

PRØVNING AF VARMELAGERUNITS
TIL SOLVARMEANLÆG

SIMON FURBO
APRIL 1980

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

MEDDELELSE NR. 97

Forord

Energiministeriets (tidligere Handelsministeriets) projekt vedrørende udvikling af mindre varmelagre har til formål gennem teoretiske og eksperimentelle studier at vurdere og udvikle varmelagre, der er egnede til danske forhold.

Projektet udføres af Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole, i samarbejde med interesserede institutter og erhversvirksomheder.

I projektet, der udføres i perioden 1978 - 1980, indgår følgende delprojekter:

Varmelagring i,

- a) Vand
- b) Stenmagasiner
- c) Smeltevarmelagre
- d) Bygningskonstruktioner
- e) Kemiske reaktanter
- f) Vandbassiner (sæsonlagring)
- g) Jord

Projektet tager sigte på, at de opnåede resultater allerede på kort sigt skal kunne anvendes i praksis.

RESUME

Forskellige solfangerfabrikanter varmelagerunits til solvarmeanlæg til brugsvandopvarmning er afprøvet med hensyn til varmetekniske forhold.

Afprøvningsproceduren for varmelagrene er beskrevet. For hver enkelt varmelagerunit er følgende forhold undersøgt:

- varmetabskoefficienten for varmelageruniten når solfangeren er i drift.
- Afkølingsforløbet for lagertemperaturerne i en periode uden varmetilførsel eller varmetapning.
- Varmelagerunitens varmelagringskapacitet.
- Varmeoverførselsevnen fra solfangervæskens til varmelageret for forskellige lagertemperaturer.

Der er opstillet forbedringsforslag for hver enkelt varmelagerunit. Desuden er erfaringerne fra afprøvningsrækkerne omtalt.

Indholdsfortegnelse

Side

0.	Indledning	2
1.	Prøvningsprocedure for varmelagre	3
1.0	Prøvestandens formål	3
1.1	Prøvestandens opbygning	3
1.2	Prøvestandens målesystem	8
1.3	Afprøvning af varmelagre	9
1.3.1	Måling af varmetab	9
1.3.2	Varmelagringskapacitet og varmeoverførselsevne fra solfangervæske til varmelager	11
2.	Prøvning af varmelagerunits	14
2.1	Metro Combibeholder type 2002 C	15
2.1.1	Identifikation af varmelagerunit	16
2.1.2	Beskrivelse af lagerunit	16
2.1.3	Måleresultater	18
2.1.4	Diskussion af måleresultater	21
2.2	Corona-Vex lagertype HSW 300/ST 175	24
2.2.1	Identifikation af varmelagerunit	25
2.2.2	Beskrivelse af lagerunit	25
2.2.3	Måleresultater	27
2.2.4	Diskussion af måleresultater	30
2.3	AR-CON lagertank L-410	34
2.3.1	Identifikation af varmelagerunit	35
2.3.2	Beskrivelse af lagerunit	35
2.3.3	Måleresultater	38
2.3.4	Diskussion af måleresultater	40
2.4	HS-Solvarmelagertank type I	41
2.4.1	Identifikation af varmelagerunit	42
2.4.2	Beskrivelse af lagerunit	42
2.4.3	Måleresultater	44
2.4.4	Diskussion af måleresultater	47
2.5	Dæmpalager B-6/1 - unit	48
2.5.1	Identifikation af varmelagerunit	49
2.5.2	Beskrivelse af lagerunit	49
2.5.3	Måleresultater	52
2.5.4	Diskussion af måleresultater	52

2.6 Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400	57
2.6.1 Identifikation af varmelagerunit	58
2.6.2 Beskrivelse af lagerunit	58
2.6.3 Måleresultater	61
2.6.4 Diskussion af måleresultater	64
2.7 Solarmatic akkumuleringstank	66
2.7.1 Identifikation af varmelagerunit	67
2.7.2 Beskrivelse af lagerunit	67
2.7.3 Måleresultater	70
2.7.4 Diskussion af måleresultater	72
3. Sammenfatning af måleresultater	76
Appendix A. Målenøjagtighed	82
1. Varmetabskoefficienten	83
2. Varmekapaciteten	84
3. Varmeoverførselsevnen	88
Referencer	90
Projektorganisation	91
Liste over udkomne rapporter	92

Figurliste

Side

Figur 1.	Principskitse af afprøvningsopstilling til varmelagerafprøvning.....	4
2.	Afprøvningsopstillingens kontrolpanel	6
3.	Solfangervæskens rørsystem med pumpe,	6
4.	Solfangervæskens rørsystem med varmelegeme,.....	7
5.	Afkølingssystemet med de 5 ventiler,	7
6.	Datoopsamlingsudstyret til opstillingen er placeret på kontrolbordets to øverste hylder	8
1.1	Varmelagringsprincip for Metro Combibeholder type 2002 C	16
1.2	Metro Combibeholder type 2002 C	17
1.3	Afkølingsforløb for Metro Combibeholder type 2002 C	19
1.4	Varmeoverførselsevne fra solfangervæske til Metro Combibeholder type 2002 C.....	20
1.5	Tværsnit af mineraluldslaget,	21
1.6	10 cm mineraluldsisolering placeret under beholderen	22
2.1	Varmelagringsprincip for Corona-Vex lagertype HSW 300/ST 175	25
2.2	Corona-Vex lagertype HSW 300/ST 175	26
2.3	Afkølingsforløb for Corona-Vex lagerunit type HSW 300/ST 175	28
2.4	Varmeoverførselsevne fra solfangervæske til Corona-Vex lagerunit type HSW 300/ST 175	29
2.5	Corona-Vex lagerunittype HSW 300/ST 175 set ovenfra uden kabinetlæg	30
2.6	Corona-Vex lagerunit HSW 300/ST 175 set ovenfra uden kabinetlæg med de 4 rørgennemføringer isoleret med 14 mm Armaflex	31
3.1	Varmelagringsprincip for AR-CON lagertank L-410 ..	35
3.2	AR-CON lagertank L-410	37
3.3	Afkølingsforløb for AR-CON lagertank L-410	39
3.4	Varmeoverførselsevne fra solfangervæske til AR-CON lagertank L-410,.....	38

Figur 4.1	Varmelagringsprincip for HS-Solvarmelagertank type I	42
4.2	HS-Solvarmelagertank type I uden kabinettet monteret	43
4.3	Afkølingsforløb for HS-Solvarmelagertank type I..	45
4.4	Varmeoverførselsevne fra solfangervæske til HS-Solvarmelagertank type I	46
5.1	Varmelagringsprincip for Dæmpalager B-6/l-unit ..	49
5.2	Dæmpa B-6/l-unit varmelagerets 2 beholdere uden kabinet	51
5.3	Afkølingsforløb for Dæmpa B-6/l-unit	53
5.4	Varmeoverførselsevne fra solfangervæske til Dæmpa B-6/l-unit	54
6.1	Varmelagringsprincip for Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400	59
6.2	Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400	60
6.3	Afkølingsforløb for Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400	63
6.4	Varmeoverførselsevne fra solfangervæske til Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400	62
6.5	Varmeoverførselsevne fra solfangervæske til Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400. Benyttet solfangervæske:PKL 300	65
7.1	Varmelagringsprincip for Solarmatic akkumulerings-tank	68
7.2	Solarmatic akkumulerings-tank	69
7.3	Afkølingsforløb for Solarmatic akkumulerings-tank.	71
7.4	Varmeoverførselsevne fra solfangervæske til Solar-matic akkumulerings-tank	70
7.5	Varmelagringsprincip for forbedret Solarmatic akkumulerings-tank	73
7.6	Afkølingsforløb for forbedret Solarmatic akkumulerings-tank	75
7.	Måleresultater for de afprøvede lagerunits	77

Tabelliste

Side

Tabel 1.	Liste over anvendte symboler	1
1.1	Data for Metro Combibeholder type 2002 C	18
2.1	Data for Corona-Vex lagertype HSW/300 ST 175	27
3.1	Data for AR-CON lagertank L-410	36
4.1	Data for HS-Solvarmelagertank type I	44
5.1	Data for Dæmpa B-6/1-unit	51
6.1	Data for Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400....	61
7.1	Data for Solarmatic akkumuleringstank	69
7.2	Data for forbedret Solarmatic akkumuleringstank .	72
2.	Data for de afprøvede lagerunits.....	81
3.	De benyttede måleubestemtheder	82
4.	Beregningseksempel på størrelsen af varmetabskoef- ficientens måleubestemthed	84
5.	Beregningseksempel på størrelsen af varmelagrings- kapacitetsmålingens ubestemthed	87
6.	Ubestemtheder på målinger af varmeoverførsels- evnen for forskellige varmeoverførselsevner for et 400 l vandlager	89

T_{VB}	varmelagerets brugsvandstemperatur	$^{\circ}\text{C}$
T_l	varmelagerets temperatur	$^{\circ}\text{C}$
T_o	omgivelsernes temperatur	$^{\circ}\text{C}$
T_f	solfangervæskens fremløbstemperatur til varmelageret	$^{\circ}\text{C}$
T_r	Solfangervæskens returtemperatur fra varmelageret	$^{\circ}\text{C}$
T_{vl}	solfangervæskens temperatur ved varmelegemet i forsøgsopstillingen	$^{\circ}\text{C}$
ΔT_1	solfangervæskens temperaturdifferens over varmelegemet i forsøgsopstillingen	$^{\circ}\text{C}$
ΔT_2	solfangervæskens temperaturdifferens $T_f - T_r$ over varmelegemet	$^{\circ}\text{C}$
τ	tid	h
Q_l	varmelagerets varmeindhold	Wh
Q_u	effektoverførsel til varmelageret	W
Q_{tab}	varmelagerets varmetab	W
EF	effekten i varmelegemet i forsøgsopstillingen	W
$\dot{M}$	solfangervæskeflowet	m^3/s
$(C_p)_t$	solfangervæskens varmekapacitet ved temperaturen $t^{\circ}\text{C}$	$\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$
$(\rho)_t$	solfangervæskens massefylde ved temperaturen $t^{\circ}\text{C}$	kg/m^3
$(UA)_l$	varmelagerets varmetabskoefficient	$\text{W}/^{\circ}\text{C}$
$\Delta\tau$	tidsspring	h
N	antal tidsspring i opvarmningsforløbet	ubenævnt
ΔQ_l	ændring af varmelagerets varmeindhold igennem et $\Delta\tau$ tidsspring under opvarmningsforløbet	Wh
T_{start}	lagertemperaturen ved opvarmningsstart	$^{\circ}\text{C}$
T_{slut}	lagertemperaturen ved opvarmnings Slutning	$^{\circ}\text{C}$
$Q_{lT_{start}, T_{slut}}$	varmeindholdet af lageret i temperaturintervallet ml. T_{start} og T_{slut}	Wh
Q_{kap}	varmelagringsindholdet af varmelageret pr. $^{\circ}\text{C}$ temperaturdif.	$\text{Wh}/^{\circ}\text{C}$
i	indeks, som tilføjet de øvrige symboler angiver, at der er tale om en gennemsnitsværdi gennem tidsperioden $\Delta\tau$.	
$(UA)_{sl}$	varmeoverførselsevne fra solfanger-væske til varmelager	$\text{W}/^{\circ}\text{C}$
$(UA)_{svB}$	varmeoverførselsevne fra solfanger-væske til brugsvandet i varmelager	$\text{W}/^{\circ}\text{C}$

Tabel 1. Liste over anvendte symboler

0. Indledning

Som led i Energiministeriets projekt: "Mindre Varmelagre", der udføres på Laboratoriet for Varmeisolering på Danmarks tekniske Højskole, er der foretaget varmetekniske afprøvninger af solvarmelagerunits, som markedsføres i Danmark.

Formålet med afprøvningerne er at undersøge varmelagrenes egnethed i forbindelse med solvarmeanlæg, at hjælpe producenterne til at udvikle bedre egnede varmelagre samt at indsamle og viderebringe viden vedrørende de varmetekniske forhold, som er forbundet med udformningen af varmelagre.

Prøvningsproceduren er omtalt i afsnit 1. Den er ikke standardiseret og vil senere blive udvidet.

Afprøvningerne af hver enkelt lagerunit er beskrevet i afsnit 2, mens resultaterne er sammenfattet i afsnit 3. Målenøjagtighederne er angivet i appendix A.

1. Prøvningsprocedure for varmelagre.

1.0 Prøvestandens formål

Ved optimering af et solvarmeanlægs varmelager bør der tages hensyn til en række faktorer af forskellig art, fx produktionsmæssige, installationsmæssige, holdbarhedsmæssige og ydeevnemæssige forhold. Vurderingen af forskellige varmelagerudformningers egnethed kræver derfor indsigt i en lang række forhold, og en egentlig optimering af varmelagerudformningen er således en vanskelig sag.

I prøvestanden kan nogle af de varmetekniske forhold, som er knyttet til et varmelager og som er af betydning for solvarmesystemers ydeevne, undersøges, når det varmetransporterende medium er en væske. Ud over varmelagerets varmeindhold måles varmelagerets varmetab og varmeoverførsels- evnen fra solfangervæsken til varmelageret. Måleresultaterne kan benyttes ved en vurdering af et solvarmeanlægs ydeevne og danne baggrund for forslag til en forbedret varmelagerudformning.

1.1 Prøvestandens opbygning

Figur 1 viser en skematisk skitse af prøvestanden, som er opdelt i 3 rørsystemer: et opvarmningssystem med vand som varmebærende medium, et kølesystem med en glykol/vand-blending som kølemedium og et rørsystem til solfangervæsken. Opvarmningssystemet består af en varmtvandsbeholder med tre 6000 W varmelegemer, således at effekttilførslen til vandet kan reguleres fra 0 til 18000 W i 6000 W-spring. En cirkulationspumpe pumper vandet i opvarmningssystemet igennem en varmeveksler, hvor vandet afgiver varme til solfangervæsken. Kølemediets temperatur holdes konstant på -5°C af et køleanlæg. 5 ventiler placeret i kølesystemet styrer kølingen, se figur 1. En håndbetjent reguleringsventil benyttes til en grov regulering af kølemediumflowet. En magnetventil åbner og lukker for kølingen. En motorstyret ventil kan

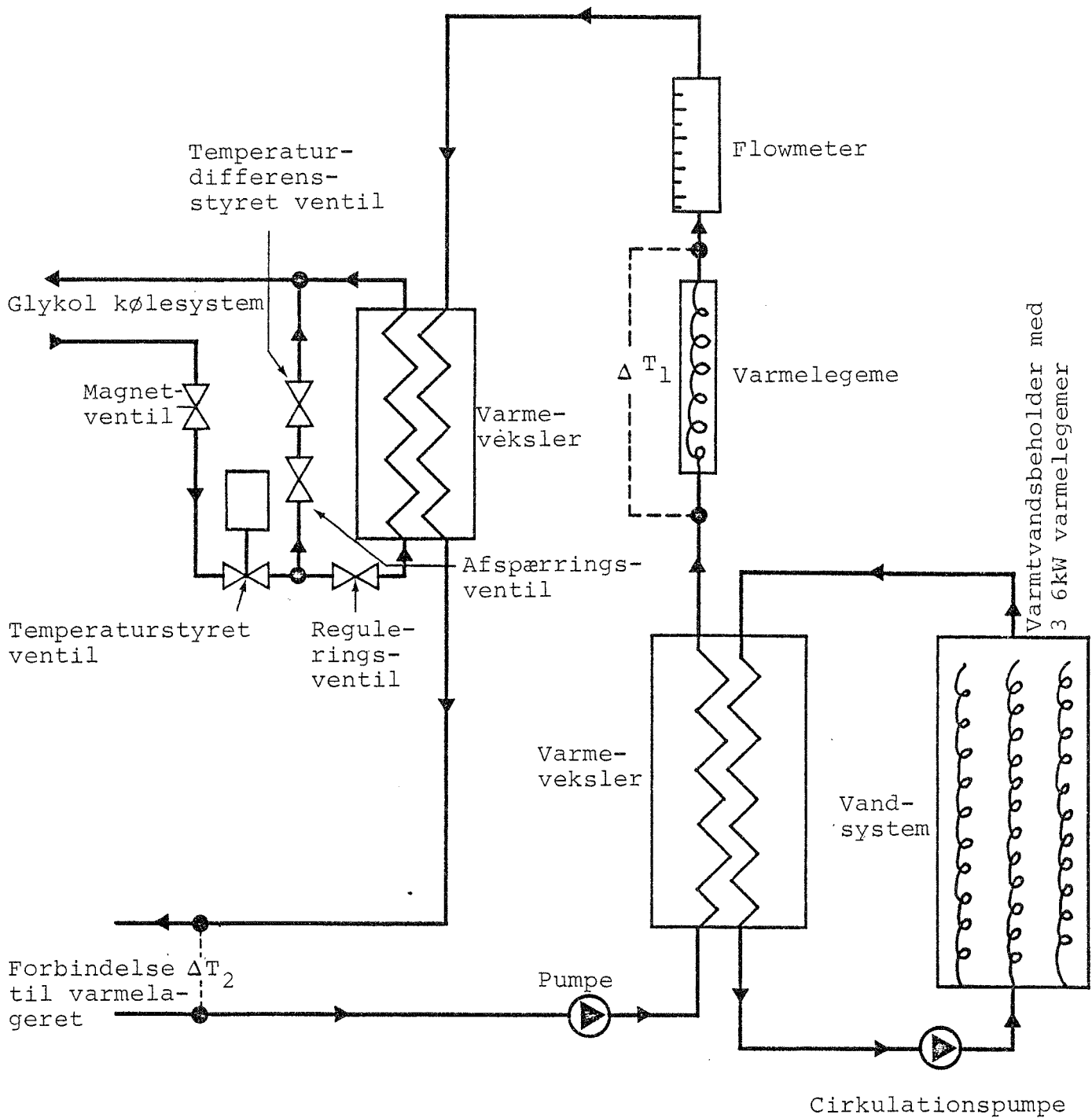


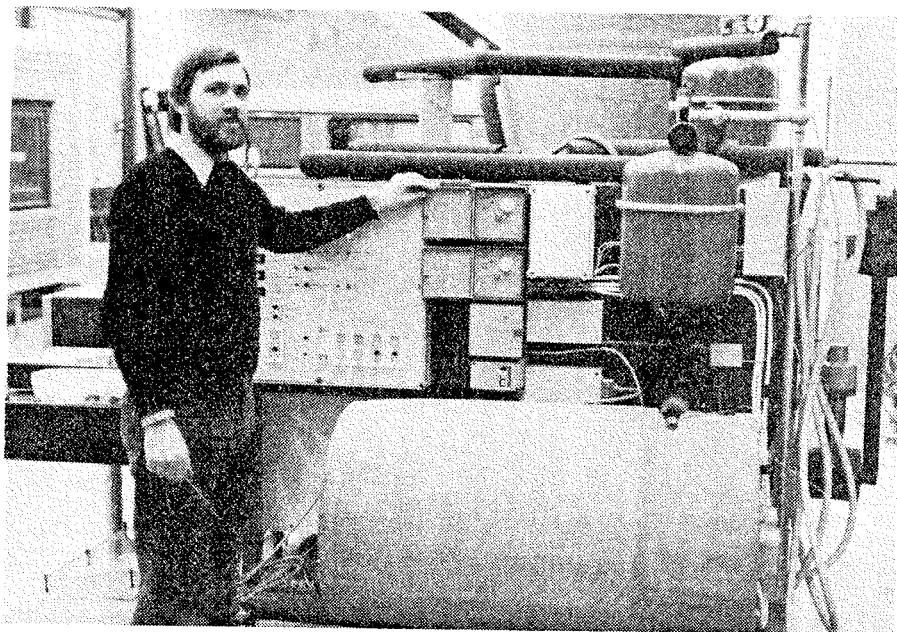
Fig.1 Principskitse af afprøvningsopstilling til varmelagerafprøvning

regulere kølemediumflowet således, at solfangervæskens fremløbstemperatur til varmelageret bliver konstant. En afspærringsventil og en temperaturdifferensstyret ventil placeret i et omløb parallelt med varmeveksleren, hvor kølemediet afkøler solfangervæsken, kan regulere kølemediumflowet igennem varmeveksleren således, at der opnås en konstant temperaturdifferens mellem solfangervæskens fremløb til og retur fra varmelageret. Herved opnås at der kan tilføres en konstant effektmængde til varmelageret. Kølesystemet er altså udformet således, at man enten kan overføre en konstant effektmængde til varmelageret eller holde solfangervæskens fremløbstemperatur til varmelageret konstant.

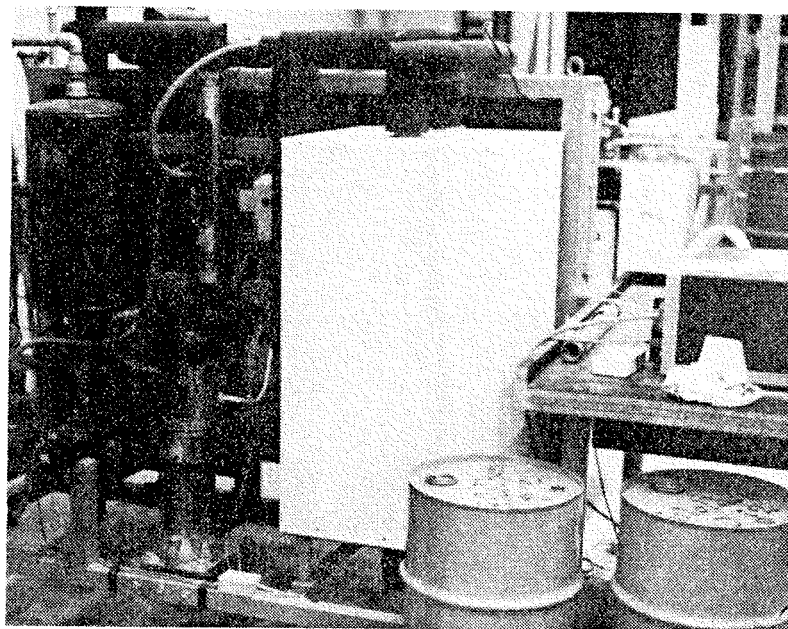
Solfangervæskens rørsystem består af de to omtalte varmevekslere, hvor solfangervæsken opvarmes og afkøles, et i rørsystemet indbygget varmelegeme, et flowmeter, en pumpe og reguleringsventiler, som muliggør en nøjagtig flowindstilling. Kuglehaner placeret i rørsystemet muliggør en forholdsvis let udskiftning af solfangervæsken. Da varmelagrene forbindes til afprøvningsopstillingen med fleksible slanger, kan udskiftning af varmelageret således hurtigt finde sted.

Alle rørsystemerne er isoleret kraftigt for at nedsætte varmetabene. Prøvestanden er placeret i laboratoriets prøvehal, hvor temperaturen normalt ligger i området mellem 20°C og 25°C. Opstillingens pumper, ventiler og varmelegemer styres fra et kontrolpanel.

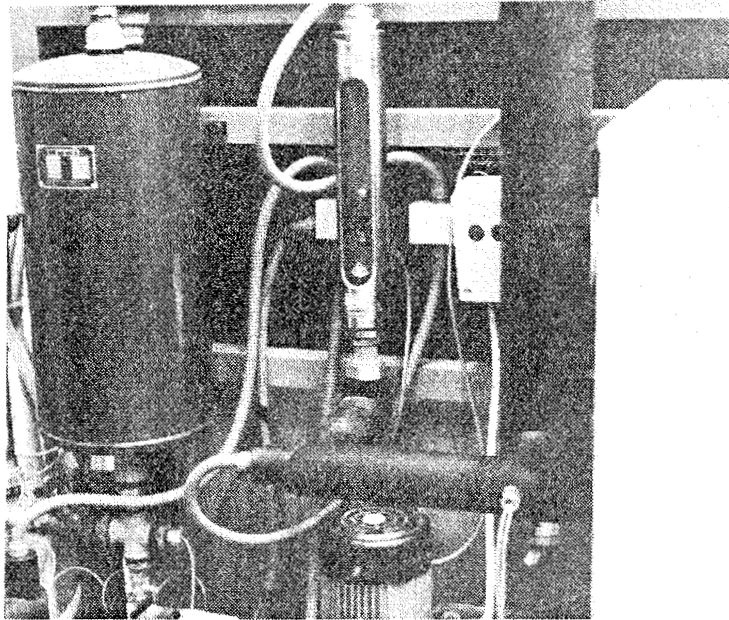
Figur 2 - 5 viser forskellige dele af afprøvningsopstillingen.



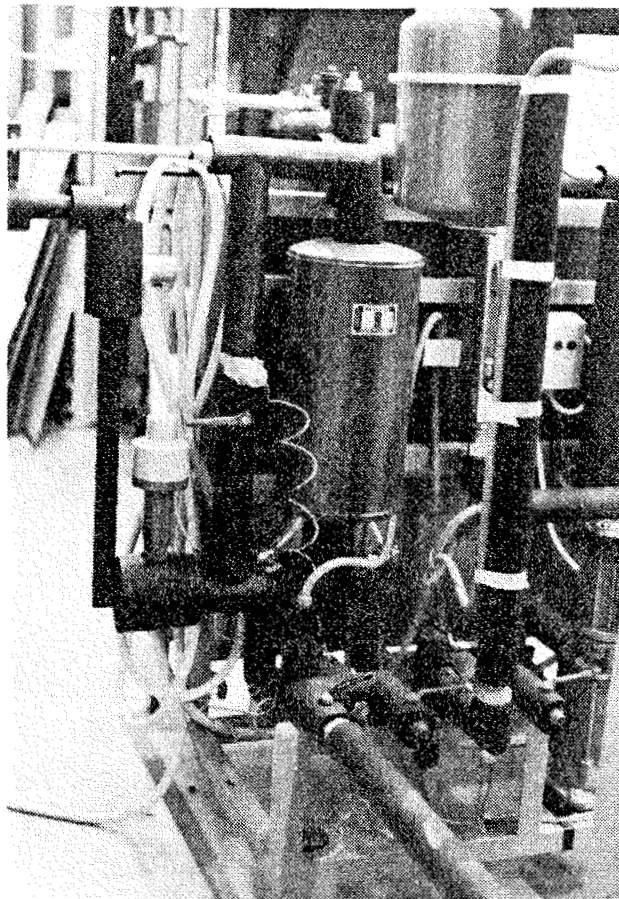
Figur 2. Afprøvningsopstillingens kontrolpanel. Foran panelet ses opvarmningssystemets varmtvandsbeholder med de tre varmelegemer.



Figur 3. Solfangervæskens rørsystem med pumpe, til højre varmeveksler, hvor solfangervæskens opvarmes, og til venstre varmeveksleren, hvor solfangervæskens afkøles.



Figur 4. Solfangervæskens rørsystem med varmelegeme, flowmeter og afkølingsvarmeveksleren.



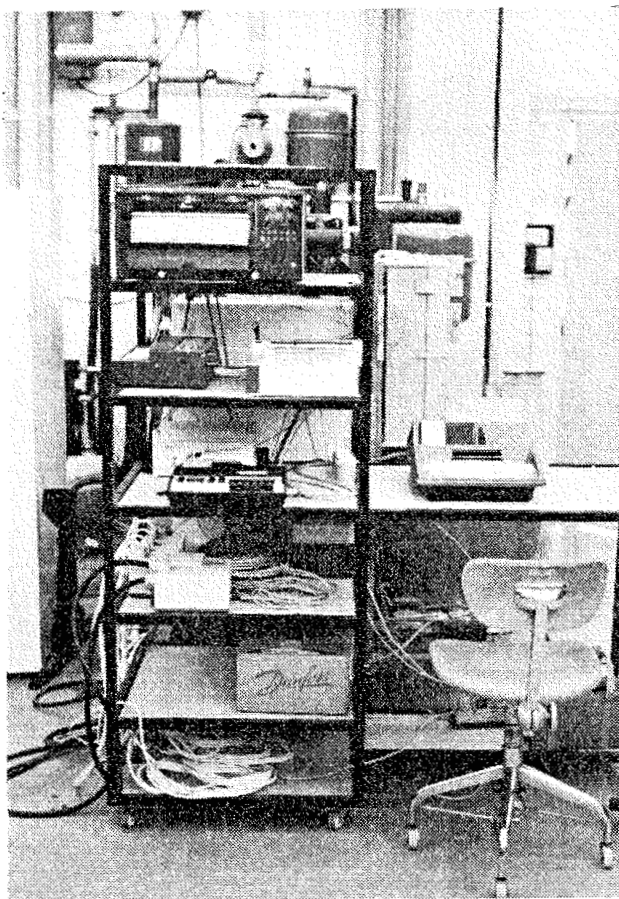
Figur 5. Afkølingssystemet med de 5 ventiler, som styrer forsøgene. Rørtilslutningerne fra solfangervæskens rørsystem til varmelageret ses i forgrunden.

1.2 Prøvestanden målesystem

Temperaturdifferencen over varmelegemet i solfangervæskerørsystemet og mellem forbindelsesstudsene til varmelageret måles kontinuert. Ligeledes måles omgivelsernes temperatur, lagertemperaturen i forskellige niveauer og solfangervæskens temperaturer i de punkter i afprøvningsopstillingen, hvor termosøjlerne er placeret. Endvidere måles den afgivne effekt i varmelegemet i solfangervæskerørsystemet.

Ved alle temperaturmålinger benyttes der termoelementtråd af typen TT kobber-konstanten. Målingerne henføres til en elektrisk reference. Ved temperaturdifferensmålingerne benyttes termosøjler med 10 elementer.

De ovenfor nævnte data opsamles ved hjælp af en 2-kanal og en 12-kanal skriver, se figur 6.



Figur 6. Dataopsamlingsudstyret til opstillingen er placeret på kontrolbordets to øverste hylder.

1.3 Afprøvning af varmelagre

For hvert varmelager måles varmetabet til omgivelserne, varmeindholdet i et temperaturinterval og varmeoverførselsevnen fra solfangervæsken til varmelageret.

1.3.1 Måling af varmetab

Varmetabet udtrykkes som produktet af varmetabskoefficienten og temperaturdifferensen mellem varmelageret og omgivelserne. Varmetabskoefficienten afhænger selvfølgelig af lagerudformningen. Herudover afhænger varmetabskoefficienten bl.a. af lagerplacering, lagertemperatur, omgivelsernes temperatur, temperaturlagdeling i varmelageret og af, om solfangeren er i drift eller ej.

For at få et rimeligt billede af varmetabets størrelse benyttes to metoder ved varmetabsmålingen. Varmelageret placeres ved afprøvningsopstillingen på laboratoriehallens betongulv. Ved den første metode tilføres solfangervæsken, som pumpes langsomt gennem varmelageret, en konstant fremløbstemperatur, som er ca. 25°C varmere end omgivelsernes temperatur. Efter et stykke tid opnår hele lageret næsten samme temperatur, mens solfangervæskens returtemperatur fra varmelageret indstiller sig på en konstant temperatur lidt lavere end fremløbstemperaturen. Når temperatur- og temperaturdifferensstabiliteten er opnået, fastholdes den i mindst 2 timer. Med resultaterne fra det i afsnit 1.2 omtalte målesystem beregnes derefter varmelagerets varmetab og varmetabskoefficient ved det pågældende temperaturniveau. Varmetabskoefficienten, som findes herved, er et mål for varmetabet, når solfangeren er i drift. Med de i tabel 1 anvendte symboler kan varmebalancen for varmelageret under de stabile stationære forhold udtrykkes ved ligningen:

$$\frac{dQ_1}{d\tau} = 0 = Q_u - Q_{\text{tab}}$$

idet varmelagerets varmeindhold jo ikke ændres under de stationære forhold. Varmetabet bestemmes af ligningen:

$$Q_{\text{tab}} = Q_u = \Delta T_2 \cdot \dot{M} \cdot (C_p)_{\frac{T_f + T_r}{2}} \cdot (\rho)_{\frac{T_f + T_r}{2}}$$

Da solfangervæskeflowet findes af

$$\dot{M} = \frac{EF}{\Delta T_1 \cdot (\rho)_{T_{v1}} \cdot (C_p)_{T_{v1}}}$$

beregnes varmetabskoefficienten således:

$$\begin{aligned} (UA)_1 &= \frac{Q_{\text{tab}}}{T_1 - T_o} = \frac{\Delta T_2 \cdot \dot{M} \cdot (C_p)_{\frac{T_f + T_r}{2}} \cdot (\rho)_{\frac{T_f + T_r}{2}}}{T_1 - T_o} \\ &= \frac{EF \cdot \Delta T_2 \cdot (C_p)_{\frac{T_f + T_r}{2}} \cdot (\rho)_{\frac{T_f + T_r}{2}}}{\Delta T_1 \cdot (T_1 - T_o) \cdot (C_p)_{T_{v1}} \cdot (\rho)_{T_{v1}}} \end{aligned}$$

Den anden varmetabsmålingsmetode består i en registrering af afkølingsforløbet for varmelageret igennem en 24 timers periode uden varmetapning. Starttemperaturen for afkølingsforløbet er 66°C for alle varmelagrene, således at en sammenligning også er rimelig ved denne afprøvning. Under afkølingen vil der normalt opstå en temperaturlagdeling i varmelageret. Størrelsen af denne temperaturlagdeling afhænger af lagerudformningen og placeringen af eventuelle kuldebroer. Denne afprøvningsmetode giver et billede af varmelagerets varmetab, når solfangeren ikke er i drift.

1.3.2 Varmelagringskapacitet og varmeoverførselsevne fra solfangervæske til varmelager

Der foretages en opvarmning af varmelageret i temperaturintervallet $15^{\circ}\text{C} - 65^{\circ}\text{C}$. Solfangervæskeflowet M og varmeoverførselseffekten under opvarmningsforløbet vælges inden for områderne $0,01 - 0,02 \text{ l/min l vandlager}$ og $3-6 \text{ W/l vandlager}$. Dette svarer til et solfangervæskeflow på 1 l/min m^2 solfanger og et solfangerudbytte på 300 W/m^2 solfanger, idet der forudsættes et vandvarmelagervolumen/solfangerareal-forhold af størrelsesordenen $50-100 \text{ l/m}^2$ solfanger. Både solfangervæskeflowet og effekttilførslen holdes konstant igennem hele opvarmningsforløbet. Ved hjælp af resultaterne fra de i afsnit 1.2 omtalte målinger kan såvel varmeindholdet i et temperaturinterval som varmeoverførselsevnen beregnes. Idet der ikke tappes varme under opvarmningsforløbet, kan varmebalancen udtrykkes således: Ændringen i varmelagerets varmeindhold pr. tidsenhed er lig effekttilførslen til lageret minus lagerets varmetab, eller med de i tabel 1 angivne symboler:

$$\frac{dQ_1}{d\tau} = Q_u - Q_{\text{tab}}$$

Opvarmningsperioden opdeles i N tidsspring, hver med længden $\Delta\tau$. For små tidsspring $\Delta\tau$ kan differentiaalligningen omskrives til:

$$\frac{\Delta Q_1}{\Delta\tau} = Q_u - Q_{\text{tab}} \quad \text{eller} \quad \Delta Q_1 = \Delta\tau \cdot (Q_u - Q_{\text{tab}})$$

For hele opvarmningsforløbet summeres alle varmeindholdsbidragene for således at finde varmeindholdet i temperaturintervallet fra T_{start} til T_{slut} :

$$Q_{1,T_{\text{start}},T_{\text{slut}}} = \sum_{i=1}^N \Delta\tau_i \cdot (Q_{u_i} - Q_{\text{tab}_i})$$

Varmelagringskapaciteten for varmelageret findes af ligningen:

$$Q_{\text{kap}} = \frac{Q_{l_{T_{\text{start}}, T_{\text{slut}}}}}{T_{\text{slut}} - T_{\text{start}}}$$

Ved indsættelse i ovenstående ligninger benyttes den målte varmetabskoefficient $(UA)_1$, således at varmetabet Q_{tab_1} findes af:

$$Q_{\text{tab}_1} = (UA)_1 \cdot (T_{1_i} - T_{0_i})$$

Solfangervæskeflowet $\dot{M}_i$ bestemmes af:

$$\dot{M}_i = \frac{EF_i}{\Delta T_{1_i} \cdot (C_p)_{T_{vl_i}} \cdot (\rho)_{T_{vl_i}}},$$

og effekttilførslen til varmelageret af:

$$Q_{u_i} = \dot{M}_i \cdot \Delta T_{2_i} \cdot (C_p)_{\frac{T_f + T_r}{2}_i} \cdot (\rho)_{\frac{T_f + T_r}{2}_i}$$

Opvarmningsforløbet benyttes også ved bestemmelse af varmeoverførselsevnen fra solfangervæsken til varmelageret, $(UA)_{s1}$.

Varmeoverførselsevnen angiver, hvor stor effekt der kan overføres fra solfangervæske til lager pr. °C temperaturforskel mellem solfangervæske og varmelager. Størrelsen af varmeoverførselsevnen afhænger af varmelagerudformningen, solfangervæsken, solfangervæskeflowet og varmelagertemperaturen. Varmeoverførselsevnen beregnes under hele opvarmningsforløbet, således at afhængigheden af lagertemperaturen klarlægges. Forudsættes lagertemperaturen at være konstant i hele lageret, kan varmeoverførslen findes af ligningen:

$$\frac{T_f - T_r}{T_f - T_l} = 1 - e^{-\frac{(UA)_{sl}}{\dot{M} \cdot (C_p)_{\frac{T_f+T_r}{2}} \cdot (\rho)_{\frac{T_f+T_r}{2}}}}$$

Ligningen kan omskrives til:

$$(UA)_{sl} = - \dot{M} \cdot (C_p)_{\frac{T_f+T_r}{2}} \cdot (\rho)_{\frac{T_f+T_r}{2}} \ln\left(1 - \frac{T_f - T_r}{T_f - T_l}\right)$$

hvor solfangervæskeflowet som før beregnes af:

$$\dot{M} = \frac{EF}{\Delta T_l \cdot (C_p)_{T_{vl}} \cdot (\rho)_{T_{vl}}}$$

2. Prøvning af varmelagerunits

De afprøvede varmelagerunits er:

- 2.1 Metro Combibeholder type 2002 C
- 2.2 Corona-Vex lagertype HSW 300/ST 175
- 2.3 AR-CON lagertank L-410
- 2.4 HS-solvarmelagertank type I
- 2.5 Dæmpa B-6/l-unit
- 2.6 Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400
- 2.7 Solarmatic akkumuleringstank

Afprøvningerne af hver enkelt lagerunit er beskrevet i det følgende.

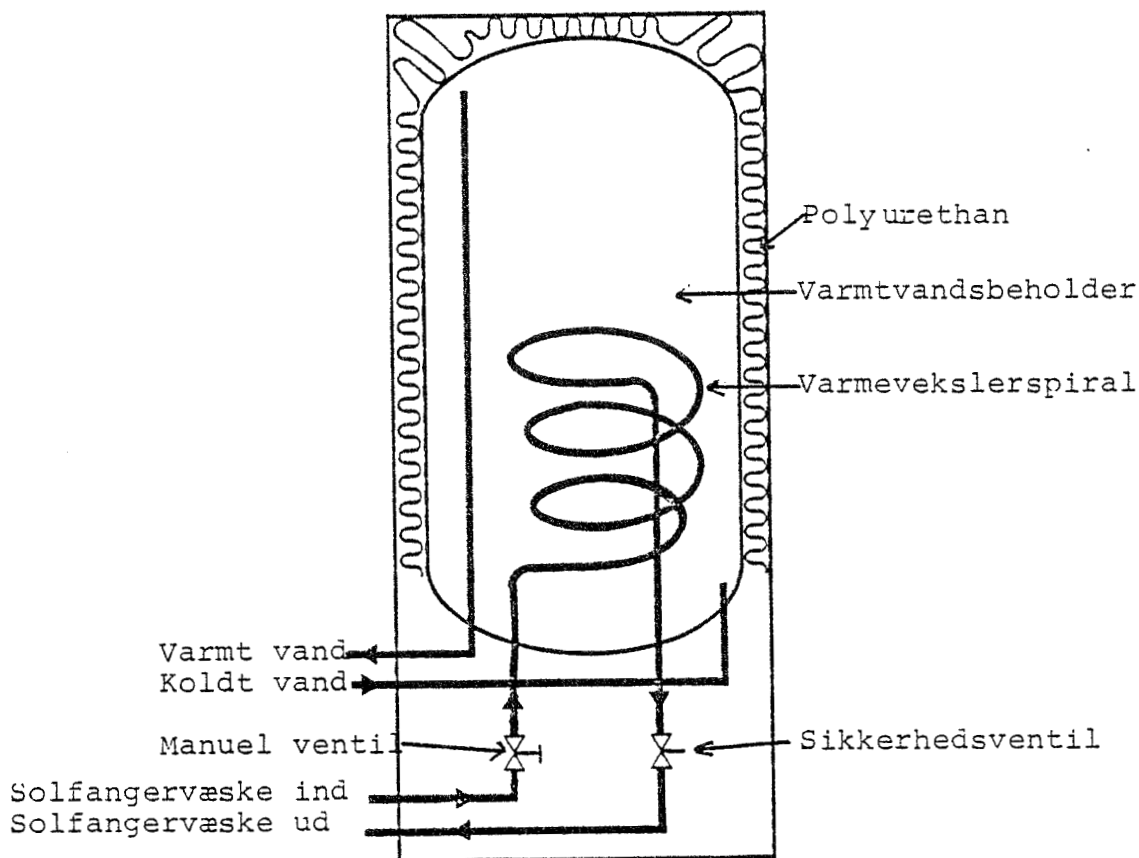
2.1. Metro Combibeholder type 2002 C

2.1.1 Identifikation af varmelagerunit

Firmanavn: Metro
Adresse: Bymosevej 1-3, 3200 Helsingør
Telf.nr. 03-296211
Lagerunitmodel: Combibeholder type 2002 C

2.1.2 Beskrivelse af lagerunit

Varmelagringsprincippet fremgår af figur 1.1. Brugsvandet benyttes som varmeakkumulerende materiale. Varmen overføres fra solfangerkredsen til brugsvandet ved hjælp af en varmevekslerspiral placeret i bunden af varmtvandsbeholderen. Varmevekslerspiralen er udformet som en dobbeltspiral med et indvendigt kobberør og et udvendigt stålrør. Mellemrummet mellem de to rør er delvist vandfyldt og afspærret af en sikkerhedsventil og en stophane. Sikkerhedsventilen skal åbne ved et tryk, der er lavere end trykket i såvel solfangerkreds som i varmtvandsbeholderen. Sikkerhedsventilen vil derfor åbne ved eventuel lækage i varmevekslerspiralen. Herved opnås ved en elegant og materialebesparende metode dobbeltadskillelse mellem solfangervæsken og brugsvandet.



Figur 1.1 Varmelagringsprincip for Metro Combibeholder type 2002 C.

Den cylinderformede beholder er placeret på et stativ, hvortil et kabinet er fastgjort. Mellemrummet mellem beholder og kabinet er opskummet med polyurethan. Alle beholdernes rørgennemføringer er placeret i beholderens bund, som er uisoleret. Lagerunitten indeholder ikke styringssystem, ekspansionsbeholder, ventiler, pumpe og lignende udstyr til et solvarmeanlæg. Varmelagerunitten er vist på fig. 1.2.

Størrelsen af lagerunitten fremgår af tabel 1.1. Lagerunitten er afprøvet med en propylenglykol/vand blanding frostsikret til -20°C som solfangervæske.

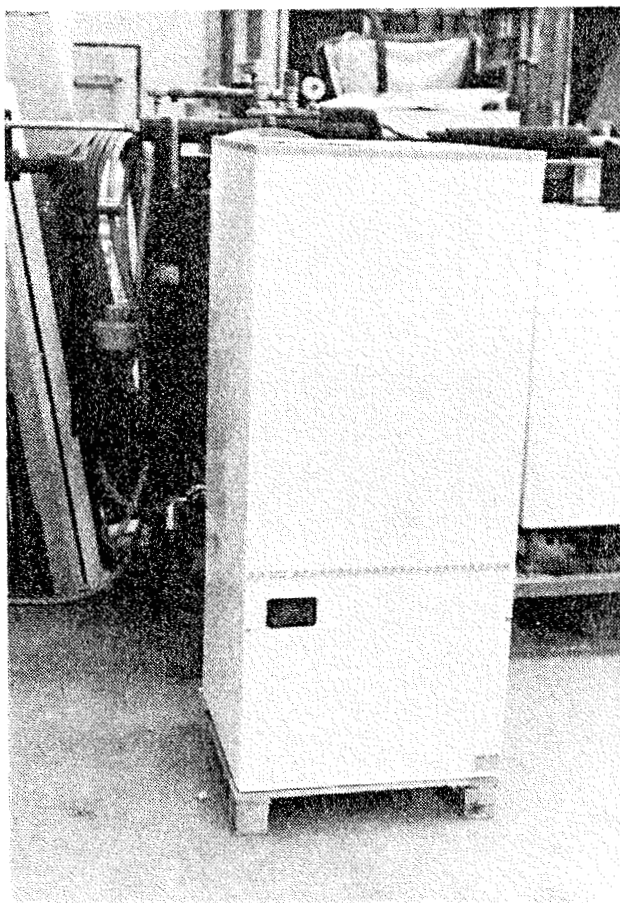


Fig. 1.2 Metro Combibeholder type 2002 C.

Varmtvandsbeholdervolumen		185 l
Sikkerhedskredsens volumen		1 l
Solfangervæskevolumen i varmevekslerspiral		2 l
Total lagerunitmasse (tom)		118 kg
Ydre dimensioner	bredde	60 cm
	dybde	60 cm
	højde	142 cm
Omtrentlig isoleringstykkelse	sider	2-5 cm
	top	1-5 cm
	bund	0 cm

Tabel 1.1 Data for Metro Combibeholder type 2002 C.

2.1.3 Måleresultater

Varmelagerunitens varmetab og varmeoverførselsevnen fra solfangervæske til lager blev målt som beskrevet i afsnit 1. Resultaterne var:

Under stabile temperaturforhold med $51,6^{\circ}\text{C}$ som fremløbstemperatur og $22,4^{\circ}\text{C}$ som omgivelsernes temperatur var varmelagerunitens varmetabskoefficient, når solfangeren var i drift:

$$4,6 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$$

Lagerunitens afkølingsforløb uden varmetilførsel og tapning igennem 24 timer fremgår af figur 1.3. Vandtemperaturen i 3 forskellige niveauer, øverst $T_{VB\phi}$, i midten T_{VBm} og nederst T_{VBn} er registreret.

Med et solfangervæskeflow på $5,8 \text{ l/min}$ og en effektoverførsel på ca. 1600 W blev varmelageruniten opvarmet fra 10°C til 65°C . Varmelagringskapaciteten var:

$$220 \text{ Wh}/^{\circ}\text{C}$$

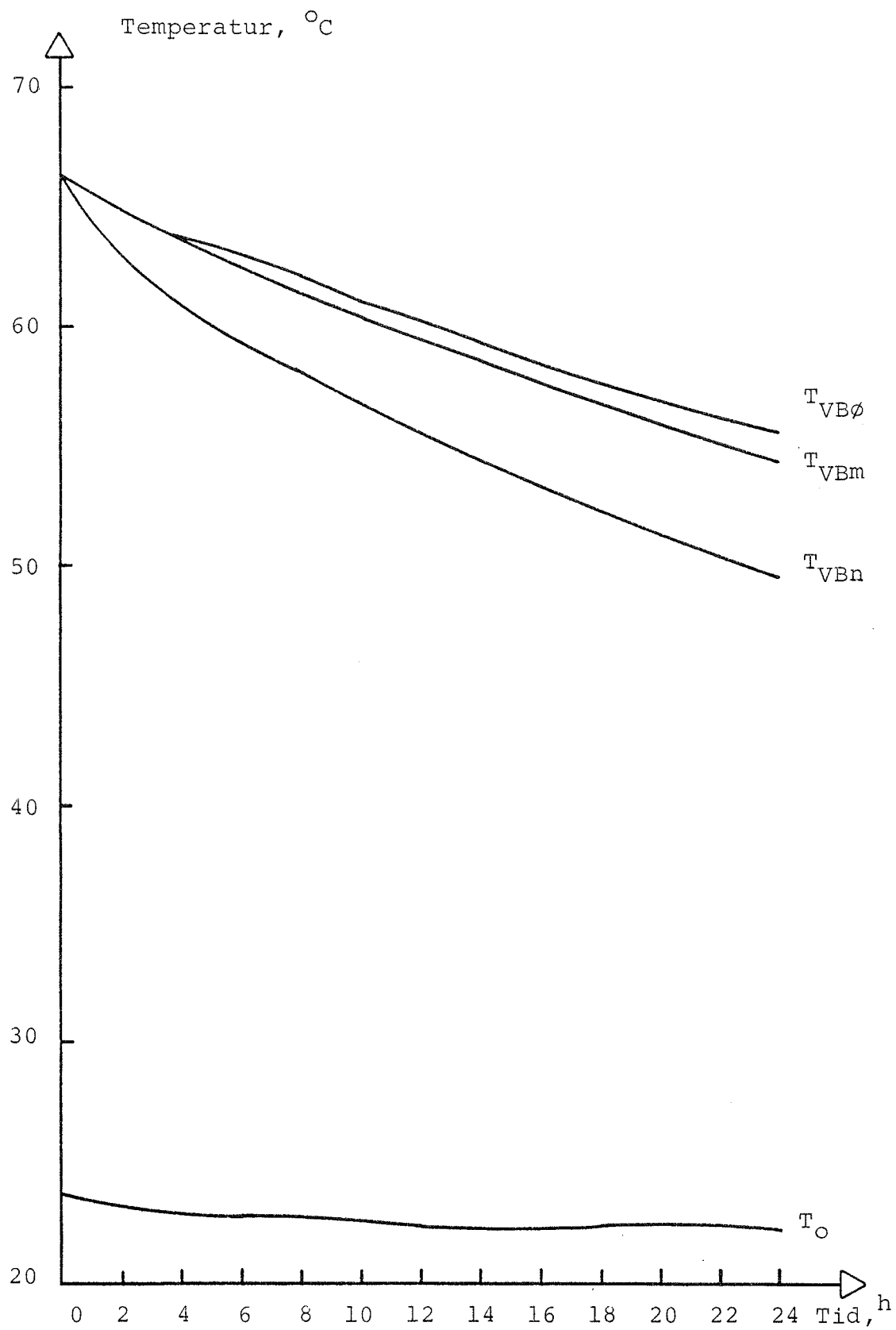
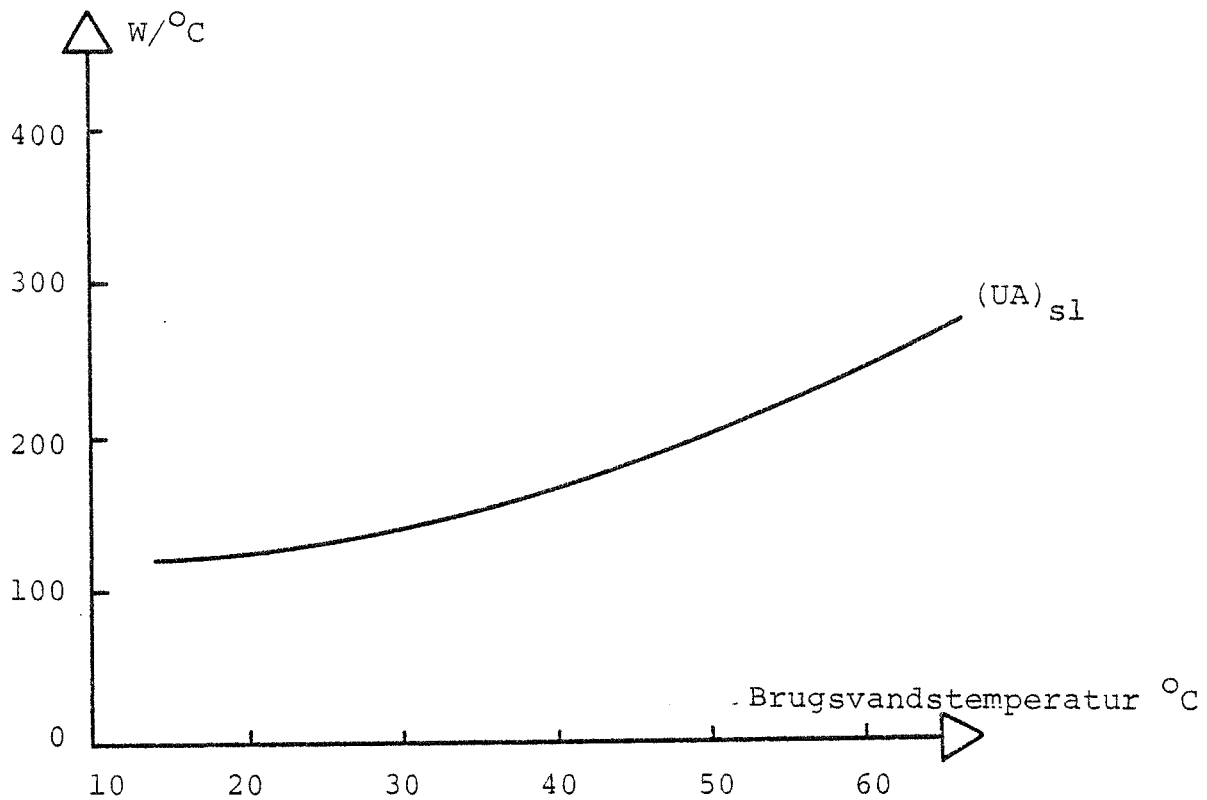


Fig. 1.3 Afkølingsforløb for Metro Combibeholder type 2002C.

Varmeoverførselsevnen fra solfangerkredsen til brugsvandet fremgår af figur 1.4.

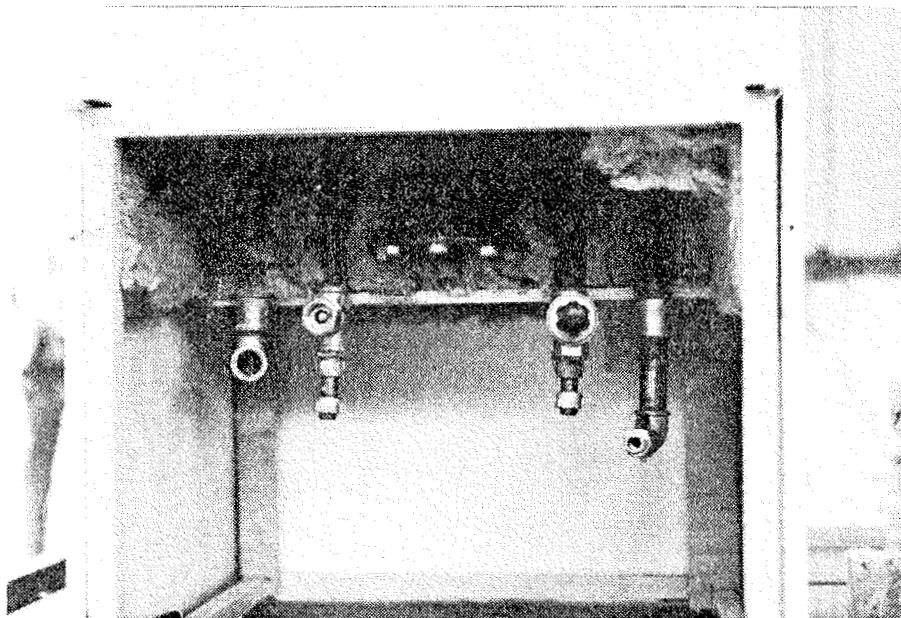


Figur 1.4 Varmeoverførselsevne fra solfangervæske til Metro Combibeholder type 2002 C. Benyttet solfangervæskeflow 5,8 l/min og effektoverførsel: 1600 W.

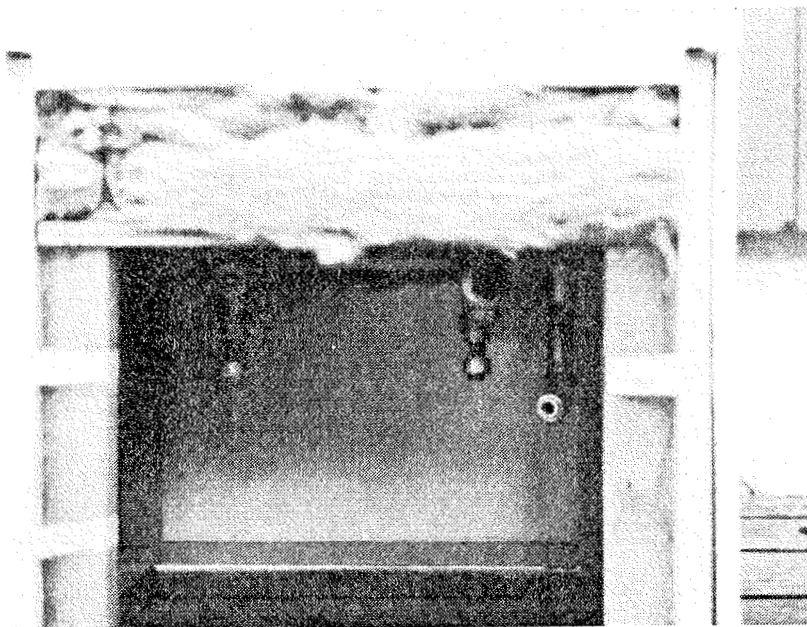
2.1.4 Diskussion af måleresultater

Størrelsen af varmelagerunitens varmetab svarer til en ideel mineraluldsisoleringstykkelse på ca. 1 cm. Da lageruniten er uisoleret i bunden, hvor der yderligere er 4 uisolerede rørgennemføringer, er det naturligt at undersøge betydningen af en eventuel bundisolering.

Derfor blev bunden og den nederste del af beholdervæggen isoleret med 10 cm mineraluld, se figur 1.5 og 1.6.



Figur 1.5 Tværsnit af mineraluldslaget, som bunden af beholderen blev isoleret med. Koldt- og varmtvandsforbindelsesrørene, de to yderste rør, er forlænget, så en fuldstændig isolering er muliggjort.



Figur 1.6 10 cm mineraluldsisolering placeret under beholderen.

Trods den relativt kraftige bundisolering blev varmetabskoefficienten kun reduceret fra $4,6 \text{ W/}^\circ\text{C}$ til $4,0 \text{ W/}^\circ\text{C}$. Altså er der tale om en forholdsvis ringe reduktion af varmetabet. Årsagen hertil er, at den stillestående luft under beholderen inde i kabinettet i det uisolerede tilfælde ikke er meget koldere end det forholdsvis kolde vand ved beholderens bund og i rørgennemføringerne. Herved får varmeafgivelsen fra rørgennemføringerne og bunden ikke en altafgørende betydning for størrelsen af lagerunitens varmetab. Lagerudformningsprincippet, hvor rørgennemføringer og i øvrigt det for solvarmesystemer nødvendige ekstra udstyr, som f.eks. pumper, ventiler, ekspansionsbeholder, styringsudstyr osv placeres under lagertanken i et rum med stillestående luft, synes derfor set ud fra et varmetabsmæssigt synspunkt at være ideelt.

Den største del af varmetabet fra lagerunitten skyldes den meget lille isoleringstykkelse på midten af kabinetets sider og på beholdertoppens midte. Det anbefales derfor, at den reelle isoleringstykkelse disse steder øges, hvilket f.eks. kan ske ved at øge kabinettets dimensioner, så der bliver mere plads til isoleringsmaterialet. Endvidere foreslås det, at det for solvarmeanlæg nødvendige udstyr placeres i rummet under beholderen, således at monteringsarbejdet lettes. Endelig må en isolering af bunden af beholderen eller af rummet under beholderen overvejes, dels fordi varmetabet herfra øges når pumper, styringssystem, ventiler, ekspansionsbeholder osv er monteret i rummet, dels fordi tabet får en relativ større betydning, når side- og topisoleringen er forbedret.

Lagerunitens vandvolumen er 185 l. Vælges den kritiske varmeoverførselsevne fra solfangervæskens til brugsvandet til $25 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}^2$ solfanger, ses det af figur 1.4, at lageret af varmeoverførselsmæssige hensyn er velegnet til solvarmeanlæg med solfangerarealer op til omtrent 5 m^2 .

Efter afprøvningernes afslutning er lagerunit'en forbedret, idet isoleringstykkelsen af beholderens sider er forøget på de svageste punkter.

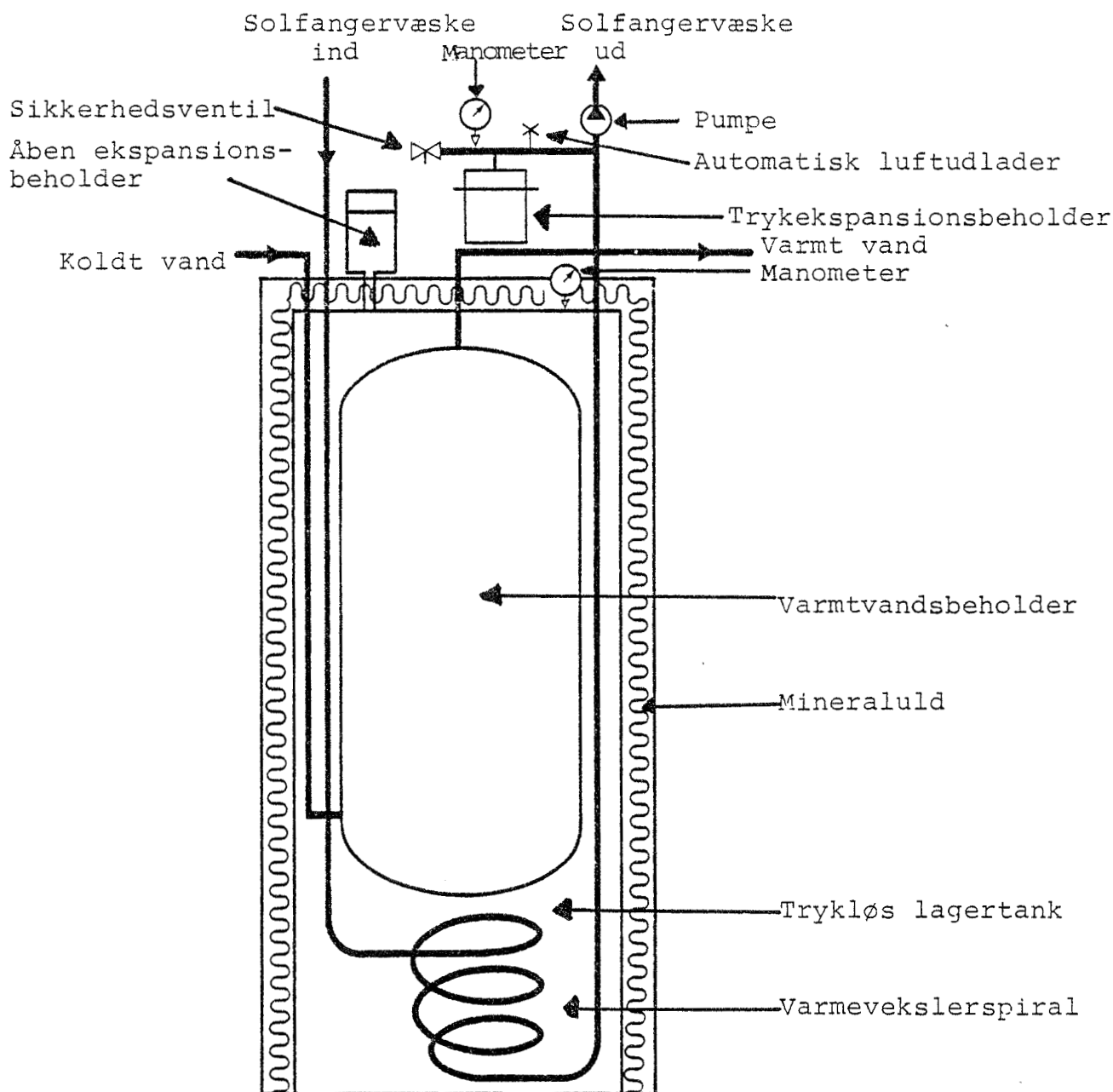
2.2. Corona-Vex lagertype HSW 300/ST 175.

2.2.1 Identifikation af varmelagerunit

Firmanavn: Corona-Vex
Adresse: Assens, 9550 Mariager
Telf.nr.: 08-583779
Lagerunitmodel: Lagertype HSW 300/ST 175

2.2.2 Beskrivelse af lagerunit

Varmelagringsprincippet fremgår af figur 2.1.



Figur 2.1 Varmelagringsprincip for Corona-Vex lagertype HSW 300/ST 175.

Både brugsvand og lagervand benyttes som varmeakkumulerende materiale. Varmen overføres fra solfangerkredsen til lagervandet ved hjælp af en varmevekslerspiral placeret i bunden af den kasseformede trykløse lagertank. Varmen transporteres gennem varmtvandsbeholderens overflade videre til brugsvandet. Et kabinet holdes på plads ved hjælp af nogle på beholderen påsvejste bærere. Mellemrummet mellem kabinet og lagertank er isoleret med mineraluld. Bunden af beholderen er uisolaret. Alle beholderens rørgennemføringer samt det nødvendige udstyr for solvarmeanlæg, så som pumpe, ekspansionsbeholdere, ventiler og styringssystem er placeret i beholderens topplade og i rummet over beholderen mellem kabinet og beholder. Varmelagerunitten er vist på fig. 2.2.

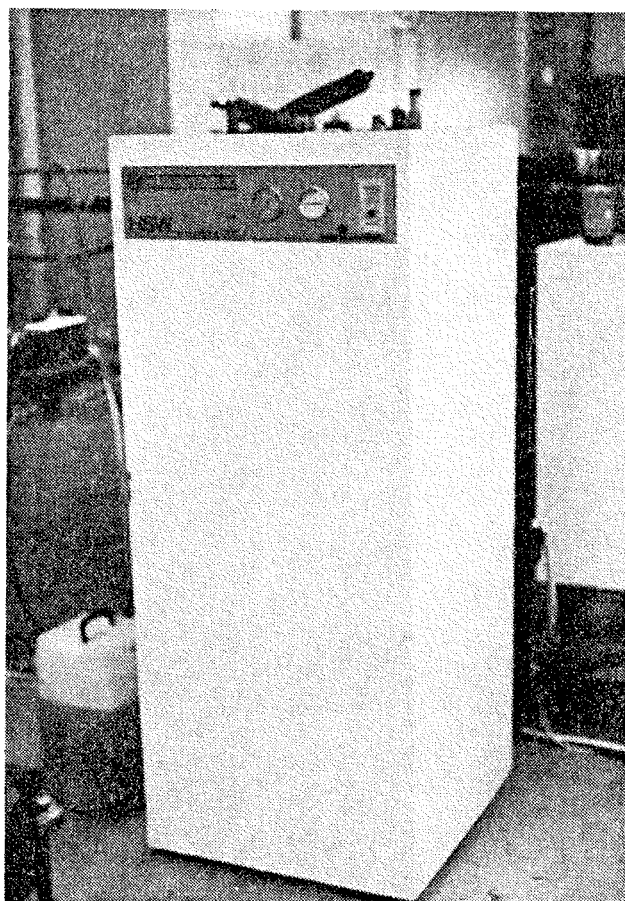
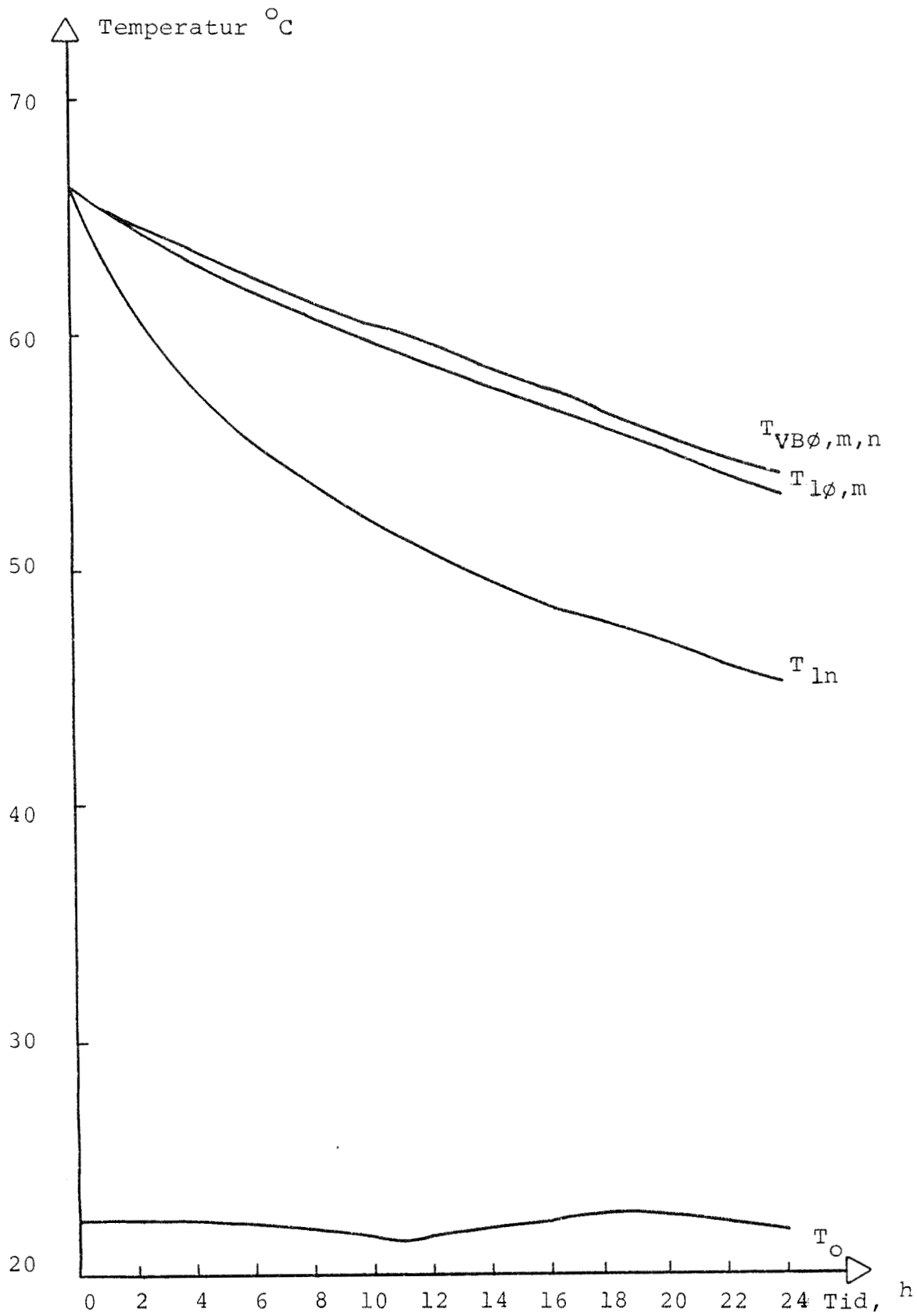


Fig. 2.2. Corona-Vex lagertype HSW 300/ST 175.

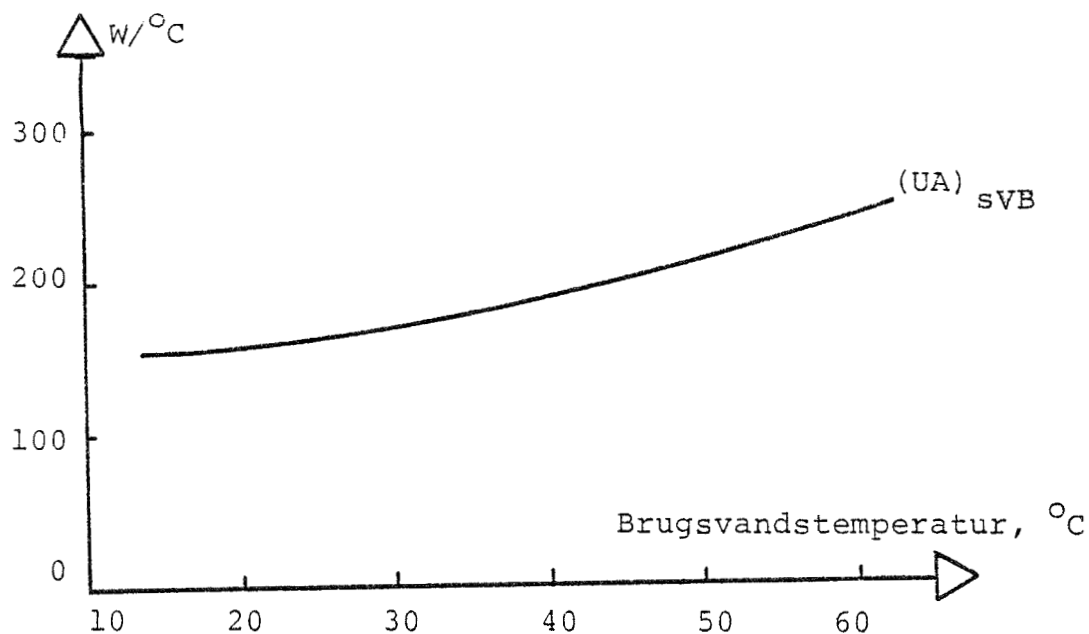


Figur 2.3 Afkølingsforløb for Corona Vex lagerunit type HSW 300/ST 175.

Med et solfangervæskeflow på 6,5 l/min og en effekttilførsel på ca 1800 W blev varmelagerunitten opvarmet fra 10°C til 65°C. Varmelagringskapaciteten var:

$$350 \text{ Wh/}^{\circ}\text{C}$$

Varmeoverførselsevnen fra solfangerkredsen til brugsvandet fremgår af figur 2.4.



Figur 2.4 Varmeoverførselsevne fra solfangervæske til Corona-Vex lagerunit type HSW 300/ST 175. Benyttet solfangervæskeflow 6,5 l/min og effekttilførsel: 1800 W

2.2.4 Diskussion af måleresultater

Størrelsen af varmelagerunittens varmetab svarer til tabet fra en beholder med en ideel tykkelse af mineraluldsisolering på ca. 1 cm, hvilket er et urimeligt stort tab med tanke på den benyttede isoleringstykkelse (7,5 cm). Lagerunittens største enkelttab foregår gennem de uisolerede rørgennemføringer til og fra solfangeren og til koldt og varmt brugsvand. Betydningen af isoleringen af disse rørgennemføringer blev derfor undersøgt. De 4 rørgennemføringer blev isoleret med 14 mm Armaflex fra beholderens top til kabinetets topplade, se figur 2.5 og 2.6.



Figur 2.5 Corona-Vex lagerunittype HSW 300/ST 175 set ovenfra uden kabinetlåg.

På figur 2.5 ses bl.a. lagerunittens 4 uisolerede rørgennemføringer og den uisolerede ekspansionsbeholder. Figur 2.6 viser samme motiv som figur 2.5 blot med de 4 rørgennemføringer isoleret med 14 mm Armaflex.



Figur 2.6 Corona-Vex lagerunit HSW 300/ST 175 set ovenfra uden kabinetlåg med de 4 rørgennemføringer isoleret med 14 mm Armaflex.

Ved den beskrevne rørisolering blev varmetabskoefficienten reduceret fra $7,5 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$ til $5,0 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$. Altså er der tale om en forholdsvis stor forbedring ved denne simple foranstaltning. Forklaringen er, at brugsvandet i rørene i det uisolerede tilfælde afkøles temmeligt kraftigt. Det afkølede vand i rørene er tungere end det varme vand i brugsvandsbeholderen og erstattes derfor af dette varmere vand. Dette vand afkøles dernæst, og der opstår en naturlig vandcirkulation i rørtilslutningerne, således at temperaturen i disse rør til stadighed holdes høj, hvorved varmetabet bliver meget stort. En lignende cirkulation vil finde sted i lagertankens ekspansionsbeholder, ligesom der er et stort enkelttab igennem den uisolerede trykekspressionsbeholder for solfangerkredsen. Endvidere vil varme ledes gennem kobberet, som forbinder solfangerkredsen og manometeret. Herfra ledes varmen videre til kabinettet, hvorfra den tabes. Endelig tabes en del varme igennem den uisolerede beholderbund.

Forsøgsresultaterne fra denne lagerunit og fra Metro Combi-beholder type 2002 C viser, at kuldebroer, f.eks. i form af rørtilslutninger til lageret, kan have en stor indflydelse på lagertabet. Særlig vigtig synes kuldebroplaceringen at være. Ved en kuldebroplacering i beholderens bund afkøles vandet ved kuldebroen hurtigt og danner et koldt stillestående isolerende lag, hvorved varmetabet fra kuldebroen bliver relativt lille. Placeres kuldebroen derimod et højt beliggende sted på beholderoverfladen, vil der være mulighed for, at der opstår naturlig cirkulation i vandet, således at kuldebroen til stadighed forbliver varm. Herved bliver kuldebroens varmetab meget stort. Ud fra et varmetabsmæssigt synspunkt må det derfor anbefales, at alle rørgennemføringer, ekspansionsbeholdere, pumper og andet lignende udstyr, der kan forårsage kuldebroer, placeres i et isoleret rum under selve varmelagerbeholderen. Kan dette ikke lade sig gøre, må en kraftig isolering reducere kuldebroernes varmetab mest muligt.

For Corona-Vex lagertype HSW 300/ST 175 anbefales følgende forbedringer: Effektiv isolering af de 4 rørgennemføringer og den åbne ekspansionsbeholder. Endvidere må instrumentrummet isoleres, f.eks. må det overvejes at fylde hele rummet med løs mineraluld for at nedsætte varmetabet fra trykekspressionsbeholderen, ventiler og det uisolerede manometerrør. Isoleringen skal dog være af en sådan art, at service og eventuelle reparationer ikke besværliggøres for meget. Forbindelsesrøret mellem solfangerkredsen og manometeret, som er placeret på kabinettets forside, er et kobberrør. Derved ledes en unødigt stor varmemængde fra solfangerkredsen til kabinettet. Det foreslås derfor, at kobberrøret udskiftes med et rør af et andet materiale med ringere varmeledningsevne. Endelig tabes en del varme igennem den uisolerede beholderbund. Her foreslås, at benene som bærer lageruniten forlænges lidt, så en fast isoleringsplade kan klæbes til bunden.

Vandlagerunittes vandvolumen er 274 l. Vælges den kritiske varmeoverførselsevne fra solfangervæske til brugsvand til $25 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}^2$ solfanger, ses det af figur 2.4, at lageret af varmeoverførselsmæssige hensyn er velegnet til solvarmeanlæg med solfangerarealer op til omtrent 6 m^2 .

Efter afprøvningernes afslutning er lagerunit'en forbedret, idet lagerunit'ens instrumentrum ved monteringen fyldes med mineraluldsgranulat. Desuden placeres ved monteringen en 3 cm isoleringsplade under beholderen.

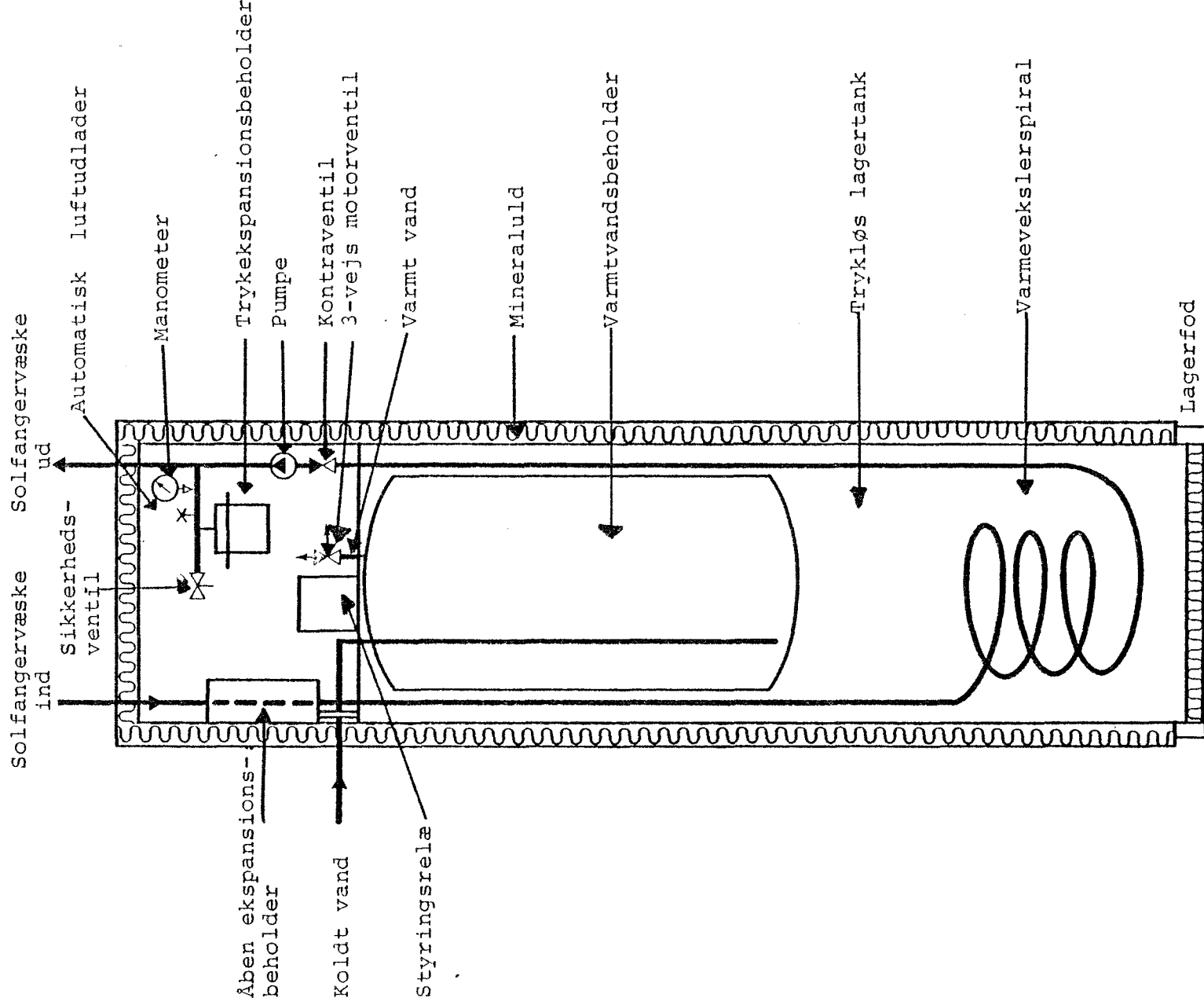
2.3. AR-CON lagertank L-410

2.3.1 Identifikation af varmelagerunit

Firmanavn: AR-CON Solvarme ApS
Adresse: Jyttevej 18, 9520 Skørping
Telf.nr.: 08-391477
Lagerunitmodel: Lagertank L-410

2.3.2 Beskrivelse af lagerunit

Varmelagringsprincippet fremgår af figur 3.1.



Figur 3.1 Varmelagringsprincip for AR-CON lagertank L-410.

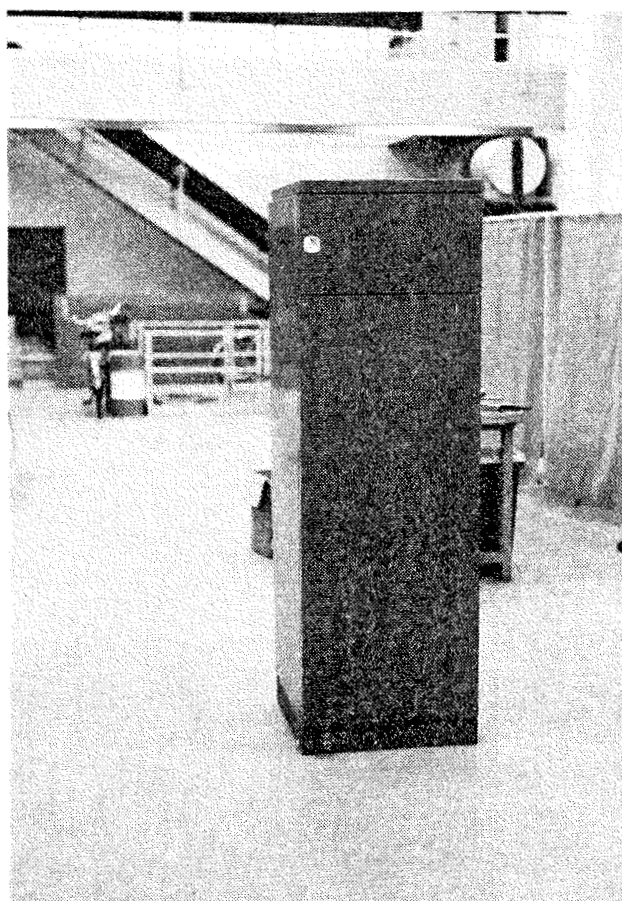
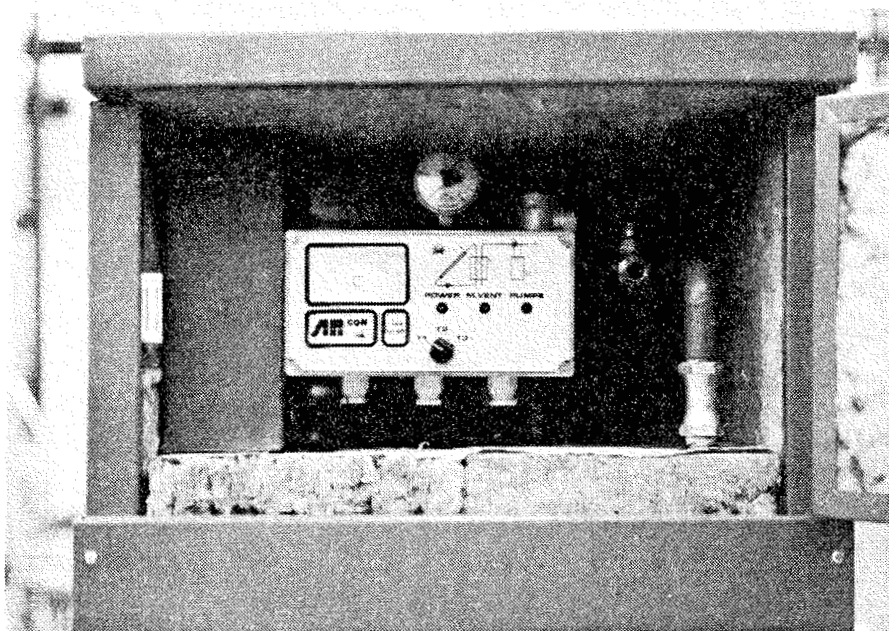
Både brugsvand og lagervand benyttes som varmeakkumulerende materiale. Varmen overføres fra solfangerkredsen til lagervandet ved hjælp af en varmevekslerspiral placeret i den kasseformede trykløse lagertank. Varmen transporteres gennem varmtvandsbeholderens overflade videre til brugsvandet. Et kabinet indeholdende en mineraluldsisolering omgiver lageruniten. Kabinettet fastgøres på lagerfoden ved hjælp af nogle pigge, som er påsvejst lagerfoden. Bunden af beholderen indenfor lagerfoden er isoleret, mens selve lagerfoden er uisoleret. Alle beholderens rørgennemføringer og det nødvendige udstyr for solvarmeanlæg er placeret i lagerunitens topplade og i det af kabinettet og lageruniten afgrænsede rum over lagerbeholderen. Dette instrumentrum er isoleret ved hjælp af det til kabinettet fastgjorte mineraluld. Beholderens topflade isoleres med et mineraluldslag, som beskrevet i monteringsvejledningen. Den benyttede isoleringstykkelser for dette lag er 5 cm. Alt hjælpeudstyret og rørene i instrumentrummet er i øvrigt uisoleret.

De mange rør og det store antal hjælpeudstyrkomponenter i det stærkt sammenpressede instrumentrum vanskeliggør monteringsarbejdet. Varmelagerunit'en er vist på figur 3.2.

Størrelsen af lageruniten fremgår af tabel 3.1. Lageruniten er afprøvet med BP solfangerolie som solfangervæske.

Varmtvandsbeholdervolumen		87 l
Lagerbeholdervolumen		285 l
Solfangervæskevolumen i varmevekslerspiral		8 l
Total lagerunitmasse (tom)		256 kg
Kabinetmasse		46 kg
Ydre dimensioner	bredde	60 cm
	dybde	65 cm
	højde	190 cm
Omtrentlig isoleringstykkelser	sider	5 cm
	top	5 cm
	bund	5 cm

Tabel 3.1 Data for AR-CON lagertank L-410.



Figur 3.2 AR-CON lagertank L-410. For oven instrumentrum-
met med beholderens topflade isoleret med 5 cm
mineraluld. For neden set forfra med kabinettets
oplukkelige låge for oven.

2.3.3 Måleresultater

Varmelagerunittens varmetab og varmeoverførselsevnen fra solfangervæske til lager blev målt som beskrevet i afsnit 1. Resultaterne var:

Under stabile temperaturforhold med $50,2^{\circ}\text{C}$ som fremløbstemperatur og $22,3^{\circ}\text{C}$ som omgivelsernes temperatur var varmelagerunittens varmetabskoefficient når solfangeren var i drift:

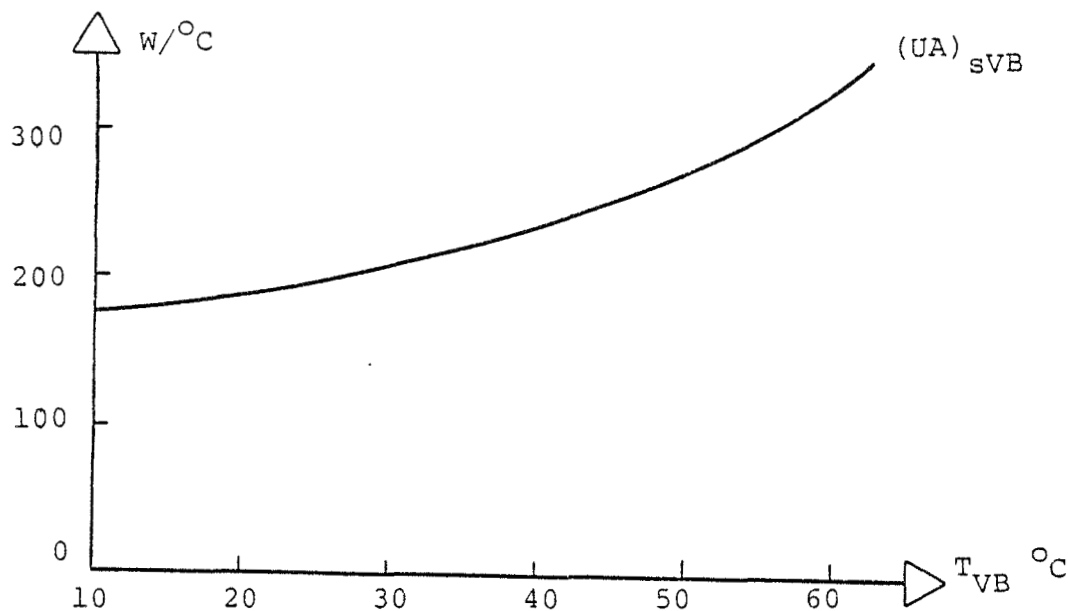
$$8,6 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$$

Lagerunittens afkølingsforløb uden varmetilførsel og- tapning igennem 24 timer fremgår af figur 3.3. Brugsvandstemperaturen T_{VB} er registreret i 2 niveauer, øverst ø og nederst n.

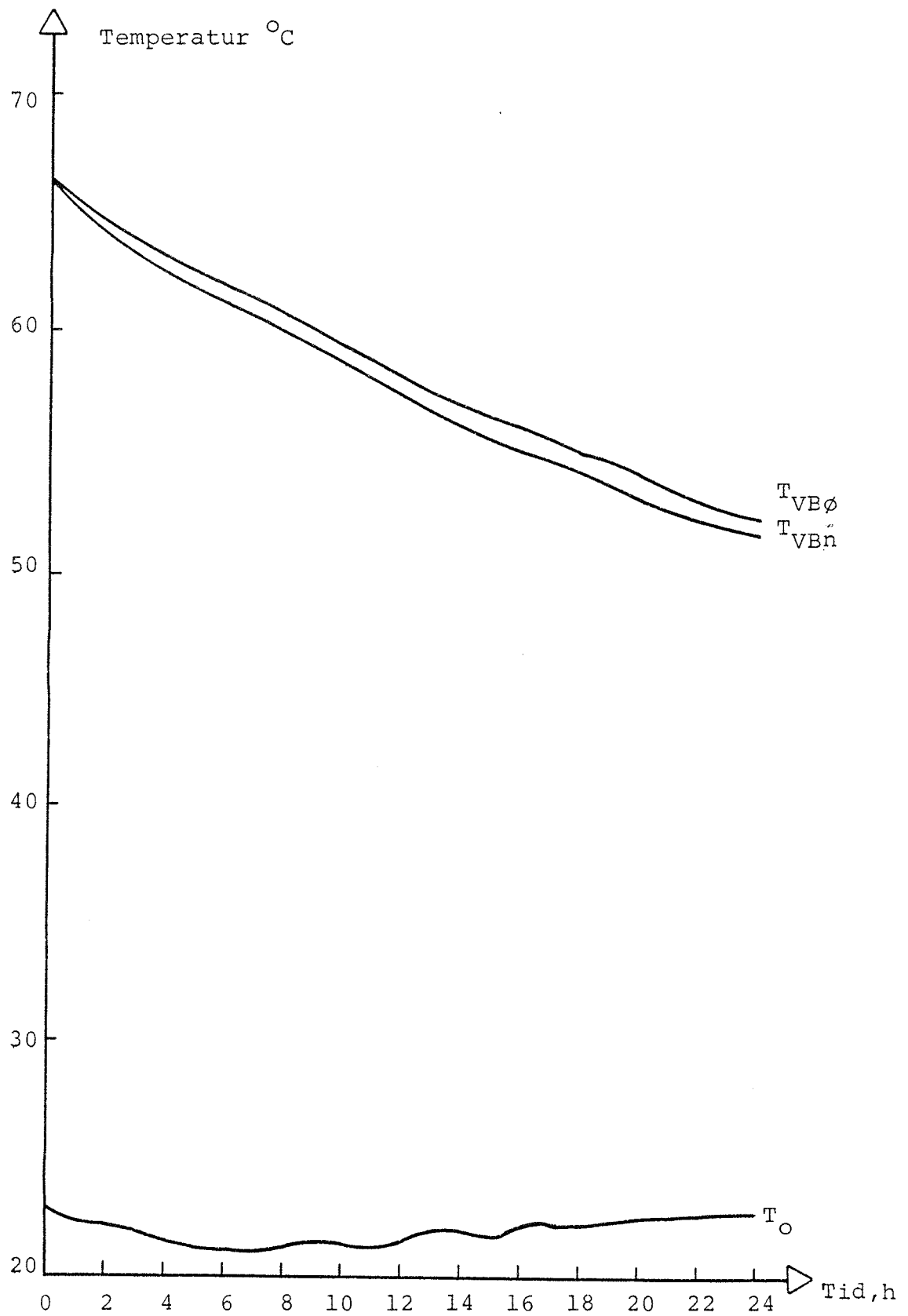
Med et solfangervæskeflow på $8,3 \text{ l/min}$ og en effekttilførsel på ca. 1900 W blev varmelagerunitten opvarmet fra 10°C til 65°C . Varmelagringskapaciteten var:

$$460 \text{ Wh}/^{\circ}\text{C}$$

Varmeoverførselsevnen fra solfangerkredsen til brugsvandet fremgår af figur 3.4.



Figur 3.4 Varmeoverførselsevne fra solfangervæske til AR-CON lagertank L-410. Benyttet solfangervæskeflow $8,3 \text{ l/min}$ og effekttilførsel: 1900 W .



Figur 3.3 Afkølingsforløb for AR-CON lagertank L-410.

2.3.4 Diskussion af måleresultater

Størrelsen af varmelagerunittens varmetab svarer til tabet fra en beholder med en ideel mineraluldsisolering på ca. 1 cm, hvilket er et urimeligt stort tab. Den største del af varmen tabes fra lagerunitten gennem den del af kabinettet, som er placeret over beholderens top. Årsagen hertil er dels de mange kuldebroer fra lagerbeholderen til instrumentrummet dels kabinettets udformning, som tillader varmetransport fra instrumentrummet til omgivelserne. Dette skyldes dels at kabinettet ikke slutter tæt om hele rummet, f.eks. slutter kabinettets oplukkelige låge ikke helt tæt til de tilgrænsede kabinetsider og kabinettoppladen, dels at varme ledes gennem kabinettet til dennes ydersider, hvorfra varmen tabes. Det blev derfor undersøgt, hvilken indflydelse utæthederne ved instrumentrummets indeslutning har på varmetabets størrelse. Der blev foretaget en fuldstændig tætning af de omtalte utætheder med tape, hvorefter varmetabet blev målt. Varmetabskoefficienten blev herved reduceret fra $8,6 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$ til $7,7 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$. Denne foranstaltning har altså stor indflydelse på varmetabet, som dog stadig synes at være urimeligt stort. Derfor må det anbefales, dels at isolere hele instrumentrummet effektivt, f.eks. ved at fylde instrumentrummet med mineraluldsgranulat, dels at ændre kabinettets udformning således at varmeledning igennem kabinettet undgås, altså må den del af kabinettet, som vender ind mod instrumentrummet, holdes koldt. Dette kan i praksis gøres på to måder. Enten isoleres den mod instrumentrummet vendende kabinetkant effektivt eller kabinettets kant bøjes slet ikke ind i instrumentrummet. Endvidere må det overvejes at isolere lagerfoden, idet der også herfra tabes en stor varmemængde.

Lagerunittens vandvolumen er 372 l. Vælges den kritiske varmeoverførselsevne fra solfangervæske til brugsvand til $25 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}^2$ solfanger, ses det af figur 3.4, at lageret af varmeoverførselsmæssige hensyn er velegnet til solvarmeanlæg med solfangerarealer op til omtrent 8 m^2 .

2.4. HS-Solvarmelagertank type I

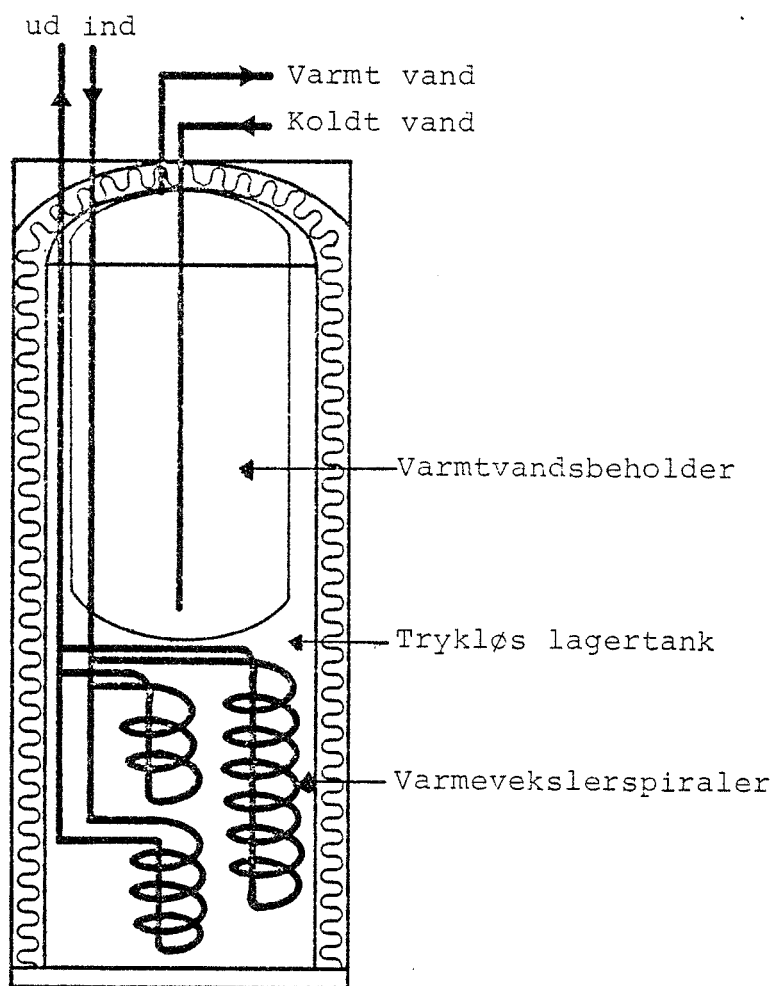
2.4.1 Identifikation af varmelagerunit

Firmanavn: HS Kedler
Adresse: P.O. Box 30, 6880 Tarm
Telf.nr.: 07-371511
Lagerunitmodel: HS-Solvarmelagertank type I

2.4.2 Beskrivelse af lagerunit

Varmelagringsprincippet fremgår af figur 4.1. Både brugsvand

Solfangervæske



Figur 4.1 Varmelagringsprincip for HS-Solvarmelager-tank type I.

og lagervand benyttes som varmeakkumulerende materiale. Varmen overføres fra solfangerkredsen til lagervandet ved hjælp af et varmevekslerspiralsystem placeret i den nederste del af den kasseformede trykløse lagertank. Varmen transporteres gennem den del af varmtvandsbeholderens overflade, som er neddykket i lagertanken, videre til brugsvandet. En mineraluldsisoleringskappe er placeret rundt om lagertanken. Mineralulds-kappen holdes på plads af kabinettet, som fastholdes til lagertank ved hjælp af en påsvejst støtte. Desuden hviler kabinettet på den uisolerede lagerfod. Størrelsen af kabinetsidernes bredde er i underkanten af det ønskværdige, hvorved kabinetmonteringen besværliggøres unødigt. Alle rørgennemføringer er placeret i lagerunittens top. Lagerunitten indeholder ikke det for solvarmeanlæg nødvendige udstyr så som pumpe, ekspansionsbeholder, ventiler og styringssystem. Varmelagerunitten uden kabinet ses på figur 4.2.



Figur 4.2 HS-Solvarmelagertank type I uden kabinettet monteret.

Størrelsen af lagerunitten fremgår af tabel 4.1. Lagerunitten er afprøvet med HS-Varmetransmissionsvæske, PKL 300, som solfangervæske.

Varmtvandsbeholdervolumen	155 l
Lagerbeholdervolumen	359 l
Solfangervæskevolumen i varmevekslerspiraler	5 l
Total lagerunitmasse incl. kabinet (tom)	320 kg
Kabinetmasse	60 kg
Ydre dimensioner	
	bredder 66 cm
	dybde 75 cm
	højde 194 cm
Omtrentlig isoleringstykkelse	
	sider 5 cm
	top 5 cm
	bund 0 cm

Tabel 4.1 Data for HS-Solvarmelagertank type I.

2.4.3 Måleresultater

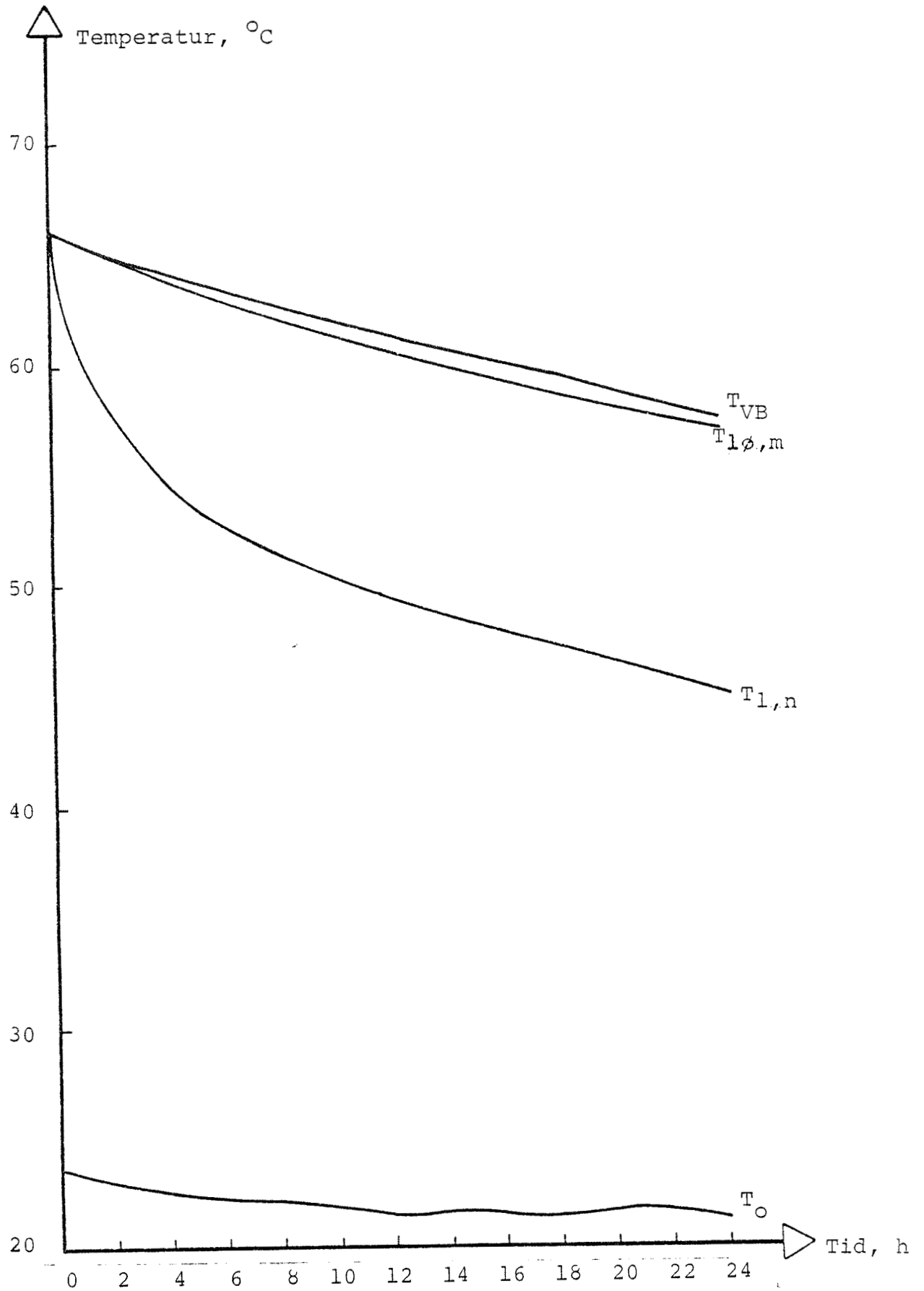
Varmelagerunitens varmetab og varmeoverførselsevnen fra solfangervæske til lager blev målt som beskrevet i afsnit 1.

Resultaterne var:

Under stabile temperaturforhold med $50,0^{\circ}\text{C}$ som fremløbs-temperatur og $23,6^{\circ}\text{C}$ som omgivelsernes temperatur var varmelagerunitens varmetabskoefficient, når solfangeren var i drift:

$$6,1 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$$

Lagerunitens afkølingsforløb uden varmetilførsel og -tapning igennem 24 timer fremgår af figur 4.3. Såvel brugsvandstemperaturen T_{VB} som lagervandstemperaturen T_1 er registreret i 3 niveauer, øverst ø, i midten m og nederst n.



Figur 4.3 Afkølingsforløb for HS-solvarmelagertank type I.

Med et solfangervæskeflow på 8,9 l/min og en effekttilførsel på ca. 4200 W blev varmelagerunitten opvarmet fra 10°C til 65°C. Varmelagringskapaciteten var:

$$620 \text{ Wh/}^{\circ}\text{C}$$

Varmeoverførselsevne fra solfangerkredsen til brugsvandet fremgår af figur 4.4.

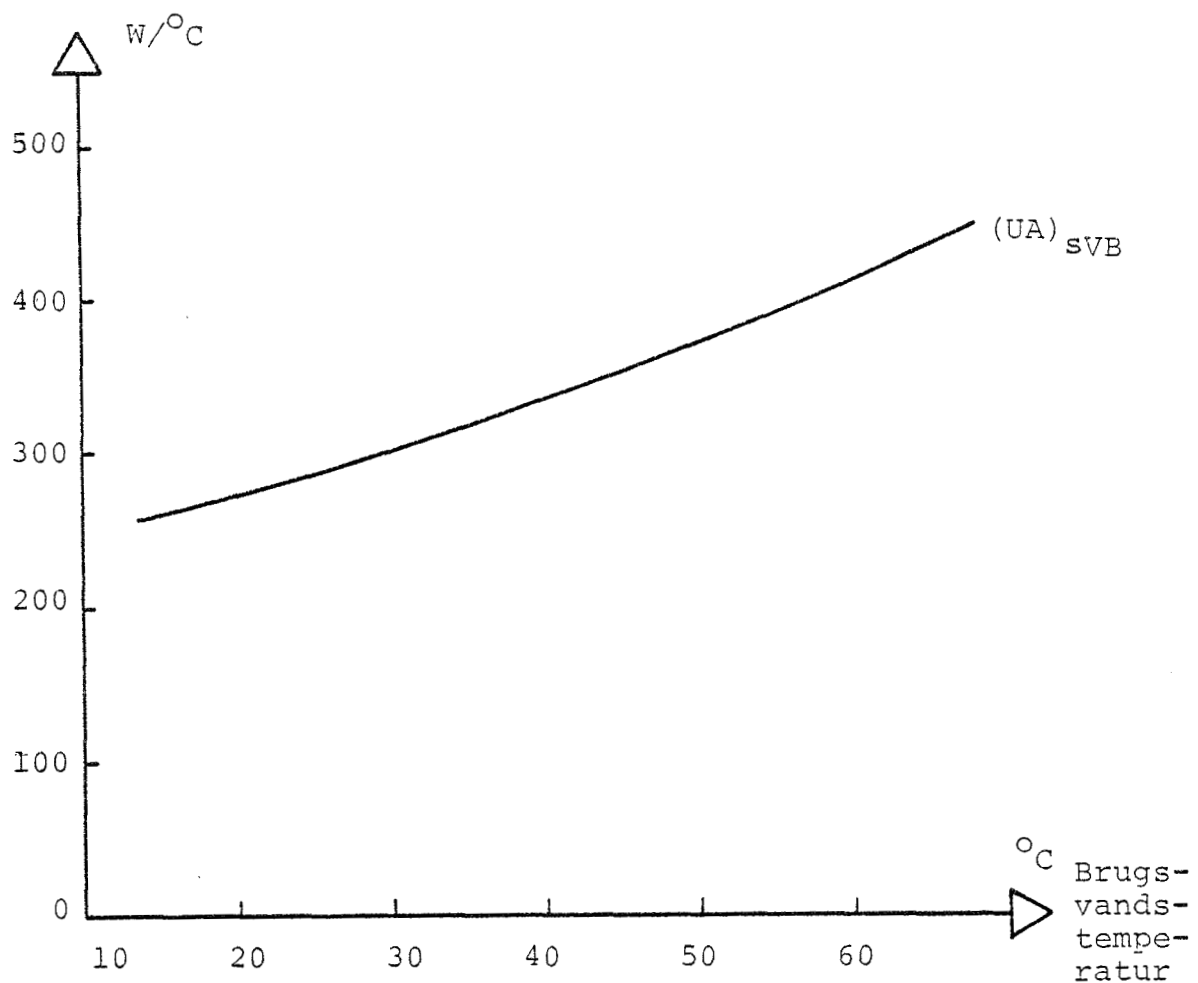


Fig. 4.4 Varmeoverførselsevne fra solfangervæske til HS-solvarmelagertank type I. Benyttet solfangervæskeflow: 8,9 l/min og effektoverførsel: 4200 W.

2.4.4 Diskussion af måleresultater

Størrelsen af varmelagerunitens varmetab svarer til tabet fra en beholder med en ideel mineraluldsisoleringstykkelse på ca. 3 cm. Af afkølingskurven figur 4.3 ses det, at varmetabet fra den nederste del af lagerbeholderen i starten af perioder efter en varmetilførsel til lageret eller i perioder med solfangerdrift er meget stort, idet lagertemperaturen falder meget hurtigt. Dette skyldes dels at varmevekslerspiralsystemet er placeret tæt ved beholderbunden, dels at kontaktarealet mellem beholderen, beholderfoden og kabinettet er stort. Det anbefales derfor, at dette kontaktareal reduceres mest muligt, f.eks. kan der monteres ben på beholderbunden, som dernæst kan isoleres. Kabinettet kan så hvile på en falsk bund placeret under isoleringslageret og fastgjort til benene med et meget lille kontaktareal. Herved reduceres det store varmetab fra varmelageret, når solfangeren er i drift og når lageret er opvarmet. Desuden foreslås, at kabinettets sider gøres lidt bredere, således at isoleringsmaterialet ikke presses unødigt sammen og kabinetmonteringsarbejdet lettes. Endvidere bør en lagerunit til solvarmeanlæg for at lette monteringsarbejdet indeholde alt nødvendigt udstyr, så som pumpe, ekspansionsbeholder, ventiler og styringssystem. Dette udstyr kan f.eks. indbygges i rummet over beholderen inde i kabinettet, således at en effektiv isolering af rummet muliggøres.

Vælges den kritiske varmeoverførselsevne fra solfangervæske til brugsvand til $25 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}^2$ solfanger, ses det af figur 4.4, at lageret af varmeoverførselsmæssige hensyn er velegnet til solvarmeanlæg med solfangerarealer op til omtrent 11 m^2 .

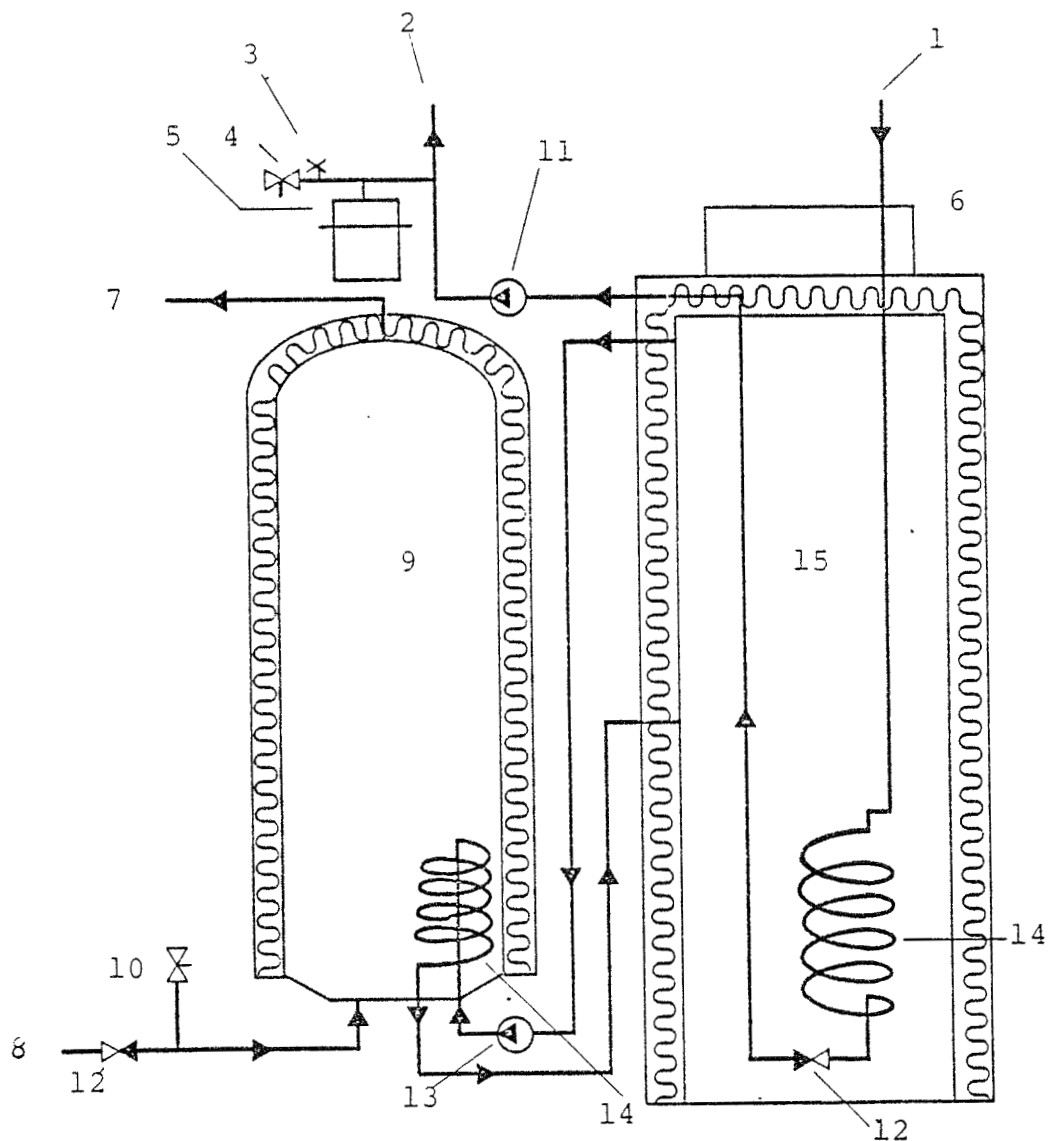
2.5. Dæmpalager B-6/1 - unit

2.5.1 Identifikation af varmelagerunit

Firmanavn: Dæmpa a/s
Adresse: 5690 Tommerup
Telf.nr.: 09-761311
Lagrunitmodel: B-6/1-unit

2.5.2 Beskrivelse af lagerunit

Varmelagerprincippet fremgår af figur 5.1.

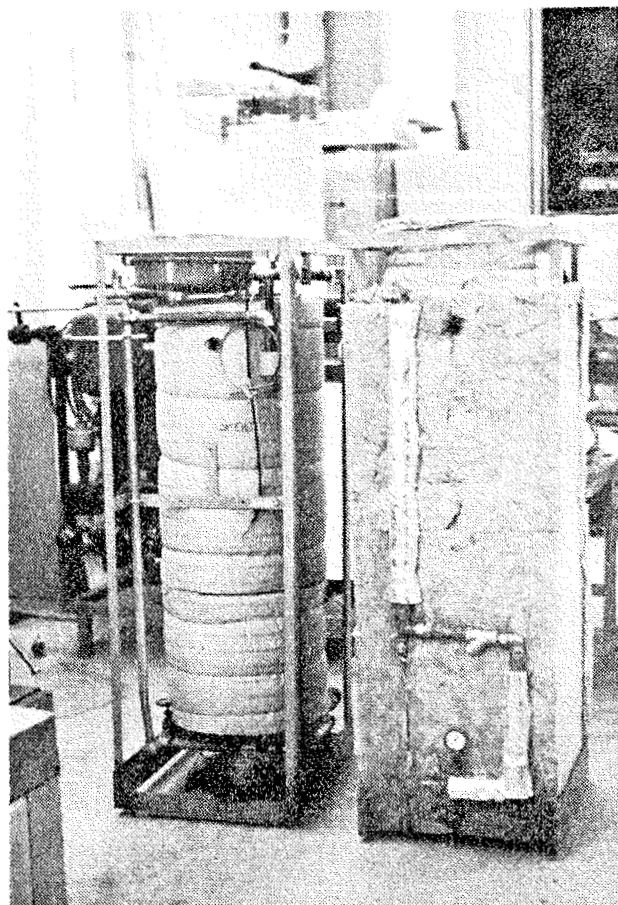


- | | |
|---|--------------------------------------|
| 1. Solfangervæske ind | 8. Koldt vand |
| 2. Solfangervæske ud | 9. Varmtvandsbeholder |
| 3. Automatisk luftudlader | 10. Sikkerhedsventil for brugsvandet |
| 4. Sikkerhedsventil for solfangerkredsen | 11. Solfangerpumpe |
| 5. Solfangerkredsens trykekspressionsbeh. | 12. Kontraventil |
| 6. Åben ekspansionsbeholder | 13. Pumpe |
| 7. Varmt vand | 14. Varmevekslerspiral |
| | 15. Varmelagertank |

Figur 5.1 Varmelagringsprincip for Dæmpalager B-6/1-unit.

Både brugsvand og lagervand benyttes som varmeakkumulerende materiale. Varmen overføres fra solfangerkredsen til varmelagertankens lagervand ved hjælp af en varmevekslerspiral placeret i bunden af den kasseformede trykløse varmelagertank. Fra toppen af varmelagertanken cirkuleres det således opvarmede lagervand tilbage til varmelagertankens midte gennem et rørsystem, som blandt andet indeholder en varmevekslerspiral placeret i bunden af den cylinderformede varmtvandsbeholder. Herved opvarmes brugsvandet. Cirkulationspumpens drift bør selvfølgelig styres efter behov, f.eks. bør pumpen stoppes når brugsvandstemperaturen overstiger 60°C , således at skoldningsrisiko og kalkudfældning undgås. For den afprøvede lagerunit, B-6/l-unit, var pumpen dog konstant i drift. Begge beholdere er isoleret med mineraluld, dog er bundene uisolerede. Beholderne er placeret tæt sammen og omgives af et fælles kabinet. Kabinettet bæres af en ramme, som er forbundet til varmelagertanken ved hjælp af vinkeljernsstykker påsvejst varmelagertankens top. Kabinettet støttes endvidere af sidestykker påsvejst varmelagertankens bund. Det for solvarmesystemer nødvendige udstyr er fortrinsvis placeret over beholderne inden for kabinettets rammer. Som rørforbindelse inden for kabinettet benyttes $3/4"$ uisolerede stålrør. Varmtvandsbeholderen er ophængt i et stativ, hvorpå kabinettet fastgøres. Varmelagerunitens to beholdere uden kabinet er vist på figur 5.2.

Størrelsen af lagerunitten fremgår af tabel 5.1. Lagerunitten er afprøvet med Dæmpa varmetransmissionsvæske D 101 som solfangervæske.



Figur 5.2 Dæmpa B-6/l-unit varmelagerets 2 beholdere uden kabinet. Brugsvandsbeholderen er placeret til venstre, varmelagertanken til højre.

Varmtvandsbeholdervolumen		150 l
Varmelagertankvolumen		375 l
Solfangervæskevolumen		5 l
Varmtvandsbeholdermasse (tom)		137 kg
Varmelagertankmasse (tom)		145 kg
Kabinetmasse		72 kg
Total lagerunitmasse (tom)		354 kg
Ydre dimensioner for hele lagerunitten	bredde	60 cm
	dybde	80 cm
	højde	180 cm
Omtrentlig isoleringstykkelse for varmtvandsbeholder	sider	3 cm
	top	3 cm
	bund	0 cm
Omtrentlig isoleringstykkelse for varmelagertank	sider	5-7,5 cm
	top	5 cm
	bund	0 cm

Tabel 5.1 Data for Dæmpa B-6/l-unit

2.5.3 Måleresultater

Varmelagerunittens varmetab og varmeoverførselsevnen fra solfangervæske til lager blev målt som beskrevet i afsnit 1. Resultaterne var:

Under stabile temperaturforhold med $51,0^{\circ}\text{C}$ som fremløbstemperatur og $23,6^{\circ}\text{C}$ som omgivelsernes temperatur var varmelagerunittens varmetabskoefficient når solfangeren var i drift:

$$19,1 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$$

Lagerunittens afkølingsforløb uden varmetilførsel og -tapping igennem 24 timer fremgår af figur 5.3. Såvel brugsvandstemperaturen T_{VB} som lagervandstemperatur T_1 er registreret i 3 niveauer, øverst ø, i midten m og nederst n.

Med et solfangervæskeflow på $11,6 \text{ l/min}$ og en effekttilførsel på ca. 4300 W blev lagerunitten opvarmet fra 10°C til 65°C . Varmelagringskapaciteten var:

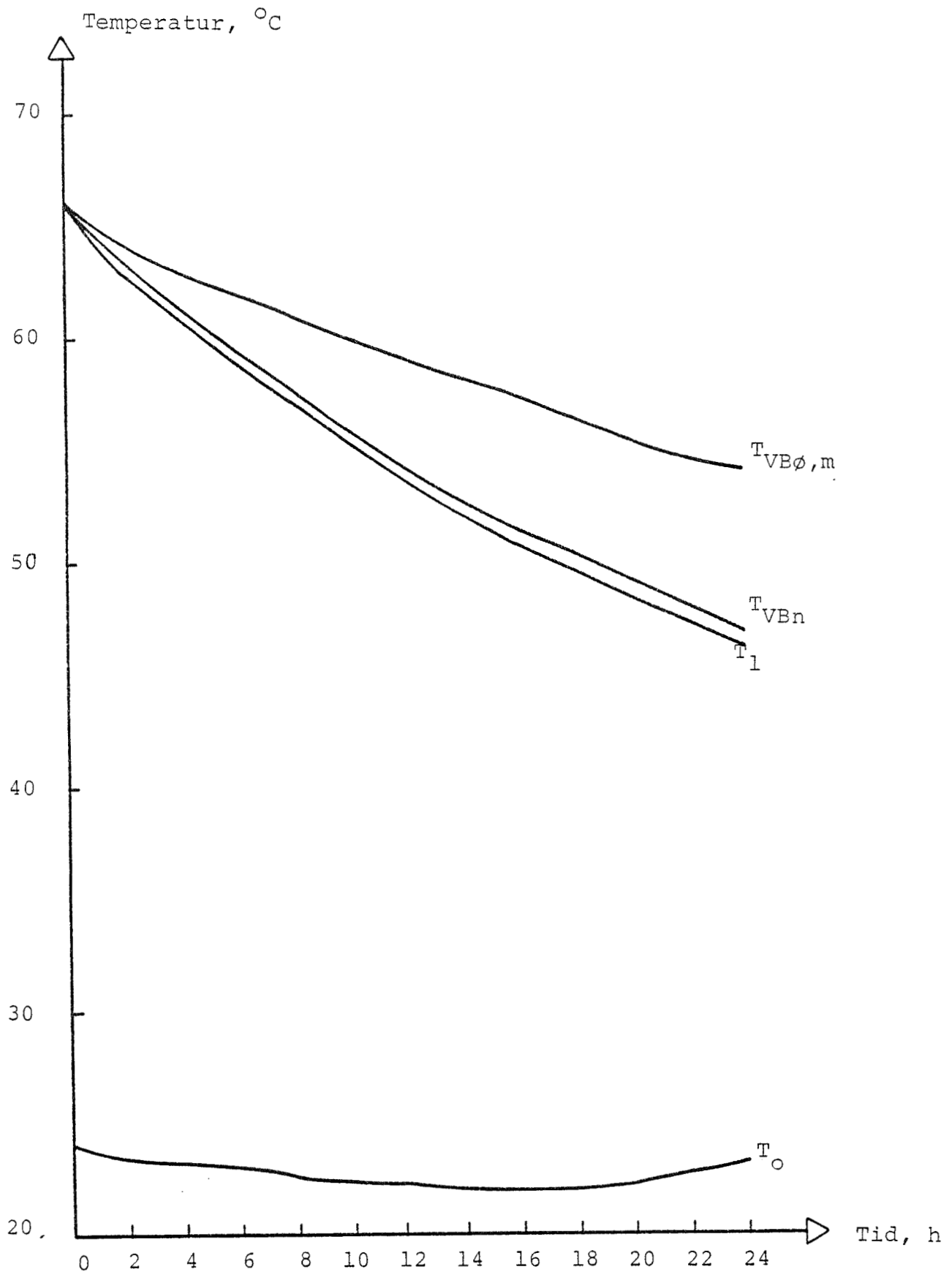
$$630 \text{ Wh}/^{\circ}\text{C}$$

Varmeoverførselsevnerne fra solfangerkredsen til hhv brugsvandet, $(UA)_{\text{SVB}}$, som funktion af brugsvandstemperaturen T_{VB} og vandet i varmelagertanken, $(UA)_{\text{s1}}$, som funktion af lagervandstemperaturen T_1 fremgår af figur 5.4.

2.5.4 Diskussion af måleresultater

Størrelsen af varmelagerunittens varmetab er uacceptabelt stort. Nedenfor angives årsagerne til, at varmetabet er så stort. Desuden angives forslag til ændring af lagerunitkonstruktionen.

Cirkulationspumpen mellem lagertanken og varmtvandsbeholderen var konstant i drift under afprøvningen. Dels tabes store varmemængder derved gennem de uisolerede forbindelsrør, dels bliver energiforbruget til pumpedriften unødigt stort. En effektiv isolering af forbindelsesrørene mellem de to beholdere



Figur 5.3 Afkølingsforløb for Dæmpa B-6/l-unit.

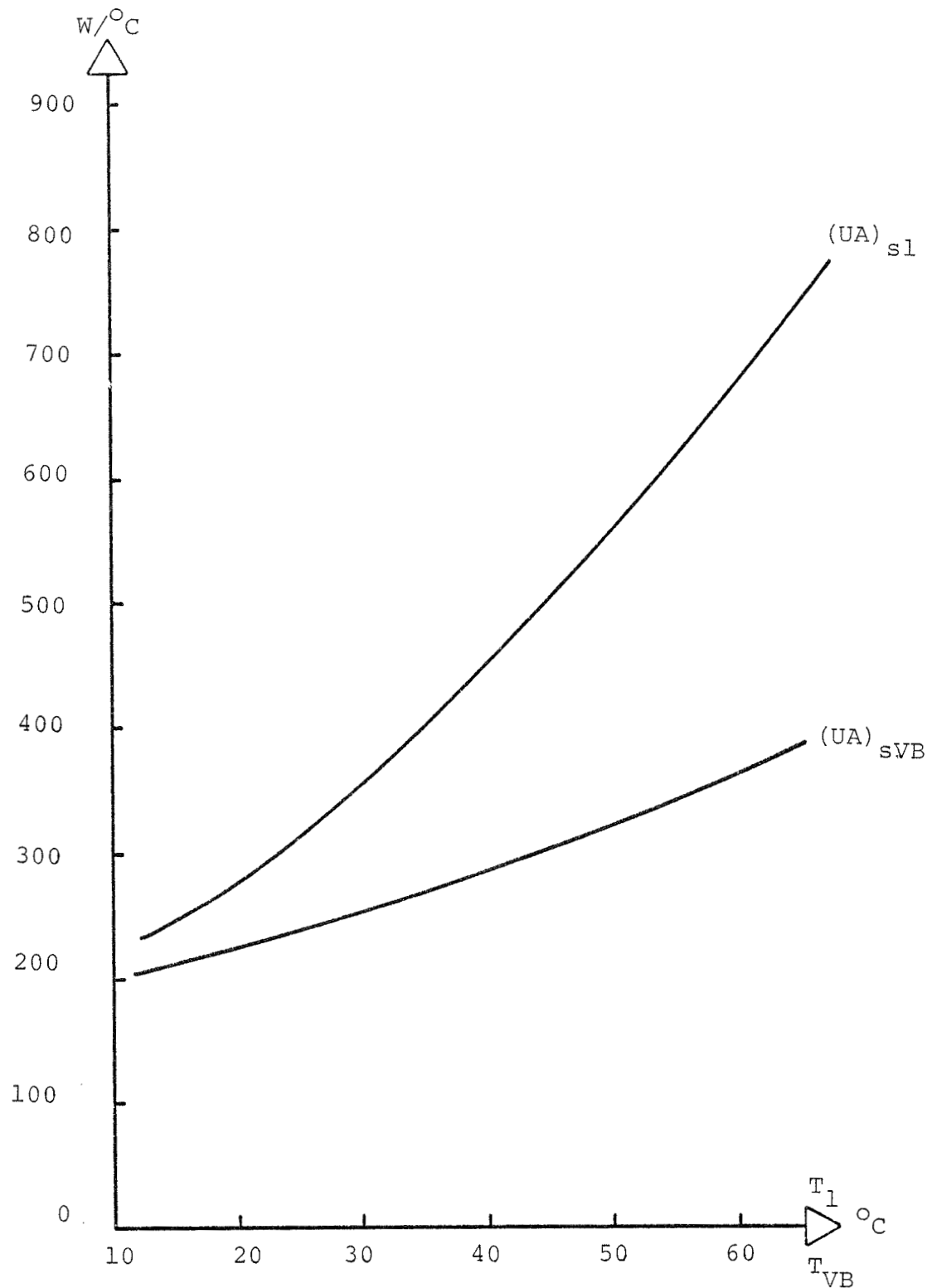


Fig. 5.4 Varmeoverførselsevne fra solfangervæske til Dæmpa B-6/l-unit. Benyttet solfangervæskeflow: 11.6 l/min og effekttilførsel: 4300 W.

i forbindelse med en effektiv styring af pumpen, dvs at pumpen kun er i drift når brugsvandstemperaturen er lavere end en vis temperatur, f.eks. 60°C , og når lagervandets temperatur er så meget højere end brugsvandstemperaturen, at der kan overføres varme fra lagertanken til brugsvandet, vil nedsætte varmetabet betydeligt.

Isoleringen af varmelagertanken er gennembrudt af vinkeljernstykker, som forbinder varmelagertankens top og rammen, som bærer kabinettet. Da rammen desuden har et stort overfladeareal og et forholdsvis stort kontaktareal med kabinettet, udgør konstruktionen en kuldebro, hvorfra varmetabet er særdeles stort. Da kuldebroen yderligere er placeret i toppen af varmelagertanken, vil naturlig cirkulation i lagervandet sørge for, at kuldebroen holdes på en konstant høj temperatur med et konstant stort varmetab til følge. Konstruktionen må ændres, således at værmegennemstrømningsarealet reduceres mest muligt, f.eks. kan rammens overfladeareal gøres meget mindre. Er dette forhold umuligt at ændre, må kabinetfastgørelsen placeres så tæt på bunden som muligt.

Isoleringen er ligeledes brudt ved varmelagertankbunden, idet der her er påsvejest sidestykker med et stort overfladeareal. Dette overfladeareal kan reduceres, hvorved også tabet mindskes. Endvidere er rørgennemføringer samt ekspansionsbeholdere, ventiler, pumper samt det øvrige udstyr, som er nødvendigt til solvarmeanlægget, behæftet med enkeltvarmetab, som ved en hensigtsmæssig placering i bunden af lagerunitten og en effektiv isolering kan holdes på et rimeligt lavt niveau. Endelig skal nævnes, at et omhyggeligt udført isoleringsarbejde af varmelagerbeholderens store overfladearealer er vigtigt for opnåelse af det tilstræbte lille varmetab. Desuden må en isolering af beholdernes bunde overvejes. Betydningen af sådanne isoleringsforanstaltninger anses dog at være relativt lille i forhold til betydningen af de øvrige nævnte foranstaltninger.

Varmelagerunitens vandvolumen er 525 l. Vælges den kritiske varmeoverførselsevne fra solfangervæske til brugsvand til $25 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}^2$ solfanger, ses det af figur 5.4, at lageret af varmeoverførselsmæssige hensyn er velegnet til solvarmeanlæg med solfangerarealer op til omtrent 9 m^2 .

Monteringsmæssige er lageruniten ikke færdigudviklet. Mange komplicerede rørgennemføringer og rørtilslutninger gør monteringsarbejdet unødvendigt besværligt og tidskrævende. Det bør tilstræbes at lagerunitkonstruktionen bliver enkel med så få rørtilslutninger som muligt. En tydelig afmærkning af lagerenhedens sider vil ligeledes lette monteringsarbejdet.

Firmaet oplyser, at den afprøvede lagerunit var at betragte som en prototype, da en mængde af ovennævnte fejl allerede er rettet. Det fremføres således at:

Cirkulationspumpen mellem lagertank og varmtvandsbeholder i den endelige udførelse er forsynet med en differenstermostat, således at pumpen kun kører, når der er behov for det, dvs når temperaturen i varmtvandsbeholderen nedkøles under lagertanktemperaturen.

Rørforbindelser altid isoleres på montagestedet.

Akkumulator og varmtvandsbeholder under afprøvningen blev betragtet som en samlet enhed, hvilket kan diskuteres, da varmtvandsbeholderen egentlig ikke har funktion som akkumulator, men kun skal opvarme det kolde vand, der passerer den.

Varmtvandsbeholderen er udført som en relativ stor varmebeholder, der indeholder mindst det halve dagsforbrug, med en meget lille varmeblade til følge.

De ret kraftige stativer er nødvendige aht. transportskader og håndtering i øvrigt.

Isolering af en solvarmeunit er en omkostning og denne må vurderes i relation til dens betydning for det færdige anlægs årsudbytte.

2.6. Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400

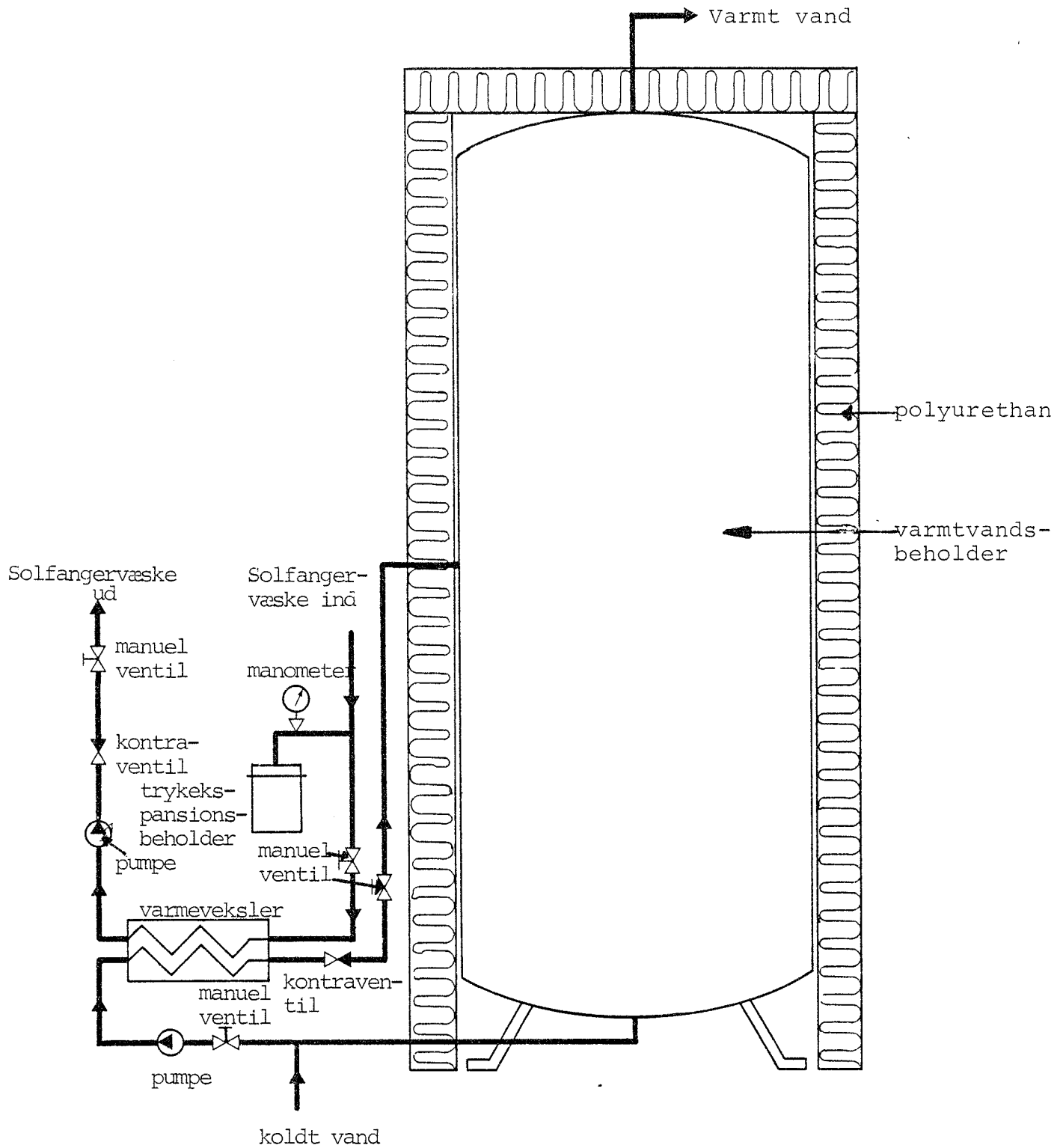
2.6.1 Identifikation af varmelagerunit

Firmanavn: Elektropower ApS
Adresse: Datavej 48, 3460 Birkerød
Telf.nr.: 02-816222
Lagerunitmodel: Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400
 i forbindelse med SOKI 6.

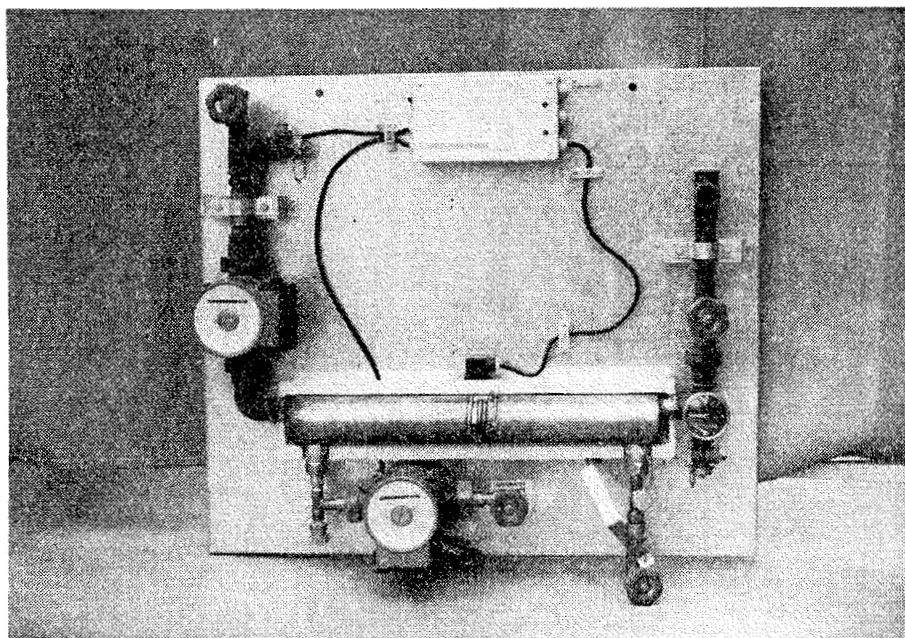
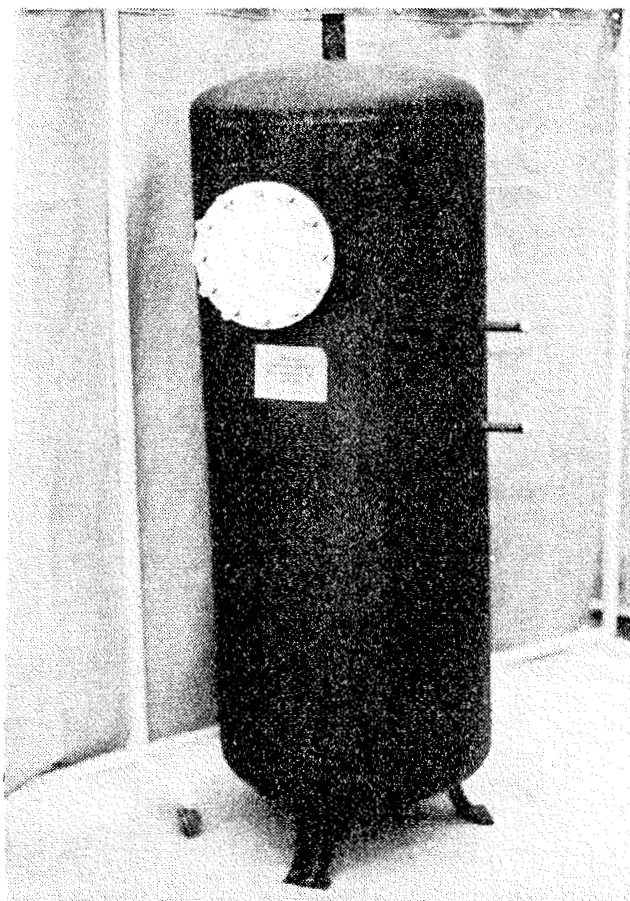
2.6.2 Beskrivelse af lagerunit

Varmelagringsprincippet fremgår af figur 6.1. Brugsvand placeret i en cylinderformet varmtvandsbeholder benyttes som varmeakkumulerende materiale. Når solfangeren er i drift, pumpes brugsvand fra bunden af lagertanken gennem en varmeveksler tilbage til lagertankens midte. Herved overføres varme fra solfangeren til lageret. Varmeveksleren er sammen med det øvrige udstyr til solvarmesystemet installeret på en plade, kompaktinstallation SOKI 6, som placeres ved siden af lagerbeholderen. I varmeveksleren er der kun enkeltadskillelse mellem solfangervæske og brugsvand, hvorfor anlægget kræver en af Miljøstyrelsen godkendt solfangervæske. Derfor kan den anbefalede solfangervæske, PKL 90, ikke anvendes. I stedet kan eksempelvis PKL 300 tilsat et godkendt farvet røbestof benyttes, idet Miljøstyrelsen har godkendt brug af denne solfangervæske i systemer uden dobbeltadskillelse mellem solfangervæske og brugsvand.

Lageret er isoleret ved hjælp af 6 polyurethanplader, nemlig 4 sideplader og 2 topplader. Sidepladerne stilles på gulvet omkring varmtvandsbeholderen således at lagerunitten bliver kasseformet. Sidepladerne og toppladerne holdes sammen ved hjælp af en række gammeldags remsamlere. Bunden af lagertanken er uisolert. Endelig er en kunststofkappe trukket uden på isoleringspladerne. Lagerunitten er således meget let at montere og "kabinettet" er billigt og ressourcebesparende. Lagerbeholderen uden isoleringsplader og kappe er vist øverst på



Figur 6.1 Varmelagringsprincip for Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400.



Figur 6.2 Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400.

Foroven den uisolerede lagerbeholder, for neden kompakt installation SOKI 6 med varmevekslerens forsideisolering fjernet.

figur 6.2, mens kompaktinstallationen SOKI 6 uden varmevekslerens forsideisolering ses nederst. Størrelsen af lagerunitten fremgår af tabel 6.1. Lagerunitten er afprøvet med PKL 90, som altså ikke er godkendt af Miljøstyrelsen, som solfangervæske. Senere blev lageret afprøvet med en godkendt væske, se side 65.

Varmtvandsbeholdervolumen		413 l
Solfangervæskevolumen i kompakt installation SOKI 6		1 l
Varmtvandsbeholdermasse (tom)		110 kg
Masse af kompaktinstallation SOKI 6 (tom)		25 kg
Masse af isoleringsplader		13 kg
Masse af kunststofkappe		2 kg
Total lagerunitmasse (tom)		150 kg
Ydre dimensioner for lager	bredde	78 cm
	dybde	78 cm
	højde	182 cm
Ydre dimensioner for kompaktinstallation SOKI 6	bredde	76 cm
	højde	65 cm
	dybde	41 cm
Omtrentlig isoleringstykkelser	sider	2-8 cm
	top	8 cm
	bund	0 cm

Tabel 6.1 Data for Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400 i forbindelse med SOKI 6.

2.6.3 Målerelsultater

Varmelagerunittens varmetab og varmeoverførselsevnen fra solfangervæske til lager blev målt som beskrevet i afsnit 1. Resultaterne var:

Under stabile temperaturforhold med $49,7^{\circ}\text{C}$ som fremløbs-temperatur og $22,2^{\circ}\text{C}$ som omgivelsernes temperatur var varmelagerunittens varmetabskoefficient, når solfangeren var i drift:

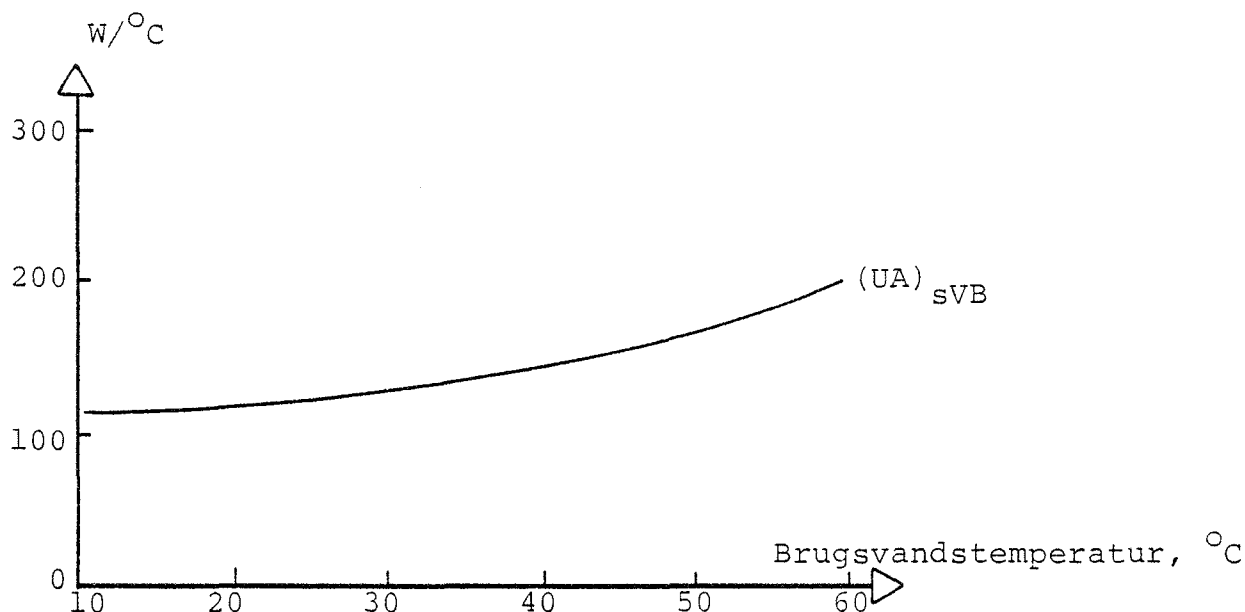
$$7,4 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$$

Lagerunittens afkølingsforløb uden varmetilførsel og -tapning igennem 24 timer fremgår af figur 6.3. Brugsvandstemperaturen T_{VB} er registreret i 3 niveauer, øverst ø, i midten m og nederst n.

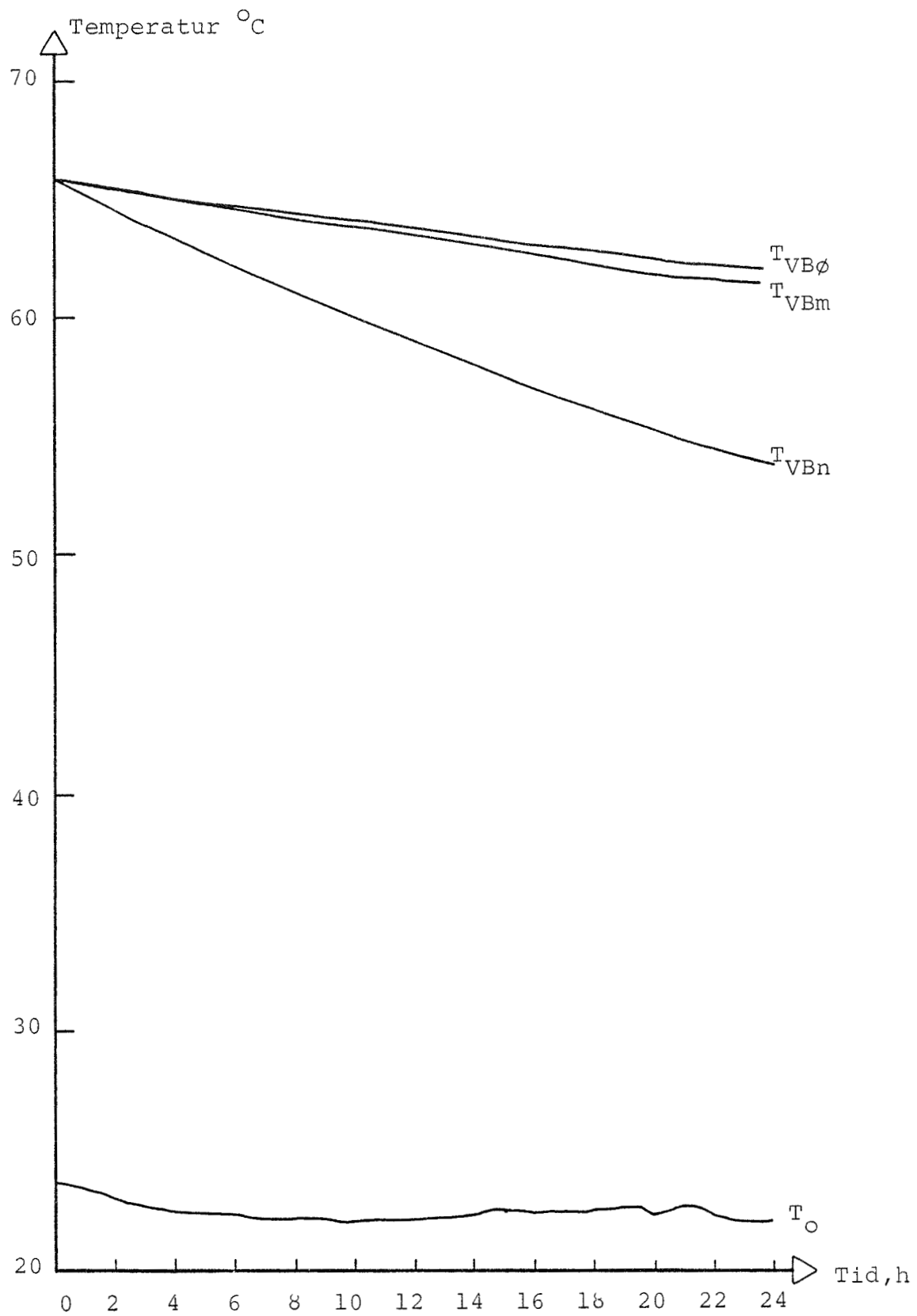
Med et solfangervæskeflow på $7,5 \text{ l/min}$ og en effekttilførsel på ca. 2100 W blev varmelagerunitten opvarmet fra 10°C til 65°C . Varmelagringskapaciteten var:

$$490 \text{ Wh}/^{\circ}\text{C}$$

Varmeoverførselsevnen fra solfangerkredsen til brugsvandet fremgår af figur 6.4.



Figur 6.4 Varmeoverførselsevne fra solfangervæske til Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400. Benyttet solfangervæskeflow $7,5 \text{ l/min}$ og effekttilførsel: 2100 W .



Figur 6.3 Afkølingsforløb for Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400.

2.6.4 Diskussion af måleresultater

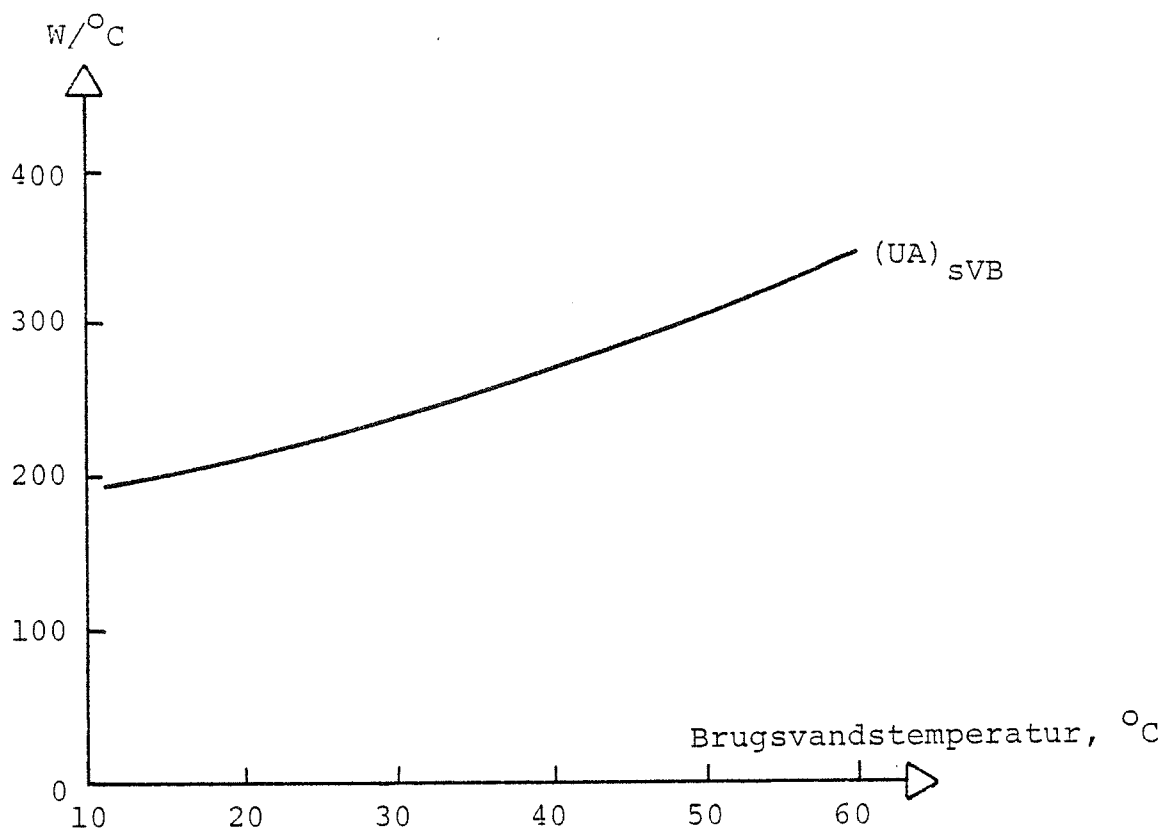
Størrelsen af varmelagerunitens varmetab når solfangeren er i drift svarer til tabet fra en beholder med en ideel tykkelse af mineraluldsisolering på ca. 2 cm. Den største del af varmetabet sker fra kompaktinstallation SOKI 6, som bortset fra varmeveksleren er uisoleret. En effektiv isolering af instrumentenheden er derfor nødvendig. Med tanke på de enkelte komponenters forskelligartede overfladeformer er dette et tidskrævende arbejde, hvorfor en totalisolering af enheden, f.eks. i form af en ændret placering må foreslås. Placeres instrumentenheden under lagerbeholderen inden for isoleringspladerne, vil tabet reduceres betydeligt. Denne placering er mulig uden at serviceeftersyn besværliggøres urimeligt meget, hvis lagerbeholderens ben forlænges lidt.

I en periode uden solfangerdrift er varmetabet fra lageruniten forholdsvis ringe. Afkølingsforløbet for brugsvandet i den nederste del af lagertanken vidner dog om, at der herfra tabes en stor varmemængde. Dette tab sker dels til gulvet fra den uisolerede lagerbeholderbund, dels ved varmeledning gennem rørføringerne mellem lagerbeholderen og instrumentenheden. Også dette tab vil derfor reduceres ved den omtalte ændrede placering af instrumentenheden.

Endelig skal som forklaring på varmetabets størrelse nævnes, at tykkelsen af isoleringspladerne visse steder er meget lille og at isoleringspladerne ikke slutter helt tæt ved alle sammenføjningerne.

Vandlagerunitens vandvolumen er 413 l. Vælges den kritiske varmeoverførselsevne fra solfangervæske til brugsvand til $25 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}^2$ solfanger, ses det af figur 6.4, at lageret af varmeoverførselsmæssige hensyn er velegnet til solvarmeanlæg med solfangerarealer op til omtrent 5 m^2 . Solfangervæsken har en væsentlig indflydelse på varmeoverførselsevnen. Derfor må det forventes, at anvendelsen af PKL 300, som f.eks. kan erstatte brugen af PKL 90, vil forbedre de varmeoverførselsmæssige forhold.

Efter afprøvningernes afslutning besluttede fabrikanten at anvende en ny solfangervæske, PKL 300-80. Denne væske er godkendt af Miljøstyrelsen og har bedre varmetekniske værdier end PKL 90. Varmelagerunit'en blev under afprøvningen testet med PKL 300 som solfangervæske. De varmetekniske værdier for PKL 300 og PKL 300-80 er næsten ens, således at resultaterne fra afprøvningen med PKL 300 med rimelighed også kan anvendes, når PKL 300-80 benyttes som solfangervæske. Med et solfangervæskeflow på 7,5 l/min og en effekttilførsel på ca. 2100 W blev varmeoverførselsevnen fra solfangerkredsen til brugsvandet målt. Resultatet fremgår af figur 6.5. Vælges den kritiske varmeoverførselsevne fra solfangervæske til brugsvand til $25 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}^2$ solfanger, ses det af figur 6.5, at lageret af varmeoverførselsmæssige hensyn er velegnet til solvarmeanlæg med solfangerarealer op til omtrent 8 m^2 .



Figur 6.5. Varmeoverførselsevne fra solfangervæske til Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400. Benyttet solfangervæskeflow 7,5 l/min og effekttilførsel: 2100 W. Benyttet solfangervæske: PKL 300.

2.7. Solarmatic akkumuleringstank

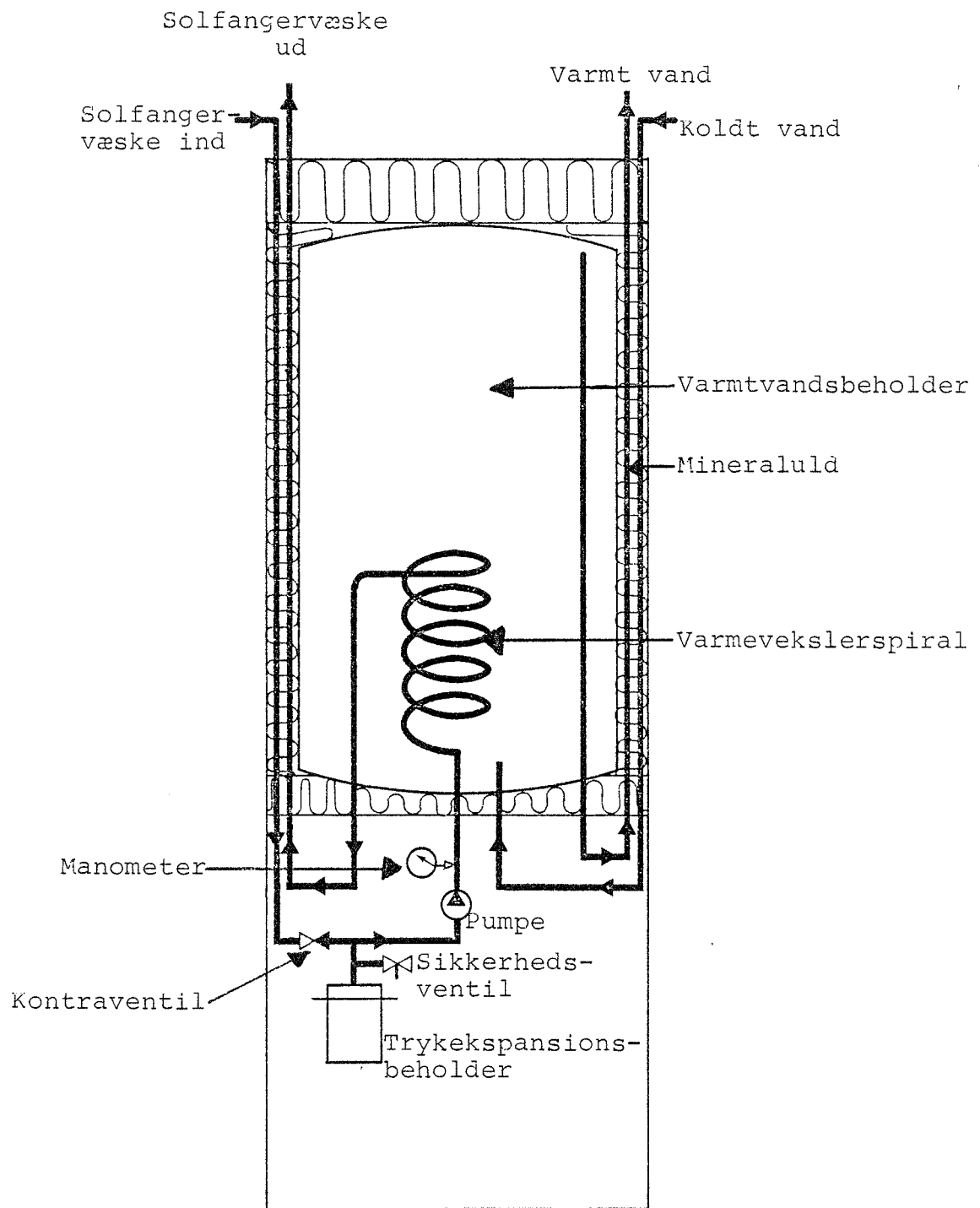
2.7.1 Identifikation af varmelagerunit

Firmanavn: Sunfix Miljøteknik
Adresse: Industriskellet 7, 3300 Frederiksværk
Telf.nr.: 03-124200
Lagerunitmodel: Solarmatic akkumuleringstank

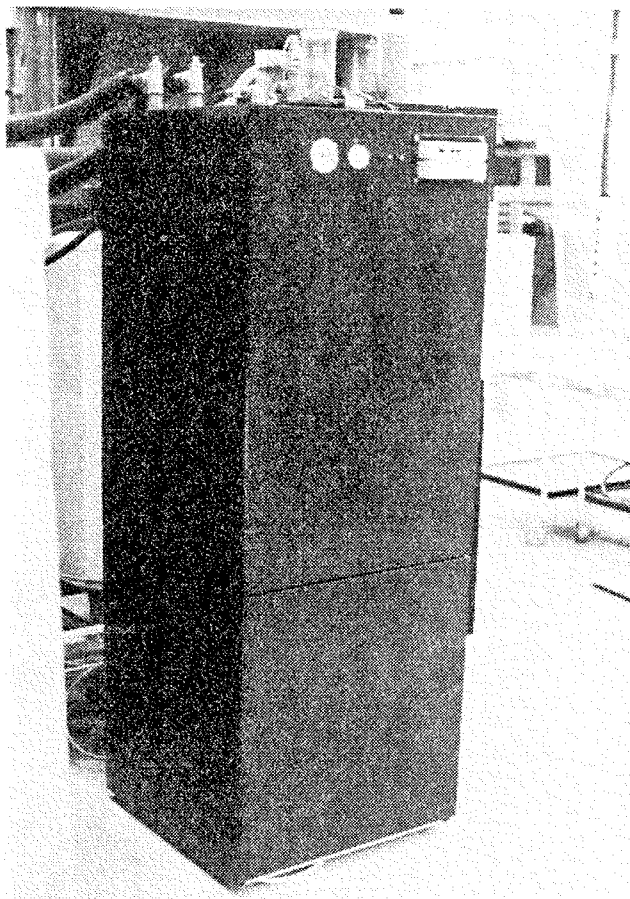
2.7.2 Beskrivelse af lagerunit

Varmelagringsprincippet fremgår af figur 7.1. Brugsvand placeret i en cylinderformet varmtvandsbeholder benyttes som varmeakkumulerende materiale. Varmen overføres fra solfangerkredsen til brugsvandet ved hjælp af en varmevekslerspiral placeret i varmtvandsbeholderen. Der er således kun enkeltadskillelse mellem solfangervæske og brugsvand, hvorfor der må benyttes en solfangervæske, som er godkendt af Miljøstyrelsen til anvendelse i brugsvandssystemer uden dobbeltadskillelse mellem brugsvand og solfangervæske. Beholderen er isoleret med mineraluld og er ved beholderbunden fastgjort til et stativ. Under beholderen er placeret et instrumentrum med styringssystem, ekspansionsbeholder, ventiler, pumpe og lignende udstyr til et solvarmeanlæg. Et kabinet fastgjort til stativet omgiver lagerunitten med undtagelse af instrumentrummets bagside. Rørene med brugsvand og solfangervæske er ført gennem kabinettes topplade og videre gennem beholderisoleringen til instrumentrummet, således at alle rørføringer gennem beholderoverfladen er placeret i beholderbunden. Varmelagerunitten er vist på figur 7.2.

Størrelsen af lagerunitten fremgår af tabel 7.1. Lagerunitten er afprøvet med en propylenglykol/vand blanding frostsikret til $\div 20^{\circ}\text{C}$ som solfangervæske.



Figur 7.1 Varmelagringsprincip for Solarmatic akkumuleringstank.



Figur 7.2 Solarmatic akkumuleringstank

Varmtvandsbeholdervolumen		199 l
Solfangervæskevolumen i lagerunit		4 l
Total lagerunitmasse (tom)		145 kg
Ydre dimensioner	bredde	58 cm
	dybde	60 cm
	højde	163 cm
Omtrentlig isoleringstykkelse	sider	3-5 cm
	top	10 cm
	bund	3 cm

Tabel 7.1 Data for Solarmatic akkumuleringstank.

2.7.3 Måleresultater

Varmelagerunitens varmetab og varmeoverførselsevnen fra solfangervæske til lager blev målt som beskrevet i afsnit 1. Resultaterne var:

Under stabile temperaturforhold med $50,1^{\circ}\text{C}$ som fremløbs-temperatur og $23,7^{\circ}\text{C}$ som omgivelsernes temperatur var varmelagerunitens varmetabskoefficient, når solfangeren var i drift:

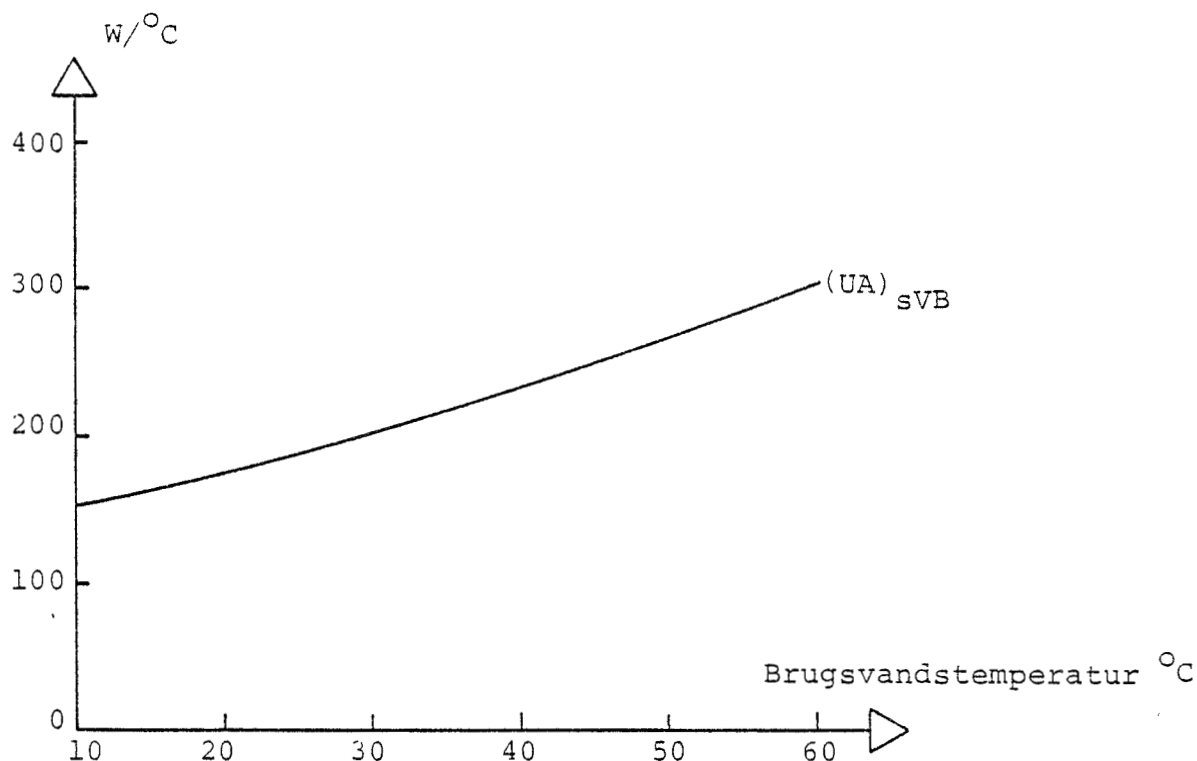
$$4,4 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$$

Lagerunitens afkølingsforløb uden varmetilførsel og tapping igennem 24 timer fremgår af figur 7.3. Vandtemperaturen i 3 forskellige niveauer, øverst $T_{VB\phi}$, i midten T_{VBm} og nederst T_{VBn} er registreret.

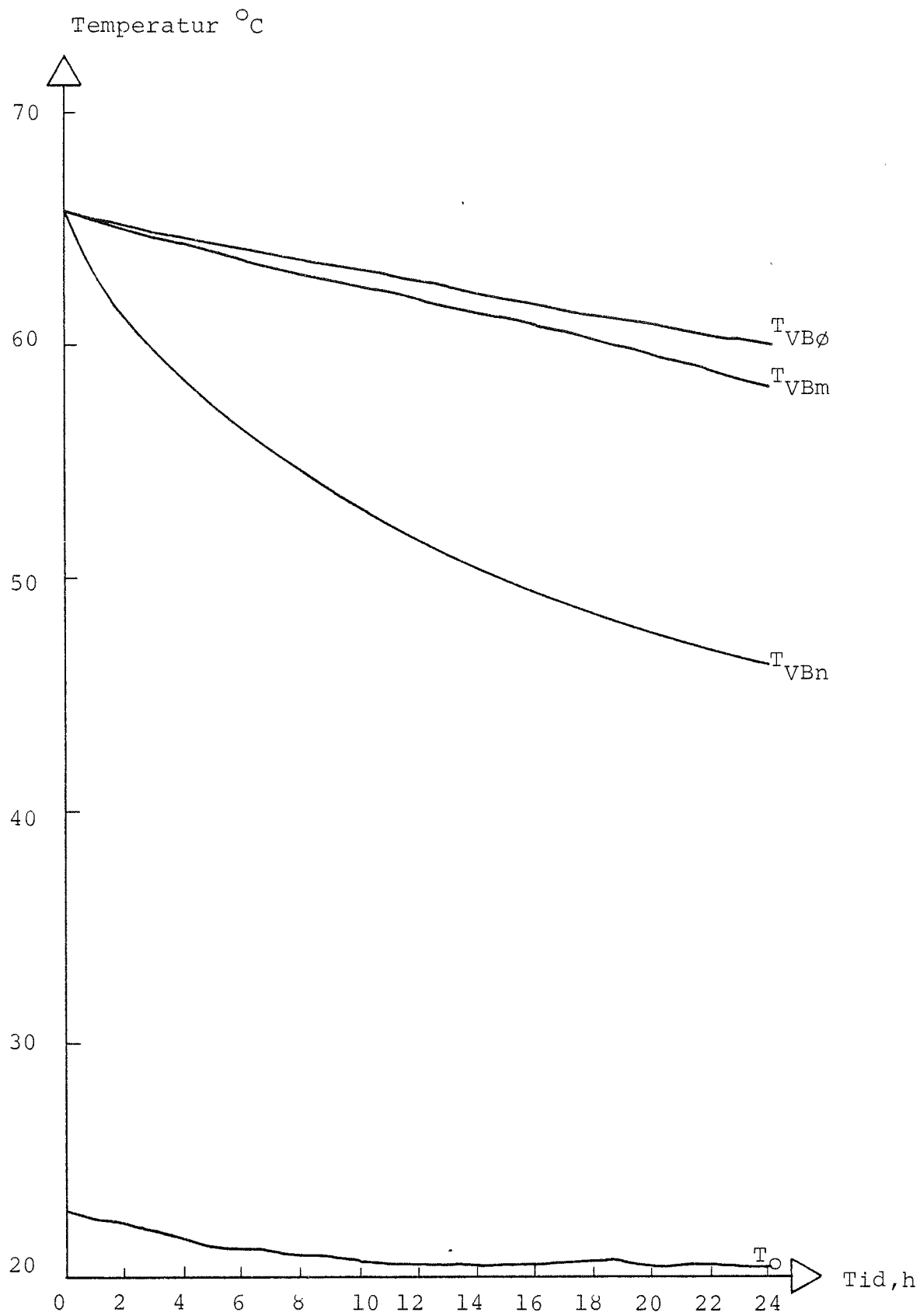
Med et solfangervæskeflow på $3,8 \text{ l/min}$ og en effekt overførsel på ca. 1200 W blev varmelageruniten opvarmet fra 10°C til 65°C . Varmelagringskapaciteten var:

$$240 \text{ Wh}/^{\circ}\text{C}$$

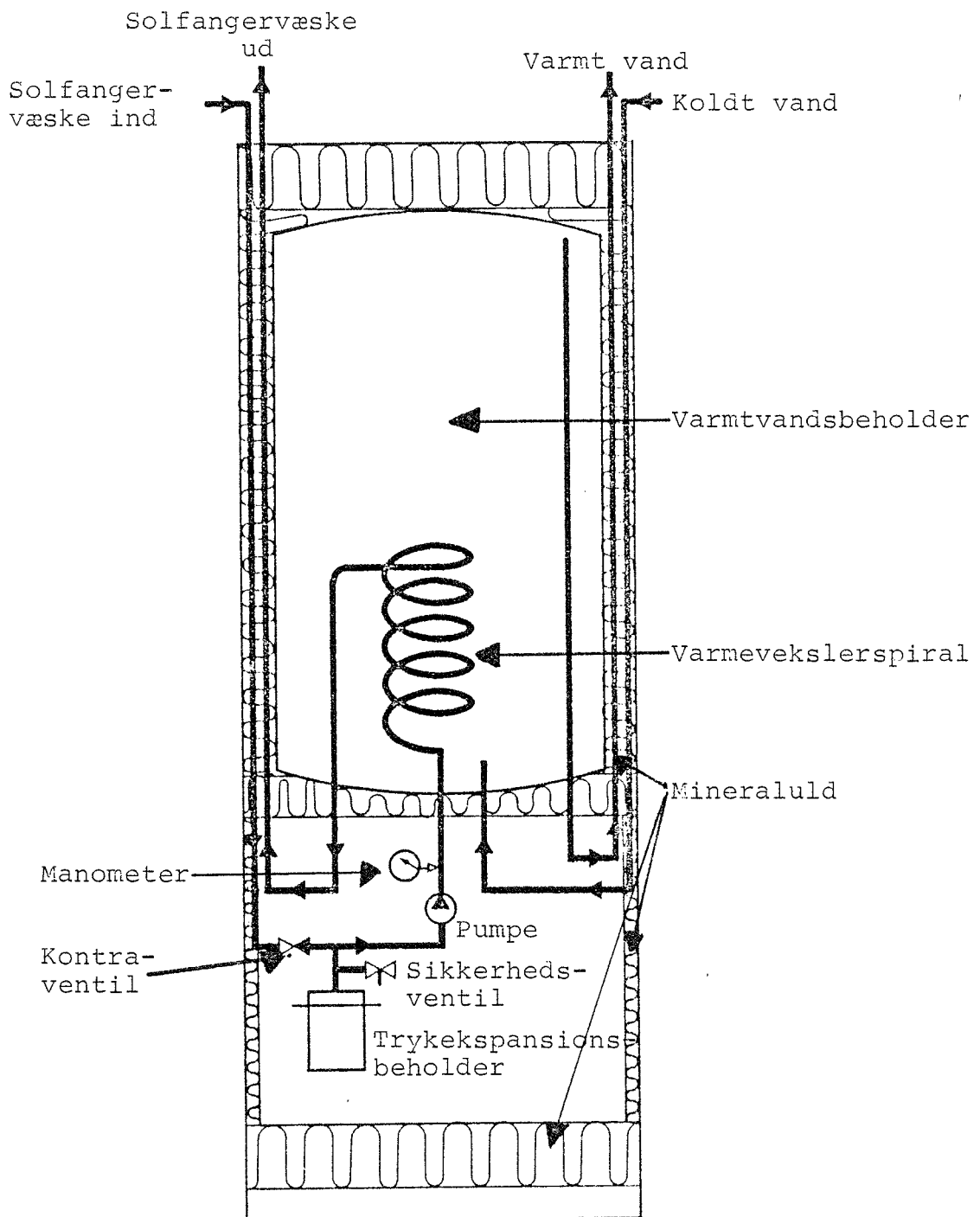
Varmeoverførselsevnen fra solfangerkredsen til brugsvandet fremgår af figur 7.4.



Figur 7.4 Varmeoverførselsevne fra solfangervæske til Solarmatic akkumuleringstank. Benyttet solfangervæskeflow: $3,8 \text{ l/min}$ og effekttilførsel: 1200 W .



Figur 7.3 Afkølingsforløb for Solarmatic akkumuleringsstank.



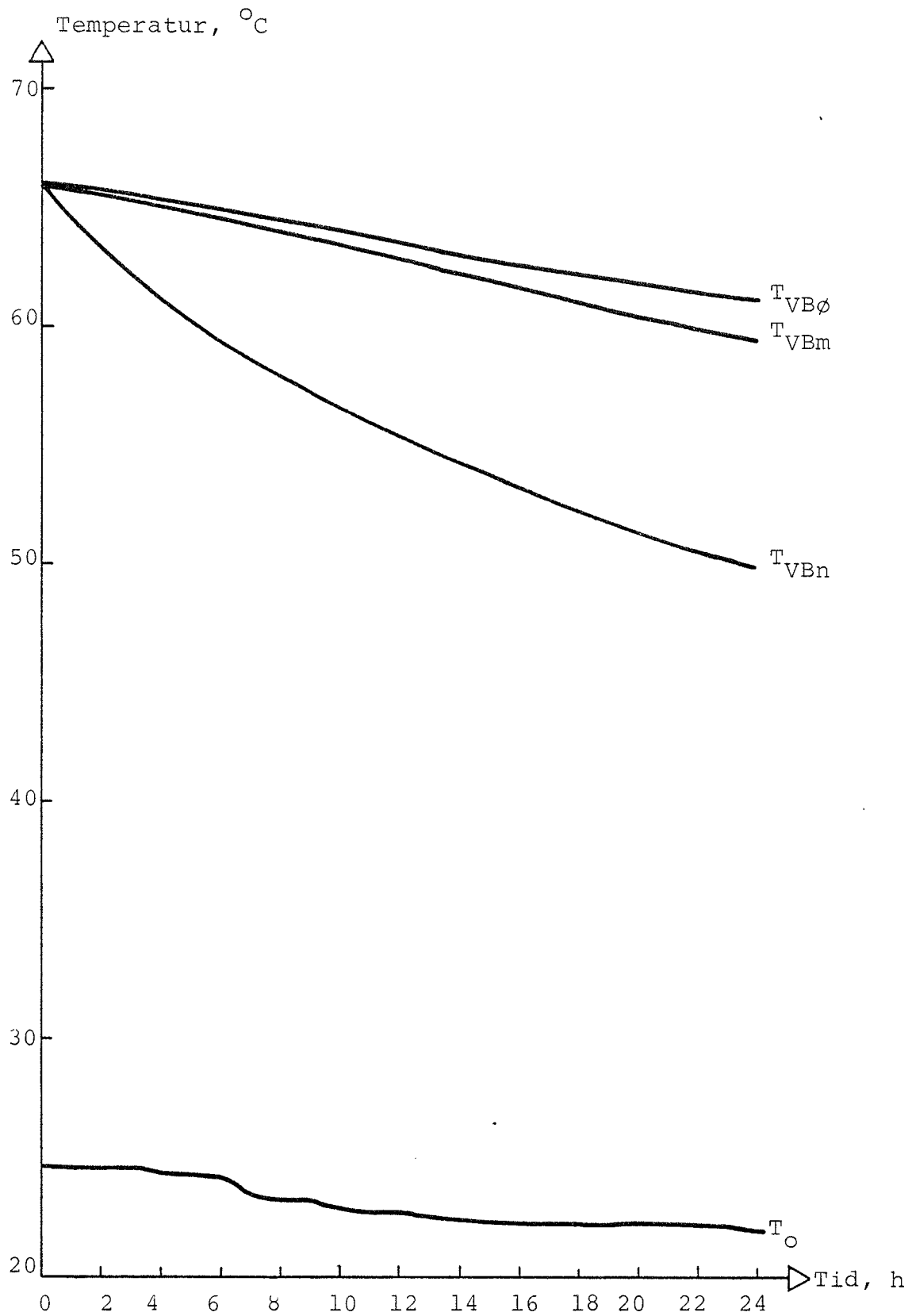
Figur 7.5 Varmelagringsprincip for forbedret Solar-matic akkumuleringsstank.

Den forbedrede lagerunit har set ud fra et varmetabsmæssigt synspunkt en ideel udformning, hvilket fremgår af målingerne: Under stabile temperaturforhold med $49,4^{\circ}\text{C}$ som fremløbstemperatur og $22,4^{\circ}\text{C}$ som omgivelsernes temperatur var den forbedrede varmelagerunits varmetabskoefficient, når solfangeren var i drift:

$$2,1 \text{ W}/^{\circ}\text{C}.$$

Den forbedrede varmelagerunits afkølingsforløb uden varmetilførsel og tapning igennem 24 timer fremgår af figur 7.6. Vandtemperaturen i 3 forskellige niveauer, øverst $T_{VB\phi}$, i midten T_{VBm} og nederst T_{VBn} er registreret.

Lagerunittens vandvolumen er 199 l. Vælges den kritiske varmeoverførselsevne til $25 \text{ W}/^{\circ}\text{C m}^2$ solfanger, ses det af figur 7.4, at lageret af varmeoverførselsmæssige hensyn er velegnet til solvarmeanlæg med solfangerarealer op til omtrent 7 m^2 .



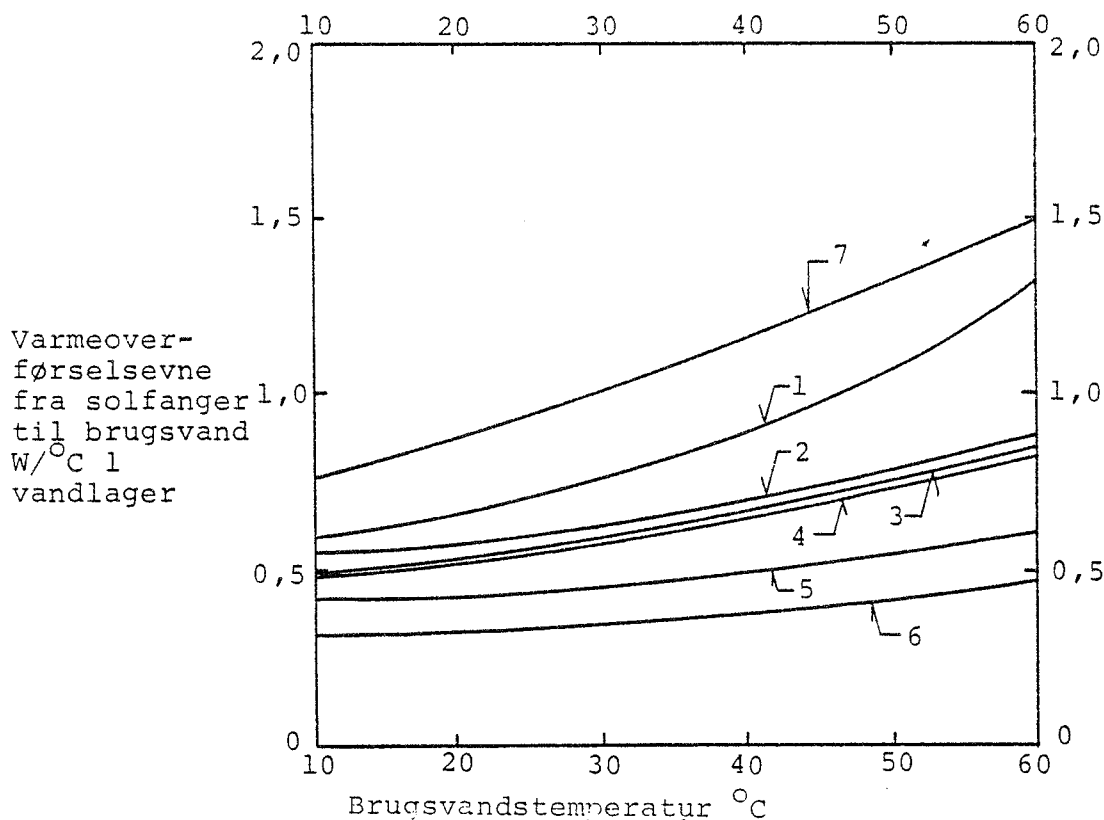
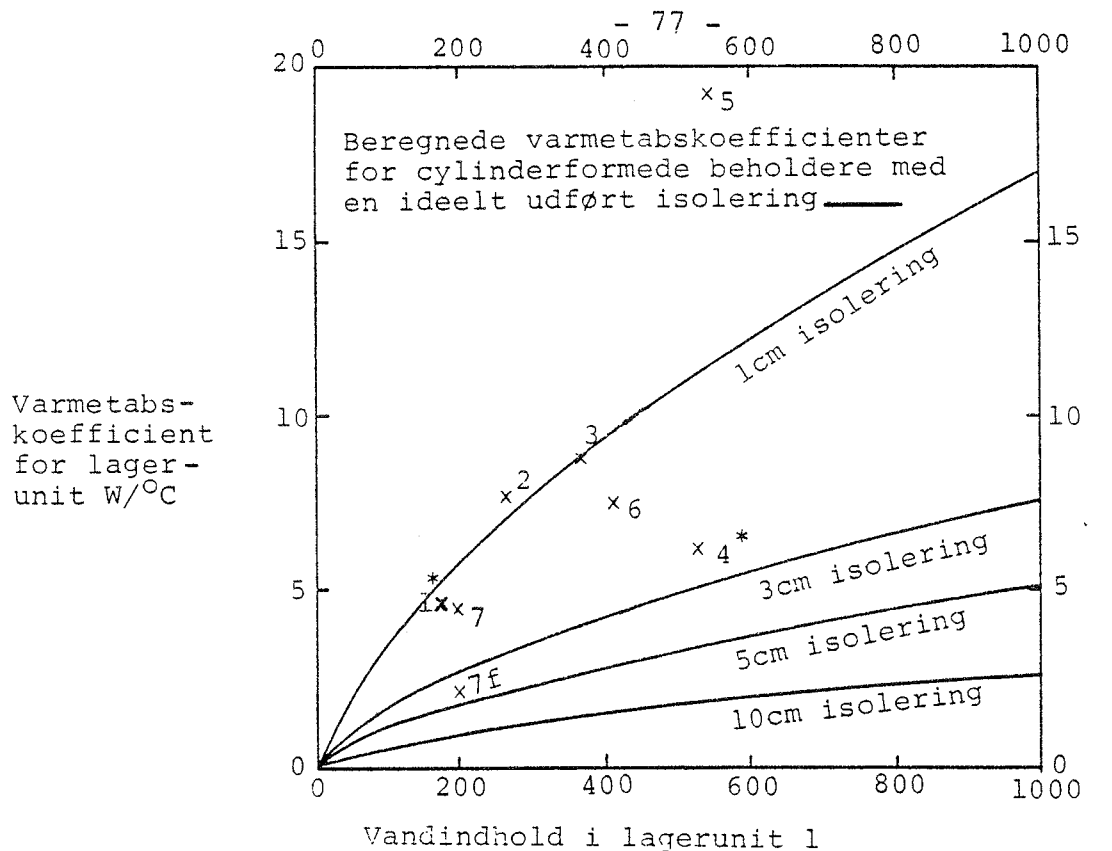
Figur 7.6 Afkølingsforløb for forbedret Solararmatic akkumuleringskøleakku.

3. Sammenfatning af måleresultater

Figur 7 viser øverst de målte varmetabskoefficienter for de afprøvede varmelagerunits. På figuren er desuden til sammenligning angivet teoretisk beregnede varmetabskoefficienter for forskellige isoleringstykkelser for en ideelt isoleret cylinderformet beholder med en højde, som er dobbelt så stor som diameteren. Der er regnet med et varmeisoleringsmateriale med en varmeledningsevne på $0,045 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Det er forudsat, at den udvendige overgangsisolans er $0,13 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$.

Varmetabskoefficienterne for de enkelte lagerunits kan ikke sammenlignes direkte med hinanden, idet der er forskelle i udformningen. Ikke alle de afprøvede lagerunits indeholder f.eks. det nødvendige hjælpeudstyr, så som solfangerpumpe, ekspansionsbeholder, styringssystem osv. Metro Combibeholder og HS-Solvarmelagertank indeholder således ikke dette udstyr, hvorved monteringsarbejdet besværliggøres. Varmetabet fra en lagerunit uden dette udstyr bliver selvfølgelig også mindre end varmetabet fra en komplet lagerunit. Derfor er varmetabskoefficienten for de lagerunits, hvor udstyret mangler forsynet med en * i figur 7. For at lette monteringsarbejdet og for at forbedre mulighederne for at begrænse varmetabet fra hele solvarmelagerdelen bør varmelagerunitten indeholde alt udstyr, som er nødvendigt eller krævet for at et solvarmeanlæg kan fungere effektivt, eventuelt i form af en separat teknikunit som placeres under lagerbeholderen.

Af [1] fremgår det, at udbyttet fra solvarmeanlæg ikke stiger væsentligt for voksende varmelagerisoleringstykkelse, når blot varmelageret er isoleret med 5 cm mineraluld. Solvarmesystemets udbytte falder derimod kraftigt for aftagende isoleringstykkelse, når isoleringstykkelsen af varmelageret er mindre end 5 cm.



1. Metro combibeholder type 2002 C
2. Corona-Vex lagertype HSW 300/ST 175
3. AR-CON lagertank L-410
4. HS-solvarmelagertank Type I
5. Dæmpalager B-6/l-unit
6. Stiebel Eltron Solar-tank SB-SOL 400
7. Solarmatic akkumuleringstank
- 7f. Solarmatic akkumuleringstank, forbedret
- * Det nødvendige hjælpeudstyr til solvarmeanlæg er ikke indeholdt i den afprøvede unit.

Figur 7. Måleresultater for de afprøvede lagerunits.

Med tanke på størrelsen af de målte varmetab må isoleringsstandarden af de afprøvede varmelagerunits med undtagelse af den forbedrede udgave af Solarmatic akkumuleringstank betragtes som så ringe, at ændringer i varmelagerunitkonstruktionerne er nødvendige. I det følgende skal nogle af de erfaringer, som blev indvundet under afprøvningerne, trækkes frem.

Varmelagerunittens varmetab afhænger naturligvis af varmelagerunittens overfladeareal, isoleringsmaterialet, isoleringstykkel- sen og omhyggeligheden af isoleringsarbejdet. Erfaringen viser, at varmetab forårsaget af kuldebroer i varmelagerbeholderens overflade har en endog særdeles stor betydning for varmetabets størrelse. Kuldebroer kan f.eks. forårsages af dårligt udført isoleringsarbejde, ringe isoleringstykkel- se, gennemføringer gen- nem isoleringen af enhver art, f.eks. i form af rørgennemførin- ger og kabinetfastgørelsesanordninger. Endvidere har varmeta- bet fra hjælpeudstyret, som anvendes til solvarmeanlæg, stor betydning for varmelagerunittens varmetab. Kuldebroernes store indflydelse på varmelagerunittens varmetab kan reduceres ved et effektivt, men ofte besværligt, tidskrævende og dyrt isolerings- arbejde. Endvidere viser målingerne, at placeringen af kulde- broerne har stor indflydelse på varmetabets størrelse. Pla- ceres en kuldebro, f.eks. i form af en rørtilslutning, i be- holderens bund afkøles vandet ved kuldebroen hurtigt og dan- ner, hvis solfangeren ikke er i drift, et koldt stillestående isolerende lag oven over kuldebroen. Placeres en tilsvarende kuldebro derimod et højt beliggende sted på beholderoverfladen, vil der opstå naturlig cirkulation i vandet, således at kulde- broen til stadighed forbliver varm. Da varmeoverførselskoeffici- enten fra en varm overflade der vender opad tilmed er langt stør- re end for en varm overflade, der vender nedad, bliver størrel- sen af kuldebroens varmetab meget større for en kuldebro, der er placeret i beholderens top, end for en kuldebro, der er pla- ceret i beholderens bund.

Ud fra et varmetabsmæssigt synspunkt må det derfor anbefales, at alle gennemføringer, så som rørgennemføringer og eventuelle anordninger til kabinettets placering, gennem isoleringen placeres i lagerbeholderens bund. Ligeledes må det af varmetabsmæssige årsager anbefales, at placere alt hjælpeudstyret som er nødvendigt for at solvarmeanlægget skal fungere tilfredsstillende, i et tæt isoleret rum under lagerbeholderen.

Nederst på figur 7 er de målte varmeoverførselsevner fra solfangerkredsen til brugsvandet som funktion af brugsvandstemperaturen angivet. For overskuelighedens skyld er varmeoverførselsevnen angivet pr. 1 vandlager. Af [1] fremgår det, at udbyttet fra solvarmeanlæg ikke vokser væsentligt for voksende varmeoverførselsevne, når blot varmeoverførselsevnen er større end $25 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}^2$ solfanger. Derimod falder udbyttet kraftigt for aftagende varmeoverførselsevne, når varmeoverførselsevnen er mindre end $25 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}^2$ solfanger. Disse beregninger er foretaget under forudsætning af en konstant varmeoverførselsevne uafhængig af lagertemperatur og effekttilførsel. Denne forudsætning holder ikke i praksis. Ligeledes er beregningerne endnu ikke forfinet i en sådan grad, at resultaterne kan betragtes som endelige. Indtil videre må grænsen $25 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}^2$ solfanger anses for at være den kritiske grænse for solvarmesystemer til brugsvandsopvarmning. En vurdering af størrelsen af varmeoverførselsevnen fra solfangerkreds til varmelager er altså meningsløs uden kendskab til solvarmeanlæggets størrelse. Hver varmelagerunit kan benyttes til solvarmeanlæg af varierende størrelse, således at forholdet mellem varmelagervolumen og solfangerareal varierer fra anlæg til anlæg. Af [1] fremgår det, at når vandlagervolumet er større end 50 l/m^2 solfanger, bliver forøgelsen i solvarmesystemers ydeevne beskeden selv ved store varmelagervolumenforøgelser. Benyttes dette vandlagervolumen og $25 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}^2$ solfanger som varmeoverførselsevnegrænsen fås $0,5 \text{ W/}^{\circ}\text{C l}$ vandlager som varmeoverførselsevnegrænse. Under disse forudsætninger ses varmeoverførselsevnen for de afprøvede lagerunits at være tilstrækkelig stor, dog med undtagelse af Stiebel Eltron lageret. Efter afprøvningernes afslutning besluttede Stiebel Eltrons lagerets fabrikant at benytte en anden solfangervæske, således at dette forhold blev forbedret.

Af tabel 2 fremgår nogle karakteristiske størrelser af de afprøvede lagerunits.

Forholdet mellem varmelagringskapaciteten og bruttovolumenet er et mål for, hvor effektivt lagerunittens volumen udnyttes ved varmelagringsringen. Består hele lagervolumenet af vand, er forholdet $1,16 \text{ Wh/}^{\circ}\text{C l.}$ Forholdet vil normalt stige for voksende lagervolumen, hvilket også fremgår af tabellen, dog med Stiebel Eltron lageret som en undtagelse. Dette skyldes hovedsageligt instrumentpladens volumenkrav. Forholdet mellem lagerunitmasse og varmelagringskapacitet vil normalt falde for voksende lagerstørrelse. På dette område er Stiebel Eltron lageret fordelagtigt, idet lagerunitten hverken indeholder stativ eller et resourcekrævende kabinet. Endvidere indeholder lagerunitten kun en beholder og varmeveksleren er meget lille. Til gengæld er der kun enkeltadskillelse mellem solfangervæske og brugsvand. I denne forbindelse må Metro Combibeholderen fremhæves, idet dobbeltadskillelsen mellem solfangervæske og brugsvand her er til stede i form af en smart ressourcebesparende dobbeltvarmeveksler-spiral.

Kalkudfældning og skoldningsrisiko undgås ikke i de afprøvede varmelagerunits. Dæmpa B-6/1-unitten er dog udformet således, at disse problemer kan løses ved en fornuftig styring af cirkulationspumpen mellem de to beholdere.

Set ud fra et monteringsmæssigt synspunkt bør en varmelagerunit indeholde pumpe, ekspansionsbeholdere, temperaturfølere, andet styringsudstyr og forskellige ventiler. Dette udstyr bør placeres i et instrumentrum. Vasketilsætning, forbindelse af de elektriske installationer og rørarbejdet i form af tilslutning af koldt- og varmtvandsrørene til lagerunitten og tilslutningerne til og fra solfangeren må kunne foretages uden at nødvendigsgøre ændringer af nogen art i instrumentrummet. Ligeledes må monteringen af varmelagerunittens kabinet foregå på en let og hurtig måde. Monteringsmæssigt synes ikke alle de afprøvede lagerunits at være færdigudviklede.

Lagerunit	Metro * Combibeholder type 2002 C	Solarmatic akkumule- ringstank	Corona-Vex lagertype HSW 300/ST175	AR-CON lagertank L-410	Stiebel El- tron Solar- tank SB-SOL 400	HS-Solvarme- lagertank * type I	Dampa B-6/l-unit
Væskevolu- men i lagerunit l	188	203	278	380	414	519	530
Varmelag- ringskapa- citet $\text{Wh}/^{\circ}\text{C}$	220	240	350	460	490	620	630
Brutto- volumen l	510	567	690	740	1310	960	860
Lagerunit- masse (tom) kg	118	145	229	256	150	320	354
Varmelag- ringskapa- citet pr. bruttovolumen $\text{Wh}/^{\circ}\text{C l}$	0,43	0,42	0,51	0,62	0,37	0,65	0,73
Lagerunit- masse pr. varmelagrings- kapacitet $\text{kg } ^{\circ}\text{C}/\text{Wh}$	0,54	0,60	0,65	0,56	0,31	0,52	0,56

* Den afprøvede lagerunit indeholder ikke det nødvendige hjælpeudstyr til solvarmeanlæg.

Tabel 2. Data for de afprøvede lagerunits.

Appendix A. Målenøjagtighed

Størrelsen af de forventede måleubestemtheder for varmetabskoefficienten, varmekapaciteten og varmeoverførsels-
evnen belyses i dette afsnit ved hjælp af beregnings-
eksempler. Måleubestemthederne, som benyttes i bereg-
ningseksemplerne, er angivet i tabel 3. I beregningerne
benyttes desuden samme symboler som angivet i tabel 1.

Ubestemthed af temperaturmåling	$S_T = 0,5^{\circ}\text{C}$
Ubestemthed af temperaturdiffe- rensmåling	$S_{\Delta T} = 0,05^{\circ}\text{C}$
Relativ ubestemthed af effekt- måling	$\frac{S_{EF}}{EF} = 0,01$
Relativ ubestemthed af tids- spring	$\frac{S_{\Delta \tau}}{\Delta \tau} = 0,005$
Relativ ubestemthed af solfan- gervæskens massefylde	$\frac{S(\rho)_t}{(\rho)_t} = 0,02$
Relativ ubestemthed af solfan- gervæskens varmekapacitet	$\frac{S(C_p)_t}{(C_p)_t} = 0,02$

Tabel 3. De benyttede måleubestemtheder.

1. Varmetabskoefficienten

Varmetabskoefficienten $(UA)_1$ beregnes af formlen:

$$(UA)_1 = \frac{EF \cdot \Delta T_2 \cdot (C_p)_{\frac{T_f+T_r}{2}} \cdot (\rho)_{\frac{T_f+T_r}{2}}}{\Delta T_1 \cdot (T_1 - T_o) \cdot (C_p)_{T_{v1}} \cdot (\rho)_{T_{v1}}}$$

Varmetabskoefficientens ubestemthed $S_{(UA)_1}$ kan derfor bestemmes af:

$$\begin{aligned} S_{(UA)_1} &= \sqrt{\left(\frac{\partial (UA)_1}{\partial EF} S_{EF} \right)^2 + \left(\frac{\partial (UA)_1}{\partial \Delta T_2} S_{\Delta T_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial (UA)_1}{\partial (C_p)_{\frac{T_f+T_r}{2}}} S_{(C_p)_{\frac{T_f+T_r}{2}}} \right)^2} \\ &\quad + \left(\frac{\partial (UA)_1}{\partial (\rho)_{\frac{T_f+T_r}{2}}} S_{(\rho)_{\frac{T_f+T_r}{2}}} \right)^2 + \left(\frac{\partial (UA)_1}{\partial \Delta T_1} S_{\Delta T_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial (UA)_1}{\partial T_1} S_{T_1} \right)^2 \\ &\quad + \left(\frac{\partial (UA)_1}{\partial T_o} S_{T_o} \right)^2 + \left(\frac{\partial (UA)_1}{\partial (C_p)_{T_{v1}}} S_{(C_p)_{T_{v1}}} \right)^2 + \left(\frac{\partial (UA)_1}{\partial (\rho)_{T_{v1}}} S_{(\rho)_{T_{v1}}} \right)^2 \\ &= (UA)_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{S_{EF}}{EF} \right)^2 + \left(\frac{S_{\Delta T_2}}{\Delta T_2} \right)^2 + \left(\frac{S_{(C_p)_{\frac{T_f+T_r}{2}}}}{(C_p)_{\frac{T_f+T_r}{2}}} \right)^2 + \left(\frac{S_{(\rho)_{\frac{T_f+T_r}{2}}}}{(\rho)_{\frac{T_f+T_r}{2}}} \right)^2} \\ &\quad + \left(\frac{S_{\Delta T_1}}{\Delta T_1} \right)^2 + \left(\frac{S_{T_1}}{T_1 - T_o} \right)^2 + \left(\frac{S_{T_o}}{T_1 - T_o} \right)^2 + \left(\frac{S_{(C_p)_{T_{v1}}}}{(C_p)_{T_{v1}}} \right)^2 + \left(\frac{S_{(\rho)_{T_{v1}}}}{(\rho)_{T_{v1}}} \right)^2} \end{aligned}$$

Ved afprøvningen holdes solfangerfæskeflowet så højt, at temperaturdifferensen over varmelegemet ΔT_1 er omtrent 10°C. Lagertemperaturen T_1 ved afprøvningen er omtrent 50°C, og omgivelsernes temperatur T_o omtrent 25°C. ΔT_2 afhænger af varmetabsstørrelsen. For forskellige varmetabskoefficienter beregnes ubestemtheden ved hjælp af ovenstående ligning, med de i tabel 3 angivne størrelser og

$\Delta T_1 = 10^\circ\text{C}$, $T_1 = 50^\circ\text{C}$ og $T_0 = 25^\circ\text{C}$. Resultaterne fremgår af tabel 4. På baggrund af dette beregningseksempel, må målenøjagtigheden anses at være af en rimelig størrelsesorden.

Varmetabskoefficient $(UA)_1 \text{ W/}^\circ\text{C}$	Varmetab $Q_{\text{tab W}}$	temperaturdifferens over varmelager $\Delta T_2 \text{ }^\circ\text{C}$	Varmetabskoefficients ubestemthed $S_{(UA)_1 \text{ W/}^\circ\text{C}}$	Relativ ubestemthed for varmetabskoefficienten
3	75	0,28	0,56	18
5	125	0,46	0,60	12
10	250	0,93	0,74	7
20	500	1,85	1,14	6

Tabel 4. Beregningseksempel på størrelsen af varmetabskoefficientens måleubestemthed.

2. Varmekapaciteten

Varmelagringskapaciteten beregnes ved hjælp af ligningen:

$$Q_{\text{kap}} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_i \cdot (\dot{M}_i \Delta T_2 \cdot (C_p)_{\frac{T_f+T_{ri}}{2}} \cdot (\rho)_{\frac{T_f+T_{ri}}{2}} - (UA)_1 \cdot (T_{1i} - T_{0i}))}{(T_{\text{slut}} - T_{\text{start}})} =$$

$$\frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_i \cdot \left(\frac{EF_i \cdot \Delta T_2 \cdot (C_p)_{\frac{T_f+T_{ri}}{2}} \cdot (\rho)_{\frac{T_f+T_{ri}}{2}}}{\Delta T_{1i} \cdot (C_p)_{T_{v1i}} \cdot (\rho)_{T_{v1i}}} - (UA)_1 \cdot (T_{1i} - T_{0i}) \right)}{T_{\text{slut}} - T_{\text{start}}} =$$

$$\sum_{i=1}^N Q_{\text{kap}i}$$

Varmelagringskapacitetens ubestemthed $S_{Q_{\text{kap}}}$ kan, idet $S_{Q_{\text{kap}i}}$ igennem hele opvarmningsforløbet forudsættes at være konstant, bestemmes af $S_{Q_{\text{kap}}} = \sqrt{N} \cdot S_{Q_{\text{kap}i}} =$

$$\begin{aligned}
 & \sqrt{N} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial Q_{\text{kap}_i}}{\partial \Delta \tau_i} S_{\Delta \tau_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{\text{kap}_i}}{\partial EF_i} S_{EF_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{\text{kap}_i}}{\partial \Delta T_{2_i}} S_{\Delta T_{2_i}} \right)^2} \\
 & + \left(\frac{\partial Q_{\text{kap}_i}}{\partial (C_p) \frac{T_f + T_{r_i}}{2}} S_{(C_p) \frac{T_f + T_{r_i}}{2}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{\text{kap}_i}}{\partial (\rho) \frac{T_f + T_{r_i}}{2}} S_{(\rho) \frac{T_f + T_{r_i}}{2}} \right)^2 \\
 & + \left(\frac{\partial Q_{\text{kap}_i}}{\partial \Delta T_{1_i}} S_{\Delta T_{1_i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{\text{kap}_i}}{\partial (C_p) T_{vl_i}} S_{(C_p) T_{vl_i}} \right)^2 \\
 & + \left(\frac{\partial Q_{\text{kap}_i}}{\partial (\rho) T_{vl_i}} S_{(\rho) T_{vl_i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{\text{kap}_i}}{\partial (UA)_1} S_{(UA)_1} \right)^2 \\
 & + \left(\frac{\partial Q_{\text{kap}_i}}{\partial T_{1_i}} S_{T_{1_i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{\text{kap}_i}}{\partial T_{O_i}} S_{T_{O_i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{\text{kap}_i}}{\partial T_{\text{slut}}} S_{T_{\text{slut}}} \right)^2 \\
 & + \left(\frac{\partial Q_{\text{kap}_i}}{\partial T_{\text{start}}} S_{T_{\text{start}}} \right)^2 = \\
 & \sqrt{N} \cdot \sqrt{\left(\frac{Q_{\text{kap}_i}}{\Delta \tau_i} S_{\Delta \tau_i} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau_i \cdot \Delta T_{2_i} \cdot (C_p) \frac{T_f + T_{r_i}}{2} \cdot (\rho) \frac{T_f + T_{r_i}}{2} \cdot S_{EF_i}}{\Delta T_{1_i} \cdot (C_p) T_{vl_i} \cdot (\rho) T_{vl_i} \cdot (T_{\text{slut}} - T_{\text{start}})} \right)^2} \\
 & + \left(\frac{\Delta \tau_i \cdot EF_i \cdot (C_p) \frac{T_f + T_{r_i}}{2} \cdot (\rho) \frac{T_f + T_{r_i}}{2} \cdot S_{\Delta T_{2_i}}}{\Delta T_{1_i} \cdot (C_p) T_{vl_i} \cdot (\rho) T_{vl_i} \cdot (T_{\text{slut}} - T_{\text{start}})} \right)^2 \\
 & + \left(\frac{\Delta \tau_i \cdot EF_i \cdot \Delta T_{2_i} \cdot (\rho) \frac{T_f + T_{r_i}}{2} \cdot S_{(C_p) \frac{T_f + T_{r_i}}{2}}}{\Delta T_{1_i} \cdot (C_p) T_{vl_i} \cdot (\rho) T_{vl_i} \cdot (T_{\text{slut}} - T_{\text{start}})} \right)^2
 \end{aligned}$$

(fortsættes)

$$+ \left(\frac{\Delta\tau_i \cdot EF_i \cdot \Delta T_{2i} \cdot (C_p)_{T_{f+T_{r_i}}} \cdot S_{(\rho)_{T_{f+T_{r_i}}}}}{\Delta T_{1i} \cdot (C_p)_{T_{vl_i}} \cdot (\rho)_{T_{vl_i}} \cdot (T_{slut} - T_{start})} \right)^2$$

$$+ \left(\frac{\Delta\tau_i \cdot EF_i \cdot \Delta T_{2i} \cdot (C_p)_{T_{f+T_{r_i}}} \cdot (\rho)_{T_{f+T_{r_i}}}}{(C_p)_{T_{vl_i}} \cdot (\rho)_{T_{vl_i}} \cdot \Delta T_{1i}^2 \cdot (T_{slut} - T_{start})} \cdot S_{\Delta T_{1i}} \right)^2$$

$$+ \left(\frac{\Delta\tau_i \cdot EF_i \cdot \Delta T_{2i} \cdot (C_p)_{T_{f+T_{r_i}}} \cdot (\rho)_{T_{f+T_{r_i}}}}{\Delta T_{1i} \cdot (\rho)_{T_{vl_i}} \cdot (C_p)_{T_{vl_i}}^2 \cdot (T_{slut} - T_{start})} \cdot S_{(C_p)_{T_{vl_i}}} \right)^2$$

$$+ \left(\frac{\Delta\tau_i \cdot EF_i \cdot \Delta T_{2i} \cdot (C_p)_{T_{f+T_{r_i}}} \cdot (\rho)_{T_{f+T_{r_i}}}}{\Delta T_{1i} \cdot (C_p)_{T_{vl_i}} \cdot (\rho)_{T_{vl_i}}^2 \cdot (T_{slut} - T_{start})} \cdot S_{(\rho)_{T_{vl_i}}} \right)^2$$

$$\left(\frac{\Delta\tau_i \cdot (T_{1i} - T_{O_i})}{T_{slut} - T_{start}} \cdot S_{(UA)_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta\tau_i \cdot (UA)_1}{T_{slut} - T_{start}} \cdot S_{T_{1i}} \right)^2$$

$$+ \left(\frac{\Delta\tau_i \cdot (UA)_1}{T_{slut} - T_{start}} \cdot S_{T_{O_i}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{kap_i}}{T_{slut} - T_{start}} \cdot S_{T_{slut}} \right)^2$$

$$+ \left(\frac{Q_{kap_i}}{T_{slut} - T_{start}} \cdot S_{T_{start}} \right)^2$$

I det nedenfor viste beregningseksempel forudsættes opvarmningsforløbet at foregå fra $T_{\text{start}} = 15^{\circ}\text{C}$ til $T_{\text{slut}} = 60^{\circ}\text{C}$. Effektoverførslen til varmelageret sættes til $6 \cdot X \text{ W}$, hvor X er vandlagervolumenet i l. Temperaturdifferencen over varmelageret sættes til $\Delta T_{2_i} = 5^{\circ}\text{C}$. Opvarmningsforløbet antages at vare i $8\frac{1}{2}$ time og opvarmningsperioden opdeles i halvtimer $\Delta \tau_i = 0,5 \text{ h}$, $N = 17$. Varmelagringskapaciteten sættes til $Q_{\text{kap}_i} = \frac{1,161}{N} : X \text{ Wh}/^{\circ}\text{C}$. Endvidere regnes med, at solfangervæskens massefylde og varmfylde er uafhængig af temperaturen. Lagertemperaturen og omgivelsernes temperatur sættes til hhv $T_{1_i} = 40^{\circ}\text{C}$ og $T_{o_i} = 25^{\circ}\text{C}$. Varmetabskoefficienten sættes til $(UA)_1 = 8,0 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$ og dens ubestemthed $S_{(UA)_1} = 0,7 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$. I beregningerne benyttes desuden det tilnærmede udtryk $\Delta T_{1_i} = \frac{2700 \cdot \Delta T_{2_i}}{6X} ^{\circ}\text{C}$ og de i tabel 3 angivne ubestemtheder. Ved ind-

$$S_{Q_{\text{kap}}} = \sqrt{17} \cdot \sqrt{0,0000092683 \cdot X^2 + 0,1075617283}.$$

Tabel 5 angiver for forskellige vandlagervolumen lagringskapaciteten og ubestemtheden på den. De anførte ubestemtheder anses for at være tilstrækkelige små.

Vandlager- volumen	Varmelagrings- kapacitet	Varmelagrings- kapacitetens ubestemthed	Relativ ube- stemthed for varmelag- ringskap.
$X \text{ l}$	$Q_{\text{kap}} \text{ Wh}/^{\circ}\text{C}$	$S_{Q_{\text{kap}}} \text{ Wh}/^{\circ}\text{C}$	%
100	116	1,85	1,6
200	232	2,85	1,2
300	348	4,00	1,1
400	464	5,20	1,1
500	581	6,42	1,1
800	929	10,13	1,1
1000	1161	12,62	1,1

Tabel 5. Beregningseksempel på størrelsen af varmelagringskapacitetsmålingens ubestemthed.

3. Varmeoverførselsevnen

Varmeoverførselsevnen beregnes ved hjælp af ligningen:

$$(UA)_{sl} = \frac{EF \cdot (C_p)_{T_f+T_r} \cdot (\rho)_{T_f+T_r}}{\Delta T_1 \cdot (C_p)_{T_{v1}} \cdot (\rho)_{T_{v1}}} \ln \left(1 - \frac{\Delta T_2}{T_f - T_1} \right)$$

Varmeoverførselsevnen's ubestemthed $S_{(UA)_{sl}}$ bestemmes derfor af:

$$\begin{aligned} S_{(UA)_{sl}} = & \sqrt{\left(\frac{\partial (UA)_{sl}}{\partial EF} S_{EF} \right)^2 + \left(\frac{\partial (UA)_{sl}}{\partial (C_p)_{T_f+T_r}} S_{(C_p)_{T_f+T_r}} \right)^2} \\ & + \left(\frac{\partial (UA)_{sl}}{\partial (\rho)_{T_f+T_r}} S_{(\rho)_{T_f+T_r}} \right)^2 + \left(\frac{\partial (UA)_{sl}}{\partial \Delta T_1} S_{\Delta T_1} \right)^2 \\ & + \left(\frac{\partial (UA)_{sl}}{\partial (C_p)_{T_{v1}}} S_{(C_p)_{T_{v1}}} \right)^2 + \left(\frac{\partial (UA)_{sl}}{\partial (\rho)_{T_{v1}}} S_{(\rho)_{T_{v1}}} \right)^2 \\ & + \left(\frac{\partial (UA)_{sl}}{\partial \Delta T_2} S_{\Delta T_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial (UA)_{sl}}{\partial T_f} S_{T_f} \right)^2 + \left(\frac{\partial (UA)_{sl}}{\partial T_1} S_{T_1} \right)^2 = \\ & \sqrt{\left(\frac{(UA)_{sl}}{EF} S_{EF} \right)^2 + \left(\frac{(UA)_{sl}}{(C_p)_{T_f+T_r}} S_{(C_p)_{T_f+T_r}} \right)^2 + \left(\frac{(UA)_{sl}}{(\rho)_{T_f+T_r}} S_{(\rho)_{T_f+T_r}} \right)^2} \\ & + \left(\frac{(UA)_{sl}}{\Delta T_1} S_{\Delta T_1} \right)^2 + \left(\frac{(UA)_{sl}}{(C_p)_{T_{v1}}} S_{(C_p)_{T_{v1}}} \right)^2 + \left(\frac{(UA)_{sl}}{(\rho)_{T_{v1}}} S_{(\rho)_{T_{v1}}} \right)^2} \end{aligned}$$

(fortsættes)

$$\begin{aligned}
 & + \left(\frac{EF \cdot (C_p)_{T_f+T_r} \cdot (\rho)_{T_f+T_r} \cdot S_{\Delta T_2}}{2} \right)^2 \\
 & + \left(\frac{\Delta T_1 \cdot (C_p)_{T_{v1}} \cdot (\rho)_{T_{v1}} \cdot (T_f - T_1 - \Delta T_2)}{2} \right)^2 \\
 & + \left(\frac{EF \cdot (C_p)_{T_f+T_r} \cdot (\rho)_{T_f+T_r} \cdot S_{T_f} \cdot \Delta T_2}{2} \right)^2 \\
 & + \left(\frac{\Delta T_1 \cdot (C_p)_{T_{v1}} \cdot (\rho)_{T_{v1}} \cdot (T_f - T_1 - \Delta T_2) \cdot (T_f - T_1)}{2} \right)^2 \\
 & + \left(\frac{EF \cdot (C_p)_{T_f+T_r} \cdot (\rho)_{T_f+T_r} \cdot S_{T_1} \cdot \Delta T_2}{2} \right)^2 \\
 & + \left(\frac{\Delta T_1 \cdot (C_p)_{T_{v1}} \cdot (\rho)_{T_{v1}} \cdot (T_f - T_1 - \Delta T_2) \cdot (T_f - T_1)}{2} \right)^2
 \end{aligned}$$

I beregningseksemplet benyttes et 400 l vandlagervolumen og de i varmekapacitetsafsnittet og i tabel 3 anførte forudsætninger. Ved indsættelsen i ligningen findes resultaterne, som er anført i tabel 6. Ubestemthederne må siges at være rimelige små.

Varmeoverførsels- evne (UA) _{sl} W/°C	Ubestemthed for varmeoverførsels- evnen S(UA) _{sl} W/°C	Relativ ubestemt- hed for varme- overførselsevnen %
200	8,4	4,2
300	12,6	4,2
400	16,9	4,2

Tabel 6. Ubestemtheder på målinger af varmeoverførselsevnen for forskellige varmeoverførselsevner for et 400 l vandlager.

Alt i alt må alle måleunøjagtighederne siges at være rimelige små, således at man kan have tillid til de opnåede resultater.

Referencer

- [1] Leif Sønderskov Jørgensen og Henrik Lawaetz:
"Dimensionering af solvarmeanlæg", Laboratoriet for
Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole, Meddelelser
nr. 71, november 1977.

Projektororganisation

Styregruppe

Energiministeriet har udpeget følgende styregruppe for projektet:

V. Korsgaard, professor, Laboratoriet for Varmeisolering, DTH (formand).

J. Lemming, civilingeniør, Energiministeriet.

V. Bruhn, ekspeditionssekretær, Energistyrelsen.

J. Fischer, Civilingeniør.

E. Pedersen, lektor, lic.scient, H.C. Ørsted Instituttet.

O. Paulsen, civilingeniør, lic.techn., Teknologisk Institut.

J.S.R. Nielsen, civilingeniør, Birch & Krogboe,

M. Michelsen, lektor, Instituttet for Kemiteknik, DTH.

C.W. Kallenbach, civilingeniør, Industrirådet.

O. Rathman, civilingeniør, lic.techn., Forsøgsanlæg Risø.

Projektmedarbejdere fra

Laboratoriet for Varmeisolering, DTH:

P. Christensen, civilingeniør, lic.techn.

S. Furbo, civilingeniør.

K.K. Hansen, akademiingeniør, stud.lic.techn.

P.N. Hansen, lektor, lic.techn. (projektleder fra 17.9.79).

H. Lawaetz, adjunkt, HD, (projektleder indtil 17.9.79).

A. Nielsen, civilingeniør, lic.techn.

L. Olsen, civilingeniør, stud.lic.techn.

Liste over udkomne rapporter

- Nr. 1. Litteraturundersøgelse og vurdering af kemiske varmelagre, af Peter L. Christensen, august 1979.
- Nr. 2. Sæsonlagring af varme i store vandbassiner. Udført af Dipco Engineering ApS, november 1979.
- Nr. 3. Beregning af energiforbrug i bygninger (EFB-1). En metode til brug for bordregnemaskiner, af lic.tech. Anker Nielsen, februar 1980.
- Nr. 4. Beregning af energiforbrug i bygninger (EFB-1). Brugervejledning for TI-59, af lic.techn. Anker Nielsen, februar 1980.