

UNDERSØGELSE
AF
SOLVARMEANLÆG FRA
ZEN B.V.

SIMON FURBO
KLAUS ELLEHAUGE

MAJ 1994

MEDDELELSE NR. 261

Laboratoriet for Varmeisolering
Danmarks Tekniske Universitet

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD	3
RESUME	4
SUMMARY	5
1. INDLEDNING.	6
2. KOMPONENTAFPRØVNING.	8
2.1 Solfanger	8
2.2 Varmelager	14
3. AFPRØVNING AF ANLÆG	26
3.1 Beskrivelse af anlægget.	26
3.2 Målesystem og afprøvningsbetingelser.	30
3.3 Målte og beregnede ydelser samt driftserfaringer	31
3.4 Beregnet årsydelse	37
4. VURDERING AF ANLÆGGET	38
5. KONKLUSION	38
REFERENCER	39

FORORD

Denne rapport beskriver arbejdet, som er gennemført under projektet: "Attraktive markedsførte solvarmeanlæg fra udlandet", j. nr. 51181/93-0025.

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

Simon Furbo, civilingeniør, Ph.D.
Klaus Ellehauge, civilingeniør
Martin Dandanell, maskinarbejder
Poul Dedenroth, maskinarbejder
Lars Kæstel Jørgensen, elektronikmekaniker
Hamid Jalali, teknisk assistent
Anne Rasmussen, korrespondent
Bodil Fauerskov, korrespondent
Grethe Larsen, assistent
Ann Johnsen, kontorelev

RESUME

Det hollandske firma ZEN B.V. markedsfører et lille billigt solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning.

Anlægget, som er designet efter tømmeprincipet, benytter vand som solfangervæske. Varmelageret består af to små varmtvandsbeholdere, en forvarmebeholder og en eftervarmebeholder. Forvarmebeholderen opvarmes ved hjælp af en varmevekslerspiral af solfangervæsken og eftervarmebeholderen opvarmes af den supplerende energikilde. Den cylinderformede opretstående eftervarmebeholder er placeret oven over forvarmebeholderen. Solfangerkredsen, som er en lukket kreds med vand og luft, udgøres af solfangeren, af rørene til og fra solfangeren, af mellemrummet mellem de to beholdere og af forvarmebeholderens varmevekslerspiral. I perioder uden solfangerdrift opholder vandet sig i mellemrummet mellem beholderne og luften opholder sig i rørene og solfangeren. I perioder med solfangerdrift opholder luften sig i mellemrummet mellem beholderne.

Anlæggets komponenter er afprøvet i laboratoriets indendørs prøvestande. Solfangerens effektivitet er målt i solsimulatoren og varmelageret er afprøvet i lagerprøvestanden.

Endvidere 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

A small inexpensive DHW solar heating system marketed by the Dutch company ZEN B.V. was investigated.

The system makes use of the drain back principle. Water is used as the solar collector fluid. The heat storage consist of two small hot water tanks, a preheating tank and a postheating tank. Heat is transferred from the solar collector fluid to the preheating tank by means of a heat exchanger spiral. The postheating tank is heated by the auxiliary energy supply system. The postheating tank is located above the preheating tank. Heat is transferred from the preheating tank to the postheating tank by means of natural convection and by hot water tapping.

The solar collector loop is a closed loop with water and air. The loop consist of the solar collector, the pipes to and from the collector, the interspace between the two tanks and of the heat exchanger spiral in the preheating tank. The water is located in the interspace between the two tanks and the air is located in the pipes and in the solar collector in periods without the solar collector in operation. The air is located in the interspace between the two tanks in periods with the solar collector in operation.

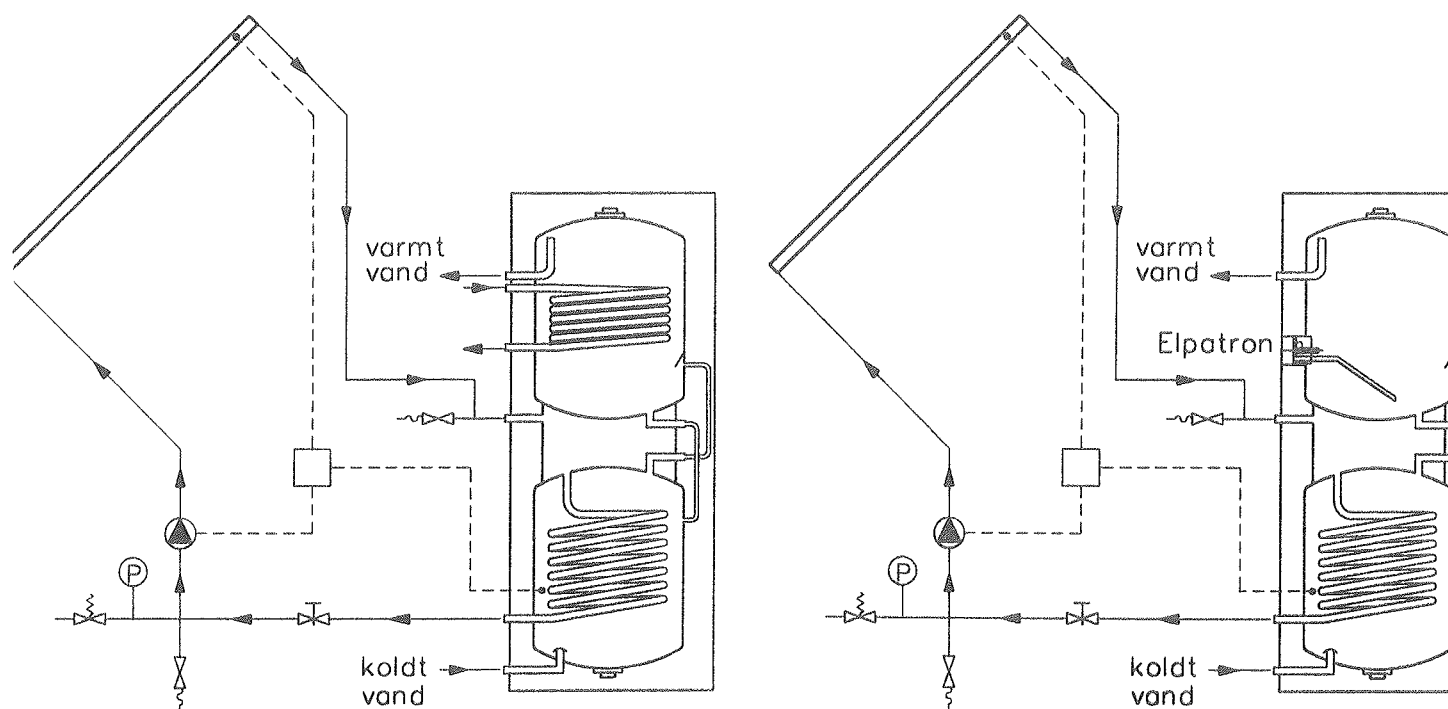
The components of the system were tested in the indoor test facilities of the Thermal Insulation Laboratory. The efficiency of the solar collector was measured in the solar simulator test facility and the heat storage was tested in the heat storage test facility.

Further, 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 to solvarmeanlæg, som markedsføres af ZEN B.V.



Figur 1. Principskitse af ZEN B.V. solvarmeanlæg.

I begge anlæg består varmelageret af to små varmtvandsbeholdere, en forvarmebeholder og en eftervarmebeholder. Forvarmebeholderen opvarmes ved hjælp af en varmevekslerspiral af solfangervæsken. Eftervarmebeholderen opvarmes af den supplerende energikilde. I det ene anlæg opvarmes eftervarmebeholderen ved hjælp af en varmevekslerspiral, som kobles til det supplerende energianlæg. I det andet anlæg opvarmes eftervarmetanken ved hjælp af en elpatron. De to beholdere er koblet sammen med to rør på en sådan måde, at der kan overføres varme fra forvarmebeholderen til eftervarmebeholderen ved brugsvandets naturlige cirkulation. Desuden kan der overføres varme fra forvarmebeholderen til eftervarmebeholderen under varmtvandstapninger.

Anlægget, som er forsynet med et enkelt solfangerelement, er designet efter tømmeprincipet. Vand benyttes som solfangervæske. Solfangerkredsen, som er en lukket kreds med vand og luft, udgøres af solfangeren, af rørene til og fra solfangeren, af mellemrummet mellem de to beholdere og af forvarmebeholderens varmevekslerspiral. I perioder uden solfangerdrift opholder vandet sig i mellemrummet mellem beholderne og luften opholder sig i rørene og solfangeren. I perioder med solfangerdrift opholder luften sig i mellemrummet mellem beholderne.

Typiske anlægspriser i Holland oplyst af ZEN B.V. fremgår af tabel 1.

	Anlæg med varmeveksler- spiral i eftervarmebeholder		Anlæg med elpatron i eftervarmebeholder	
2,70 m ² solfangerelement	1530 NLG	5360 kr.	1530 NLG	5360 kr.
Isoleret varmelager bestående af 80 l eftervarmebeholder med varmevekslerspiral og 100 l forvarmebeholder.	1824 NLG	6380 kr.		
Isoleret varmelager bestående af 120 l eftervarme- beholder med elpatron og 115 l forvarmebeholder.			2078 NLG	7270 kr.
Pumpe og styresystem.	378 NLG	1320 kr.	378 NLG	1320 kr.
Solfangerkreds.	170 NLG	600 kr.	170 NLG	600 kr.
Total excl. moms	3902 NLG	13660 kr.	4156 NLG	14550 kr.
Total incl. moms	4585 NLG	16050 kr.	4883 NLG	17090 kr.
Typisk forbrugerpris for ét installeret solvarme- anlæg i Holland.	5877 NLG	20570 kr.	6176 NLG	21620 kr.

Tabel 1. Pris for ZEN B.V. solvarmeanlæg

2. KOMPONENTAFPRØVNING.

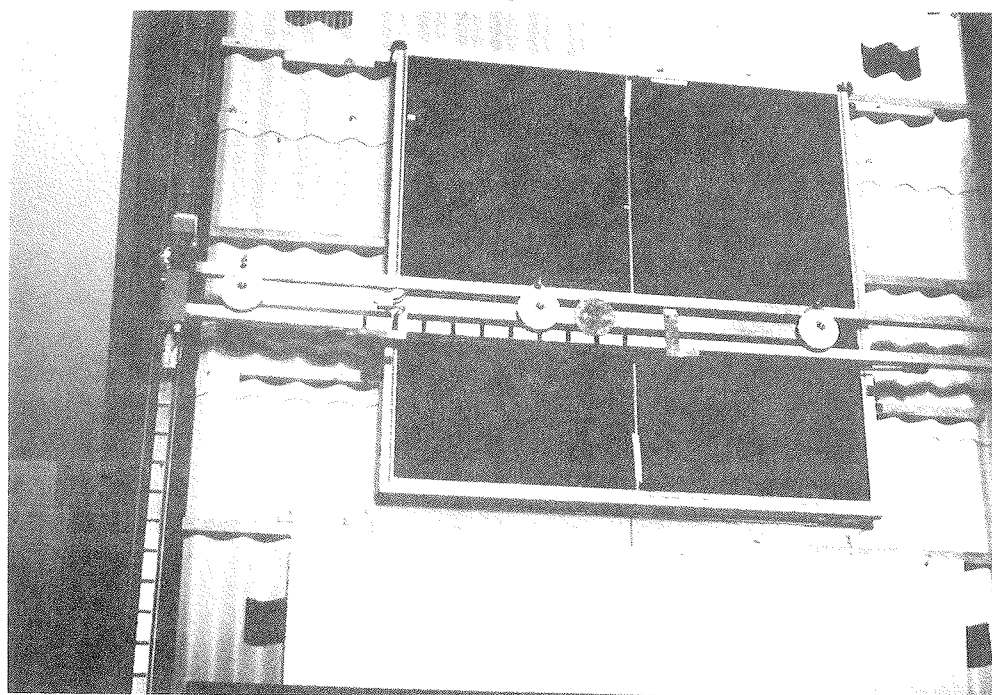
2.1 Solfanger

Dimensionerne af anlæggets solfangerelement, som har en kobberabsorber, fremgår af tabel 2.

Udvendige dimensioner	1,750 m x 1,775 m x 0,137 m
Vægt (tom)	64 kg
Solfangervæskeindhold	1,2 l
Udvendigt areal	3,11 m ²
Transparent areal	2,70 m ²

Tabel 2. Data for det afprøvede solfangerelement fra ZEN B.V.

Solfangerelementet er afprøvet i laboratoriets solsimulator [1] ved hjælp af de på laboratoriet normalt anvendte prøvemethoder [2]. Et foto af solfangeren i prøvestanden er vist på figur 2. Som nævnt benyttes vand som solfangervæske i solvarmeanlægget. Derfor blev der også under afprøvningen benyttet vand som solfangervæske.



Figur 2. Det afprøvede solfangerelement i prøvestanden.

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

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

$$\eta = 0,78 - 4,91 \times (T_m - T_a)/G$$

hvor T_m er middelvæsketemperaturen i solfangeren, °C

T_a er lufttemperaturen, °C

G er bestrålingsstyrken, W/m².

Bestrålingsstyrke G W/m ²	Massestrøm kg/s	Lufttemperatur T _a °C	Indløbstemperatur T _i °C	Temperaturstigning over solfangeren K	Effektivitet η
826	0,0541	28,9	25,1	7,83	0,794
	0,0541	29,0	25,1	7,84	0,796
	0,0541	29,1	25,1	7,85	0,796
	0,0542	29,0	25,1	7,82	0,794
879	0,0548	28,7	43,8	6,88	0,664
	0,0548	28,6	43,8	6,90	0,665
	0,0548	28,7	43,8	6,90	0,665
	0,0549	28,6	43,8	6,89	0,665
832	0,0544	30,8	71,9	5,16	0,524
	0,0544	30,8	71,8	5,21	0,529
	0,0544	30,9	71,9	5,16	0,524
	0,0545	30,9	71,9	5,19	0,527
833	0,0541	30,7	88,1	4,34	0,439
	0,0541	30,7	88,1	4,31	0,436
	0,0541	30,8	88,2	4,31	0,436
	0,0541	30,8	88,1	4,37	0,442

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 2,70 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:

$$k_s/k_{45^\circ} = 1,069 - 0,00153 \times s$$

Solfangerhældning fra vandret	Massestrøm	Lufttemperatur	Indløbstemperatur	Temperaturfald over solfangeren	Varmetabs- koefficient
s		T_a	T_i		k
°	kg/s	°C	°C	K	W/m ² K
67,5	0,0542	23,0	72,2	2,24	3,92
	0,0542	23,0	72,1	2,23	3,90
	0,0543	23,0	72,1	2,24	3,93
	0,0542	23,1	72,2	2,24	3,92
45,0	0,0545	23,6	72,4	2,30	4,08
	0,0545	23,6	72,3	2,29	4,08
	0,0546	23,6	72,3	2,29	4,08
	0,0545	23,6	72,3	2,29	4,06
22,5	0,0546	23,3	72,1	2,36	4,20
	0,0546	23,3	72,1	2,36	4,20
	0,0546	23,3	72,1	2,36	4,20
	0,0546	23,4	72,2	2,36	4,19

Tabel 4. Målte varmetabskoefficienter ved en vindhastighed langs det transparente dæklag på 5 m/s. Det benyttede solfangerareal er 2,70 m².

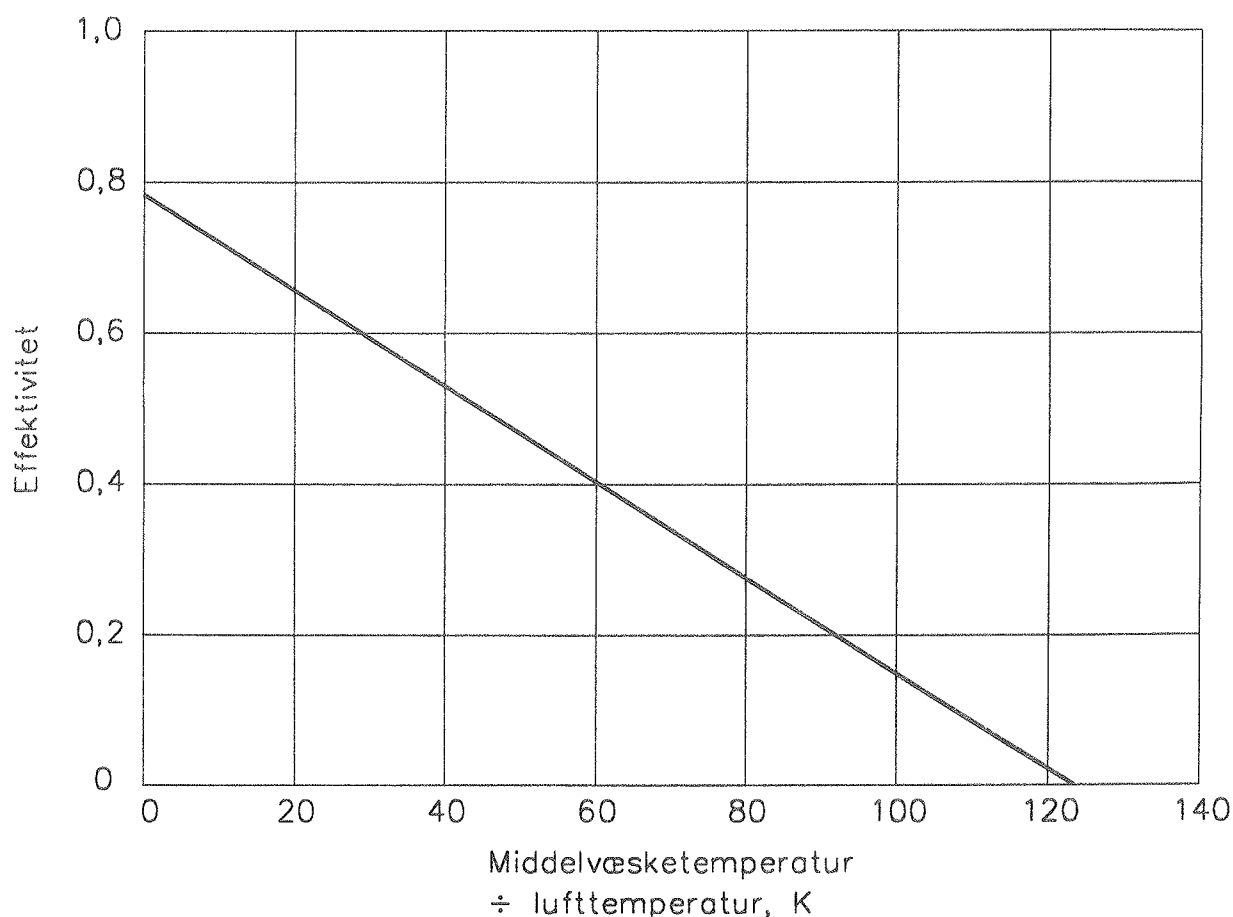
Ved at benytte korrektionen for hældningen fås følgende udtryk for effektiviteten:

$$\eta = 0,78 - 5,08 \times (T_m - T_a)/G$$

Forudsætningerne for dette udtryk er:

- Effektiviteten er baseret på det transparente areal 2,70 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 vand.
- Massestrømmen er ca. 0,02 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°.

ZEN B.V. anbefaler, at volumenstrømmen i solfangerkredsen er beliggende i området fra ca. 1,7 l/min til ca. 3,3 l/min, svarende til ca. 0,6-1,2 l/min pr. m² solfanger. Altså er der tale om et solvarmeanlæg med en traditionel høj volumenstrøm. På trods heraf blev der gennemført en enkelt måling af solfangereffektiviteten ved en lille volumenstrøm. Måleresultatet 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:

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

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

Bestrålingsstyrke G W/m ²	Massestrøm kg/s	Lufttemperatur T _a °C	Indløbstemperatur °C	Temperaturstigning over solfangeren K	Effektivitet η
841	0,0069	27,1	24,9	50,10	0,633
	0,0069	27,1	24,9	50,15	0,637
	0,0069	27,1	24,9	50,02	0,633
	0,0069	27,1	24,9	50,07	0,636

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 2,70 m².

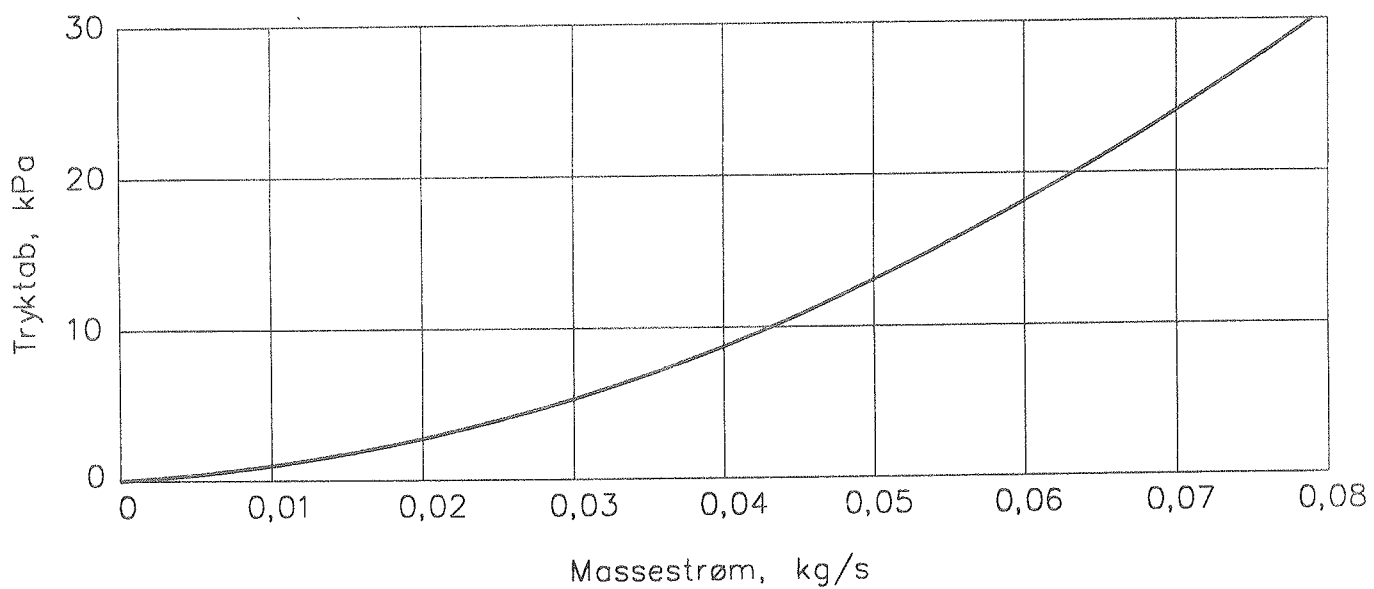
I [3] er det detaljeret beskrevet, hvorledes F_f bestemmes på basis af måleresultater. Størrelsen af F_f bestemt ud fra målingerne fremgår af tabel 6.

Massestrøm		Volumenstrøm	Integreret middel- væsketemperatur T _m °C	T _m - T _a K	Effektivitet η	F _f
kg/s	kg/s m ² solfanger	l/min m ² solfanger				
0,0069	0,0026	0,16	51,8	24,7	0,635	0,992

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

I [4] er angivet målte størrelser af F_f for forskellige volumenstrømme for 9 forskellige markedsførte solfangere - 8 danske og 1 canadisk. Ved at sammenholde disse størrelser med måleresultaterne i tabel 6 kan det konkluderes, at den hollandske solfanger - på trods af at den ikke indgår i et low flow solvarmeanlæg - er særdeles velegnet til low flow solvarmeanlæg.

Endelig blev tryktabet over solfangeren bestemt med vand ved 25°C som solfangervæske for forskellige massestrømme. Måleresultaterne fremgår af figur 4, som viser tryktabet over solfangeren som funktion af massestrømmen.

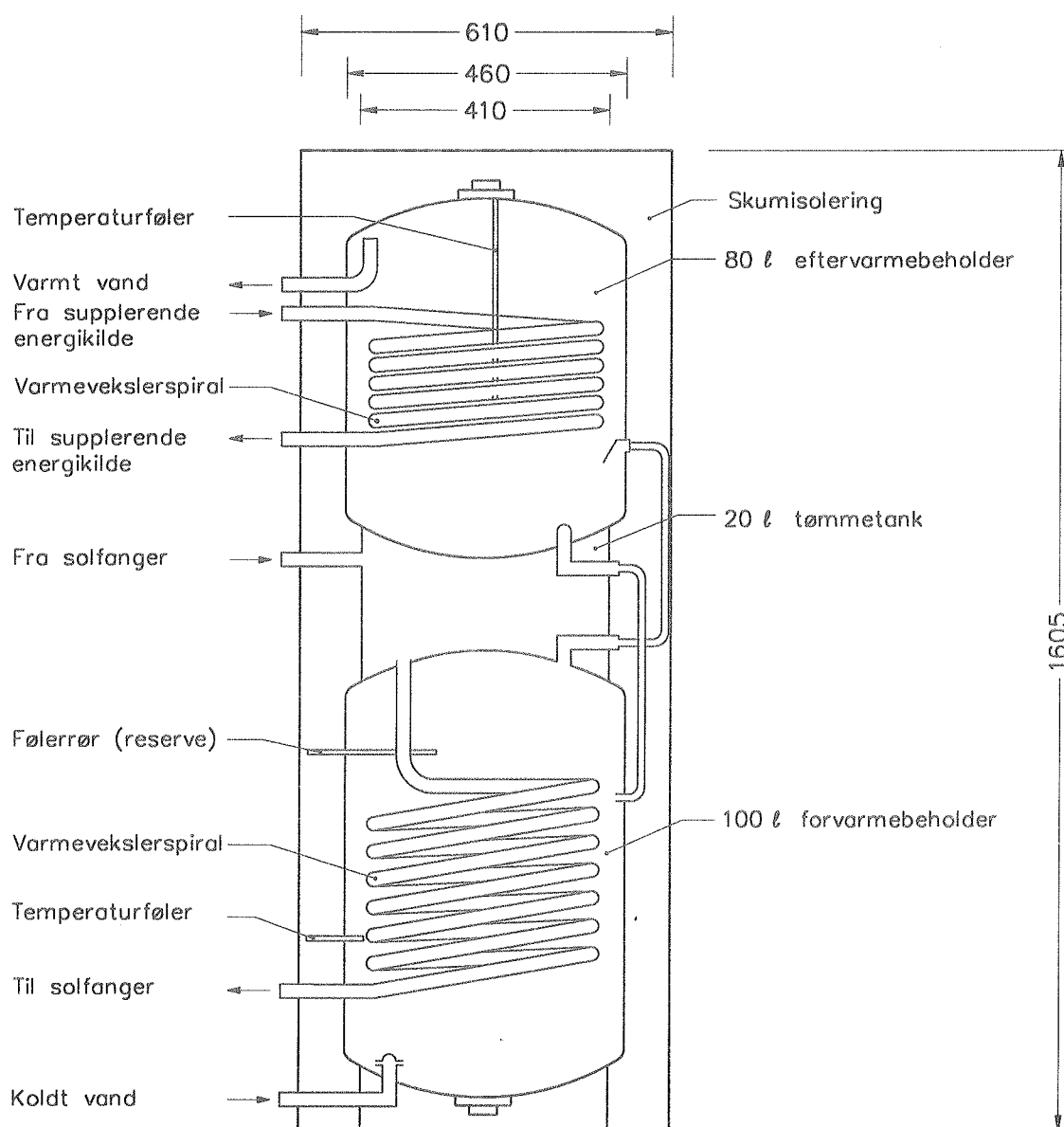


Figur 4. Tryktab over solfangeren med vand ved 25°C som solfangervæske som funktion af massestrømmen.

2.2 Varmelager

Som nævnt markedsfører ZEN B.V. to forskellige udformninger af solvarmeanlægget. I den ene anlægstype er eftervarmebeholderen forsynet med en elpatron, i den anden anlægstype er eftervarmebeholderen forsynet med en varmevekslerspiral. Varmelageret med eftervarmebeholderen med varmevekslerspiralen blev afprøvet i laboratoriets lagerprøvestand [5]. Figur 5 viser en principskitse af varmelageret og fotos af varmelageret med og uden isolering er vist på figur 6.

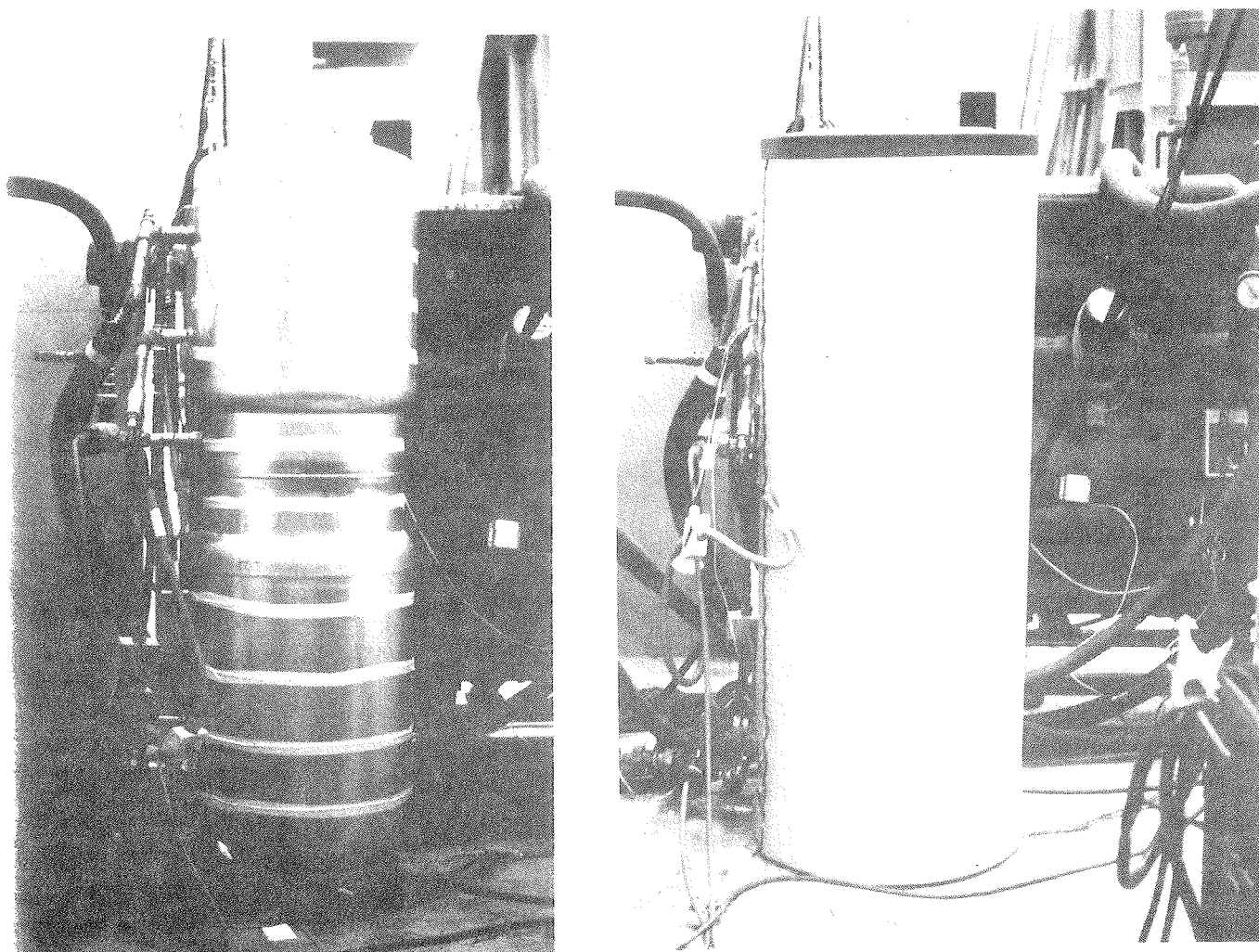
Volumenet af forvarmebeholderen og eftervarmebeholderen er henholdsvis 100 l og 80 l. Volumen af tømmetanken, som udgøres af mellemrummet mellem forvarmebeholderen og eftervarmebeholderen, er 20 l.



Figur 5. Principskitse af det afprøvede varmelager.

Beholdermaterialet er rustfrit stål. En flexibel skumnylonisoleringskappe kan let placeres så den helt omslutter varmelageret. Vandet fra solfangerkredsen tilføres tømmetanken. Herfra føres vandet videre gennem forvarmebeholderens varmevekslerspiral, hvorved solvarmen overføres til brugsvandet. I perioder med solfangerdrift er der luft i den øverste del af tømmetanken. I perioder uden solfangerdrift er tømmetanken næsten fyldt med vand.

Det kolde brugsvand tilføres bunden af forvarmebeholderen. Forvarmebeholderen og eftervarmebeholderen er som vist på figur 5 sammenkoblet med to rør. Når temperaturen i den øverste del af forvarmebeholderen er højere end temperaturen i den nederste del af eftervarmebeholderen vil brugsvandet selv cirkulere i kredsen bestående af de to rør, den nederste del af eftervarmebeholderen og den øverste del af forvarmebeholderen. Varmt vand strømmer fra toppen af forvarmebeholderen gennem det ene forbindelsesrør til eftervarmebeholderen gennem indløbet i siden af denne beholder. Samtidigt strømmer koldere vand fra bunden af eftervarmebeholderen gennem det andet forbindelsesrør til forvarmebeholderen gennem indløbet i siden af denne beholder. Herved vil der overføres varme fra forvarmebeholderen til eftervarmebeholderen. Desuden kan der overføres varme fra forvarmebeholderen til eftervarmebeholderen når der tappes varmt vand fra anlægget.



Figur 6. Det afprøvede varmelager uden og med isoleringskappe.

Der blev gennemført afprøvninger for at bestemme varmetabet af varmelageret, varmeoverføringsevnen fra solfangervæsken til varmelageret og varmeoverføringsevnen mellem de to beholdere under forskellige driftsforhold samt varmeoverføringsevnen for varmevekslerspiralen i eftervarmebeholderen. Desuden blev der gennemført forsøg for at klarlægge, om der skabes omrøring i beholderne under varmtvandstapning. 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 varmelageret og returtemperatur fra varmelageret blev målt. Lagerets omgivelsestemperatur blev målt. Desuden blev temperaturen i 4 forskellige niveauer i eftervarmebeholderen, i 4 forskellige niveauer i forvarmebeholderen og i 2 niveauer i tømmetanken målt. Endvidere blev koldtvandstemperaturen og temperaturen af det tappede varme vand målt. Endelig blev solfangervæskens volumenstrøm og volumenstrømmen igennem eftervarmebeholderens varmevekslerspiral målt.

Varmetabskoefficienten for varmelageret blev målt således, at solfangervæsken blev pumpet langsomt gennem varmelageret med en konstant høj fremløbstemperatur. Når forholdene er blevet stabile, er varmelagerets varmetab lig med den varmemængde, som solfangervæsken tilfører varmelageret. Resultaterne af varmetabsmålingen fremgår af tabel 7.

Volumenstrøm	Solfangervæskens fremløbstemperatur til varmelageret	Temperaturforskel for solfangervæsken over varmelageret	Omgivelsestemperatur	Middel varmelagertemperatur	Varmelagerets varmetab	Varmelagerets varmetabskoefficient
l/min	°C	K	°C	°C	W	W/K
1,07	80,5	1,56	25,0	77,5	114	2,2

Tabel 7. Volumenstrøm, stabile temperaturer og varmetab for varmelageret målt under varmetabsprøvningen.

Varmelagerets varmetabskoefficient er en smule mindre end varmetabskoefficienterne for de solvarmelagre, som markedsføres af de danske solfangerfabrikanter. På basis af lagergeometri, isoleringstykkelse og varmeledningsevnen for skumnylon på 0,35 W/m K beregnes varmetabskoefficienten for varmelageret til 1,2 W/K. Altså forøges varmelagerets varmetabskoefficient med ca. 1 W/K på grund af varmelagerets kuldebroer, som først og fremmest er forårsaget af rørtilslutningerne til og fra lageret. På basis af beregninger og skøn er fordelingen af varmetabskoefficienten bestemt som anført i tabel 8.

Del af varmelager	Varmetabskoefficient
	W/K
Eftervarmebeholder	1,2
Tømmetank	0,3
Forvarmebeholder	0,7
Total	2,2

Tabel 8. Skønnet fordeling af varmelagerets varmetabskoefficient ved ca. 80°C.

Varmeoverføringssevnen fra solfangervæsken til varmelageret blev bestemt for forskellige driftsforhold. Der blev gennemført 4 opvarmningsforsøg med forskellige effektilførsler fra solfangervæsken til varmelageret. De målte effektilførsler, temperaturer og varmeoverføringssevner for varmevekslerspiralen i forvarmebeholderen igennem de fire opvarmningsforsøg er vist på figur 7-10.

Det ses, at jo større effektilførslen fra solfangervæsken til varmelageret er, des større er varmeoverføringssevnen for forvarmebeholderens varmevekslerspiral. Af figur 8 og 10 ses det endvidere, at eftervarmebeholderens temperatur ikke påvirker varmeoverføringssevnen for forvarmebeholderens varmevekslerspiral nævneværdigt. Dog gælder det, at varmeoverføringssevnen er en smule større i perioder med en forholdsvis kold eftervarmebeholder end i perioder med en varm eftervarmebeholder. En typisk størrelse for varmeoverføringssevnen er ca. 190 W/K, svarende til ca. 70 W/K pr. m² solfanger for et solvarmeanlæg med et solfangerareal på 2,70 m². I [6] er det klarlagt, at størrelsen af varmeoverføringssevnen mellem en forvarmebeholder og en eftervarmebeholder i et solvarmeanlæg under normale driftsforhold næsten ikke påvirker solvarmeanlæggets ydelse. Solvarmeanlæg, hvor varmen udelukkende overføres fra forvarmebeholderen til eftervarmebeholderen under varmtvandstapninger, yder således normalt ikke nævneværdigt mindre end solvarmeanlæg med en uendelig stor varmeoverføringssevne mellem de to beholdere. På basis af undersøgelserne kan det derfor konkluderes, at varmeoverføringssevnen fra solfangervæsken til varmelageret er tilstrækkelig stor.

Der blev gennemført et forsøg, hvor eftervarmebeholderen blev opvarmet ved hjælp af eftervarmebeholderens varmevekslerspiral. Igennem hele opvarmningen var volumenstrømmen igennem varmevekslerspiralen ca. 9,7 l/min og effektilførslen ca. 4200 W. Den målte varmeoverføringssevne for varmevekslerspiralen fremgår af figur 11. Det vurderes, at varmeoverføringssevnen for denne varmevekslerspiral også er tilstrækkelig stor.

Under varmtvandstapninger føres der vand fra forvarmebeholderen til eftervarmebeholderen igennem begge koblingsrørene. Man kunne derfor forestille sig, at der skabes uønsket omrøring i eftervarmebeholderen under varmtvandstapninger. For at klarlægge forholdene blev der derfor gennemført to tappeforsøg med forskellige tappeflow. Varmtvandstapningerne startede umiddelbart efter en opvarmningsperiode, hvor solfangervæsken har opvarmet varmelageret. Derfor var temperaturniveauet ved starten af tappeforsøgene lidt højere i forvarmebeholderen end i eftervarmebeholderen.

Figur 12 og 13 viser for de to tappeforsøg med et tappeflow på henholdsvis ca. 5 l/min og ca. 14 l/min målte temperaturer for det kolde vand, som løber ind nederst i forvarmebeholderen og for det varme vand, som tappes fra toppen af eftervarmebeholderen. Temperaturerne er vist igennem tappeforsøgene som funktion af vandmængden, som er tappet fra varmelageret.

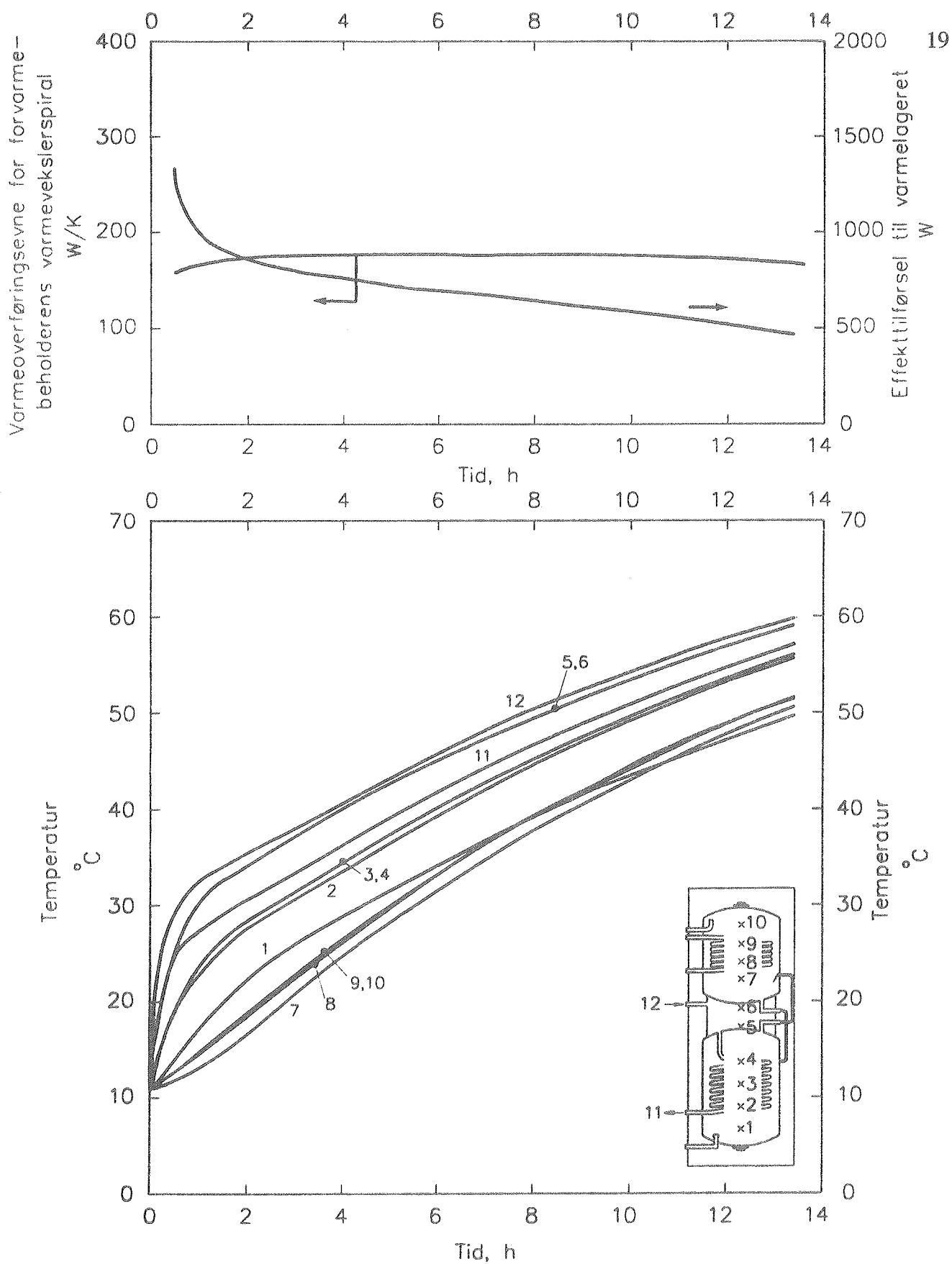
Det ses, at temperaturen af det tappede varme vand i begge forsøg holder sig på et højt niveau næsten indtil der er tappet 180 l, svarende til volumen af varmelagerets to varmtvandsbeholdere. Altså opstår der ikke nogen omrøring af betydning under varmtvandstapninger, hverken ved små eller store tappeflow.

De dynamiske forhold for varmelageret blev undersøgt i en forsøgsperiode med varierende

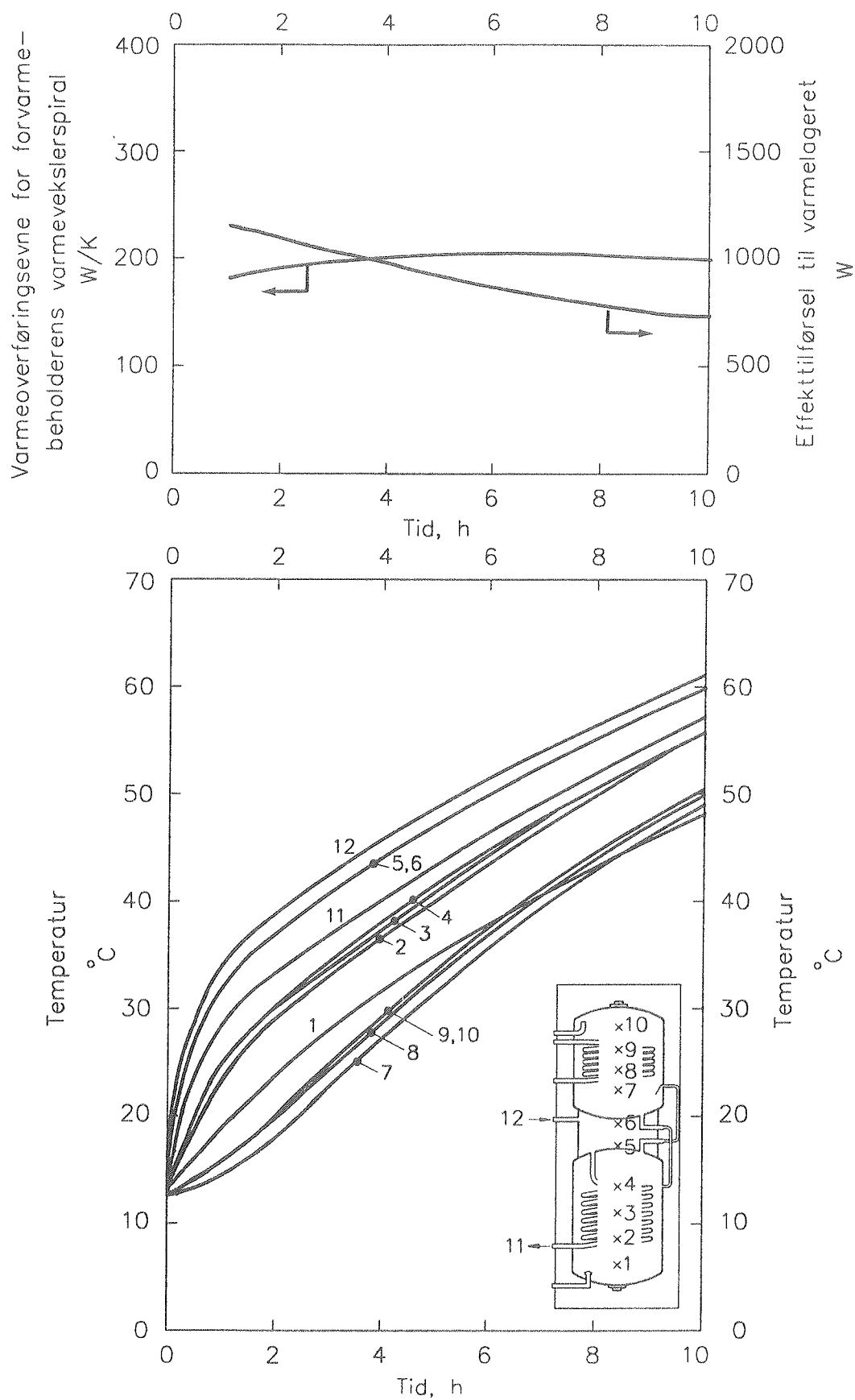
fremløbstemperatur til varmelageret, se figur 14. Figuren viser forsøgsbetingelserne, de målte temperaturer og den målte varmeoverføringsevne for forvarmebeholderens varmevekslerspiral igennem forsøgsperioden. Der blev tappet 51 l varmt vand fra lageret efter 3 h 50 minutter. I perioden fra 3 h 55 minutter til 4 h 20 minutter tilføres der varme til eftervarmebeholderen gennem denne beholders varmevekslerspiral.

Varmeoverføringsevnen for forvarmebeholderens varmevekslerspiral afhænger som det kan ses af driftsforholdene. En typisk størrelse af varmeoverføringsevnen er 175 W/K svarende til 65 W/K pr. m² solfanger for et solvarmeanlæg med et solfangerareal på 2,70 m².

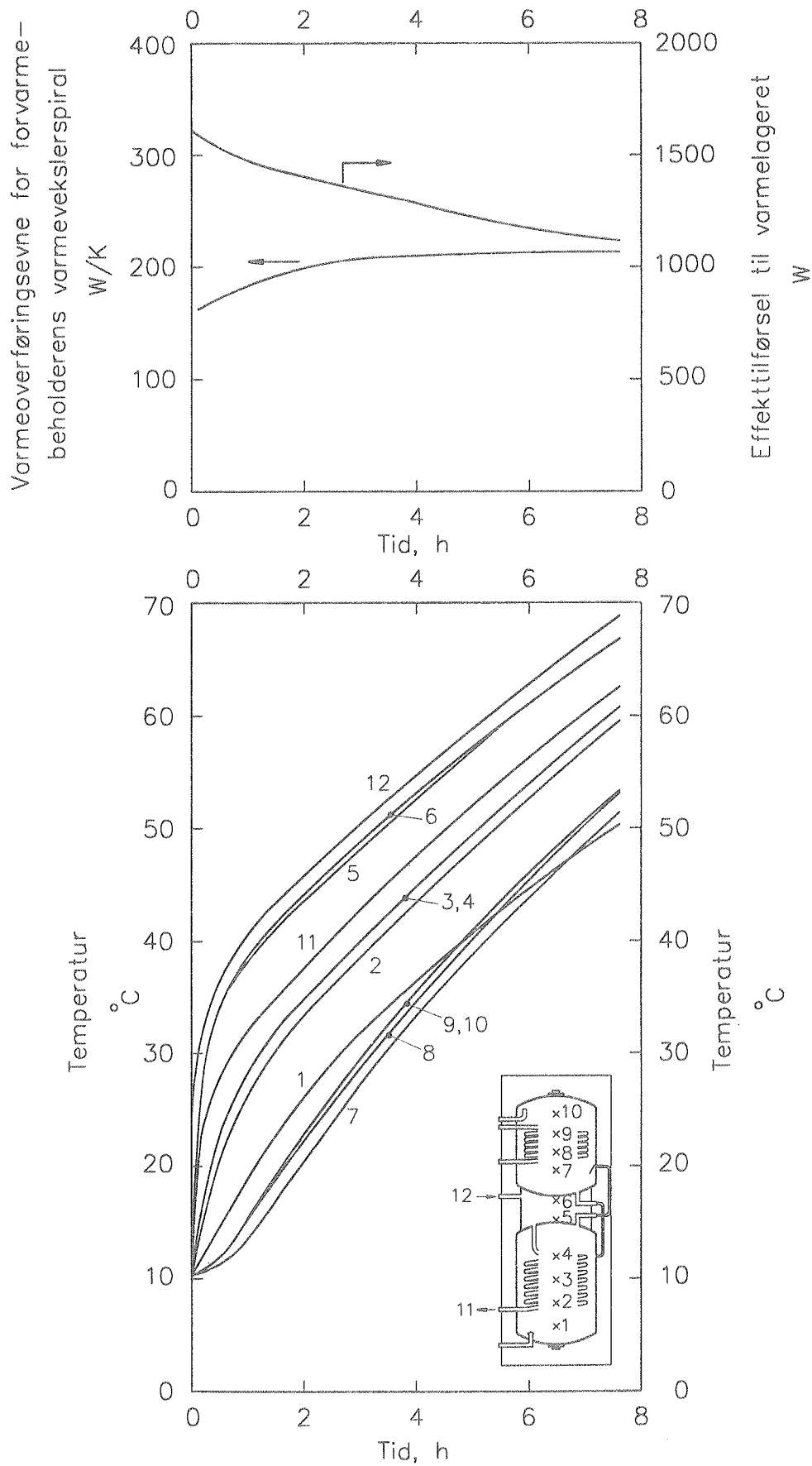
På basis af varmelagerprøvningen kan det konkluderes, at varmelageret har en udmærket udformning.



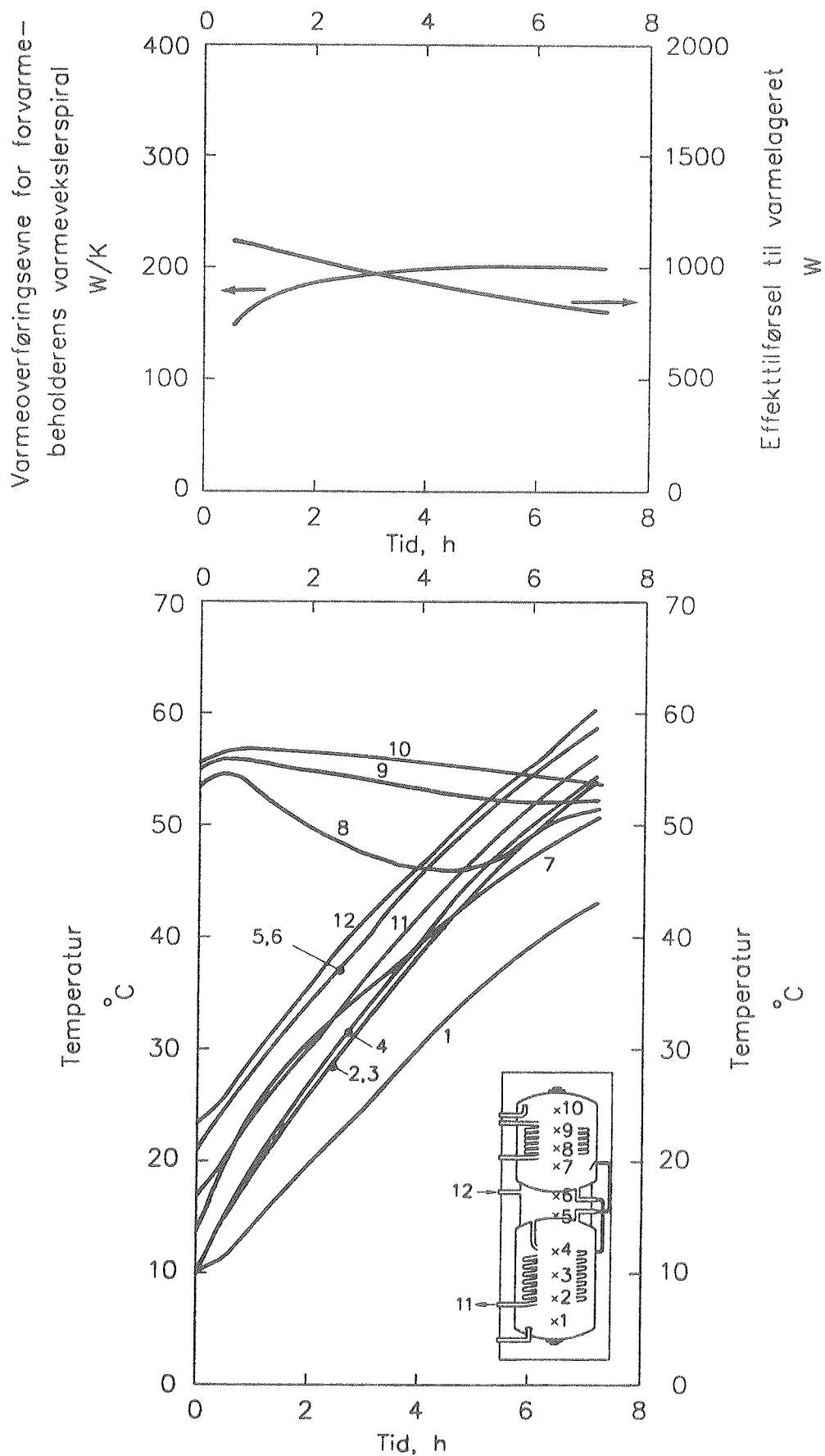
Figur 7. Temperaturer, effekttilførsel og varmeoverføringsevne for varmevekslerspiralen i forvarmebeholderen for et opvarmningsforløb med en volumenstrøm i solfangerkredsen på 2,7 l/min og en effekttilførsel på ca. 700 W



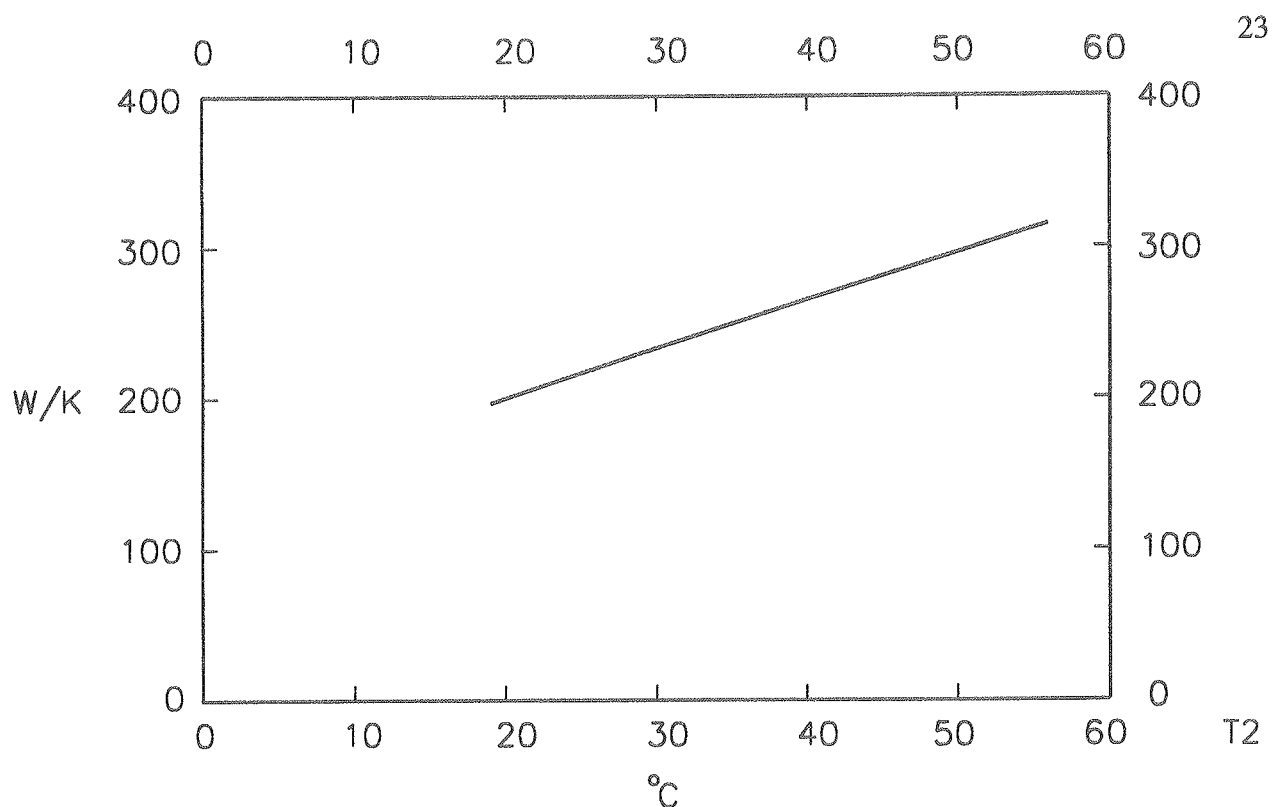
Figur 8. Temperaturer, effektilførsel og varmeoverføringssevne for varmevekslerspiralen i forvarmebeholderen for et opvarmningsforløb med en volumenstrøm i solfangerkredsen på 2,7 l/min og en effektilførsel på ca. 900 W.



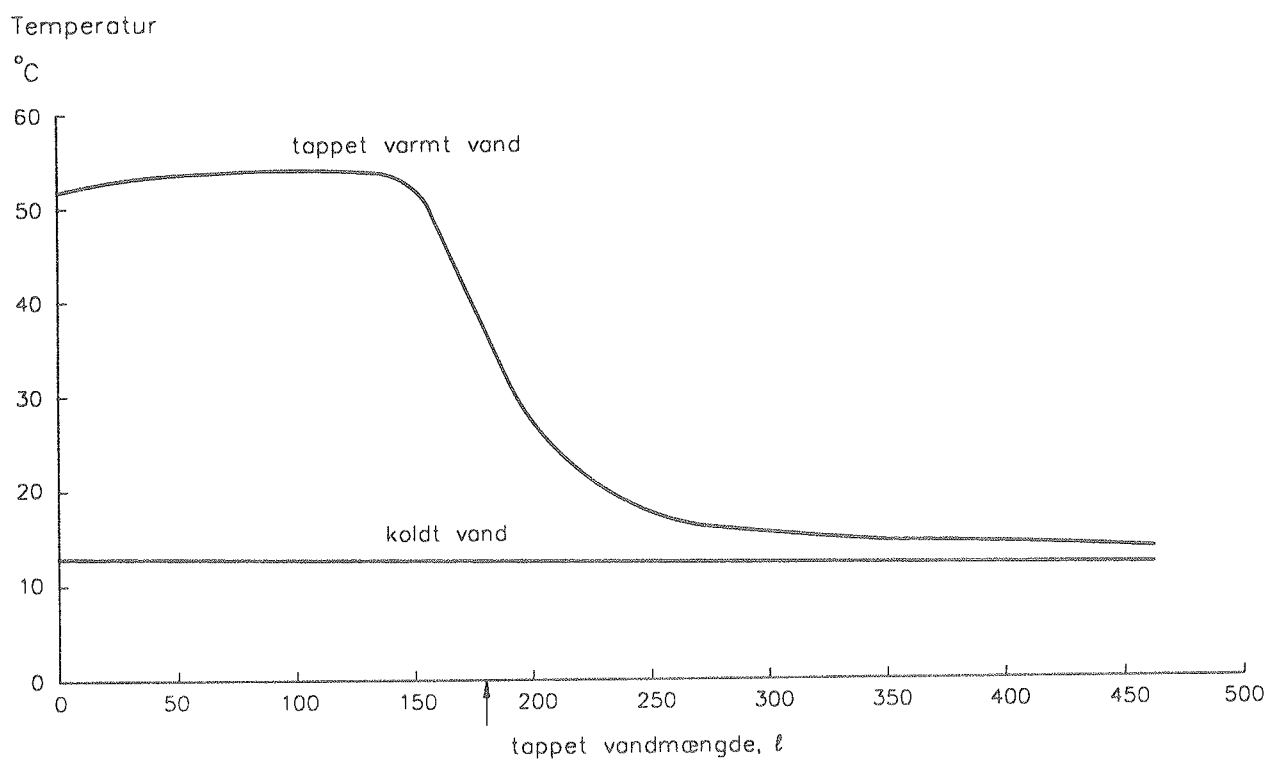
Figur 9. Temperaturer, effektilførsel og varmeoverføringsevne for varmevekslerspiralen i forvarmebeholderen for et opvarmningsforløb med en volumenstrøm i solfangerkredsen på 2,5 l/min og en effektilførsel på ca. 1300 W.



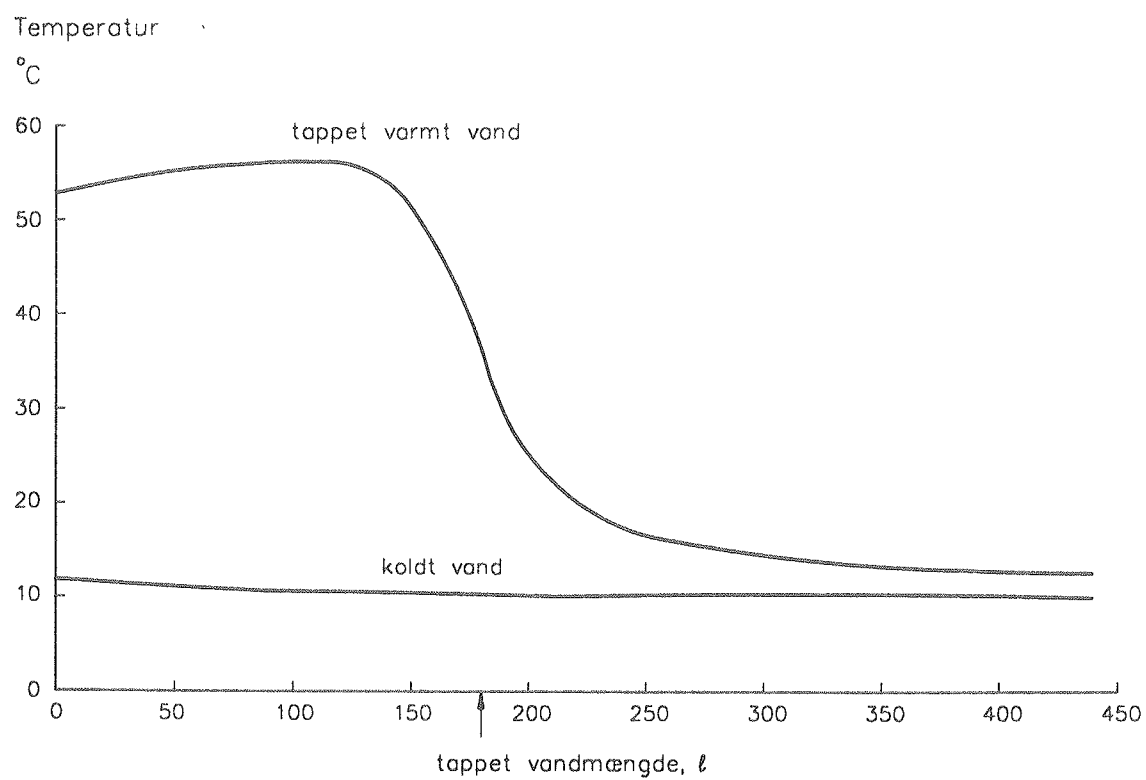
Figur 10. Temperaturer, effektilførsel og varmeoverføringsevne for varmevekslerspiralen i forvarmebeholderen for et opvarmningsforløb med en volumenstrøm i solfangerkredsen på 2,8 l/min og en effektilførsel på ca. 900 W.



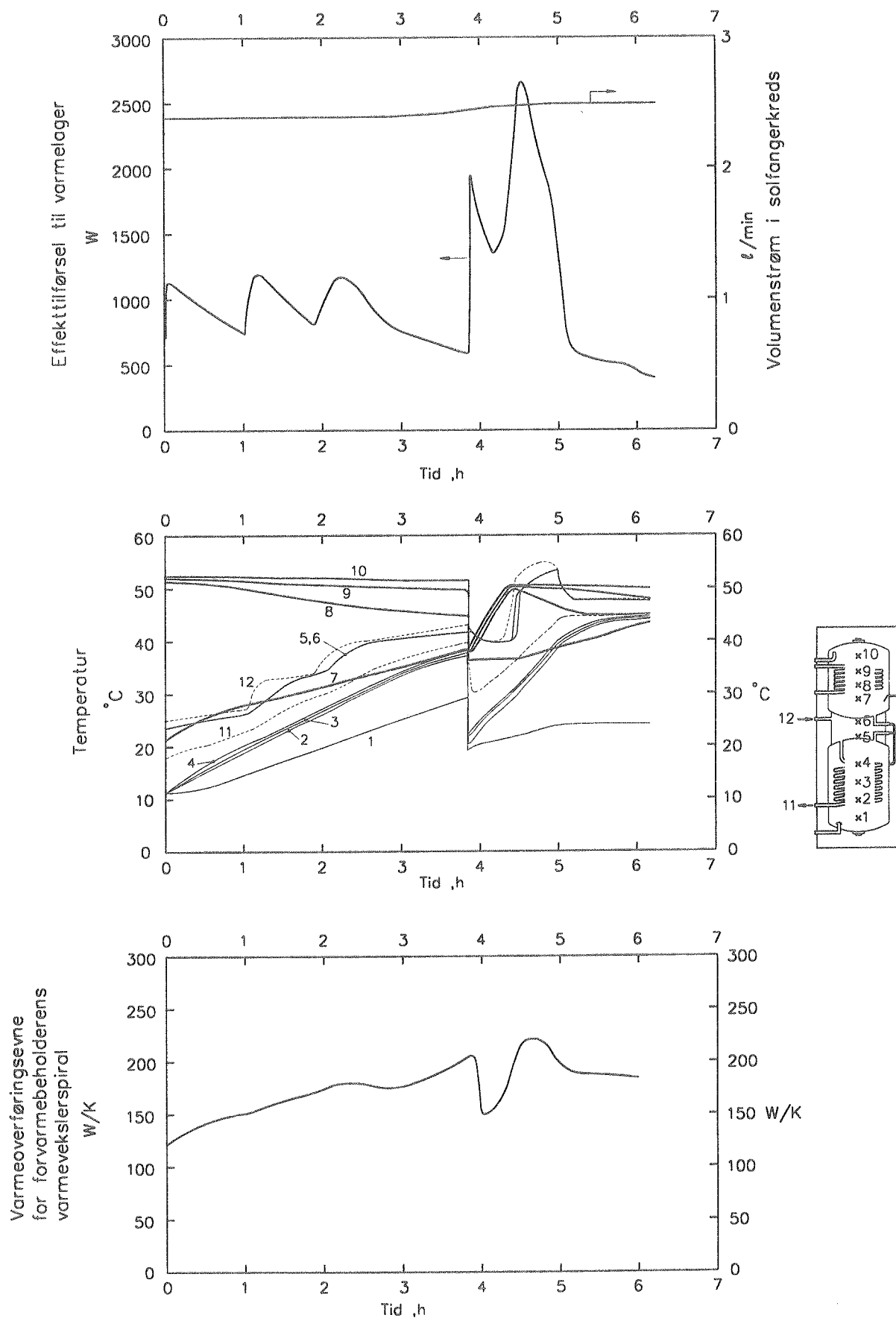
Figur 11. Varmeoverføringsevnen for eftervarmebeholderens varmevekslerspiral som funktion af eftervarmebeholderens temperatur for et opvarmningsforløb med en volumenstrøm på ca. 9,7 l/min og en effektilførsel på ca. 4200 W.



Figur 12. Målt temperatur af koldt vand og af varmt vand under tappeforsøg med et tappeflow på ca. 5 l/min.



Figur 13. Målt temperatur af koldt vand og af varmt vand under tappeforsøg med et tappeflow på ca. 14 l/min.



Figur 14. Forsøgsbetingelser, målte temperaturer og målt varmeoverføringsevne for forvarmebeholderens varmevekslerspiral for en forsøgsperiode med varierende fremløbstemperatur for solfangervæsken.

3. AFPRØVNING AF ANLÆG

3.1 Beskrivelse af anlægget.

Solvarmeanlægget fra ZEN B.V. og solvarmeanlægget fra det canadiske firma Thermo Dynamics Ltd [4] blev opført og afprøvet i laboratoriets prøvestand for solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning [7]. 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 solfangerstativ, som er placeret foran forsøgsbygningen, vender mod syd og har en hældning på 45° . Det vurderes, at det ingen nævneværdig betydning har for solvarmeanlæggenes ydelse, om solfangerne, som det er tilfældet for de danske solfangere, er placeret på prøvestandens separate solfangerstativ eller om de er placeret på det nye stativ på forsøgsbygningens tag, som det er tilfældet for de udenlandske solfangere.

Anlægget fra ZEN B.V. består af det afprøvede solfangerelement med arealet $2,70 \text{ m}^2$ og af et varmelager bestående af en 115 l forvarmebeholder med en varmevekslerspiral, en 120 l eftervarmebeholder med en elpatron og en 20 l tømmetank mellem de to varmtvandsbeholdere.

Solfangerkredsens længde er i alt 17,8 m. Solfangerkredsen består af 8,6 m rør - 8 m indendørs og 0,6 m udendørs - fra varmelageret til solfangeren og af 9,2 m rør - 2 m udendørs og 7,2 m indendørs - fra solfangeren til varmelageret. Rørene i solfangerkredsen er WICU-extra 15 x 1 kobberør, som har en varmetabskoefficient på ca. $0,22 \text{ W/K}$ pr. m rør.

Figur 15 viser en principskitse af det afprøvede solvarmeanlæg. Som solfangervæske benyttes vand. Vand påfyldes anlægget gennem ventilen nederst i solfangerkredsen indtil det løber ud af den åbne ventil ud for tømmetanken. Herefter påfyldes endnu ca. $1 \frac{1}{2} \text{ l}$ vand i solfangerkredsen, hvorefter ventilerne lukkes. Solfangerkredsen indeholder således vand og luft. I perioder med solfangerdrift er luften placeret i tømmetanken. I perioder uden solfangerdrift fyldes solfangeren og de øverste dele af solfangerkredsen med luft og vandet opholder sig i tømmetanken. En sikkerhedsventil med et åbningstryk på 3 bar er monteret nederst i solfangerkredsen.

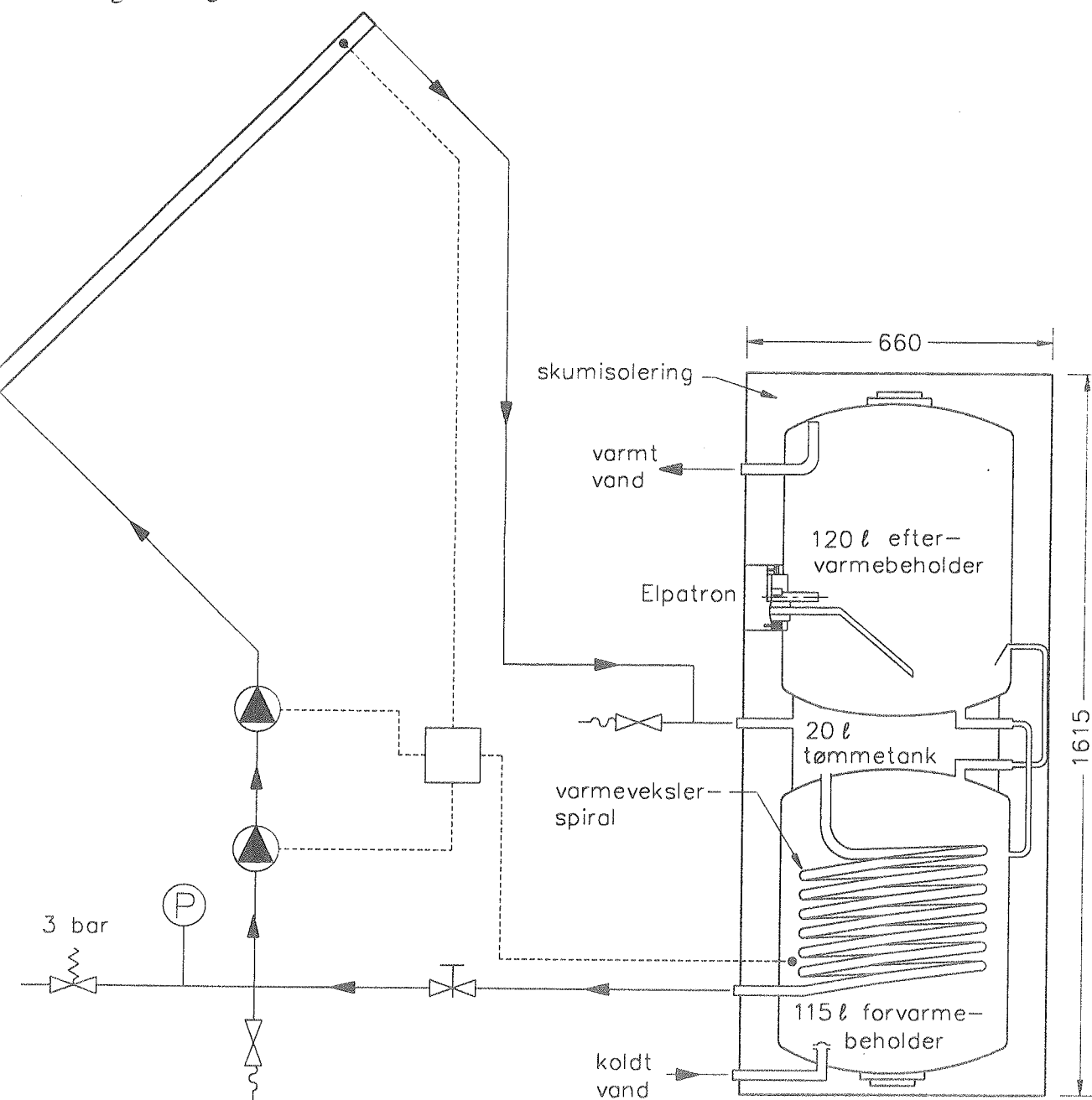
Højdeforskellen mellem forsøgsbygningens gulv, hvorpå varmelageret står, og toppen af solfangerelementet er ca. 6 m. Derfor har det, for at opnå den nødvendige løftehøjde til at fylde solfangeren med vand i starten af driftsperioder for solfangeren, været nødvendigt at installere 2 cirkulationspumper i serie i solfangerkredsen. De to pumper er Grundfos type UPS 25-40 180 og UPS 25-60 180.

Styresystemet er et differenstermostatstyresystem med temperaturfølere i solfangeren og i forvarmebeholderen. Når temperaturen i solfangeren er 10 K højere end temperaturen i forvarmebeholderen starter begge pumper op på trin 3. Solfangeren fyldes med vand og cirkulationen i solfangerkredsen påbegyndes. Efter en opstartperiode på 200 sekunder med

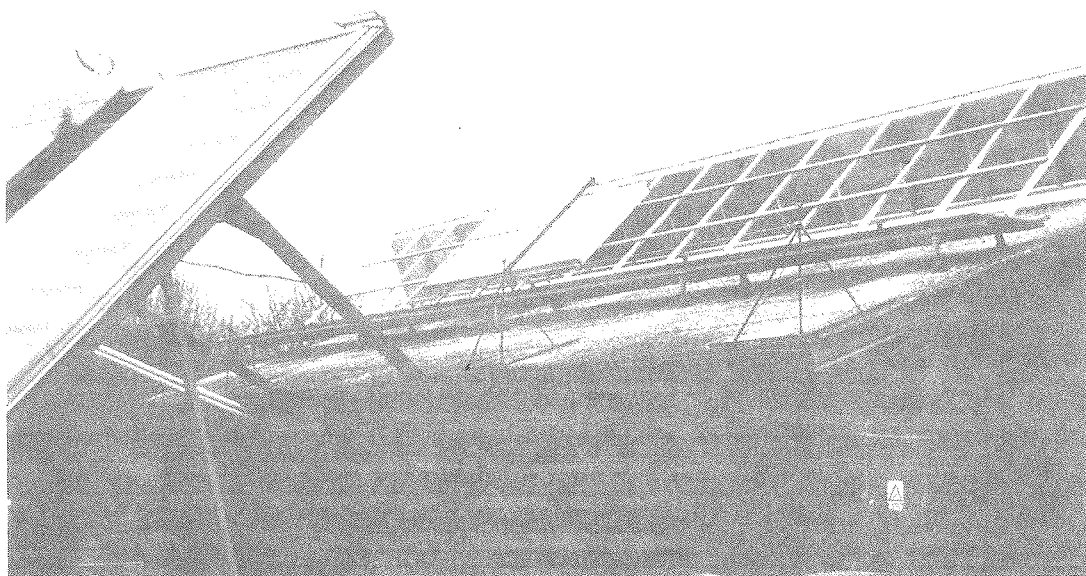
begge pumper på trin 3 stoppes den store cirkulationspumpe og pumpetrinet for den lille cirkulationspumpe ændres fra trin 3 til trin 1, således at effektforbruget til cirkulation af vandet er 30 W bortset fra i opstartperioderne på 200 sekunders varighed. I disse perioder er pumpernes effektforbrug 180 W. Solfangerkredsens reguleringsventil er indstillet således, at volumenstrømmen i solfangerkredsen er ca. 2,5 l/min som anbefalet af ZEN B.V.

Styresystemet sikrer, at der ikke opnås uønskede høje temperaturer i varmelageret, idet pumpen stoppes hvis temperaturen i forvarmebeholderen når 90°C. På denne måde sikres det også, at der ikke opstår kogning i solfangeren.

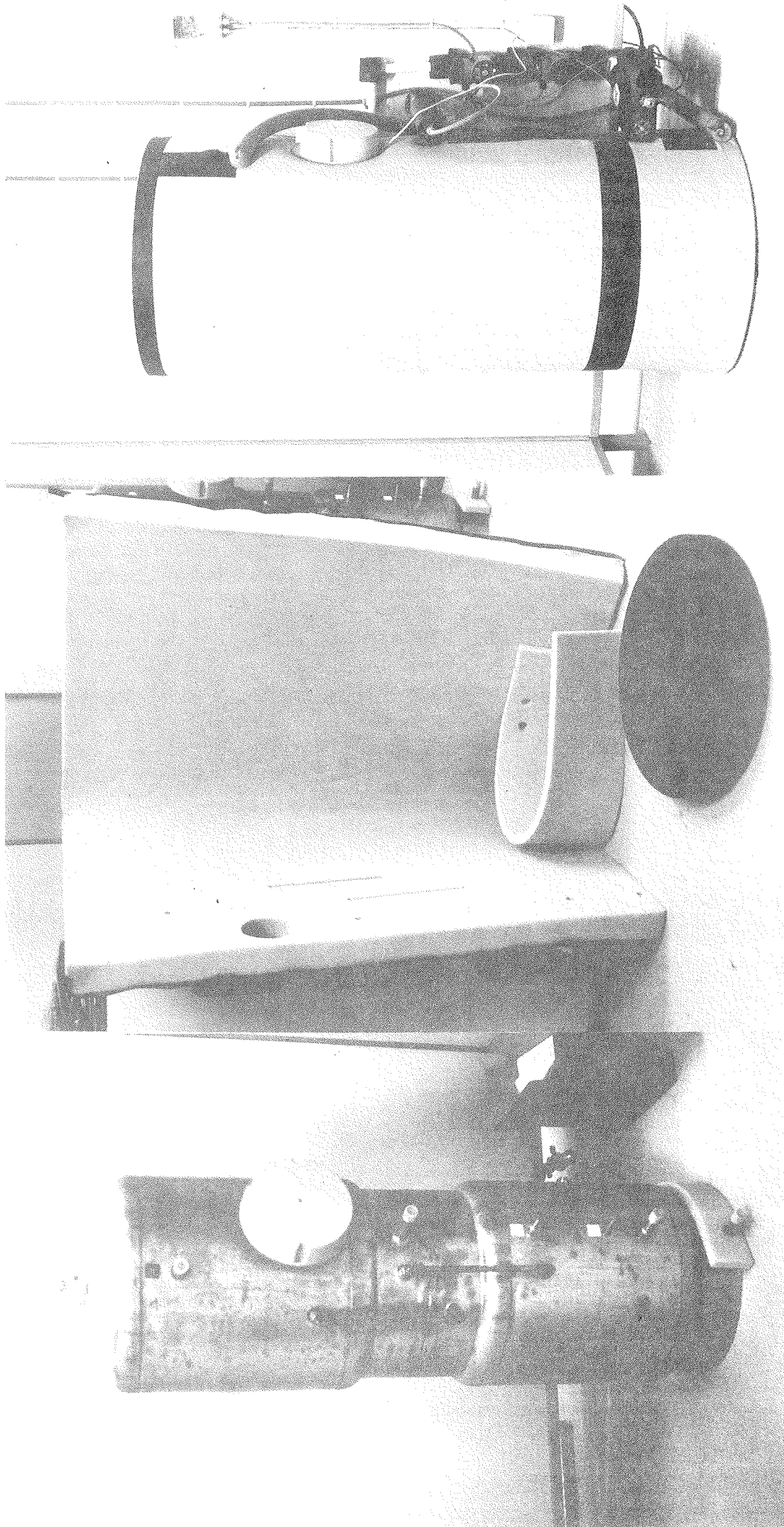
Figur 16 og 17 viser fotos af anlæggets solfanger og varmelager.



Figur 15. Principskitse af det afprøvede solvarmeanlæg.



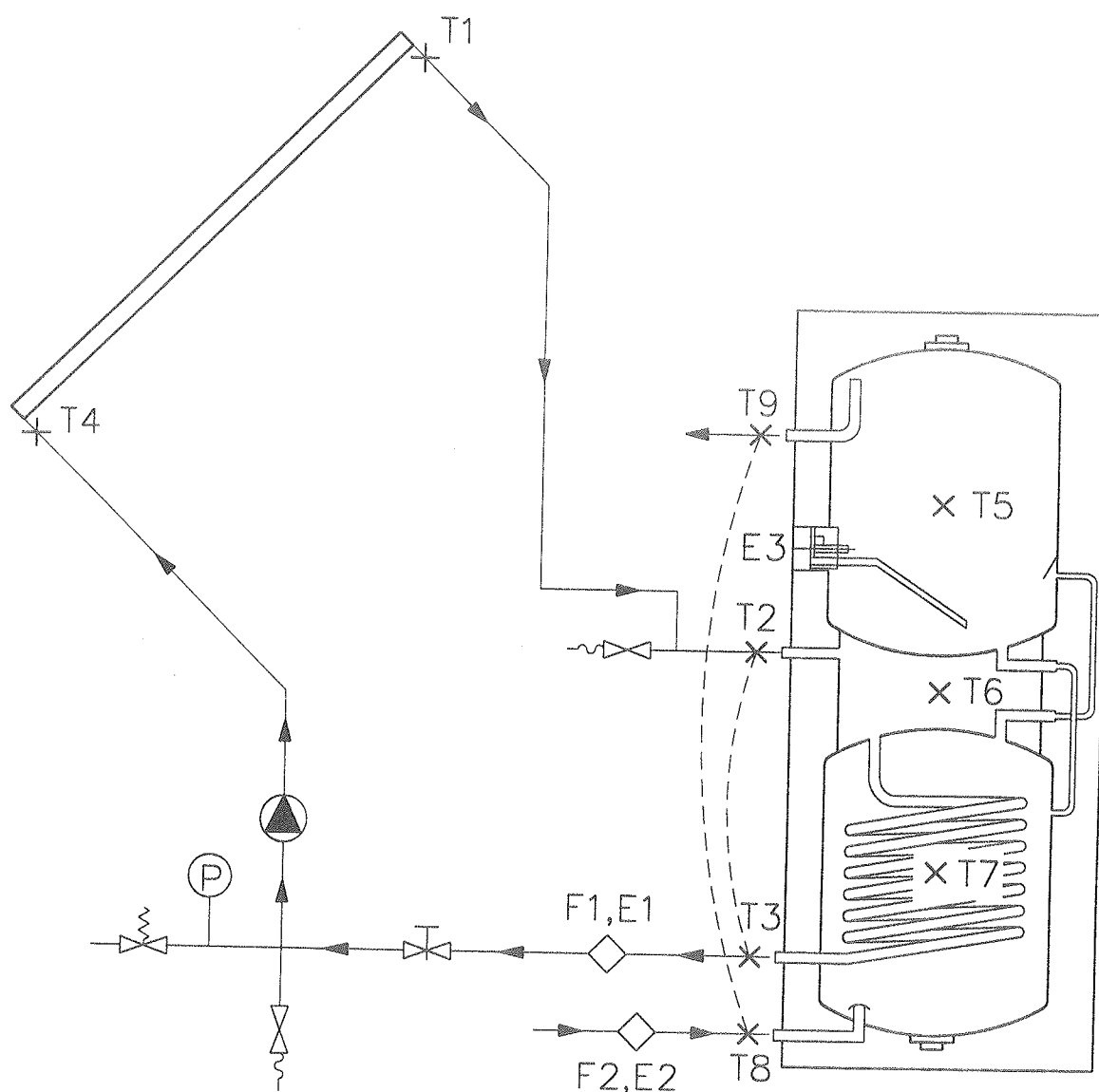
Figur 16. Det afprøvede solvarmeanlægs solfangerelement (til højre) på det nye solfangerstativ.



Figur 17. Solvarmeanlæggets uisolerede varmelager, varmelagerets skumisoleringsskappe og det isolerede varmelager med to cirkulationspumper.

3.2 Målesystem og afprøvningsbetingelser.

Målesystemet og måleprocedurerne, som blev benyttet ved afprøvningen af anlægget, er beskrevet i [7]. På figur 18 er vist, hvilke temperaturer, volumenstrømme og energimængder, der måles i anlægget. Varmelagerets temperaturmålepunkter er placeret som vist på figuren.



Figur 18. Målte temperaturer, flow og energimængder.

Temperaturerne måles med termoelementer af kobber-konstantan, type TT. Varmelagerets termoelementer er placeret udvendigt på beholderne 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 koldtvandstemperaturen 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.

Vejrdata måles som angivet i [7], 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.

Elpatronens termostat i eftervarmebeholderen er indstillet således, at elpatronen opvarmer denne beholder til ca. 50°C.

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 canadiske firma Thermo Dynamics Ltd. Det canadiske anlæg er beskrevet i [4]. Det har et solfangerareal på 5,56 m² og et lager på i alt 270 liter. Anlægget er et low flow anlæg, som har tømning af solfangerkredsen. Anlægget har i modsætning til anlægget fra ZEN B.V. ikke kørt med el-back up i måleperioden. Tabel 9 angiver målte energistrømme for det canadiske og hollandske anlæg.

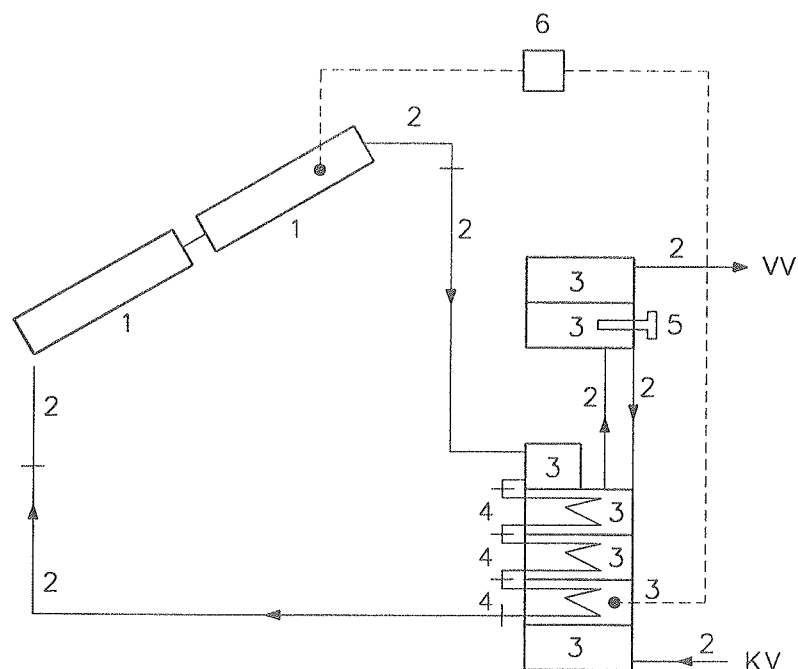
Bruttoydelsen er energimængden overført fra solfangeren, medens nettoydelsen er den udnyttede solvarme, d.v.s brugsvandsforbruget - tilskudsenergi. Da anlægget fra ZEN B.V. har kørt med el-back-up, medens dette ikke har været tilfældet med anlægget fra Thermo Dynamics Ltd., er der forskel på de tappede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

Til simulering af anlægsydelsen er der opbygget en beregningsmodel med solvarmesimuleringsprogrammet EMGP3. EMGP3 [8] er et modulært opbygget solvarmesimuleringsprogram, hvor anlægskonfigurationen af brugeren opbygges ved hjælp af moduler, som simulerer anlæggets enkeltdele.

Figur 19 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.

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 9. Målte ydelser af canadisk og hollandsk anlæg.



1. SOLFANGER ELEMENTER
2. RØR ELEMENTER
3. LAGER ELEMENTER
4. VARMEVEKSLER ELEMENTER
5. EL-VARMELEGERME
6. SOLFANGER STYRING

Figur 19. Anlægsopbygning taget i beregning med EMGP3-programmet.

I modellen er indsat solfangerens effektivitetsligning korrigeret til en gennemsnitlig vindhastighed på 2 m/s. Solfangerens effektivitetsligning bliver således:

$$\eta = 0,78 - 4,87 \times (T_m - T_a)/G$$

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

- I rørkredse regnes med et konstant flow.

D.v.s. det selvcirkulerende flow i rørene mellem over- og undertank kan kun modelleres med et konstant flow. Der regnes med, at der overføres varme fra den underste tank til den øverste, når temperaturen i toppen af den underste tank er højere end temperaturen i den underste del af den øverste tank.

I solfangerkredsen er regnet med et konstant flow på 108 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 18 og 29 liter pr 10 min.

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

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

- Varmeroverføringsevnen i varmeveksleren regnes konstant, og det er således ikke muligt at simulere den varierende varmeoverføringsevne, således som denne er beskrevet i afsnit 2.2. I simuleringerne er anvendt en konstant værdi på 175 W/K.

- Modellen lider af "numerisk diffusion" ved simulering af temperaturlagdelingen i lagerbeholderen. 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. Dette vil især for anlæg med stærkt temperaturlagdelte varmelagre give anledning til simulerede ydelser, der er mindre end de målte. Det vurderes, at den numeriske diffusion ikke vil reducere den beregnede ydelse af det hollandske anlæg væsentligt.

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 9. maj 1994.

På figur 20 og 21 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 god overensstemmelse mellem målinger og beregninger.

I nedenstående tabel 10 er angivet målte og beregnede energimængder i perioden.

	Målt kWh	Beregnet kWh	Forskel kWh	%
Tappet varmt vand	203	201	2	1,0
Solenergi i solfangerkreds	149	146	3	2,0
Tilført supplerende energi	82	76	6	7,8
Udnyttet solenergi	121	125	-4	-3,2
Varmetab fra tank	27	21	6	28,5

Tabel 10. Målte og beregnede energistrømme (12. april til 9. maj 1994)

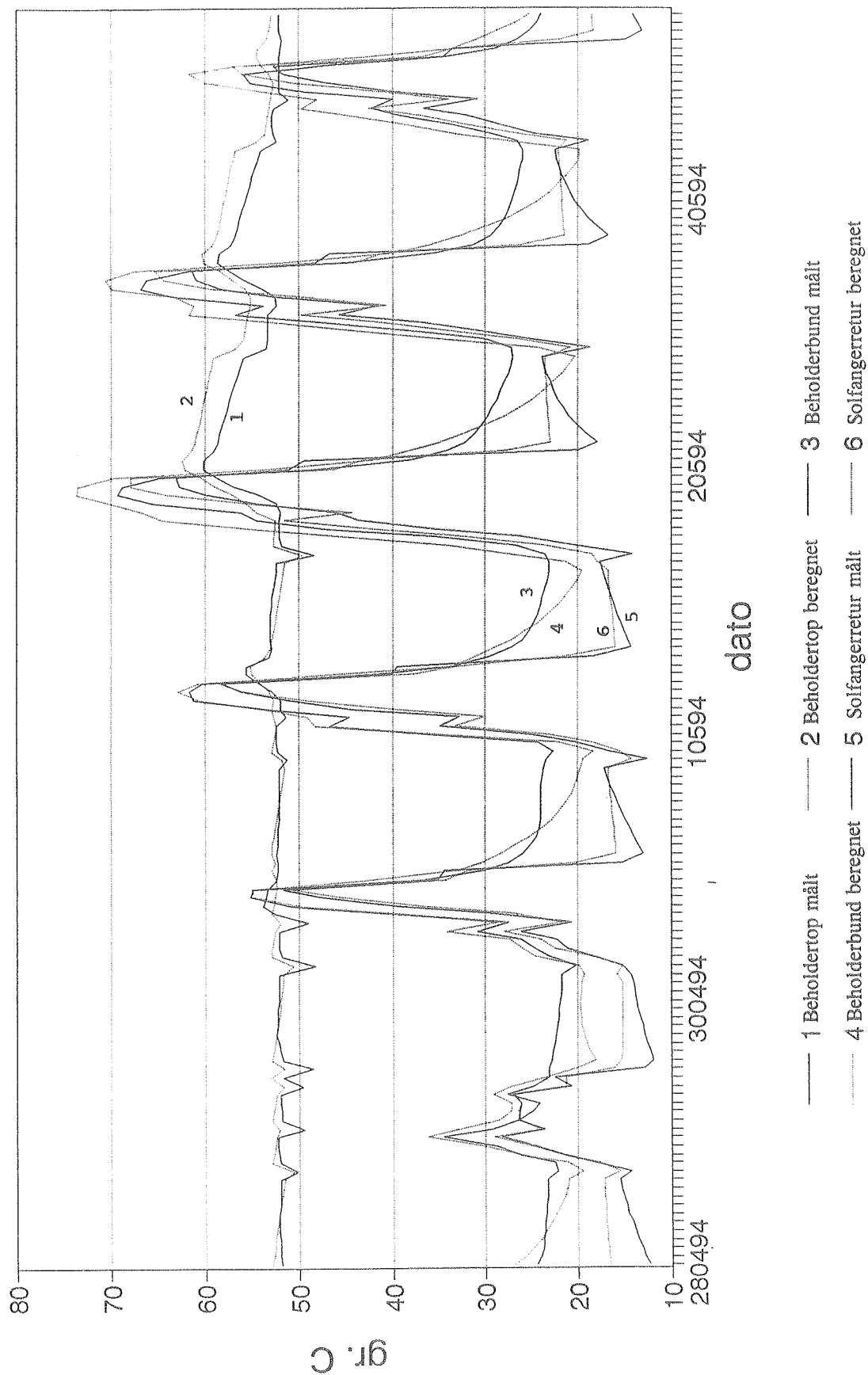
Den udnyttede solenergi er den tappede energi til varmt vand - supplerende energi.

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

Det ses, at de beregnede energimængder i måleperioden (bortset fra varmetabet) er mellem 1 og 7,8 % forskellige fra de målte. For den udnyttede solenergi er forskellen 3,2 %.

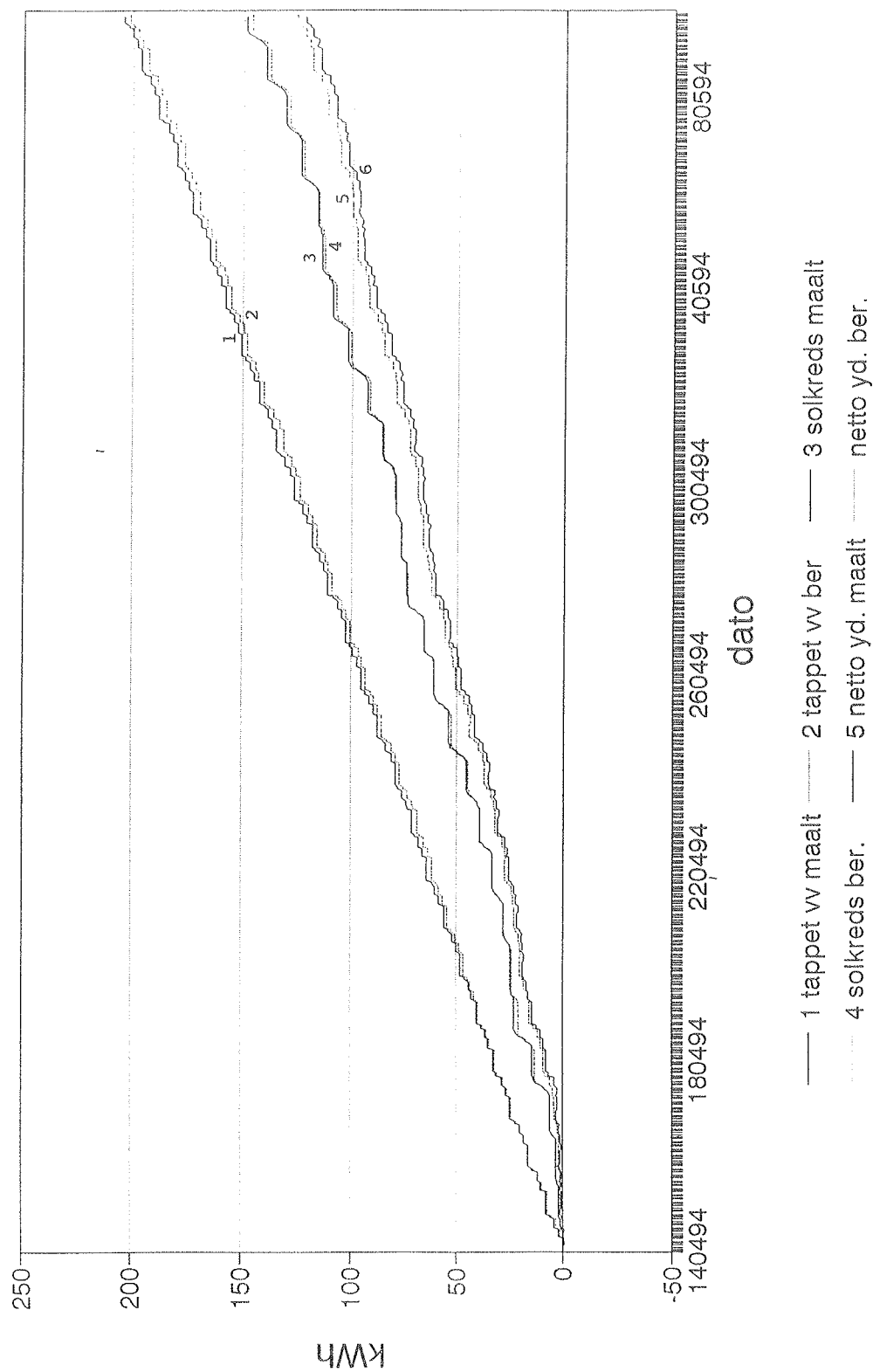
Forskellene kan skyldes måleusikkerhed, men kan også skyldes ovennævnte simplifikationer i beregningsmodellen.

I forbindelse med afprøvningen er der hverken konstateret fejl ved anlægget eller driftsproblemer i øvrigt.



Figur 20. Beregnede og målte temperaturer.

Summerede energier ZEN B.V.



Figur 21. Beregnede og målte energimængder.

3.4 Beregnet årsydelse.

Anlæggets årsydelse med referenceårets vejrdato er beregnet med den opbyggede simuleringssmodel. 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 11. Til sammenligning er endvidere angivet den beregnede årsydelse for det canadiske anlæg fra Thermo Dynamics Ltd.

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 11. Beregnede årsydelser for det canadiske og hollandske anlæg.

4. VURDERING AF ANLÆGGET

Anlæggets solfangerareal på 2,70 m² er lille i forhold til de danske anlæg, som tidligere er afprøvet i laboratoriets prøvestand. På trods heraf har anlæggets ydelse været næsten lige så høj som ydelserne af de danske anlæg [9]. Årsagen er, at anlæggets varmelager har et meget lille varmetab, at solfangeren er effektiv og at anlægget i øvrigt har fungeret helt uden driftsproblemer.

Da de oplyste komponent- og anlægspriser desuden er små sammenlignet med priserne for de danske anlæg, må det sammenfattende konkluderes, at anlægget er velegnet til danske forhold.

5. KONKLUSION

Der er gennemført undersøgelser af et lille billigt solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning. Anlægget markedsføres i Holland af firmaet ZEN B.V.

Anlægget, der er designet efter tømmeprincipet, benytter vand som solfangervæske.

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 solfangerens effektivitet er høj, at varmeoverføringsevnen fra solfangervæsken til varmelageret er høj og at varmelagerets varmetab er lille.

På trods af at anlæggets solfangerareal er væsentligt mindre end solfangerarealerne af de tidligere afprøvede danske anlæg, er anlægsydelsen kun en smule mindre end ydelserne af de danske anlæg.

Årsagen til den forholdsvis høje ydelse er solfangerens og varmelagerets gode termiske egenskaber samt det forhold, at anlægget har fungeret helt uden driftsproblemer. Da anlægget desuden sammenlignet med danske anlæg er billigt, kan det konkluderes, at anlægget er velegnet til danske forhold.

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] "Undersøgelse af solvarmeanlæg fra Thermo Dynamics Ltd". Simon Furbo. Laboratoriet for Varmeisolering. Meddelelse nr. 260, maj 1994.
- [5] "Varmelagring til solvarmeanlæg". Simon Furbo. Laboratoriet for Varmeisolering. Meddelelse nr. 162, september 1984.
- [6] "Forvarmebeholder til solvarmeanlæg". Lise Boye-Hansen. Laboratoriet for Varmeisolering. Meddelelse nr. 256, oktober 1993.
- [7] "Små markedsførte solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning - funktionsafprøvning og ydelsesmålinger. Opbygning af prøvestand". Klaus Ellehauge. Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 93-37, december 1993.
- [8] "Simulation of Thermal Systems. A Modular Program with an Interactive Preprocessor (EMGP3)" Willie L. Dutré. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/Boston/London, 1991.
- [9] "Små markedsførte solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning, funktionsafprøvning og ydelsesmålinger. Sammenfatning af måle- og simuleringsresultater". Klaus Ellehauge. Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 94-12, marts 1994.

