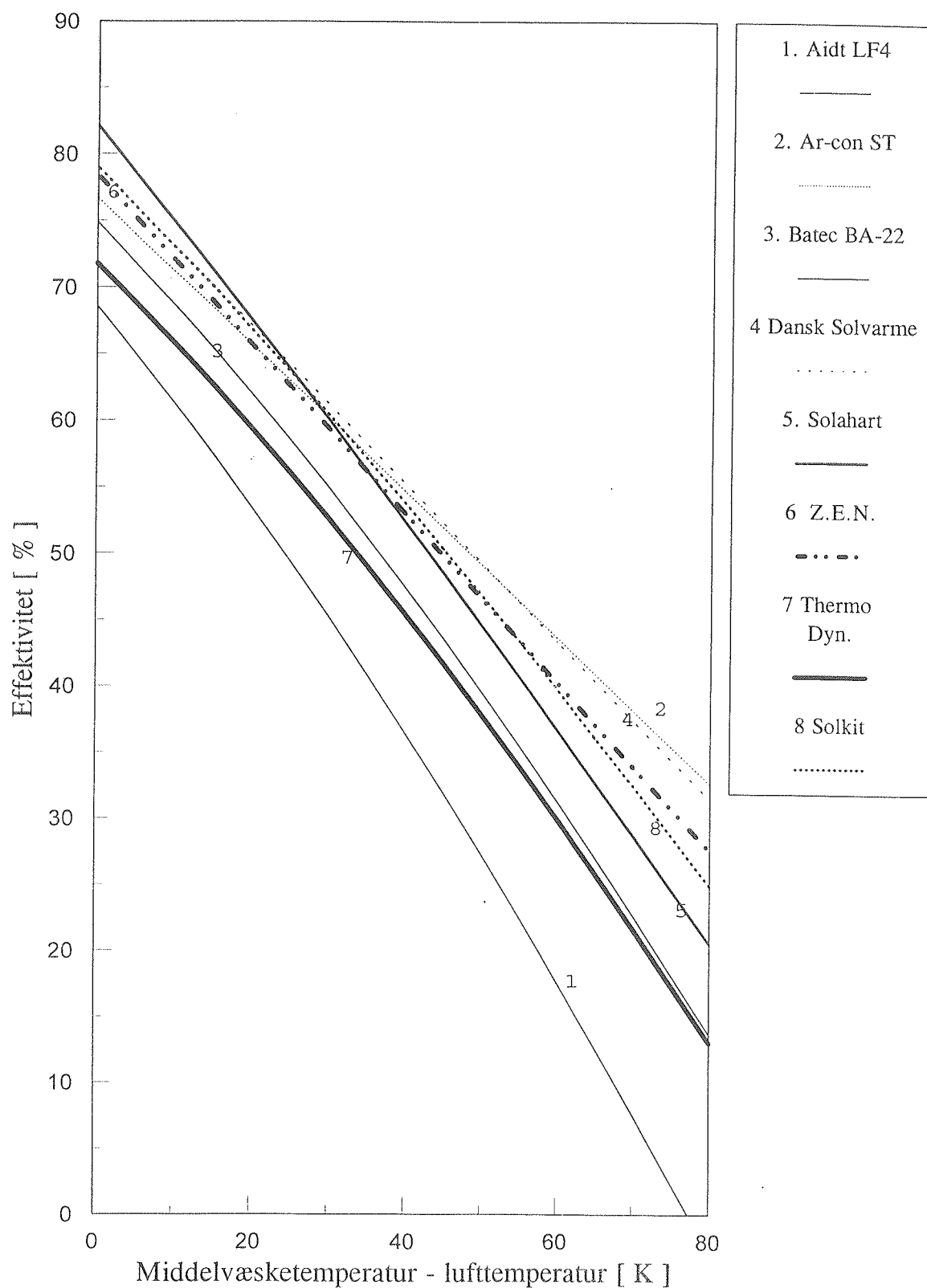
Solvarmeanlæg	Aidt Miljø	Dansk Solvarme	Batec	Arcon	Solahart Scandinavia	Thermo Dynamics Ltd. Canada	ZEN B. V. Holland	Solkit Schweiz
Solfangerareal	4,83 m ²	4,00 m ²	4,38 m ²	5,02 m ²	5,55 m ²	5,56 m ²	2,70 m ²	4,36 m ²
Lagervolumen og lagertype	265 l kappebeholder	290 l varmtvandsbeholder med indbygget varmevekslerspiral	295 l varmtvandsbeholder med indbygget varmevekslerspiral	250 l varmtvandsbeholder med indbygget varmevekslerspiral	280 l varmtvandsbeholder med indbygget varmevekslerspiral	270 l varmtvandsbeholder med en ekstern varmeveksler	255 l varmelager: 115 l forvarmetank med indbygget varmevekslerspiral 120 l eftervarmetank 20 l tømmetank	405 l varmelager: 276 l varmtvandsbeholder 129 l trykløst tank
Supplerende energikilde i varmelageret	Elpatron og varmevekslerspiral	Elpatron og varmevekslerspiral	Elpatron og varmevekslerspiral	Elpatron og varmevekslerspiral	Elpatron og varmevekslerspiral		Elpatron	Elpatron
Low flow?	Ja	Nej	Nej	Nej	Nej	Ja	Nej	Ja
Nettoydelse kWh/år	1455	1353	1453	1595	1471	1643	1308	1716
Dækningsgrad %	49,4	46,0	49,4	54,2	50,0	55,8	44,4	57,8
Pumpeenergi kWh/år	52	132	126	89	47	85	76	98
Beregnet tilskudsydelse kWh/år	1703	1521	1627	1806	1724	1558	1342	1728
Statstilskud kr.	8515	7605	8135	9030	8620	7790	6710	8640

Tabel 14. Anlægsydelse for 8 afprøvede solvarmeanlæg.

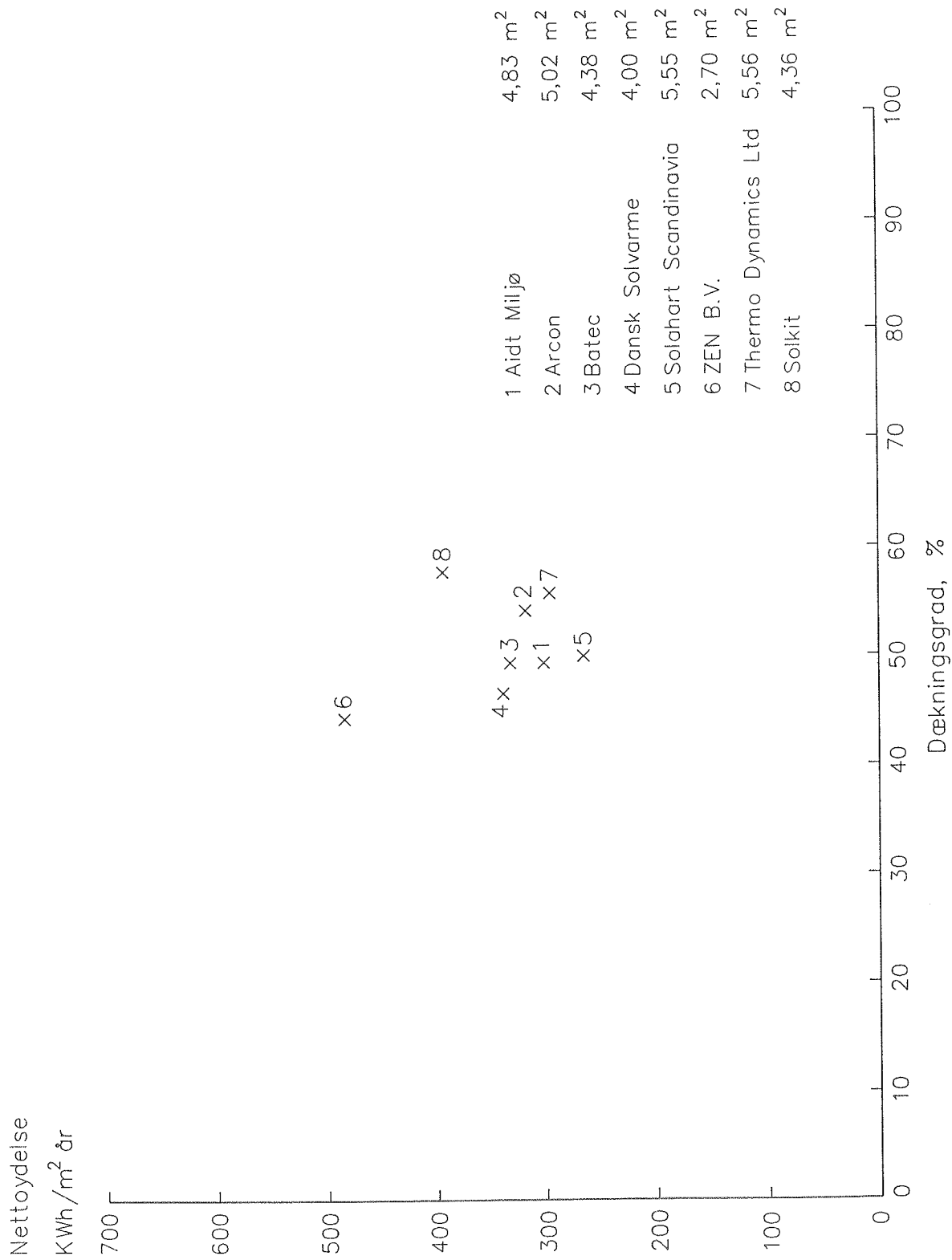
Effektivitetskurver ved en bestrålingsstyrke på

$G = 800 \text{ W/m}^2$

40

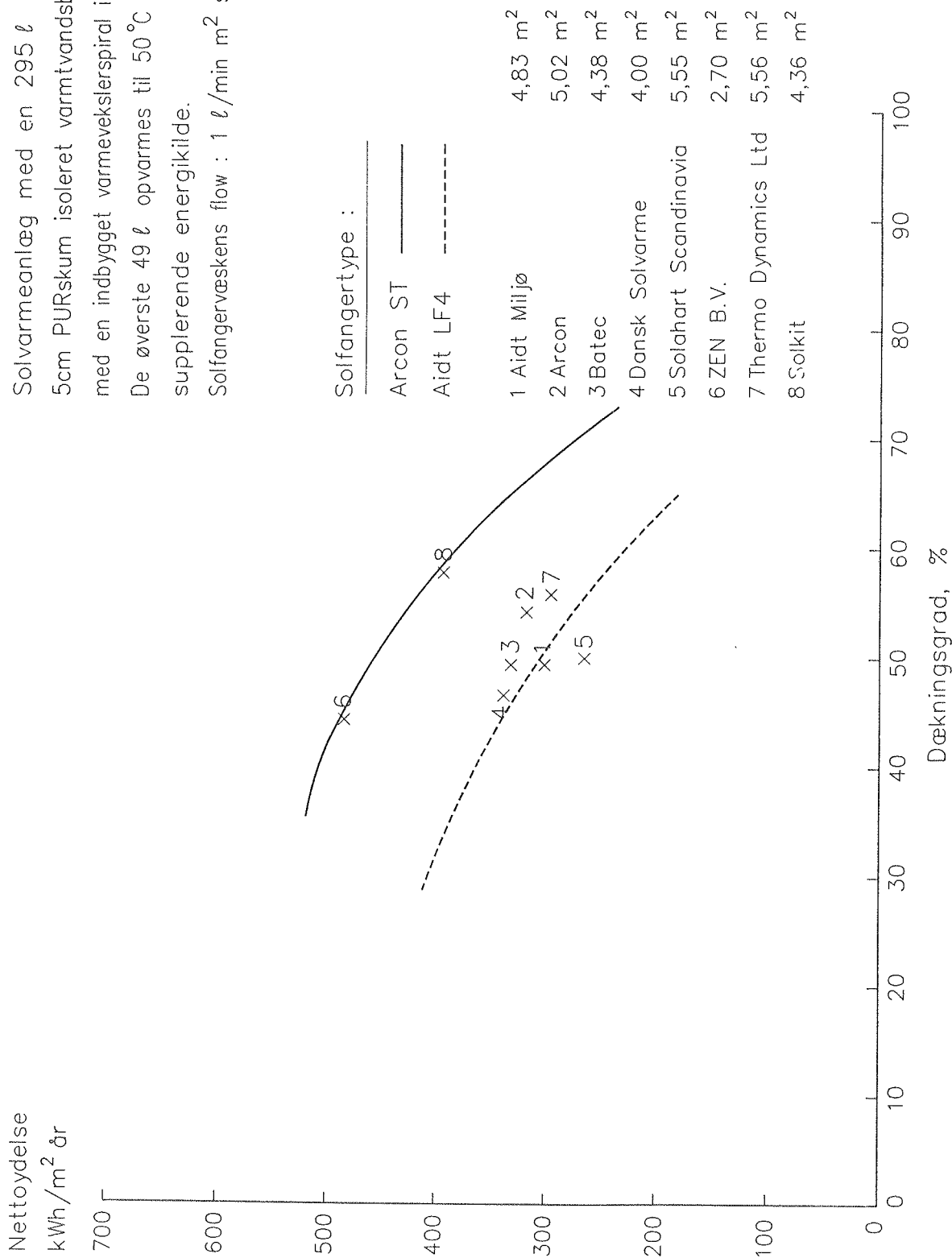


Figur 22. Målte solfangereffektiviteter for 8 solfangere ved en bestrålingsstyrke på 800 W/m² som funktion af forskellen mellem middelsolfangervæsketemperaturen og lufttemperaturen.



Figur 23. Årlig nettoydelse pr. m² solfanger som funktion af dækningsgraden for 8 afprøvede solvarmeanlæg.

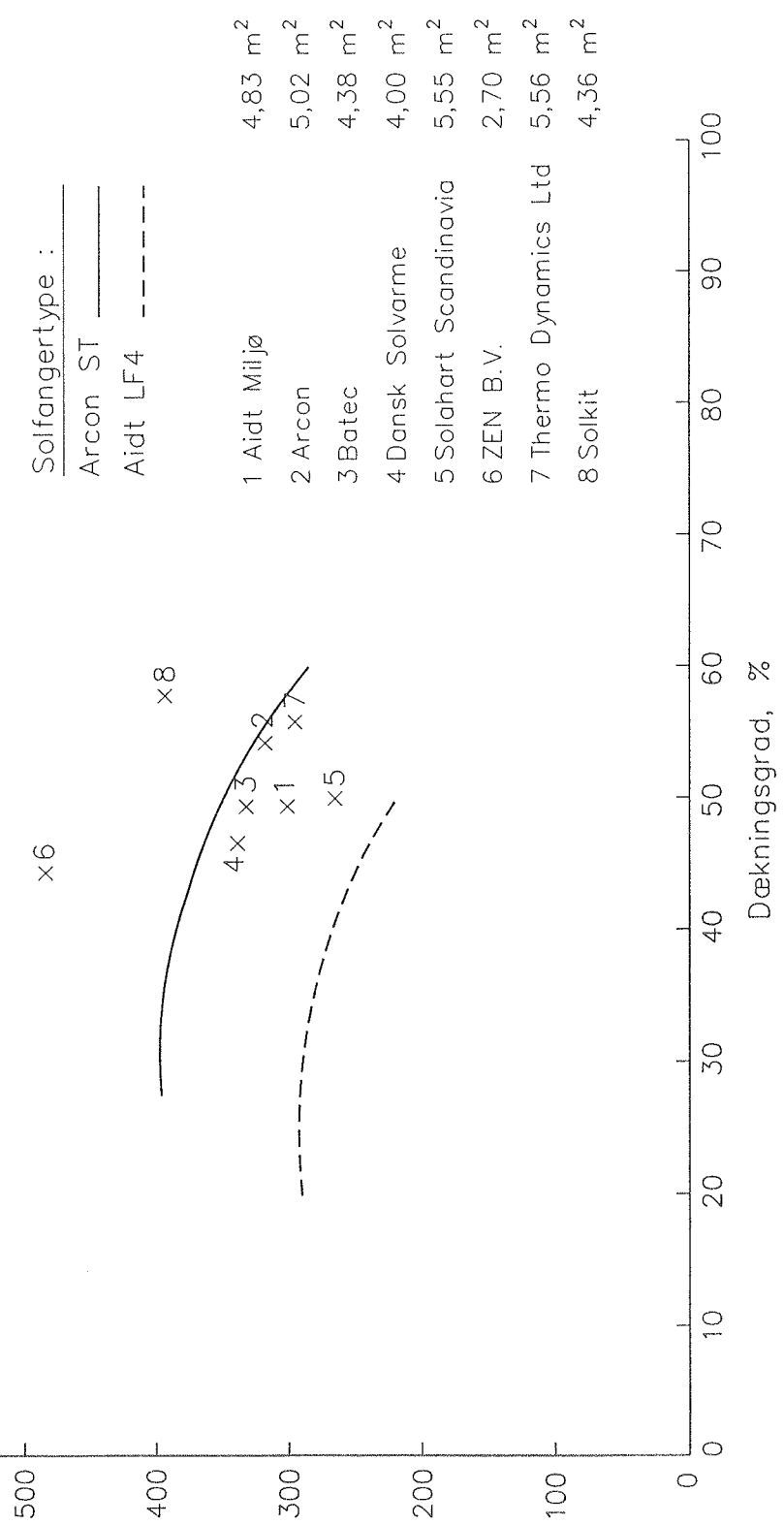
Solvarmeanlæg med en 295 l
5cm PURskum isoleret varmtvandsbeholder
med en indbygget varmevekslerspiral i bunden.
De øverste 49 l opvarmes til 50 °C af den
supplerende energikilde.
Solfangervæskens flow : 1 l/min m² solfanger.



Figur 24. Årlig nettoydelse pr. m² solfanger for 8 afprøvede solvarmeanlæg og beregnede årlige nettoydelse pr. m² solfanger for reference-solvarmeanlæg med en varmtvandsbeholder med en indbygget varmevekslerspiral i bunden af beholderen som funktion af dækningsgraden.

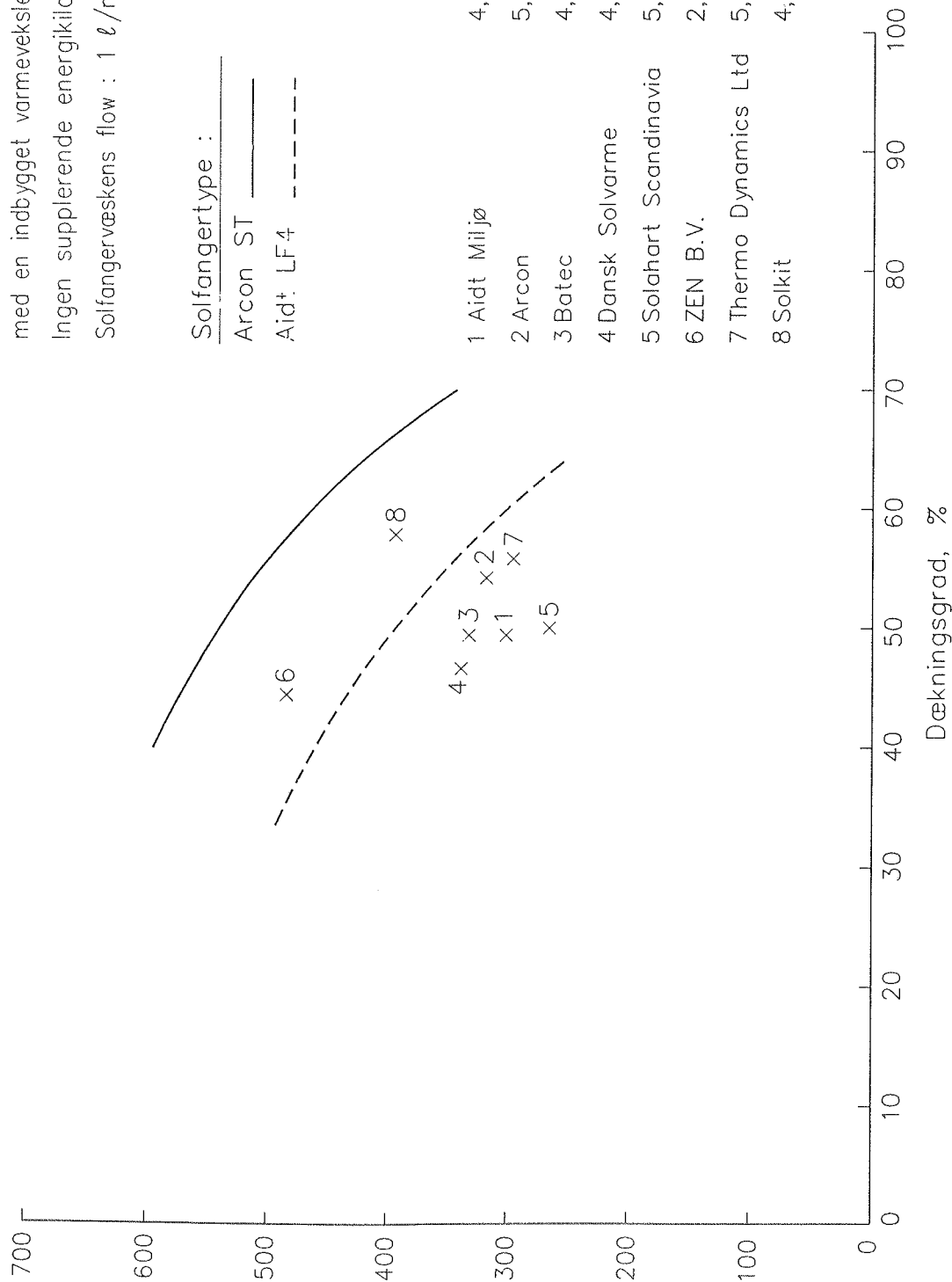
Nettoydelse
kWh/m² år

Solvarmeanlæg med en 295 l
5cm PURskum isoleret varmtvandsbeholder
med en indbygget varmevekslerspiral i bunden.
Kuldebro i toppen af beholder : 1 W/K
De øverste 49 l opvarmes til 50 °C af den
supplerende energikilde.
Solfangervæskens flow : 1 l/min m² solfanger.



Figur. 25 Årlig nettoydelse pr. m² solfanger for 8 afprøvede solvarmeanlæg og beregnede årlige nettoydelse pr. m² solfanger for solvarmeanlæg med en varmtvandsbeholder med en indbygget varmevekslerspiral i bunden af beholderen og en kuldebro på 1 W/K i toppen af beholderen som funktion af dækningsgraden.

Nettoyedelse
kWh/m² år



Solvarmeanlæg med en 295 l
5cm PURskum isoleret varmtvandsbeholder
med en indbygget varmevekslerspiral i bunden.
Ingen supplerende energikilde i beholderen.
Solfangervæskens flow : 1 l/min m² solfanger.

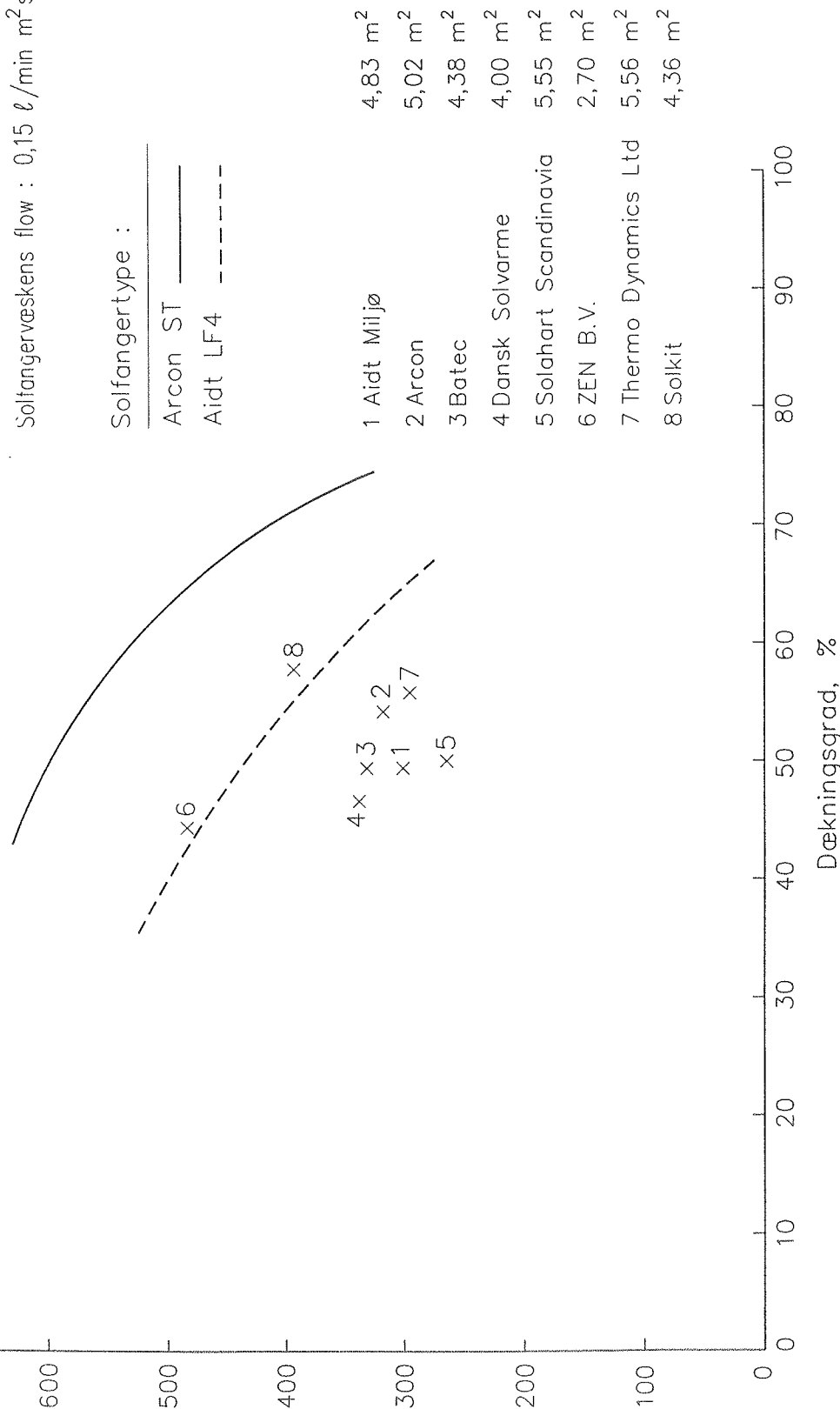
Solfangertype :
Arcon ST
Aid+ LF4

Figur 26. Årlig nettoyedelse pr. m² solfanger for 8 afprøvede solvarmeanlæg og beregnede årlige nettoyedelser pr. m² solfanger for solvarmeanlæg med en varmtvandsbeholder med en indbygget varmevekslerspiral i bunden af beholderen og uden supplerende energikilder i beholderen som funktion af dækningsgraden.

Solvarmeanlæg med en 295 l
 5cm PURskum isoleret kappebeholder.
 De øverste 49l opvarmes til 50°C af den
 supplerende energikilde.
 Solfangervæskens flow : 0,15 l/min m² solfanger.

Solfangertype :

Arcon ST ———
 Aidt LF4 - - - - -



Figur 27. Årlige nettoydelse pr. m² solfanger for 8 afprøvede solvarmeanlæg og beregnede årlige nettoydelse pr. m² solfanger for low
 flow solvarmeanlæg med en kappebeholder som funktion af dækningsgraden.

5. KONKLUSION

Der er gennemført undersøgelser af Solkitanlægget, som er et solvarmeanlæg til brugs-
vandsopvarmning.

Anlægget, som har et solfangerareal på 4,36 m², markedsføres i Schweiz og Tyskland af
firmaet Bürgele-Krismer Solartechnik. Anlægget er lidt dyrere end danske markedsførte
solvarmeanlæg af samme størrelse.

Anlægget er designet efter low flow princippet.

Anlæggets komponenter er afprøvet i indendørs prøvestande, og anlægget er afprøvet i en
prøvestand under de samme forhold, som 7 markedsførte solvarmeanlæg tidligere er blevet
afprøvet under.

Undersøgelserne viste, at solfangerens effektivitet er høj, og at anlæggets flexible solfanger-
kreds, som muliggør en reduktion af installationsomkostningerne, har gode termiske
egenskaber. Undersøgelserne viste desuden, at varmelageret har en udmærket udformning,
som i kombination med low flow princippet resulterer i, at der opbygges en stor temperatur-
lagdeling i varmelageret under driften.

På trods af det forholdsvis lille solfangerareal er anlægsydelsen større end anlægsydelse
for alle solvarmeanlæg, som tidligere er afprøvet i prøvestanden.

Årsagen til den høje ydelse er først og fremmest anvendelsen af low flow princippet og af
varmelageret med den store fordelagtige temperaturlagdeling.

Det må konkluderes, at Solkitanlægget er velegnet til danske forhold. Dog skal det bemærkes,
at den anvendte solfangervæske, en ethylenglycol/vand-blanding, ikke er godkendt som
solfangervæske i Danmark. Endvidere synes varmelageret, og navnlig den del af varme-
lageret, som opvarmes af elpatronen, at være for stort i forhold til de beskedne varmtvands-
forbrug, som er normale i Danmark. Hvis beholdervolumenet reduceres, er der samtidig
mulighed for at reducere anlæggets pris, så prisen når ned på et niveau, som svarer til prisen
for danske markedsførte solvarmeanlæg. I denne forbindelse skal det nævnes, at Bürgele-
Krismer Solartechnik er i gang med at videreudvikle og billiggøre anlægget. Blandt andet
arbejdes der med at reducere lagervolumenet og med at billiggøre cirkulationspumpen og
flexturen.

REFERENCER

- [1] "Das thermische Sonnenenergiesystem für die Brauchwassererwärmung im Einfamilienhaus! Solkit. Technische Beschreibung. Eine Aktion des Programms Energie 2000 des Bundesamtes für Energiewirtschaft". SPF-ITR, Solarenergie Prüf-und Forschungsstelle, Rapperswil, Switzerland, 1994.
- [2] "Solar Simulator Test Facility". S. Svendsen, Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Fra Proceedings: "North Sun' 92 Solar Energy at High Latitudes". Trondheim, Norge, juni 1992.
- [3] "Solar Collectors - Part 1: Methods of test for the thermal Performance of Liquid Heating Collectors". ISO/DIS 9806-1, International Organization for Standardization, 1991.
- [4] "Low flow test procedure and results". S. Svendsen, Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Rapport nr. 92-22, august 1992.
- [5] "Optimal udformning af low flow solvarmeanlæg". Simon Furbo. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Meddelelse nr. 238, december 1992.
- [6] "Undersøgelse af solvarmeanlæg fra Thermo Dynamics Ltd". Simon Furbo og Klaus Ellehauge. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Meddelelse nr. 260, maj 1994.
- [7] "Varmelagring til solvarmeanlæg" Simon Furbo. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Meddelelse nr. 162, september 1984.
- [8] "HEAT 2. A Heat Transfer PC-program". Thomas Blomberg. Department of Building Physics, Lund University, Sweden. April 1991.
- [9] "Små markedsførte solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning - funktionsafprøvning og ydelsesmålinger. Opbygning af prøvestand". Klaus Ellehauge. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Rapport nr. 93-37, december 1993.
- [10] "Små markedsførte solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning - funktionsafprøvning og ydelsesmålinger. Målinger på solvarmeanlæg fra Aidt Miljø A/S". Klaus Ellehauge. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Rapport nr. 93-43, december 1993.
- [11] "Små markedsførte solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning - funktionsafprøvning og ydelsesmålinger. Målinger på solvarmeanlæg fra Dansk Solvarme A/S". Klaus Ellehauge. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Rapport nr. 93-44, december 1993.
- [12] "Små markedsførte solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning - funktionsafprøvning og ydelsesmålinger. Målinger på solvarmeanlæg fra Batec Solvarme A/S". Klaus Ellehauge. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Rapport nr. 93-45, december 1993.
- [13] "Små markedsførte solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning - funktionsafprøvning og ydelsesmålinger. Målinger på solvarmeanlæg fra Ar-Con Solvarme A/S". Klaus Ellehauge. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Rapport nr. 93-46, december 1993.

- [14] "Små markedsførte solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning - funktionsafprøvning og ydelsesmålinger. Målinger på solvarmeanlæg fra Solahart Scandinavia ApS". Klaus Ellehauge. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Rapport nr. 93-47, december 1993.
- [15] "Afprøvning af solvarmeanlæg fra Aidt Miljø A/S, Ydelsesberegning". Søren Østergaard Jensen. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Rapport nr. 93-38, december 1993.
- [16] "Afprøvning af solvarmeanlæg fra Dansk Solvarme A/S, Ydelsesberegning". Søren Østergaard Jensen. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Rapport nr. 93-39, december 1993.
- [17] "Afprøvning af solvarmeanlæg fra Batec Solvarme A/S, Ydelsesberegning". Søren Østergaard Jensen. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Rapport nr. 93-40, december 1993.
- [18] "Afprøvning af solvarmeanlæg fra Ar-Con Solvarme A/S, Ydelsesberegning". Søren Østergaard Jensen. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Rapport nr. 93-41, december 1993.
- [19] "Afprøvning af solvarmeanlæg fra Solahart Scandinavia ApS, Ydelsesberegning". Søren Østergaard Jensen. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Rapport nr. 93-42, december 1993.
- [20] "Små markedsførte solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning - funktionsafprøvning og ydelsesmålinger. Sammenfatning af måle- og simuleringsresultater". Klaus Ellehauge. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Rapport nr. 94-12, marts 1994.
- [21] "Undersøgelse af solvarmeanlæg fra ZEN B.V." Simon Furbo og Klaus Ellehauge. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Meddelelse nr. 261, maj 1994.
- [22] "Højtydende solvarmeanlæg med små volumenstrømme. Teoretiske undersøgelser". Peter Berg. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Meddelelse nr. 209, marts 1990.
- [23] "Små low flow solvarmeanlægs ydelser". Simon Furbo og Peter Fagerlund Carlsson. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Meddelelse nr. 221, august 1991.