

Prøvemetoder for mindre varmelagre og erfaringer fra prøvningerne

Simon Furbo
Jan-Erik Larsen



LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

PRØVEMETODER FOR MINDRE VARMELAGRE
OG
ERFARINGER FRA PRØVNINGERNE

SIMON FURBO
JAN-ERIK LARSEN
NOVEMBER 1982

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE
MEDDELELSE NR. 126

Forord

Energiministeriets (tidligere Handelsministeriets) projekt (EFP-80) 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 udførtes i perioden 1978 - 1982, indgår følgende delprojekter:

Varmelagring i,

- a) Vand
- b) Stenmagasiner
- c) Bygningskonstruktioner
- d) Smeltevarmelagre
- e) Kemiske varmelagre

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

Denne delprojektrapport vedrører afprøvning af mindre vandlagre. Projektet fortsætter i øvrigt under Energiministeriets projekter EFP-81 og EFP-82.

RESUME

Prøvestande for mindre varmelagre til solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning er opbygget. Prøvemetoder for varmelagrene er udviklet. Prøvemetoderne er anvendt på forskellige solfangerfabrikanter varmelagerunits til solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning. Herved er der opnået erfaringer både med hensyn til prøvemetoderne og varmelagerudformningerne.

Prøvestandene og prøvemetoderne er beskrevet. For hver enkelt varmelagerunit undersøges følgende:

- Varmetabskoefficienten for varmelageruniten når solfangeren er i drift.
- Afkølingsforløbet for varmelageruniten i en periode uden varmetilførsel eller varmetapning.
- Varmetabskoefficienten for varmelageruniten under afkølingsforløbet.
- Varmelagerunitens varmelagringskapacitet.
- Varmeoverførselsevnen fra solfangervæsken til varmelageret for forskellige lagertemperaturer.
- Tryktabet over varmelageruniten ved forskellige solfangervæskestrømme.
- Varmelagerunitens dynamiske egenskaber.

Prøvningen af en enkelt varmelagerunit er beskrevet. Desuden er erfaringerne vedrørende prøvemetoderne og varmelagerudformningerne angivet.

<u>Indholdsfortegnelse</u>	<u>Side</u>
0. Indledning	3
1. Prøvemethoder for varmelagre	4
1.0 Prøvningernes formål	4
1.1 Statisk prøvestand	4
1.2 Dynamisk prøvestand	7
1.3 Målesystemet for prøvestanden	10
1.4 Prøvemethoder	11
1.4.1 Varmetab	12
1.4.2 Varmelagringskapacitet	15
1.4.3 Varmeoverførselsevnen fra solfangervæske til varmelager	16
1.4.4 Dynamiske forhold for varmelageret	17
2. Prøvning af Metro Combibeholder type 2002 C	21
2.1 Identifikation	21
2.2 Beskrivelse af lagerunit	21
2.3 Måleresultater	23
2.4 Diskussion af måleresultater	29
3. Erfaringer fra prøvningerne	31
3.1 Prøvemethoder	31
3.2 Lagertyper	33
3.3 Varmetab	34
4. Diskussion	36
5. Konklusion	48
Appendix A Målenøjagtighed	49
Referencer	58
Projektorganisation.....	60
Liste over udkomne rapporter	61

Figurliste

Side

Figur 1.	Skematisk illustration af statisk prøvestand.....	5
2.	Statisk prøvestand.....	6
3.	Skematisk illustration af dynamisk prøvestand.....	8
4.	Dynamisk prøvestand med mikroprocessoren.....	9
5.	Måleudstyr for prøvestanden.....	11
6.	Solintensitet på solfangeren og udelufttemperat- turen, som benyttes ved den dynamiske prøvning.....	18
7.	Principskitse af Metro Combibeholder type 2002 C...	21
8.	Metro Combibeholder type 2002 C.....	22
9.	Temperaturforløb under afkøling for Metro Combi- beholder type 2002 C.....	24
10.	Målt varmeoverførselsevne fra solfangervæske til brugsvandet. Benyttet solfangervæskeflow 3,9 l/min og effektoverførsel 900 W.....	25
11.	Tryktab over varmeveksleren for Metro Combibeholder type 2002 C, målt ved 23°C.....	26
12.	Temperaturforløbet for Metro Combibeholder type 2002 C under prøvningen.....	27
13.	Varmetabsmålinger for markedsførte varmelagerunits.	37
14.	Principskitse af solvarmeanlæg til brugsvands- opvarmning.....	36
15.	Nettoydelsen fra et solvarmeanlæg som funktion af varmelagerets kuldebrostørrelse og- placering.....	40
16.	Totalydelsen fra et solvarmeanlæg som funktion af varmelagerets kuldebrostørrelse og- placering.....	41
17.	Totalydelsen fra et solvarmeanlæg som funktion af højde/diameter-forholdet.....	43
18.	Totalydelsen fra et solvarmeanlæg som funktion af varmeledningsstørrelsen V for lagertanken	44
19.	Totalydelsen fra et solvarmeanlæg som funktion af varmeledningsstørrelsen V for lagertanken.....	45
20.	Beregnet måleubestemthed for varmetabskoeffici- enten som funktion af varmetabskoefficienten og lagertemperaturniveauet.....	51
21.	Beregnet måleubestemthed for varmeoverførings- evnen som funktion af varmeoverføringsevnen.....	56

Tabelliste

Side

Tabel 1.	Anvendte symboler med dimensioner.....	2
2.	Data benyttet ved beregning af rørsystemets varmetab og varmelagringskapacitet for et typisk solvarmeanlæg.....	19
3.	Data for Metro Combibeholder type 2002 C.....	23
4.	Målte varmetabskoefficienter for Metro 2002 C.	23
5.	Data for varmtvandsforbrug under den dynamiske prøvning.....	28
6.	Daglige energimængder for varmelageret under den dynamiske prøvning.....	29
7.	Forudsætninger for et referenceanlæg.....	39
8.	Anvendte måleubestemtheder.....	49
9.	Eksempler på størrelsen af varmetabskoefficientens måleubestemthed.....	50
10.	Eksempler på størrelsen af varmelagringskapacitetens måleubestemthed.....	53
11.	Eksempler på størrelsen af varmetabskoefficientens måleubestemthed.....	55
12.	Eksempler på størrelsen af varmeoverførings- evnens måleubestemthed.....	56

Q_1	varmelagerets varmeindhold	J
τ	tid	s
Q_u	tilført effekt til varmelager	W
Q_{tab}	varmetab for varmelager	W
m	volumenstrøm i solfangerkreds	kg/s
T_f	solfangervæskens fremløbstemperatur til varmelager	$^{\circ}\text{C}$
T_r	solfangervæskens returtemperatur fra varmelager	$^{\circ}\text{C}$
C_{pT}	varmefylde for solfangervæske ved temperaturen $T^{\circ}\text{C}$	$\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$
T_m	middeltemperatur af solfangervæsken i varmevekslersystemet i varmelager	$^{\circ}\text{C}$
K_d	varmelagerets varmetabskoefficient når solfangeren er i drift	$\text{W}/^{\circ}\text{C}$
T_l	varmelagertemperatur	$^{\circ}\text{C}$
T_o	varmelagerets omgivende temperatur	$^{\circ}\text{C}$
C	varmelagerets varmelagringskapacitet	$\text{J}/^{\circ}\text{C}$
K_s	varmelagerets varmetabskoefficient når solfangeren er ude af drift	$\text{W}/^{\circ}\text{C}$
T_s	varmelagertemperatur ved starten af afkølingsperiode	$^{\circ}\text{C}$
T_{sl}	Gennemsnitsvarmelagertemperatur ved slutning af afkølingsperiode	$^{\circ}\text{C}$
τ_s	Varighed af afkølingsperiode	s
T_{slut}	varmelagertemperatur ved slutning af opvarmningsperiode	$^{\circ}\text{C}$
τ_{op}	varighed af opvarmningsperiode	s
Q_{tilf}	varmemængde tilført varmelageret under opvarmningsperiode	J
N	antal tidsspring i opvarmningsforløbet	ubenævnt
$\Delta\tau$	tidsspring	s
ΔQ_1	ændring af varmelagerets varmeindhold igennem et $\Delta\tau$ tidsspring under opvarmningsforløbet	J
T_{start}	varmelagertemperatur ved starten af opvarmningsperiode	$^{\circ}\text{C}$
Q_1 T_{start}, T_{slut}	varmelagerets varmeindhold i temperaturintervallet mellem T_{start} og T_{slut}	J

i	indeks, som tilføjet de øvrige symboler angiver, at der er tale om en gennemsnitsværdi gennem tidsperioden $\Delta\tau$	
H	varmeoverførselsevne fra solfanger- væske til varmelager	W/°C
η	solfangereffektivitet	ubenævnt
T_{ms}	middeltemperatur af solfangervæsken i solfangeren	°C
T_{ude}	udelufttemperatur	°C
I	solintensitet på solfangeren	W/m ²
A	solfangerareal	m ²
$T_{l\phi}$	temperatur øverst i varmelageret	°C
T_{lm}	temperatur midt i varmelageret	°C
T_{ln}	temperatur nederst i varmelageret	°C
T_k	temperatur af det kolde vand, som til- føres varmelageret	°C
T_v	gennemsnitstemperatur af det opblandede vand tappet fra lagersystemet	°C
M	volumenmængde af det opblandede vand tappet fra lagersystemet	l
L	varmemængde tappet fra varmelageret under hver tapning	Wh
SD	sommerdækningsgraden, dvs den del af varmtvandsforbruget i perioden maj - september (incl) som solvarmeanlægget leverer	%
NA	antallet af dage, hvor oliefyret kan slukkes	dage
V	varmeledningsstørrelse for varmelageret	Wm/°C
λ_{vand}	varmeledningsevne for vand	W/m°C
A_{vand} tværsnit	vandret tværsnitsareal af vand i varmelageret	m ²
$\lambda_{\text{stål}}$	varmeledningsevne for stål	W/m°C
$A_{\text{stål}}$ tværsnit	vandret tværsnitsareal af stål i varmelageret	m ²

Tabel 1. Anvendte symboler
med dimensioner.

0. Indledning

Som led i Energiministeriets projekt: "Mindre Varmelagre", der udføres på Laboratoriet for Varmeisolering på Danmarks Tekniske Højskole, er der opbygget prøvestande til prøvning af mindre varmelagre til solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning, udviklet prøvemeter for varmelagre og foretaget prøvninger af solvarmelagerunits, som markedsføres i Danmark.

Formålet med arbejdet er dels at udvikle velegnede prøvestande og prøvemeter for varmelagre til solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning, dels at undersøge forskellige varmelagres 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 til varmelagerudformningen.

Prøvestandene og prøvemeterne er omtalt i afsnit 1. Prøvemeterne er udvidet i forhold til den tidligere prøvemeter, som er omtalt i [1]. Prøvningen af en af de afprøvede varmelagerunits er beskrevet i afsnit 2. Erfaringerne fra prøvningerne, både hvad angår prøvemeterne og varmelagerudformningerne, er omtalt i afsnit 3. I afsnit 4 gennemgås status for varmelagerområdet og udviklingsmulighederne diskuteres. Afsnit 5 indeholder konklusionen.

1. Prøvemetoder for varmelagre

1.0 Prøvningernes formål

Solvarmeanlægs ydeevne afhænger af en lang række faktorer, hvoraf lagerudformningen er særlig vigtig.

Formålet med prøvningerne er at undersøge de varmetekniske forhold, som er knyttet til mindre varmelagre, og som er af betydning for solvarmesystemers ydeevne. Prøvningerne er begrænset til kun at omfatte lagre, hvor en væske transporterer varmen fra solfangeren til lageret. I det følgende benævnes denne væske solfangervæsken. Ved prøvningerne benyttes to prøvestande, en statisk og en dynamisk.

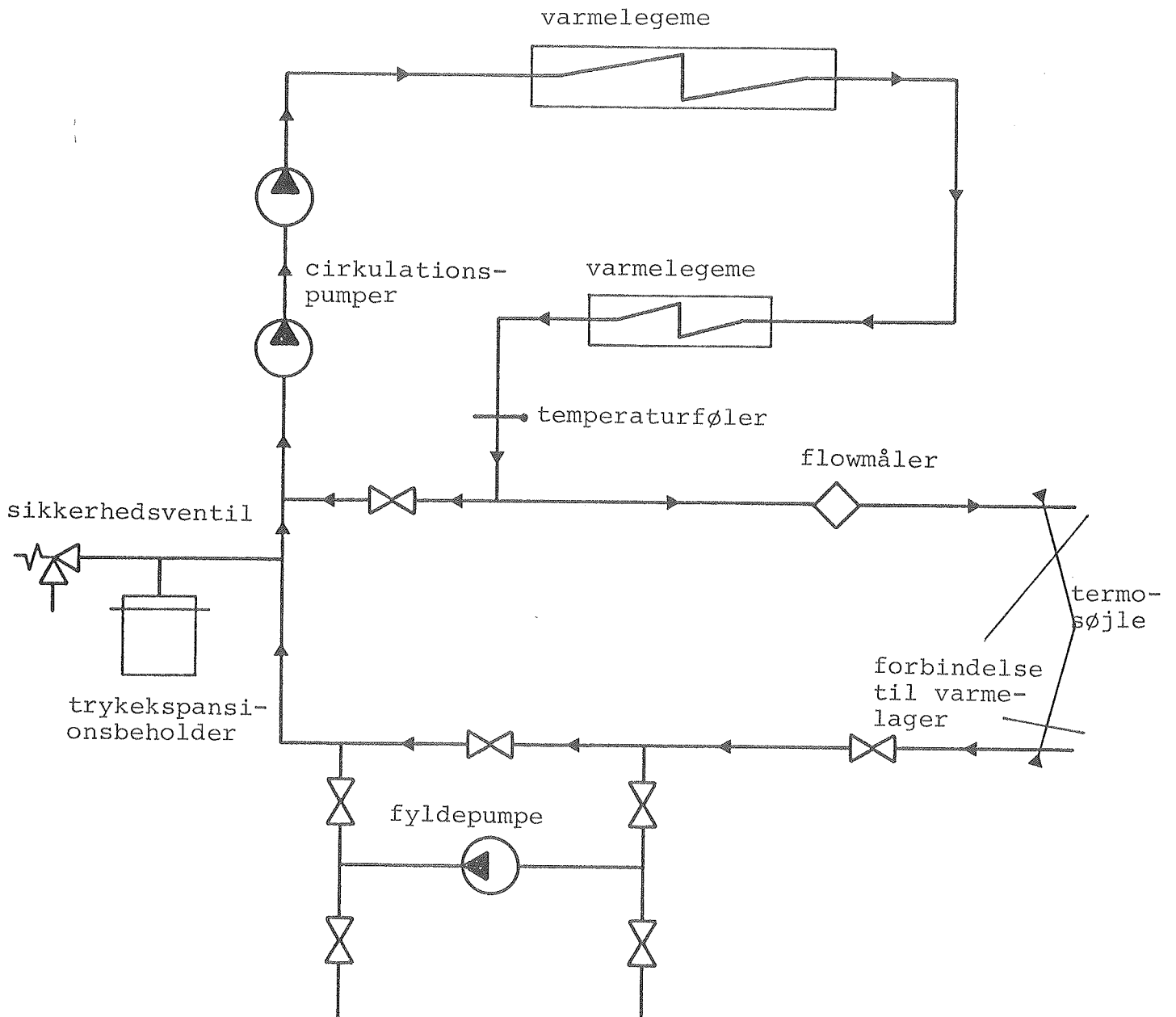
I den statiske prøvestand måles varmelagerets varmelagringskapacitet, varmeoverførselsevnen fra solfangervæsken til varmelageret og varmetabet. Desuden måles tryktabet i solfangerkredsen over varmelageret.

I den dynamiske prøvestand undersøges lageret, som var det en del af et solvarmeanlæg. Herved kan varmelagerets dynamiske egenskaber følges igennem nogle døgn, mens temperaturerne i varmelageret og de tilførte og tappede varmemængder måles. De dynamiske prøvninger kan desuden anvendes til verificering af matematiske beregningsmodeller for varmelagrene.

Prøvningerne benyttes til en vurdering af varmelagerets egnethed i forbindelse med solvarmeanlæg og danner eventuelt baggrund for forslag til en forbedring af lagerudformningen.

1.1 Statisk prøvestand

Figur 1 viser en skematisk skitse af prøvestanden. Prøvestanden består af et rørsystem, hvortil varmelageret tilsluttes med slanger, så solfangervæsken kan pumpes gennem varmelageret. I rørsystemet er indbygget to pumper, to varmelegemer, en temperaturføler, et flowmeter og en række

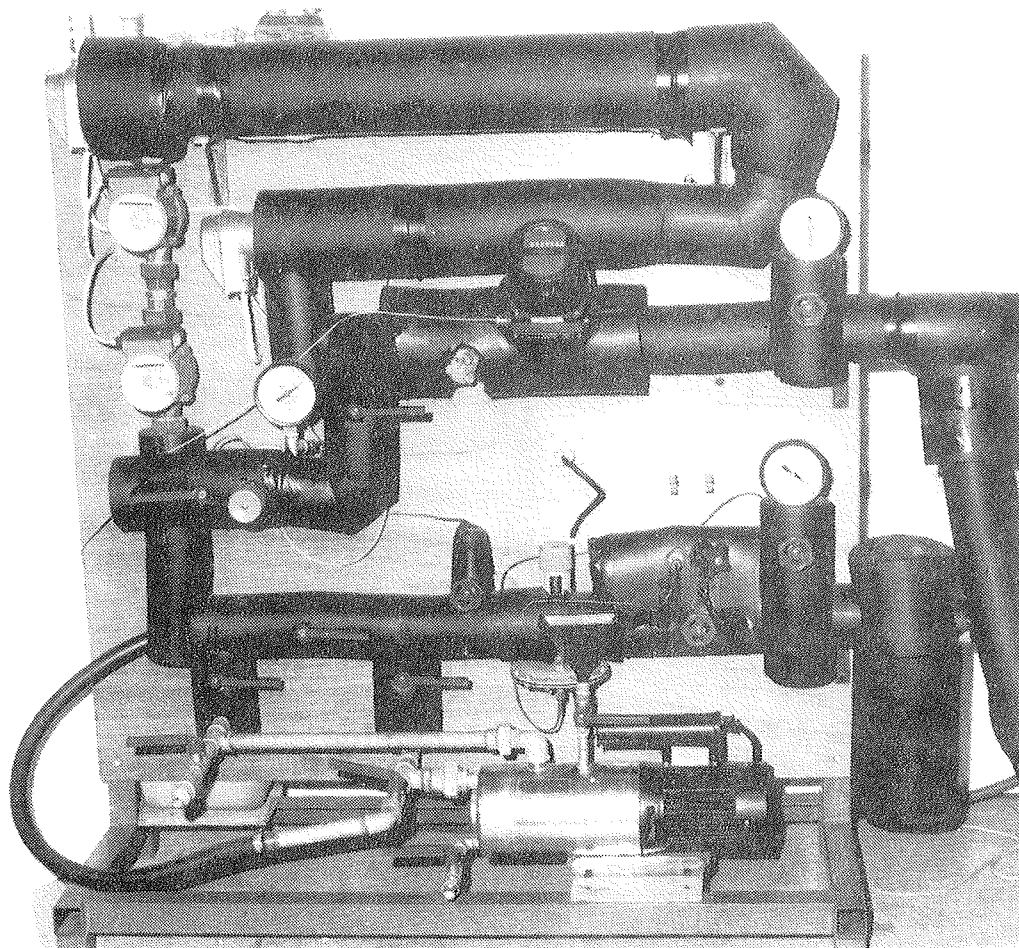


Figur 1. Skematisk illustration af statisk prøvestand.

ventiler, så volumenstrømmen gennem varmelageret kan reguleres nøjagtigt. Rørsystemet består af en indre og en ydre rørkreds. I den indre rørkreds er volumenstrømmen meget stor, mens volumenstrømmen i den ydre kreds, hvortil lageret tilsluttes, er mindre.

Temperaturføleren, som styrer det ene af varmelegemerne, er placeret lige efter varmelegemet i den indre kreds med den store volumenstrøm. Herved kan føleren styre varmelegemet, så solfangervæskens fremløbstemperatur til varmelageret holdes helt konstant igennem forsøgsperioden. Det andet varmelegeme kan styres således, at en konstant effekt overføres til solfangervæsken. Således er det muligt enten at opnå en konstant fremløbstemperatur til lageret eller at overføre en konstant effekt til lageret.

Hele rørsystemet er isoleret for at nedsætte varmetabet til omgivelserne. Prøvestanden er placeret i laboratoriets prøvehal, hvor temperaturen normalt ligger mellem 20°C og 25°C . Figur 2 viser den statiske prøvestand.



Figur 2. Statisk prøvestand.

1.2 Dynamisk prøvestand

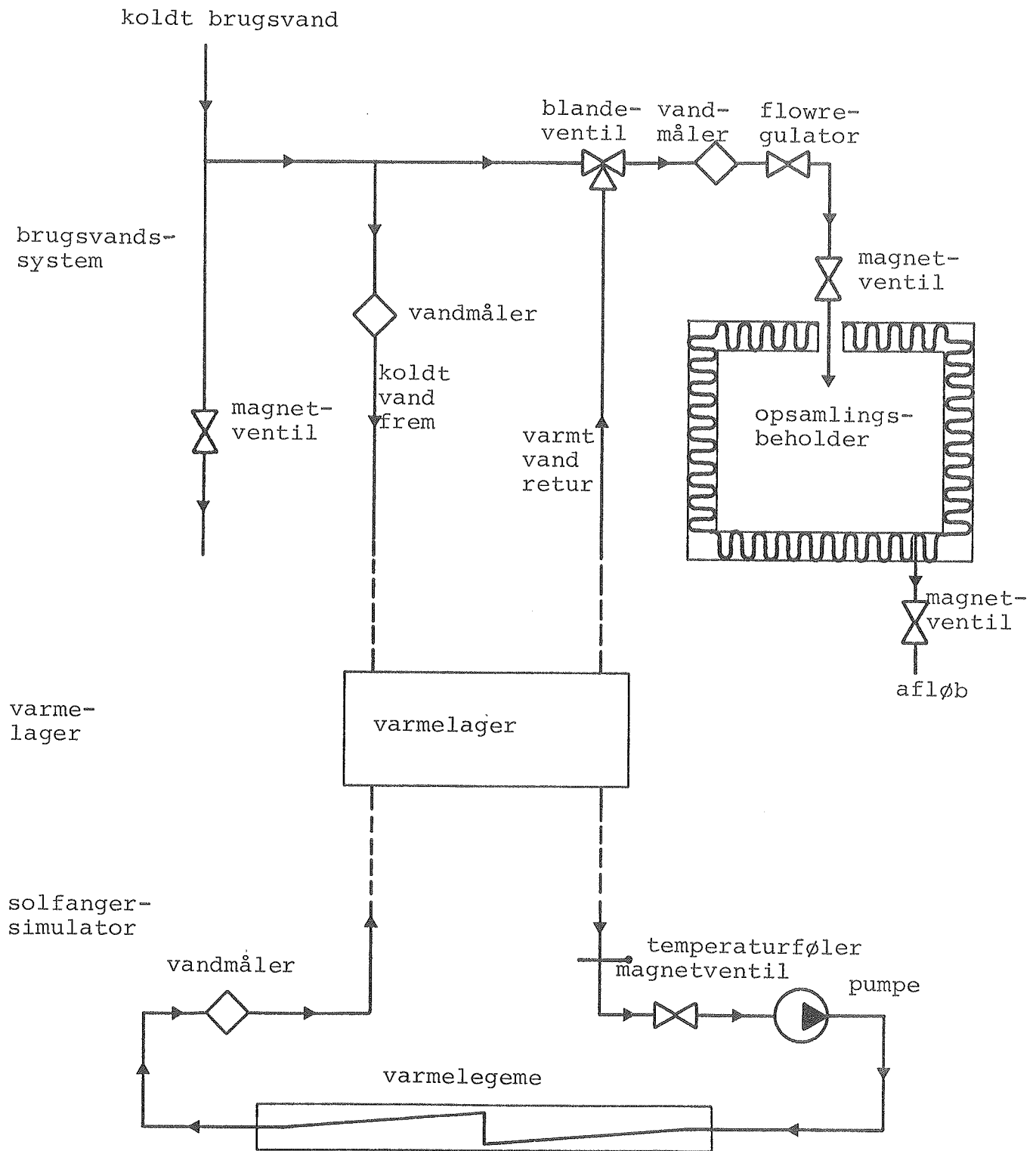
Figur 3 viser en skematisk illustration af den dynamiske prøvestand. I denne prøvestand kan kun prøves varmelagre til solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning. Prøvestanden består af en solfangersimulator, et brugsvandssystem og et styresystem. Varmelageret forbindes med slanger både til solfangerssimulatoren og til brugsvandssystemet.

Solfangerssimulatoren består af et rørsystem med indbygget varmelegeme, temperaturføler, reguleringsventil og pumpe, som transporterer solfangervæsken med en ønsket volumenstrøm gennem solfangerssimulatoren og varmelageret. Temperaturføleren er forbundet til styresystemet.

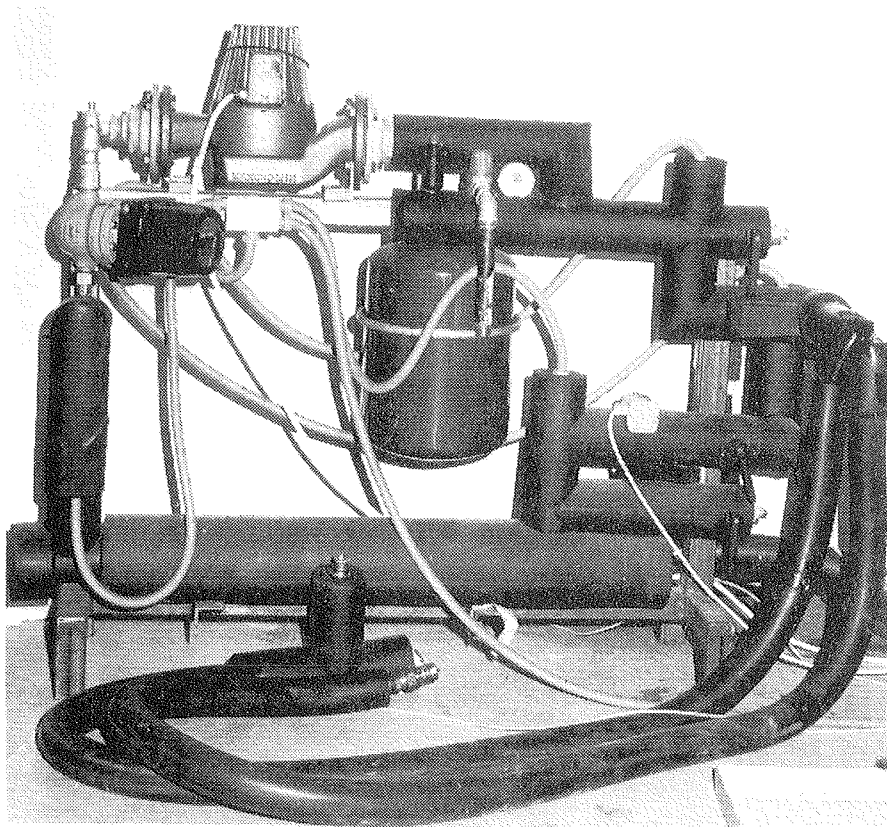
Brugsvandssystemet er forsynet med to volumenstrømsmålere og forskellige ventiler, som styrer volumenstrømmen af brugsvandet, som tappes fra lageret og temperaturen af vandet, som tilføres lageret under tapningen. Når lagertemperaturen er meget høj under en vandtapning, blander en blandeventil til varmt vand fra lageret med koldt tilførselsvand. Herved opnås, at vand med en rimelig temperatur tappes fra lagersystemet. Det opblandede vand transporteres til en opsamlingsbeholder, hvor gennemsnitstemperaturen af det tappe vand måles med stor nøjagtighed før vandet bortledes.

Styresystemet er en mikroprocessor, som styrer pumpen, ventilerne og varmelegemet således, at varmelageret udsættes for påvirkninger, som om det var en del af et solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning i en periode med typiske vejrparametre. Ventilerne styres således, at vandet, som tilføres lageret har en lav konstant temperatur under tappeperioderne, som ligeledes styres af mikroprocessoren. Varmelegemets effektafgivelse styres således, at effekten, som føres til varmelageret gennem hele forsøget, er bestemt af de valgte vejrparametre, den valgte solfangereffektivitet, den valgte udformning af solvarmeanlægget og solfangervæskens returtemperatur fra lageret, der måles ved hjælp af den omtalte temperaturføler.

Alle rørsystemerne er isoleret for at reducere varmetabet mest muligt. Figur 4 viser forskellige dele af prøvestanden.



Figur 3. Skematisk illustration af dynamisk prøvestand.



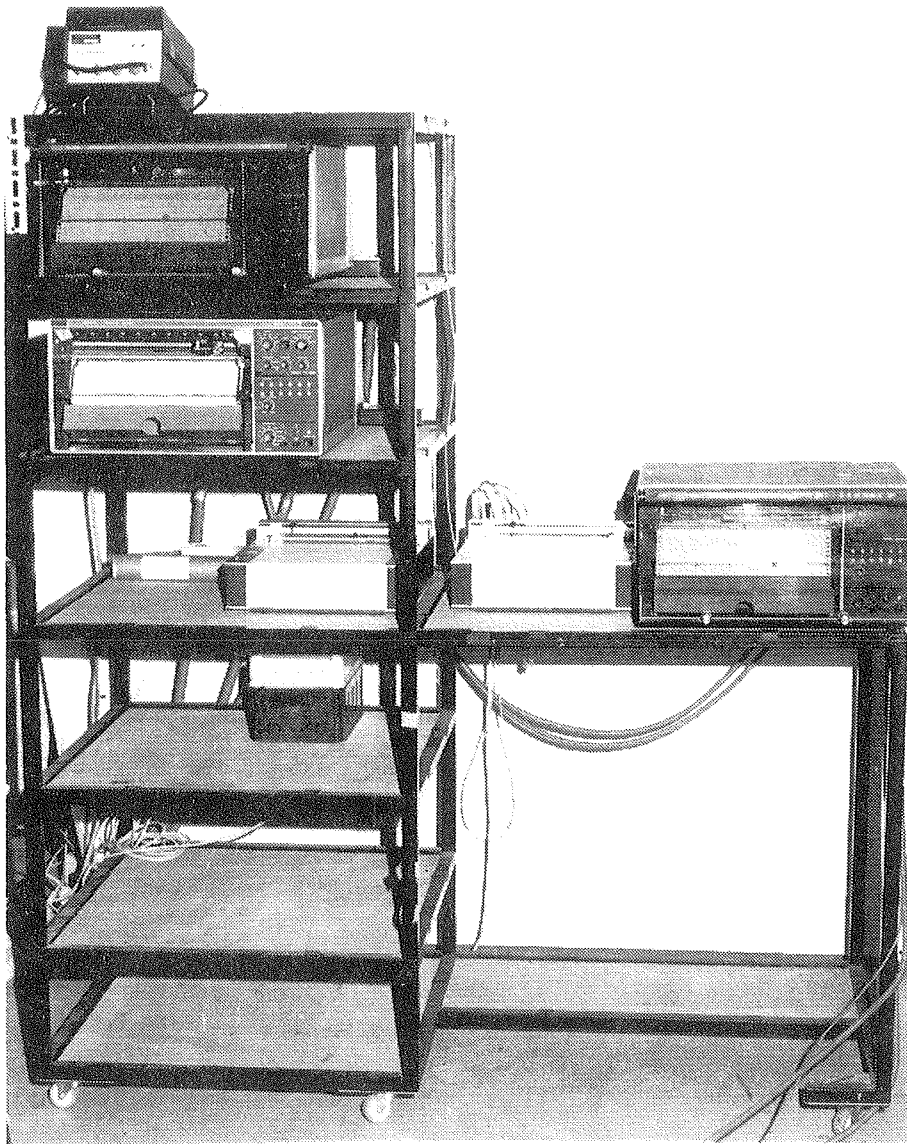
Figur 4. Dynamisk prøvestand med mikroprocessoren

1.3 Målesystemet for prøvestanden

Ved alle temperaturmålinger benyttes termoelementtråd af typen TT kobber-konstantan. Målingerne henføres til en elektrisk reference. Ved temperaturdifferensmålinger benyttes termosøjler med 10 elementer. Volumenstrømme og volumenmængder måles ved hjælp af ringstempelmålere af typen Aqua-Metro. Energimængder, som tilføres varmelegemer, måles med kWh-målere.

Lagerets temperaturer i forskellige niveauer, omgivelernes temperatur, koldtvandstemperaturen under vandtilførsel, varmtvandstemperaturen under vandtapning, gennemsnitstemperaturen af det tappede vand i opsamlingsbeholderen og solfangervæskens fremløbs-og returtemperatur måles igennem forsøgene. Temperaturdifferencen mellem solfangervæskens fremløb til og retur fra lageret, solfangervæskeflowet, den tappede vandmængde fra lageret og volumenmængden af det opblandede vand, som tilføres opsamlingsbeholderen, måles ligeledes. På grundlag af målingerne beregnes de varmemængder, som igennem forsøget tilføres lageret eller tappes fra lageret.

Alle temperaturer, som måles af enkelte termoelementer, opsamles på 12-kanalskrivere, temperaturdifferenser opsamles på 2 kanalskrivere, mængdemålingerne aflæses under forsøgsperioden. Måleudstyret er vist på figur 5.



Figur 5. Måleudstyr for prøvestandene

1.4 Prøvemethoder

For hvert varmelager bestemmes i den statiske prøvestand varmetabet til omgivelserne, varmelagringskapaciteten og varmeoverførselsevnen fra solfangervæsken til varmelageret. I den dynamiske prøvestand undersøges lagerets egenskaber under drift. Desuden måles tryktabet over varmelageret ved forskellige solfangervæskeflow.

1.4.1 Varmetab

Varmetabet udtrykkes normalt som produktet af varmetabskoefficienten og temperaturdifferensen mellem varmelageret og omgivelserne. Varmetabskoefficientens størrelse afhænger af lagerudformningen, lagerplaceringen, omgivelsernes temperatur, lagertemperaturerne samt af, om solfangeren er i drift eller ej. Varmelageret er placeret på laboratoriets 25 cm tykke betongulv. Under gulvet er der en kælder, hvor temperaturen omtrent er 20°C.

For at få et rimeligt billede af varmetabets størrelse, som for forskellige driftforhold kan variere meget, benyttes to metoder ved varmetabsmålingen. Ved den første metode pumpes solfangervæsken gennem varmelagerets solfangerkreds med et flow på ca. 1 l/min og med en konstant fremløbstemperatur. 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 alle temperaturer er stabile, fastholdes stabiliteten i mindst 2 timer. Herefter kan varmetabskoefficienten beregnes ved det pågældende temperaturniveau. Varmetabet bestemmes på denne måde ved 3 forskellige temperaturniveauer: 35, 60 og 90°C, således at varmelagerets varmetabskoefficient, når solfangeren er i drift, bestemmes som en funktion af lagertemperaturen.

Med de i tabel 1 anvendte symboler udtrykkes varmebalancen for varmelageret under de stabile stationære forhold ved ligningen:

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

idet varmelagerets varmeindhold ikke ændres under de stationære forhold.

Da temperaturfaldet over lageret er forholdsvis lille, antages det, at varmeydlen for solfangervæskens er ens ved fremløbs- og ved returtemperaturen. Varmetabet bestemmes af:

$$Q_{\text{tab}} = Q_u = m \cdot C_{p_{T_m}} \cdot (T_f - T_r) \quad \text{hvor} \quad T_m = \frac{T_f + T_r}{2}$$

Varmetabskoefficienten K_d for varmelageret under drift beregnes da af:

$$K_d = \frac{Q_{\text{tab}}}{T_1 - T_o} = \frac{m \cdot C_{p_{T_m}} \cdot (T_f - T_r)}{T_1 - T_o}$$

Den anden varmetabsmålingsmetode består dels i at registrere afkølingsforløbet for varmelageret igennem en 24 timers periode uden varmetapning, dels i at beregne varmetabskoefficienten for perioden. Starttemperaturen for varmelagerets afkøling er ca. 60°C . Under afkølingen vil der normalt opstå en temperaturlagdeling i varmelageret. Størrelsen af denne temperaturlagdeling afhænger af lagerudformningen, isoleringen og placeringen af eventuelle kuldebroer. Efter 24 timer tilføres varmelageret varme gennem solfangervæsken indtil hele lageret igen har opnået en konstant temperatur. Når solfangeren ikke er i drift har varmelageret varmetabskoefficienten K_s . Når solfangeren ikke er i drift, kan varmebalancen for varmelageret udtrykkes således:

$$C \frac{dT_1}{d\tau} = -K_s \cdot (T_1 - T_o)$$

Forudsættes varmetabskoefficienten for lageret i stilstand, K_s og omgivelsernes temperatur, T_o at være konstante igennem hele afkølingsforløbet, og ses der bort fra temperaturforskelle i lageret, får differentialligningen denne løsning:

$$T_1 = T_o + (T_s - T_o) \cdot e^{-\frac{K_s}{C} \tau}$$

T_s er lagertemperaturen ved afkølingens start, dvs til tidspunktet $\tau = 0$.

T_1 er lagertemperaturen til tidspunktet τ .

Varmetabskoefficienten K_s bestemmes af:

$$K_s = \frac{C}{\tau_s} \ln \left(\frac{T_{sl} - T_o}{T_s - T_o} \right)$$

T_{sl} , som er gennemsnitslagertemperaturen ved afkølingens slutning τ_s , måles ikke direkte, da der normalt forekommer temperaturforskelle i lageret ved afkølingens slutning. For at bestemme T_{sl} foretages en kortvarig opvarmning af lageret, indtil alle dele af lageret når samme temperatur T_{slut} . τ_{op} er varigheden af denne opvarmningsperiode og Q_{tilf} er den til varmelageret tilførte varmemængde i denne periode:

$$Q_{tilf} = \int_0^{\tau_{op}} [m \cdot C_{p_{T_m}} \cdot (T_f - T_r) - K_d \cdot (T_l - T_o)] d\tau$$

T_{sl} bestemmes da af:

$$T_{sl} = T_{slut} - \frac{Q_{tilf}}{C}$$

Varmetabskoefficienten K_s for en periode uden solfangerdrift bestemmes derfor af:

$$K_s = - \frac{C}{\tau_s} \ln \left(\frac{T_{slut} - \frac{Q_{tilf}}{C} - T_o}{T_s - T_o} \right)$$

Ved indsættelsen i denne ligning benyttes varmelagringskapaciteten, C , som måles under et opvarmningsforløb, se afsnit 1.4.2.

1.4.2 Varmelagringskapacitet

Varmelagerets varmelagringskapacitet er lagerets varmeindhold pr. °C temperaturforskkel i lageret. Varmelagringskapaciteten måles ved hjælp af et opvarmningsforløb fra lagertemperaturen T_{start} til T_{slut} . Solfangervæskeflow og den tilførte effekt under opvarmningsforløbet vælges til hhv. 0,02 l/min og 6 W pr. 1 vandlager. Dette svarer til et solfangervæskeflow på 1 l/min pr. m² solfanger og et solfangerudbytte på 300 W/m² solfanger, idet det forudsættes, at vandlagervolumen/solfangerareal-forholdet er 50 l/m² solfanger. Både solfangervæskeflowet og effekttilførslen holdes konstant igennem hele opvarmningsforløbet. Ved hjælp af resultaterne fra de i afsnit 1.3 omtalte målinger kan varmeindholdet i et temperaturinterval beregnes. Idet der ikke tappes varme under opvarmningsforløbet, kan varmembalancen 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 differentialligningen omskrives til:

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

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

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

Effekttilførslen til varmelageret bestemmes af:

$$Q_{u_i} = m \cdot C_{p_{T_{m_i}}} \cdot (T_f - T_r)_i$$

hvor $T_m = \frac{T_f + T_r}{2}$

Varmetabet bestemmes af:

$$Q_{tab_i} = K_{d_i} \cdot (T_{l_i} - T_{o_i})$$

Varmelagringskapaciteten for varmelageret findes derfor af ligningen:

$$C = \frac{Q_{l_{T_{start} - T_{slut}}}}{T_{slut} - T_{start}} =$$

$$\frac{\sum_{i=1}^N \Delta \tau_i \cdot [m \cdot C_{p_{T_{m_i}}} \cdot (T_f - T_r)_i - K_{d_i} (T_{l_i} - T_{o_i})]}{T_{slut} - T_{start}}$$

hvor $T_m = \frac{T_f + T_r}{2}$

1.4.3 Varmeoverførselsevnen fra solfangervæske til varmelager

Det i afsnit 1.4.2 beskrevne opvarmningsforløb benyttes desuden til bestemmelse af varmeoverførselsevnen H fra solfangervæske til varmelager. Varmeoverførselsevnen angiver, hvor stor effekt der kan overføres fra solfangervæske til varmelageret pr. °C temperaturforskelle mellem solfangervæske og varmelager. Størrelsen af varmeoverførselsevnen afhænger af varmelagerets udformning, solfangervæsken,

solfangervæskeflowet og varmelagerets temperatur. Varmeforoverførselsevnen beregnes under hele opvarmningsperioden, således at afhængigheden af lagertemperaturen klarlægges. Forudsættes lagertemperaturen at være konstant i hele lagertaget, kan varmeoverførselskoefficienten H bestemmes af ligningen, se [2].:

$$\frac{T_f - T_r}{T_f - T_l} = 1 - \exp\left(\frac{-H}{m \cdot C_{p_{T_m}}}\right)$$

Ligningen kan omskrives til:

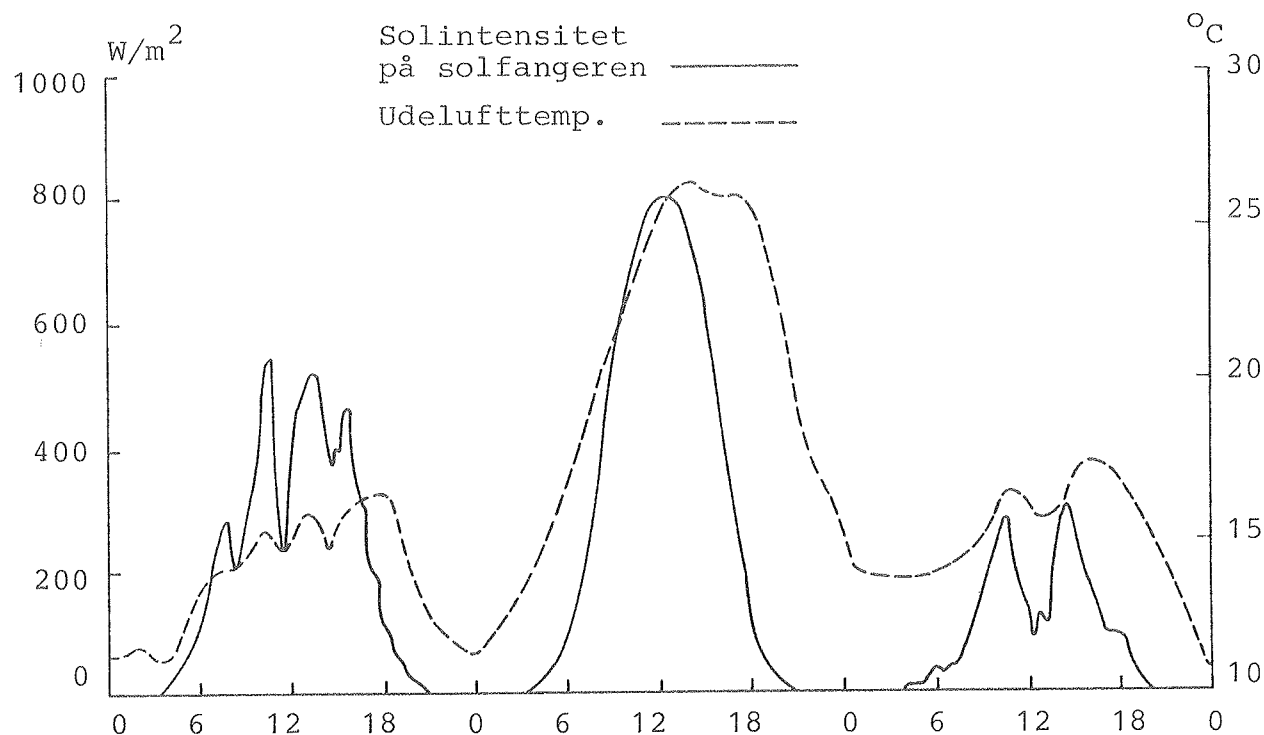
$$H = -m \cdot C_{p_{T_m}} \cdot \ln\left(1 - \frac{T_f - T_r}{T_f - T_l}\right)$$

hvor $T_m = \frac{T_f + T_r}{2}$

Endvidere måles tryktabet over varmelageret ved forskellige solfangervæskeflow angivet i [3].

1.4.4 Dynamisk forhold for varmelageret

Varmelageret undersøges igennem en 3 dages periode. Varmt vand tappes fra varmelageret 4 gange pr. dag: kl. 8, 12, 18 og 20. Det totale daglige varmtvandsforbrug er omtrent 250 l. Vejrparametrene, dvs solintensiteten på solfangeren og udelufttemperaturen, som benyttes ved beregning af varmelegemeeffektafgivelsen igennem forsøget er vist på fig. 6. Disse vejrparametre er målte værdier fra foråret 1980. Begge parametre har én værdi for alle 10-min perioder i forsøgsperioden.



Figur 6. Solintensitet på solfangeren og udelufttemperaturen, som benyttes ved den dynamiske prøvning.

Solfangereffektiviteten som benyttes i prøvningen er:

$$\eta = 0,80 - 5,5 \frac{T_{ms} - T_{ude}}{I}, \text{ hvor}$$

T_{ms} er middeltemperaturen af solfangervæsken i solfangeren. Dette svarer til effektiviteten for den bedste solfanger, som var på markedet i 1980. Forudsættes solfangervæskens temperaturstigning over solfangeren at være 5°C findes solfangereffektiviteten med rimelig nøjagtighed af:

$$\eta = 0,80 - 5,5 \frac{T_r + 2,5 - T_{ude}}{I}$$

Også under denne prøvning benyttes et vandlager/solfangerareal-forhold af størrelsesordenen 50 l/m² solfanger. Der regnes med det nærmeste hele antal m² solfangerareal A.

Der benyttes et solfangervæskeflow på A l/min svarende til 1 l/min m² solfanger. Effekten fra solfangeren beregnes af formelen:

$$Q = 0,80 \cdot A \cdot I - 5,5 \cdot A (T_r + 2,5 - T_{ude}) W.$$

Hvert minut måles solfangervæskens returtemperatur fra varmelageret T_r , dvs solfangervæskens fremløbstemperatur til solfangeren, af en temperaturføler. Ved hjælp af denne temperatur, vejrparametrene og det valgte solfangerareal beregnes effekten fra solfangeren af ovennævnte formel. Den dynamiske prøvestand er udformet anderledes end et typisk solvarmeanlæg. F.eks. er pumper, rør og rørisolering forskellige. Disse forskelle tages i betragtning ved beregninger af varmelegemets effektafgivelse på den måde, at effekttilførslen fra prøvestanden til varmelageret har samme størrelse, som den ville have i et typisk solvarmeanlæg med rørføring og pumpe, som angivet i tabel 2 og med den oven for beskrevne solfanger.

rør- materiale	rørdimen- sion	rørsole- ringsma- teriale	rørsole- ringstyk- kelse	rørlængde uden f.hus	rørlængde inden f.hus	varmetabs- koefficient for rørene	cirkulati- onspumpe- effekt W
stål	3/4"	mine- raluld	3 cm	4+A m	6 m	0,241 W/°C m	45

Tabel 2. Data benyttet ved beregning af rørsystemets varmetab og varmelagringskapacitet for et typisk solvarmeanlæg.

Temperaturføleren måler som nævnt hvert minut T_r . Hvert 10 sekund beregner, styrer og måler mikroprocessoren varmelegemets effektafgivelse, som beskrevet ovenfor. Forskelle mellem den beregnede og målte effekt, f.eks. forårsaget af pludselige spring i netspændingen, korrigeres i den næste 10 sekund periode. Herved bliver den beregnede energitilførsel fra varmelageret identisk med den målte størrelse.

Styringen af solfangersimulatorens pumpe foregår ved hjælp af mikroprocessoren uden hensyntagen til lagerets eget styringssystem.

Temperaturer og energistrømme til og fra lageret måles igennem hele forsøget, således at viden vedrørende lagrenes dynamiske egenskaber indhøstes.

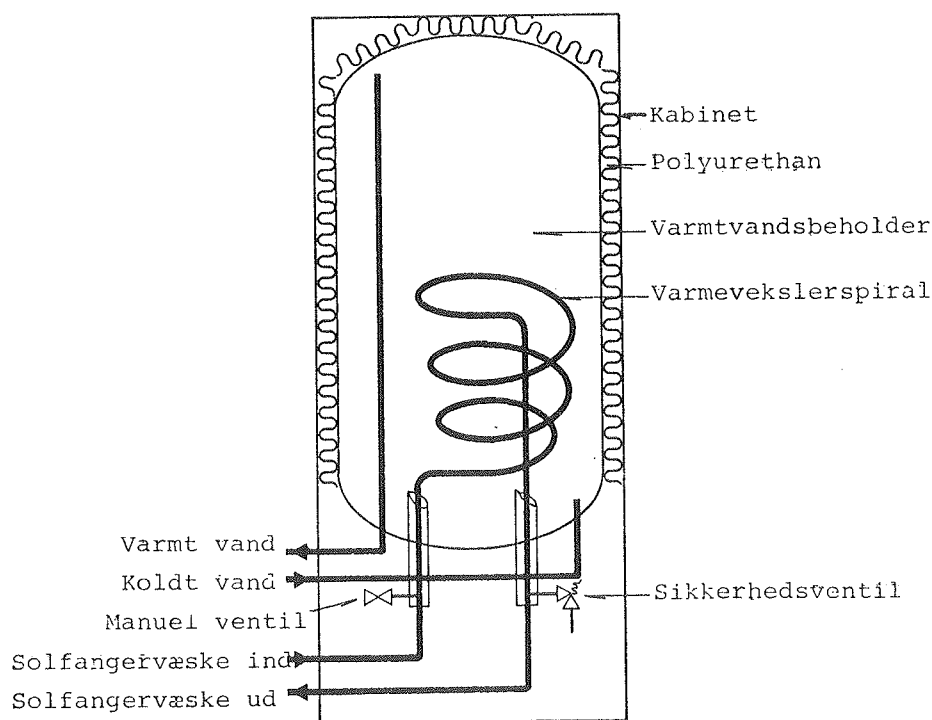
2. Prøvning af Metro Combibeholder type 2002 C

2.1 Identifikation

Firmanavn: Metro
Adresse: Bymosevej 1-3,
Telf.nr.: 02-296211
Lagerunitmodel: Combibeholder type 2002 C

2.2 Beskrivelse af lagerunit

Varmelagringsprincippet fremgår af figur 7.



Figur 7. Principskitse af Metro Combibeholder type 2002 C.

Brugsvandet benyttes som det varmeakkumulerende materiale. Lagerbeholderen er udført i stål. De indvendige overflader er beskyttet med emalje samt en magnesiumsanode. Varmen overføres fra solfangerkredsen til brugsvandet gennem en varmevekslerspiral, placeret i den nederste del af beholderen. Varmevekslerspiralen er udformet som en dobbelt-

spiral med et indvendigt kobberrør og et udvendigt stål-rør. Mellemrummet mellem de to rør er vandfyldt og forsy-
net med en sikkerheds- og en afspærringsventil. Sikkerhedsven-
tilen åbner ved et tryk, der er lavere end trykket i sol-
fangerkredsen og varmtvandsbeholderen. Sikkerhedsventi-
len vil derfor åbne ved en eventuel lækage i varmeveksler-
spiralen. Herved opnås en dobbelt adskillelse mellem sol-
fangervæsken og brugsvandet.

Den cylinderformede beholder er placeret på en ramme i ka-
binettet. Mellemrummet mellem beholder og kabinet er op-
skummet med polyurethan. Alle beholderens rørgennemfø-
ringer er placeret i beholderens bund, som er uisolaret.
Lagerunit'en indeholder ikke styringssystem, ekspansionsbe-
holder, ventiler, pumpe og lignende udstyr til et solvarme-
anlæg. Varmelagerunit'en er vist på fig. 8.

Størrelsen af lagerunit'en fremgår af tabel 3. Lagerunit'en
er afprøvet med en propylenglykol/vand blanding frostsikret
til -20°C .

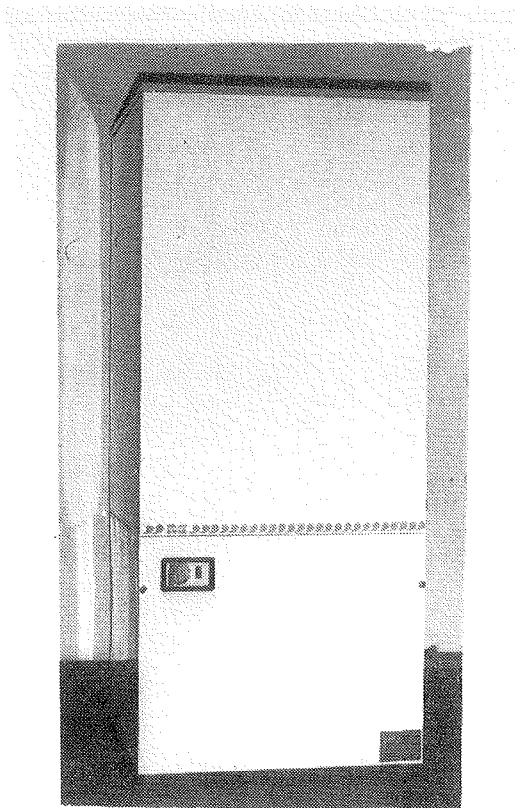


Fig. 8. Metro Combibeholder type 2002 C.

Varmtvandsbeholdervolumen	185 l
Sikkerhedskredsens volumen	1 l
Solfangervæskevolumen i varmevekslerspiral	2 l
Total lagerunitmasse (tom)	116 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 3. Data for Metro Combibeholder type 2002 C.

2.3 Måleresultater

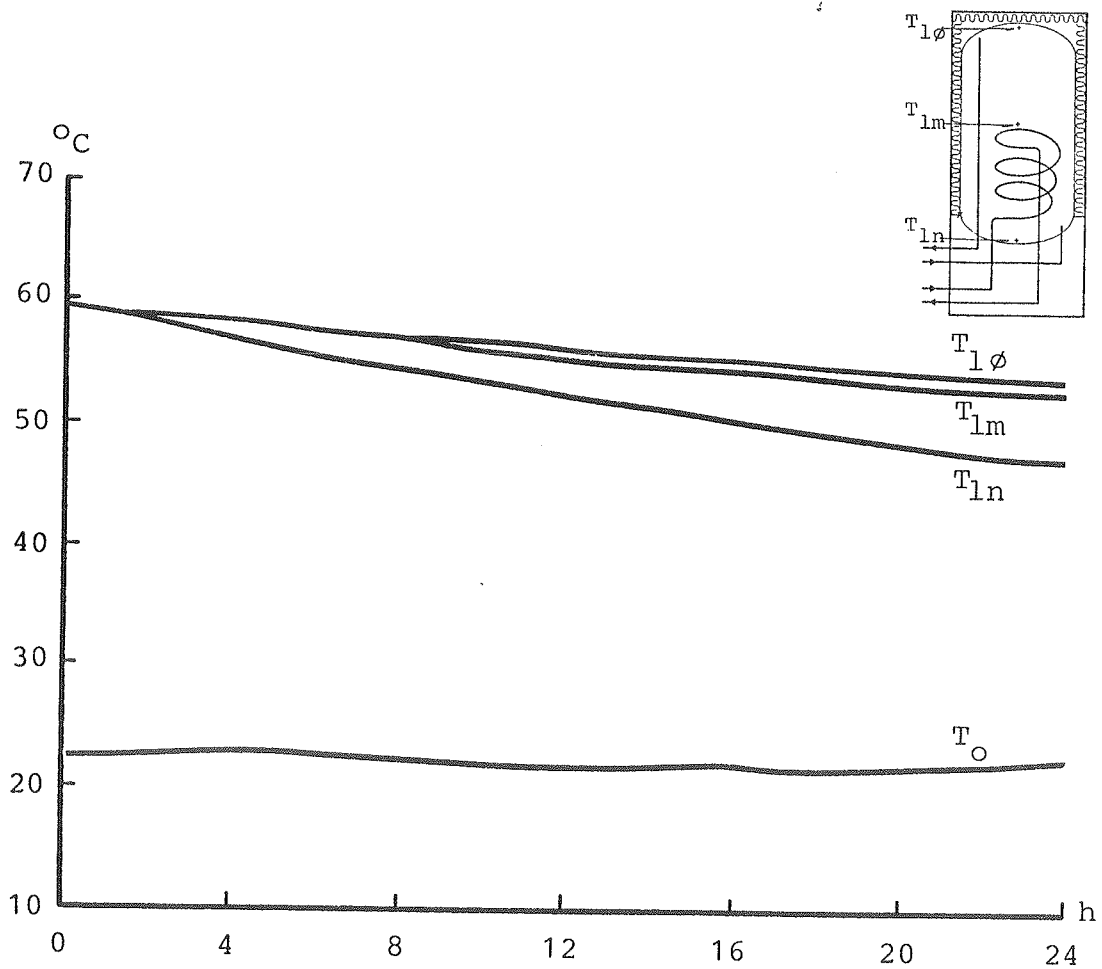
Varmelagerunit'ens varmetab, varmelagringskapacitet og varmeoverførselsevne fra solfangervæske til lager blev målt som beskrevet i afsnit 1.4. Resultaterne var:

I tabel 4 er de målte varmetabskoefficienter under solfangerdrift ved forskellige lagertemperaturer angivet.

T_l °C	35	59	88
T_o °C	22,2	22,3	22,1
K_d W/°C	2,9	2,9	3,2

Tabel 4. Målte varmetabskoefficienter for Metro 2002C.

Figur 9 viser afkølingsforløbet for lageret. Vandtemperaturerne i 3 forskellige niveauer, øverst $T_{l\phi}$, i midten T_{lm} og nederst T_{ln} er registreret.



Figur 9. Temperaturforløb under afkøling for Metro Combibeholder type 2002 C.

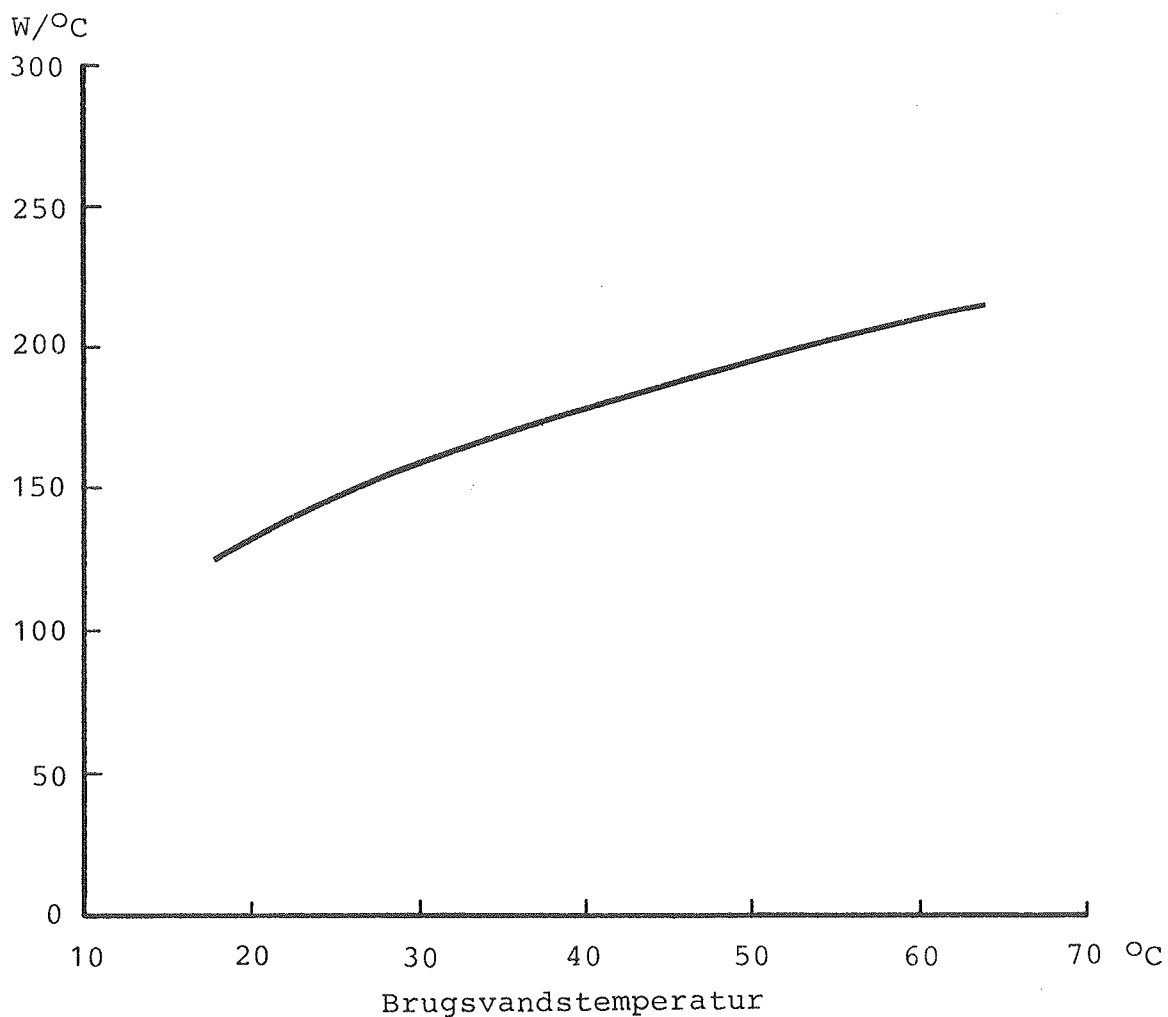
Lagerunit'ens varmetabskoefficient under afkølingsforløbet blev målt som beskrevet i afsnit 1.4.1 og resultatet var:

$$K_s = 2,8 \text{ W/}^{\circ}\text{C}.$$

Med et solfangervæskeflow på 3,9 l/min og en effektoverførsel på ca. 900 W blev varmelagerunit'en opvarmet fra 20°C til omtrent 60°C. Varmelagringskapaciteten var:

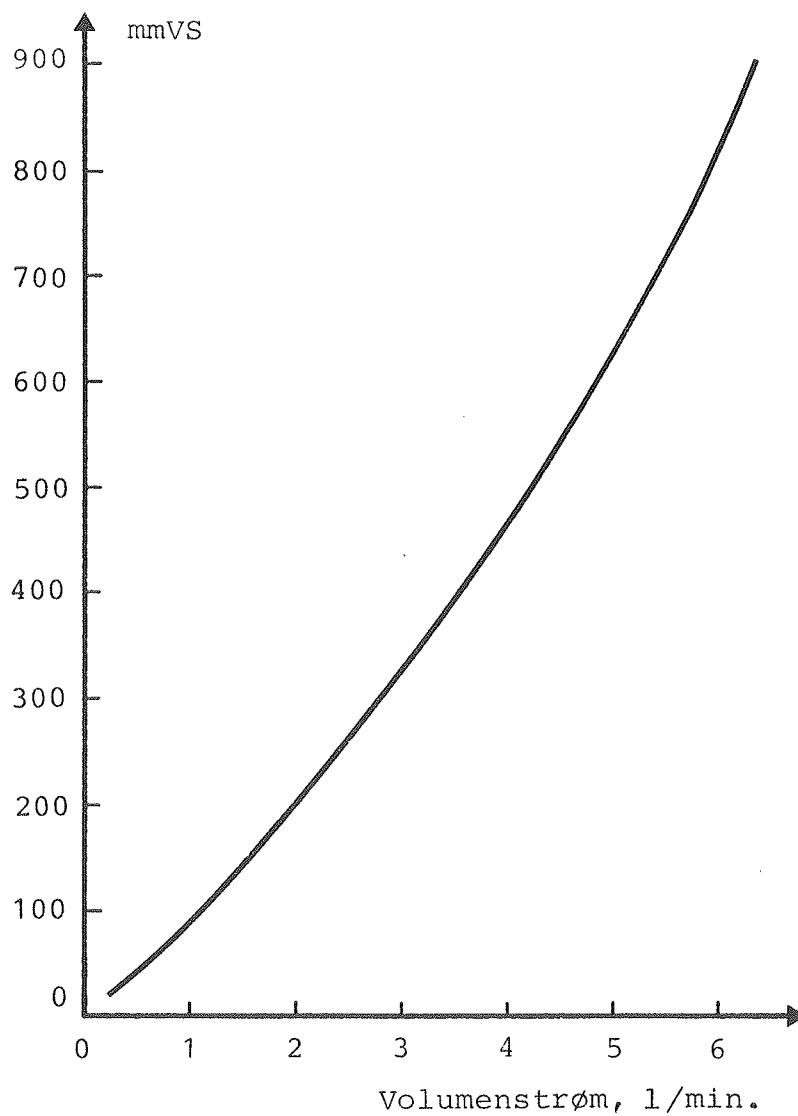
$$C = 790 \text{ kJ/}^{\circ}\text{C}.$$

Den målte varmeoverførselsevne fra solfangervæsken til brugsvandet fremgår af figur 10.



Figur 10. Målt varmeoverførselsevne fra solfanger-væske til brugsvandet. Benyttet solfanger-væskeflow 3,9 l/min og effektoverførsel 900 W.

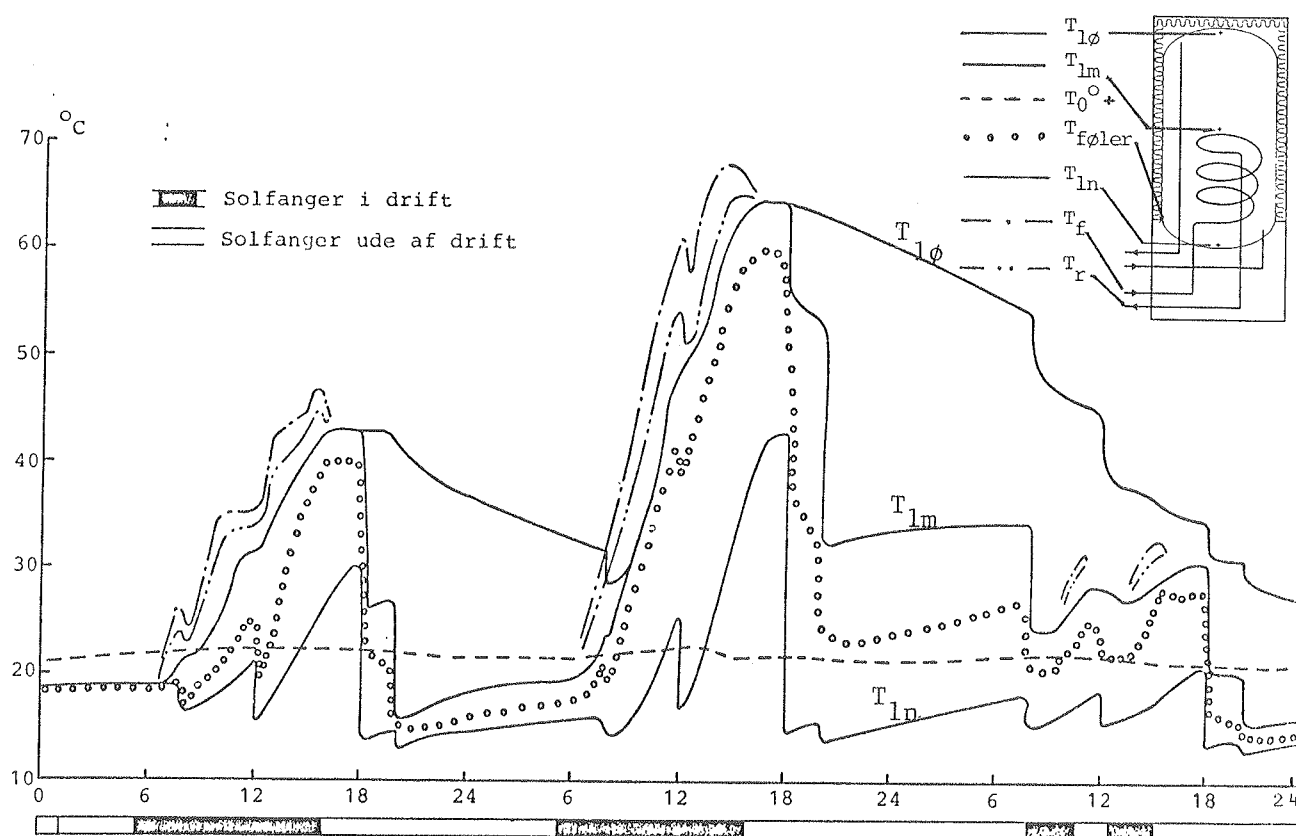
Figur 11 viser det målte tryktab over varmelageret som funktion af solfangervæskens volumenstrøm.



Figur 11. Tryktab over varmeveksleren for Metro Combibeholder type 2002 C, målt ved 23°C.

Dynamisk prøvning

Det benyttede solfangerareal er 4 m^2 . De målte temperaturer fremgår af figur 12. Temperaturen i 3 niveauer, fø-
lertemperaturen, omgivelsernes temperatur og, når solfan-
geren er i drift, solfangervæskens fremløbs- og returtem-
peratur er registreret.



Figur 12. Temperaturforløbet for Metro Combibeholder type 2002 C under prøvningen.

Data for varmtvandsforbruget er angivet i tabel 5. T_k er temperaturen af det kolde vand, som tilføres lageret, T_v og M er gennemsnitstemperaturen og volumenmængden af det opblandede vand tappet fra lagersystemet. L er energimængden, som tappes fra lageret under hver tapning.

Tid	T _k	T _v	M	L	Dagligt vandforbrug	Daglig energimængde tappet fra varmelageret	
dag kl	°C	°C	l	Wh	l	Wh	
1	8	13,5	21,1	48	233	5750	
	12	11,0	28,4	38			760
	18	11,0	38,2	98			3080
	20	11,2	37,5	49			1490
2	8	11,8	27,8	48	237	7880	
	12	11,8	41,4	40			1370
	18	11,8	44,3	99			3720
	20	11,8	44,6	50			1900
3	8	12,8	42,5	50	220	5440	
	12	11,8	36,7	33			950
	18	11,8	30,4	91			1960
	20	11,8	27,1	46			810

Tabel 5. Data for varmtvandsforbruget under den dynamiske prøvning.

De vigtige daglige energimængder for varmelagersystemet under prøvningen er angivet i tabel 6. Energimængden der tappes eller tabes fra lageret under prøvningen er 20500 Wh, mens energitilførslen til lageret er 20100 Wh. Ændringen i varmelagerets varmeindhold under prøvningen er således -400 Wh, som svarer rimeligt godt til et gennemsnitstemperaturfald fra ca. $18,5^{\circ}\text{C}$ i starten af prøvningen til sluttemperaturen ca. $17,0^{\circ}\text{C}$. Af figur 12 ses det, at de lave lagertemperaturer efter vandtapningen ikke udnyttes tilstrækkeligt effektivt til at reducere solfangervasketemperaturen og dermed at øge solfangerudbyttet. Ligeledes ses det, at hele lagerets vandindhold ikke udnyttes optimalt ved varmelagringen, idet

lagertemperaturen i den nederste del af lageret under varme-tilførsel ikke opnår samme temperatur som den øvrige del af lageret. Begge dele skyldes en uhensigtsmæssig varmevekslerplacering. Varmevekslerens nederste del er placeret ca. 18 cm over bunden af beholderen og varmeveksleren fylder så meget, at den øverste del er placeret kun 9 cm fra toppen af beholderen. Styresystemets følerplacering er vigtig for solvarmeanlægs ydeevne. Der bør være en klar sammenhæng mellem solfangervæsketemperatur og følertemperatur. Denne sammenhæng synes ikke at være til stede med den nuværende uheldige spiralplacering. Det foreslås derfor, at varmevekslerspiralen placeres på det koldeste sted i lageret, altså så tæt på bunden som praktisk muligt. Ved hjælp af den dynamiske prøvning er en matematisk model, som beregner ydeevnen for varmelageret, verificeret, se [4].

Tid dag	Solindstråling på solfangeren Wh	Energitilførsel fra solvarmean- lægget til la- geret Wh	Tappet energi- mængde fra lageret Wh	Varme- tab Wh
1	16780	7100	5700	200
2	25268	11400	7900	1100
3	7936	1600	5400	200
Sum	49984	20100	19000	1500

Tabel 6. Daglige energimængder for varmelageret under den dynamiske prøvning.

2.4 Diskussion af måleresultater

Størrelsen af varmelagerunit'ens varmetab svarer til en ideel mineraluldsisoleringstykkelse på ca. 2,5 cm. Denne type beholder har været prøvet før, se [1]. En forbedret isoleringsstandard, hovedsagelig forårsaget af en forøget isoleringstykkelse af beholderens sider på de svageste punkter, har reduceret varmetabskoefficienten fra 4,6 til

2,9 W/°C. Lageret er fordelagtigt udformet, da der ikke er nogen gennembrydninger gennem den øverste del af isoleringen og dermed ingen kuldebroer i den øverste del af lageret. Det for solvarmeanlæg nødvendige udstyr foreslås placeret i rummet under beholderen, således at monteringsarbejdet lettes. Når dette udstyr er monteret vil varmetabet fra lagerunit'en forøges, og en isolering af beholderens bund eller af rummet under beholderen må derfor overvejes.

Vandlagervolumenet er 185 l. Vælges den kritiske varmeoverførselsevne fra solfanger til brugsvand til 25 W/°C m² solfanger ved en lagertemperatur på 20°C, ses det af figur 10, at lageret af varmeoverførselsmæssige hensyn er velegnet til solvarmeanlæg med solfangerareal op til omtrent 5 m².

3. Erfaringer fra prøvningerne

3.1 Prøvemetoder

Der er afprøvet en række andre varmelagre end det her omtalte. Resultatet er omtalt i [5].

Arbejdet vedrørende prøvning af markedsførte varmelagre videreføres i solvarmeprøvestationens regie. Arbejdet vedrørende udviklingen af prøvemetoder videreføres dels under prøvestationen for solvarme, dels ved deltagelse i EF's Solar Storage Testing Group.

De målte varmetabskoefficienter viser, at de forskellige prøvemetoder til bestemmelse af varmetabskoefficienten er berettigede. Forskellen mellem de målte varmetabskoefficienter, når solfangeren er i drift, skyldes forskelle i lagertemperaturniveauet. Forskellen mellem størrelsen af varmetabskoefficienten, når solfangeren er i drift, og når solfangeren er ude af drift, skyldes, at der optræder temperaturforskelle i lageret, når solfangeren er ude af drift. Det må i det videre udviklingsarbejde af prøvemethoden tilstræbes, at varmetabskoefficientens fordeling på de enkelte overfladearealer af varmelageret kan bestemmes, idet denne fordeling har stor betydning for ydelsen af solvarmeanlægget.

Varmeoverføringsevnen fra solfangervæsken til lageret måles under en opvarmningsperiode med et givet flow og en given effektoverførsel. Både størrelsen af flow og effektoverførsel har stor indflydelse på størrelsen af varmeoverføringsevnen. Dette forhold bør tages i betragtning ved videreudvikling af prøvemethoden, således at nogle af de almindeligste driftsbetingelser anvendes under prøvningen.

Målingen af varmelagringskapaciteten for varmelageret er baseret på gennemsnitstemperaturer for lageret. Der tages derfor ikke hensyn til, at alle dele af lageret ikke opvarmes lige meget under opvarmningen. Da dette forhold kan have stor betydning for ydelsen af solvarmeanlæg, bør prøvemethoden udvides, så det klarlægges i hvilken udstrækning den teoretiske varmelagringskapacitet udnyttes under opvarmningen.

Tappesystemets udformning har også stor betydning for solvarmeanlægs ydelser. Tappesystemet kan under tapning i større eller mindre udstrækning etablere lagertemperaturprofiler med skarpe spring. Tappesystemets udformning bestemmer også i hvilken udstrækning høje lagertemperaturer kan omsættes til høje tappetemperaturer. Der bør derfor udvikles en prøvemethode, som belyser disse forhold.

I perioder med vandtapning og uden varmetilførsel til varmelageret vil temperaturerne i lageret ikke blive udjævnet som i perioder, hvor der tilføres varme til lageret. I sådanne solfattige perioder er det vanskeligt at beregne de forskellige lagertemperaturer korrekt. I årets løb er der mange perioder uden varmetilførsel, og det er derfor vigtigt også i disse perioder at kunne beregne lagertemperaturerne korrekt. Derfor bør vejrdataene i den dynamiske prøvning ændres, så der er en dag fuldstændig uden solskin. Herved bliver grundlaget for verificering af beregningsmodellen for varmelageret betydeligt forbedret.

Den dynamiske prøvestand bør ved fremtidige standardprøvninger styres således, at varmelagerets styresystems indflydelse på solvarmeanlæggets ydelse belyses. Derfor bør varmelagerets styresystems temperaturføler og strategi sammen med en teoretisk beregnet solfangertemperatur afgøre, om solfangerpumpen er i drift eller ej.

For at sikre bedst mulig kontrol af den matematiske simuleringsmodel for lagerets drift, bør den daglige tappede vandmængde under den dynamiske prøvning endvidere afstemmes efter lagerets størrelse. Herved opnås, at lageret igennem de 3 dages drift udsættes for så forskellige temperaturforhold som muligt, både hvad angår temperaturniveau i lageret og størrelsen af temperaturforskelle i lageret.

3.2 Lagertyper

I dag anvendes hovedsageligt 3 forskellige lagertyper: kappebeholdere, lagre med en neddykket varmtvandsbeholder og varmtvandsbeholdere med indbygget varmevekslerspiral. I alle lagertyperne benyttes vand som det varmelagrende materiale og stål som beholdermateriale. De forskellige lagertyper udnytter i forskellig udstrækning de muligheder, der er for at øge udbyttet fra anlæggene ved brug af temperaturlagdeling i varmelagrene. De lave temperaturer i lageret kan udnyttes til at reducere solfangerkredstemperaturen og dermed øge solfangerudbyttet. De høje temperaturer i lageret kan udnyttes, når der er behov for varmt vand med høje temperaturer.

Normalt opstår temperaturlagdelingen i lageret på grund af vandtapning. Når solfangeren er i drift, vil varmetilførslen til lageret normalt forholdsvis hurtigt udjævne eventuelle temperaturforskelle. Er solfangeren ikke i drift, vil temperaturudjævningstempoet være lavere. Lagerudformningen bestemmer tempoet. Skal temperaturlagdelingen i lageret udnyttes i rimelig udstrækning, må i hvert fald 3 krav være opfyldt:

- 1) Det kolde vand skal tilføres bunden af lageret, uden at der skabes omrøring i vandvolumet.
- 2) Varmevekslingssystemet mellem solfangervæske og vand skal placeres i bunden af beholderen.
- 3) Varmetransporten ved varmeledning fra toppen til bunden af lageret skal reduceres mest muligt, fx ved at lageret gøres højt og slankt, ved at benytte tynde beholdermaterialer med små varmeledningsevner og lignende. For almindelige små stålbeholdere er varmetransporten ved varmeledning fra toppen mod bunden af beholderen i stålet normalt større end i vandet.

3.3 Varmetab

Varmetabet fra små varmelagre kan, når lagerudformningen er uhensigtsmæssig, være uacceptabelt stort og helt ødelæggende for ydelserne fra solvarmeanlæggene. Varmetabene fra kuldebroer, fx i form af gennembrydninger af isoleringen, fra hjælpeudstyret til solvarmeanlægget og fra rørføringen uden for varmelageret, kan ofte være langt større end transmissionstabet gennem isoleringen. Det er derfor vigtigt at udforme lageret, så disse enkelttab begrænses mest muligt.

Placeringen af kuldebroerne og hjælpeudstyret har stor betydning for varmetabets størrelse. Placeres en kuldebro i beholderens bund, afkøles vandet ved kuldebroen forholdsvis hurtigt og danner, hvis solfangeren ikke er i drift, et koldt, stillestående, isolerende lag oven over kuldebroen, således at varmetabet fra kuldebroen bliver forholdsvis lille. Placeres en kuldebro i toppen af beholderen, vil kuldebroen forblive varm, idet det af kuldebroen afkølede vand erstattes af varmere vand fra lageret på grund af massefyldeforskelle. Naturlig konvektion i lageret holder altså kuldebroens temperatur høj, og varmetabet fra kuldebroen bliver derfor stort. Tilsvarende betragtninger kan gøres vedrørende varmetabet fra hjælpeudstyret. Hjælpeudstyret placeres mest hensigtsmæssigt under beholderen i et isoleret instrumentrum. En sådan placering begrænser udstyrets og lagerets varmetab mest muligt.

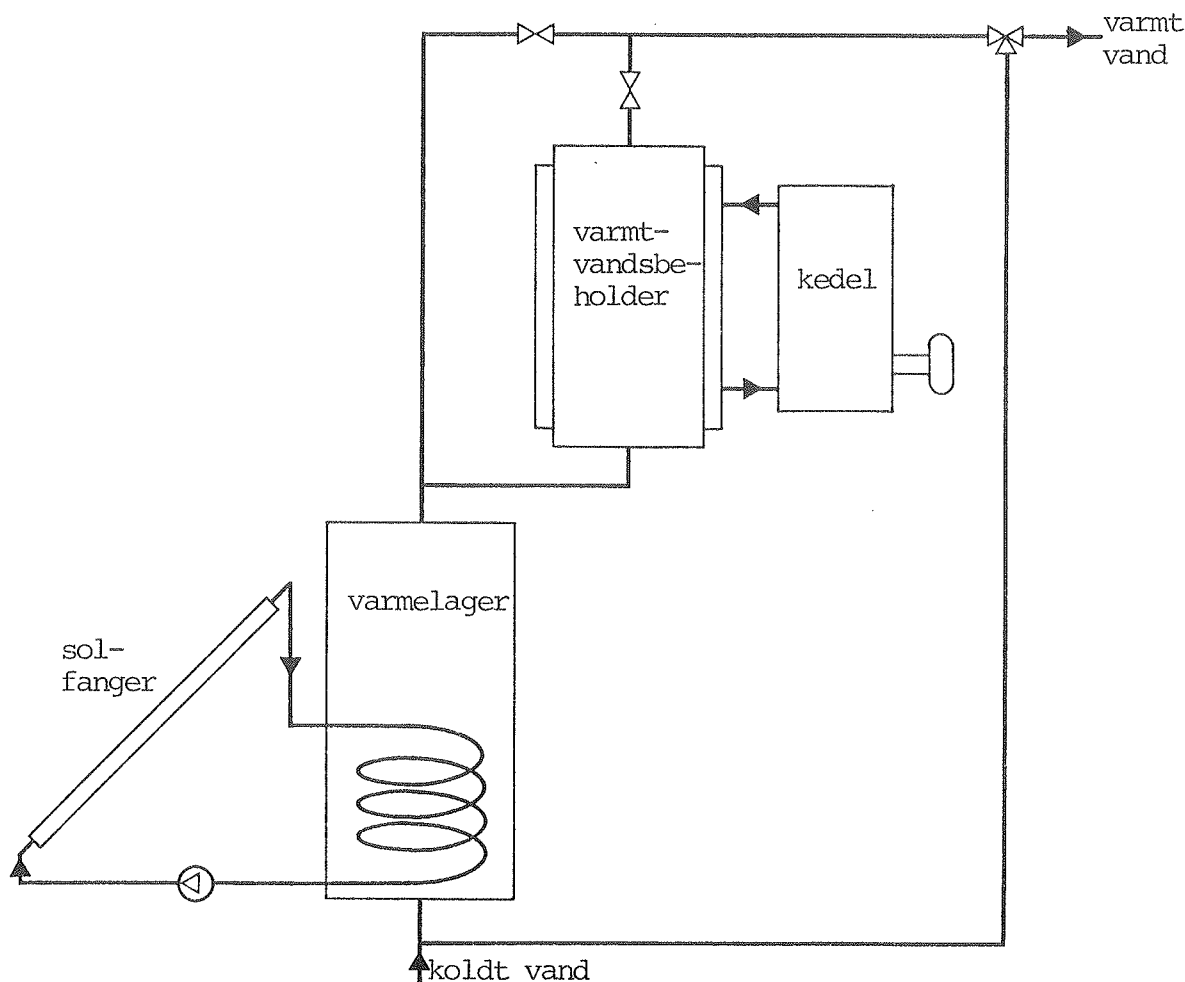
Endelig skal rørføringens betydning for varmetabet omtales. En rørgennemføring gennem isoleringen er den type kuldebro, som kan forårsage størst varmetab, idet der kan optræde intern væskecirkulation i røret, da væskens massefylde er temperaturafhængig. Denne interne væskecirkulation vil opvarme større eller mindre dele af rørsystemet med større eller mindre lagervarmetab til følge. Det er derfor vigtigt, at rørgennemføringen placeres i bunden af lageret, og at rørene føres nedad fra beholderen, så intern cirkulation i rørsystemet forhindres.

Under drift optræder der som omtalt ofte store temperaturforskelle mellem beholdertoppens varme vand og beholderbundens kolde vand. Sammenholdes dette med de ovenfor nævnte forhold, taler alle varmetabsmæssige forhold for, at 1) toppen af lageret skal være særdeles velisoleret uden nogen form for kuldebroer, 2) alle kuldebroer, fx rørgennemføringer, skal placeres i bunden af lageret, og 3) alt hjælpeudstyr skal placeres i et isoleret instrumentrum under lagertanken.

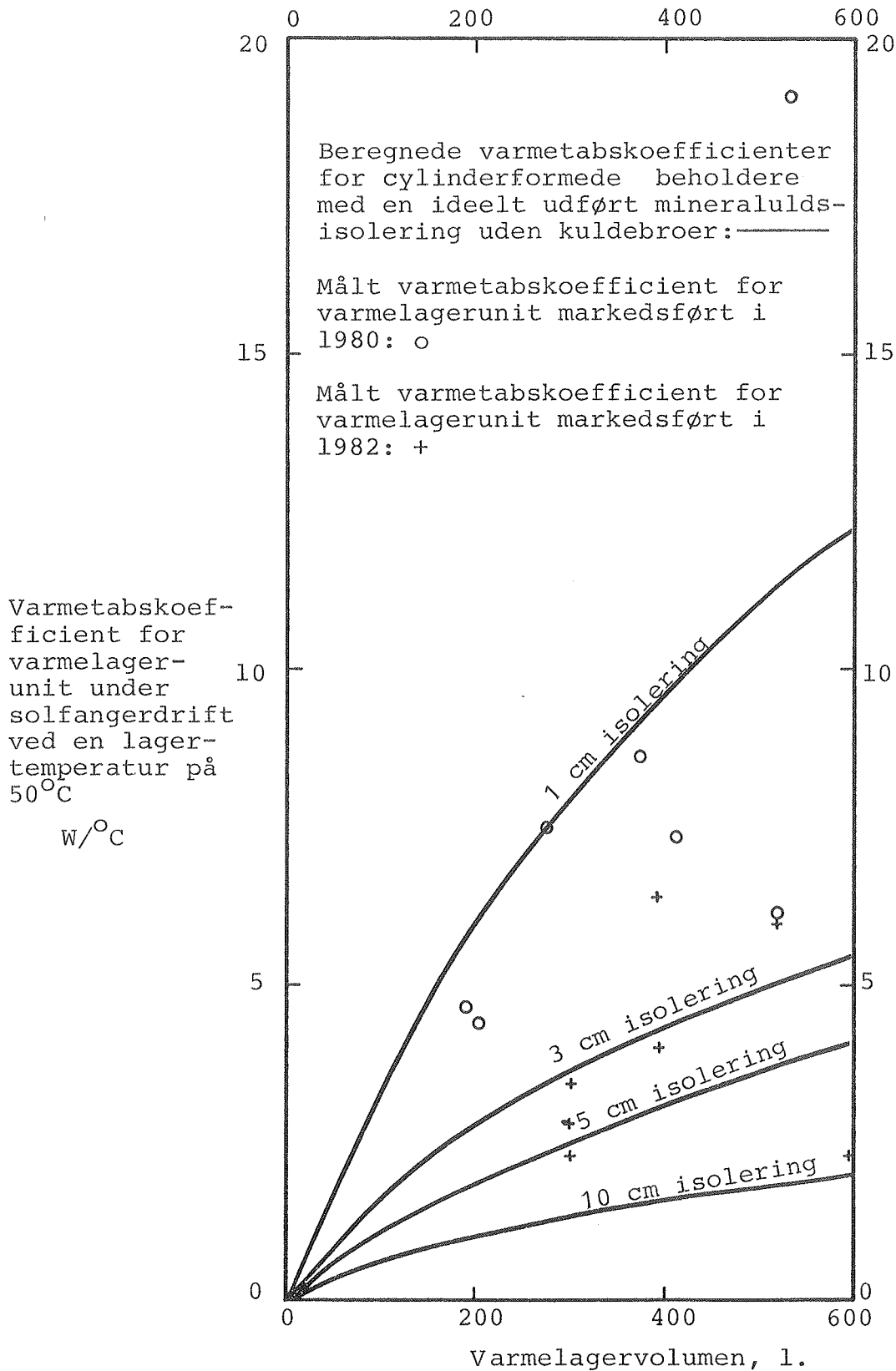
4. Diskussion

Da de markedsførte varmelagerunits blev undersøgt i 1980, var de meget store varmetab hovedproblemet [1]. De markedsførte varmelagres varmetab blev målt på ny i foråret 1982 i solvarmeprøvestationens regie, [3], [6], [7], [8], [9], [10], og [11]. Måleresultaterne fra 1980 og 1982 er vist på figur 13. Desuden er teoretisk beregnede varmetabskoefficienter for cylinderformede beholdere med en ideelt udført mineraluldsisolering uden kuldebroer vist. Udviklingen siden 1980 har, under anvendelse af de i afsnit 3.3 angivne retningslinier, ført frem til bedre udformede varmelagre med forholdsvis små varmetab, uden at lagerprisen af den grund er steget.

For at belyse betydningen af varmelagerets varmetab og udformning for ydelsen af solvarmeanlæg er der foretaget ydeevneberegninger for et typisk solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning. Figur 14 viser en principskitse af solvarmeanlægget, som tages i beregning.



Figur 14. Principskitse af solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning.



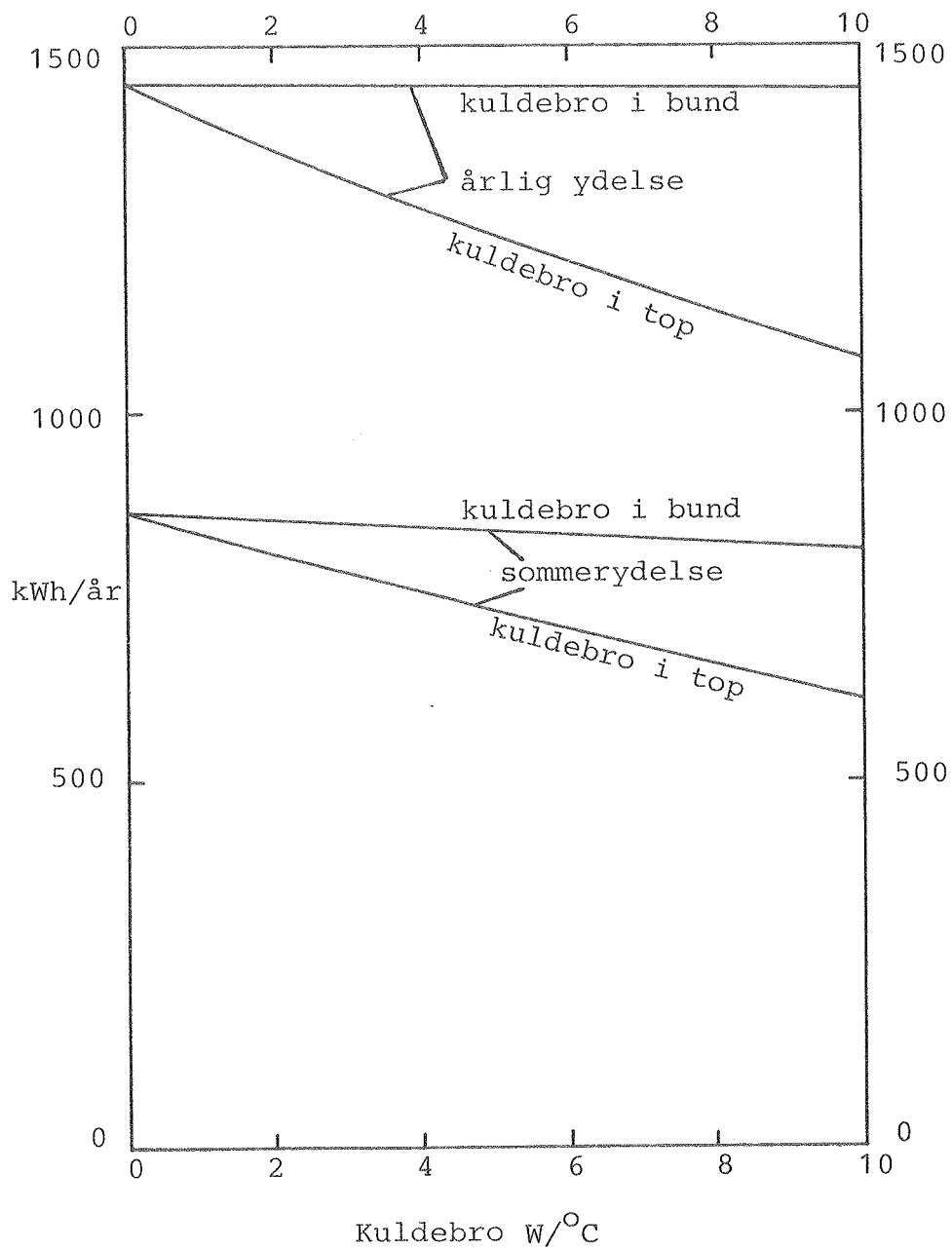
Figur 13. Varmetabsmålinger for markedsførte varmelagerunits, se [1], [3], [6], [7], [8], [9], [10] og [11].

Den matematiske model, som benyttes ved beregningerne, simulerer varmelagerets drift således, at der tages hensyn til temperaturlagdelingen i lageret. Varmebalancerne opstilles for hver enkelt del af solvarmeanlægget og varmelageret for hver halve time med Referenceårets vejrdato. Ved hjælp af de opstillede varmebalancer beregnes temperaturerne hver halve time igennem Referenceåret for hver enkelt del af anlægget og lageret. Varmelagermodellen er kontrolleret ved hjælp af forsøg udført i den dynamiske prøvestand. Ved hjælp af de beregnede temperaturer i varmelageret beregnes de varmemængder, som føres til, tabes og tappes fra varmelageret. Den totale årlige ydelse fra solvarmeanlægget består dels af solvarmeanlæggets nettoydelse, dels af det sparede tomgangstab, som stammer fra perioder, hvor oliefyret kan slukkes. Oliefyret kan slukkes i perioder, hvor der ikke er behov for rumopvarmning, og hvor solvarmeanlæggets ydelse til brugsvandsopvarmningen er tilstrækkelig stor. Som beskrevet i [12] er det rimeligt at bestemme antallet af dage, hvor oliefyret kan slukkes, NA, ved hjælp af solvarmeanlæggets sommerdækningsgrad, SD:

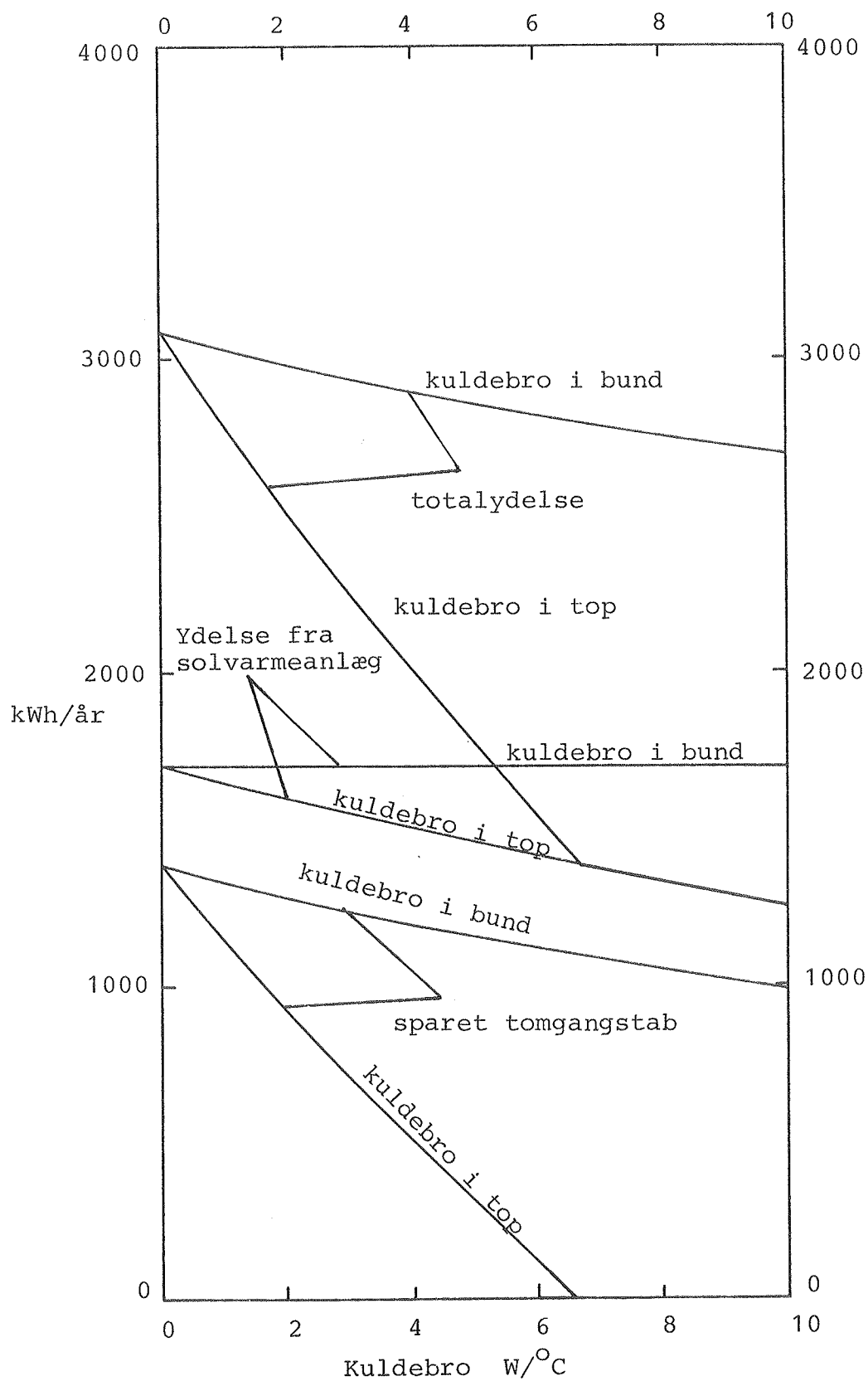
$$NA = \begin{cases} 150 & \text{for } SD \geq 95\% \\ \frac{150}{20} \cdot (SD-75) & \text{for } 75\% < SD < 95\% \\ 0 & \text{for } SD \leq 75\% \end{cases}$$

SD er den del af varmtvandsforbruget om sommeren, som solvarmeanlægget leverer. Sommeren er her defineret som de 5 sommermåneder: Maj, juni, juli, august og september, hvor velisolerede huse ikke har rumopvarmningsbehov. En del af forudsætningerne for beregningerne for et referenceanlæg er angivet i tabel 7.

Med referenceanlæggets data er solvarmeanlæggets ydelse beregnet med forskellige placeringer og størrelser af varmelagerets kuldebro. Resultaterne fremgår af figur 15, hvor nettoydelse er vist, og figur 16, hvor de totale årlige ydelser er vist. Det fremgår, at solvarmeanlæggets ydelse



Figur 15. Nettoydelsen fra et solvarmeanlæg som funktion af varmelagerets kuldebrostørrelse og- placering.

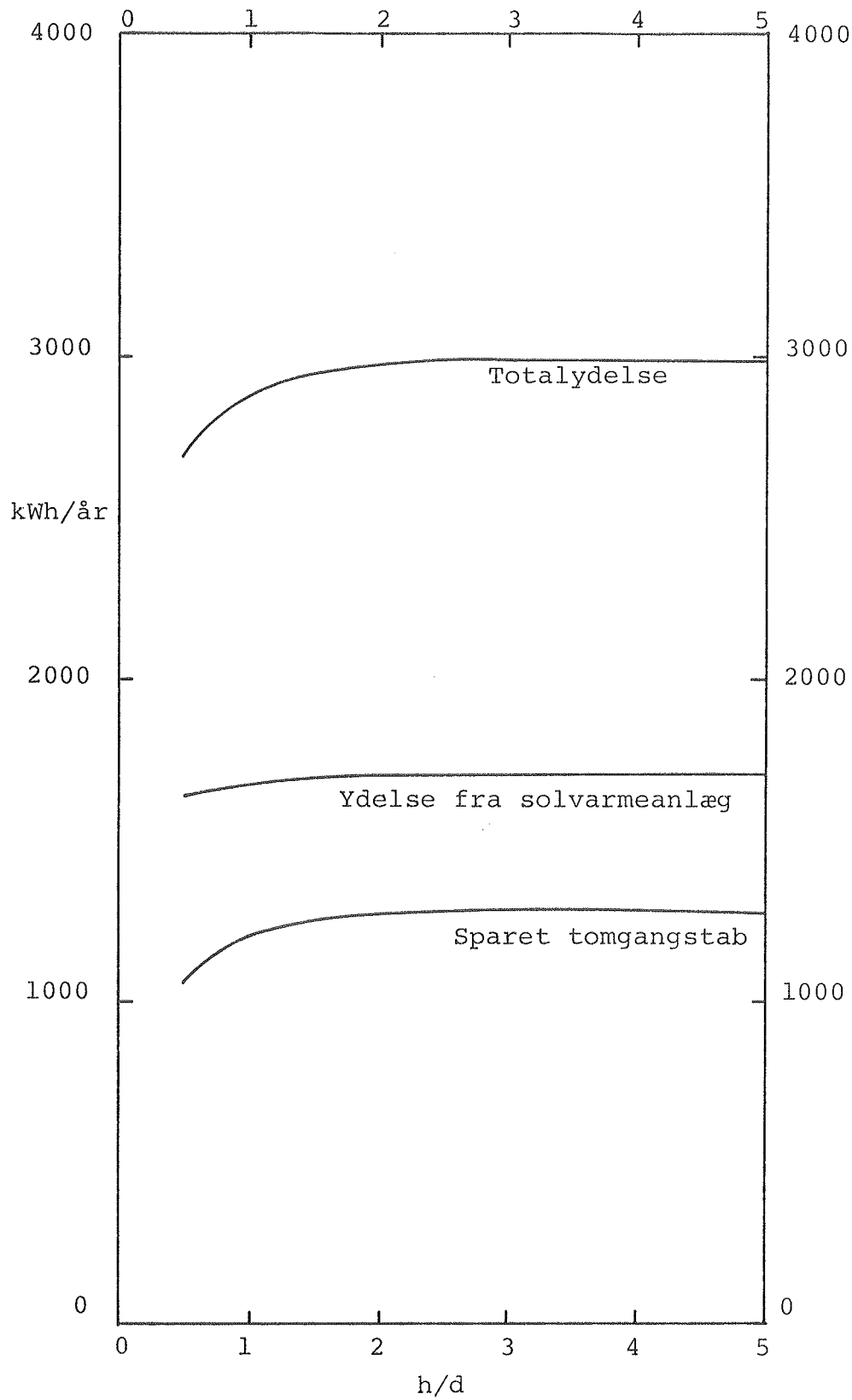


Figur 16. Totalydelsen fra et solvarmeanlæg som funktion af varmelagerets kuldebro-størrelse og- placering.

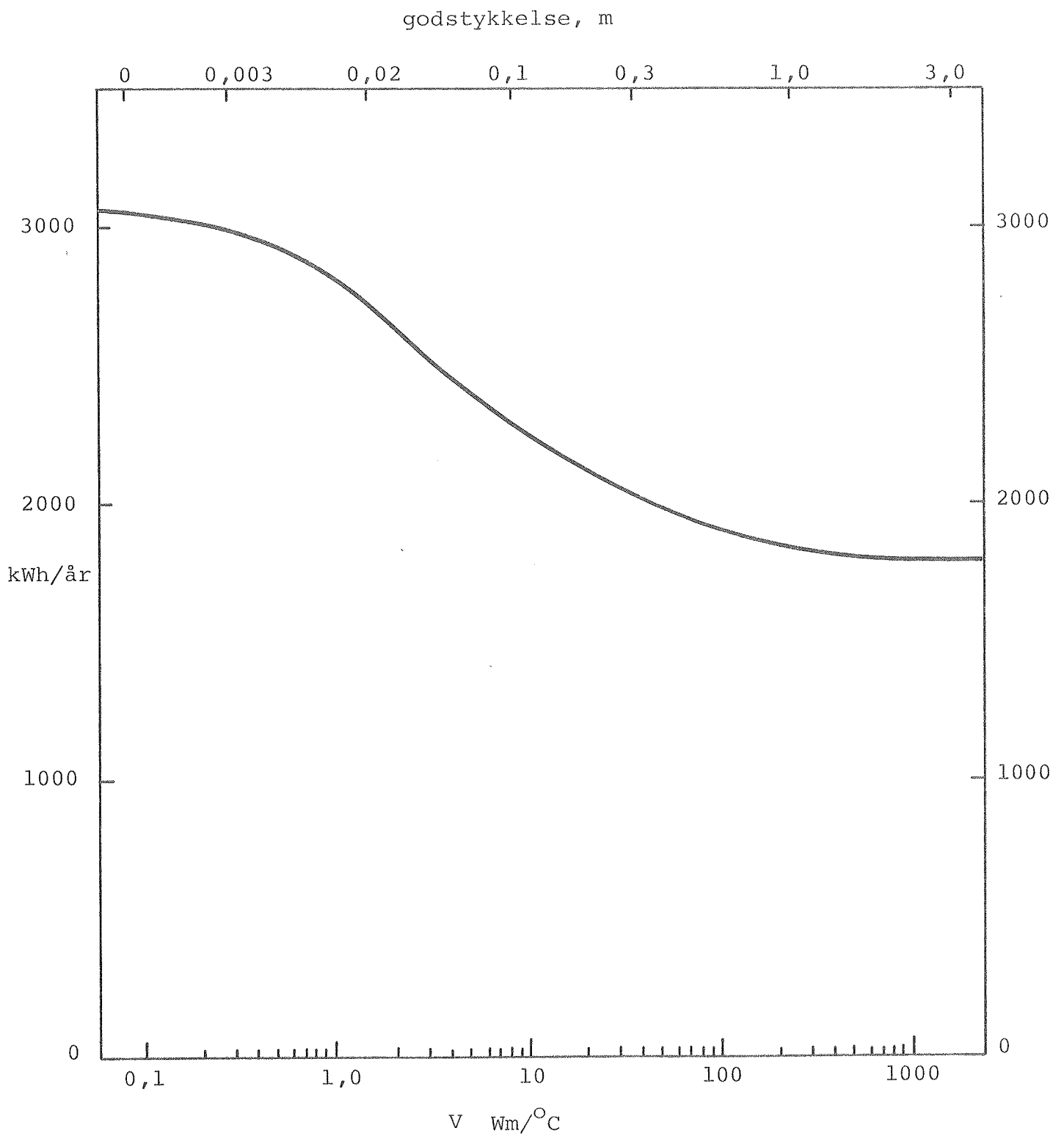
aftager med voksende kuldebrostørrelse og at kuldebroplaceringen har særdeles stor betydning for ydelsen. En kuldebro i toppen af lagertanken kan være helt ødelæggende for anlæggets ydelse, mens en kuldebro i bunden af lagertanken ikke reducerer ydelsen i samme omfang. Det er derfor af afgørende betydning, at varmelagerets kuldebroer placeres i bunden af lageret. Desuden må det tilstræbes at begrænse størrelsen af kuldebroerne mest muligt.

I det følgende angives to beregningseksempler vedrørende lagerudformningens betydning for ydelsen af ovennævnte referenceanlæg. I begge eksempler anvendes varmelagrenes traditionelle varmetilførsels-, aftapnings- og styresystem, mens kun selve beholderudformningen varieres. Solvarmeanlæggets ydelse er beregnet med forskellige højde/diameter-forhold for lagertanken. Den totale ydelse, som beregnes som ovenfor omtalt, fremgår af figur 17. For små højde/diameter-forhold vokser ydelsen for voksende højde/diameter-forhold. For højde/diameter-forhold større end 2 ændres ydelsen næsten ikke ved variation af højde/diameter-forholdet. Årsagen hertil er, at varmelagringstiden er forholdsvis kort i varmelageret, idet forholdet mellem lagervolumen og dagligt varmtvandsforbrug er lille.

Betydningen af størrelsen af varmeledningen fra toppen til bunden af varmelageret for referenceanlæggets ydelse er ligeledes undersøgt. Referenceanlæggets totale ydelse beregnes som omtalt ovenfor, og resultaterne fremgår af figur 18 og 19. Den totale ydelse fra referenceanlægget er vist som funktion af summen af produktet af varmeledningsevne og tværsnitsareal for henholdsvis vand og beholdermateriale i varmelageret. Skalaen på figur 18 er logaritmisk, på figur 19 lineær. Varmetransporten fra toppen til bunden af varmelageret ved varmeledning kan variere meget fra lager til lager, fx forårsaget af forskelle i udformningen af lagerets varmeoverføringssystem og tappesystem, i beholdermateriale, i beholdermaterialelets godstykkelse osv. I referenceanlægget er kun regnet med varmeledning i vandet og i beholdermateriale, som er stål. Den interne varmetrans-

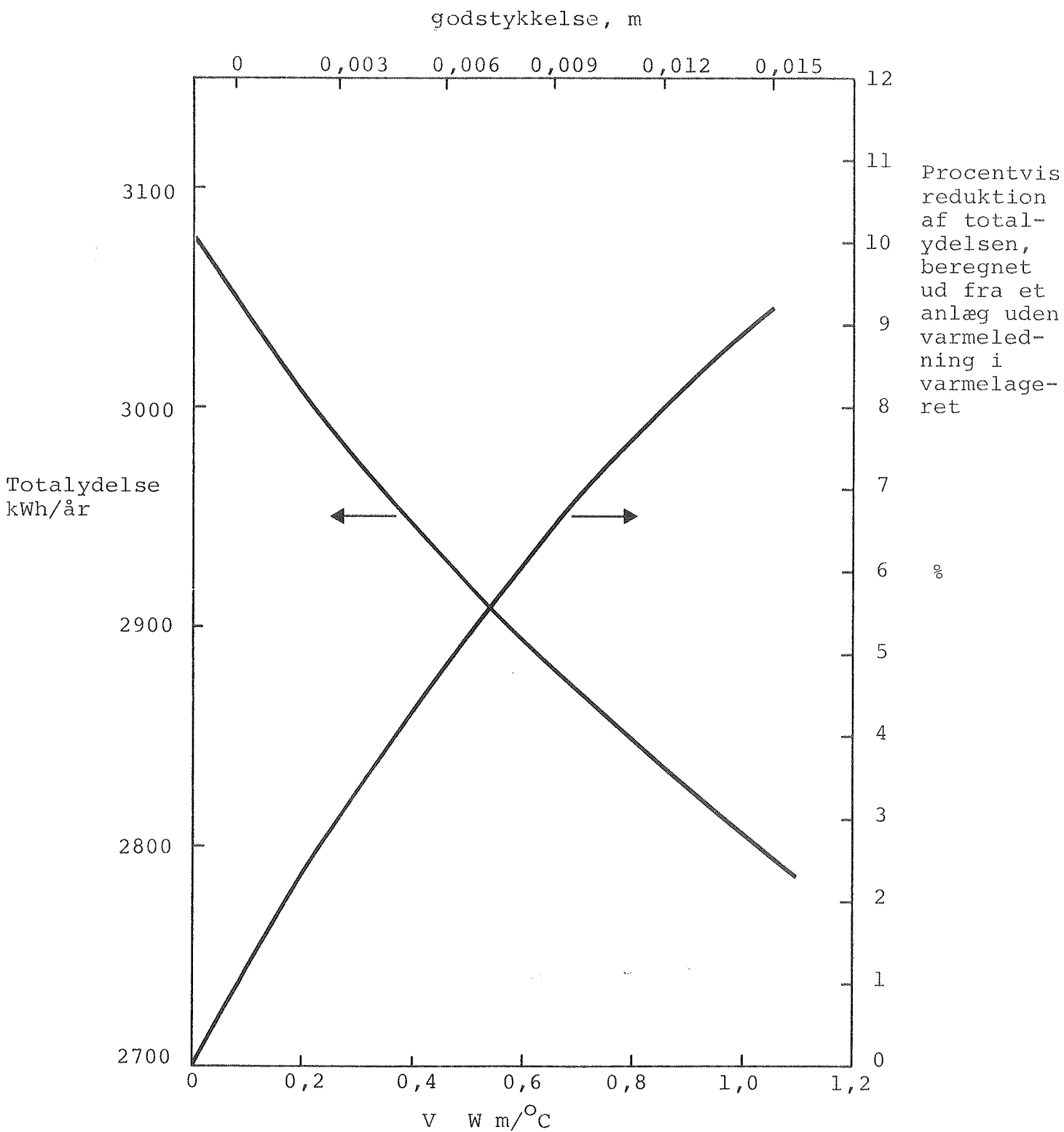


Figur 17. Totalydelsen fra et solvarmeanlæg som funktion af højde/diameter-forholdet.



$$V = \lambda_{\text{vand}} \cdot A_{\text{vand tværsnit}} + \lambda_{\text{stål}} \cdot A_{\text{stål tværsnit}}$$

Figur 18. Totalydelsen fra et solvarmeanlæg som funktion af varmeledningsstørrelsen V for lagertanken.



$$V = \lambda_{\text{vand}} \cdot A_{\text{vand tværsnit}} + \lambda_{\text{stål}} \cdot A_{\text{stål tværsnit}}$$

Figur 19. Totalydelsen fra et solvarmeanlæg som funktion af varmeledningsstørrelsen V for lagertanken.

port kan derfor være langt større end forudsat i referenceanlæggets varmelager. Til orientering er i figurerne angivet en skala for beholderens godstykkelse, som svarer til skalaen for varmeledningsstørrelsen. Jo mindre varmeledningen er, des større bliver ydelsen. Solvarmeanlæg med varmelagre, der er konstrueret således, at der ikke opstår temperaturlagdeling under driften, dvs med store værdier af varmeledningsstørrelsen, yder omtrent 40% mindre end solvarmeanlæg med varmelagre med god temperaturlagdeling. For solvarmeanlæg med varmelagre med god temperaturlagdeling er betydningen af varmeledningens størrelse vist på figur 19. Foruden anlæggets totale ydelse er den procentvise reduktion af totalydelsen fra solvarmeanlægget, beregnet ud fra ydelsen fra et anlæg uden varmeledning i varmelageret, vist. Det ses, at betydningen af varmeledningens størrelse for ydelsen er lille.

Ovenfor er vist eksempler på, at lagerudformningen kan have særdeles stor betydning for ydelsen fra solvarmeanlæg. På baggrund af varmetabsmålingerne vist på figur 13 og ydeevneberegningerne vist på figur 15 og 16, må udviklingen, som har fundet sted siden 1980 inden for varmelagerområdet, betegnes som særdeles positiv, idet de opnåede forbedringer ikke har fordyret varmelagrene. Endnu synes udviklingen dog kun at være i sin spæde start. De solvarmeanlæg, som i dag er på det danske marked, anvender næsten alle ståltanke, som først og fremmest anvendes til andre formål end solvarme. Tankene, tankenes varmetilførselssystem og aftapningssystem og styresystemet for varmetilførsel og vandtapning er ikke specielt udformet til de anlæg, hvori de skal indgå, og der er derfor gode muligheder for at forbedre varmelagrene. Da varmelageret endvidere har stor betydning for såvel ydelsen som prisen af solvarmeanlæg, afhænger forholdet mellem ydelse og pris for solvarmeanlægget meget af lagerudformningen. Der er mange mu-

ligheder for at forbedre solvarmeanlægs rentabilitet ved nytænkning inden for varmelagerområdet.

Udviklingen vil gå mod billige og/eller effektive varmelagre, som er utraditionelt udformet, specielt til solvarmeanlæg. Som eksempel på sådanne lagre kan nævnes varmelagre af billige beholdermaterialer, varmelagre, hvor lagervandet anvendes som solfangervæske, smeltevarmelagre med stor varmelagringskapacitet og temperaturlagdeling og varmelagre, hvor varmetilførsel og/eller varmetapning styres, så der opnås stor temperaturlagdeling i lageret under drift. Mulighederne er talrige. Der er masser af interessante muligheder, som endnu ikke er tilstrækkeligt undersøgt, og som kan forbedre forholdet mellem ydelse og pris for solvarmeanlæg.

5. Konklusion

Prøvestande er opbygget, og statiske og dynamiske prøvemethoder er udviklet for varmelagre til solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning. Ved de statiske prøvemethoder bestemmes en række termiske egenskaber for varmelagrene, så der kan foretages en foreløbig vurdering af lagrene. Ved den dynamiske prøvemethode bestemmes varmelagrenes termiske egenskaber under drift, og matematiske modeller, som simulerer varmelagrenes drift, kan verificeres. Smeltevarmelagre og andre avancerede varmelagre kræver særlige prøvemethoder, som endnu ikke er udviklet.

Med opbygningen af prøvestandene og gennem udviklingen af prøvemethoderne er der etableret et redskab til prøvning af varmelagre og til specielle undersøgelser, som kan udvide vor viden om de varmetekniske forhold for varmelagre. Da varmelagerudformningen har afgørende betydning for solvarmeanlægs ydelser, da optimeringsgrundlaget inden for varmelagerområdet endnu ikke er tilstrækkeligt udviklet, og da der i fremtiden må forventes et prøve- og udviklingsarbejde af betydeligt omfang, er det vigtigt, at grundlaget for undersøgelser inden for varmelagerområdet er til stede.

Der er gennem prøvningerne indhøstet stor erfaring vedrørende egnetheden af forskellige lagerudformninger. Retningslinier vedrørende lagerudformningen er opstillet, og de første resultater har vist sig i form af forbedrede markedsførte produkter. De varmelagre, som i dag er på markedet, er væsentlig bedre end de varmelagre, som var på markedet for få år siden, uden at varmelagerpriserne af den grund er steget, og udviklingen er ikke slut hermed. Der er mange muligheder for at udvikle specielt velegnede varmelagre til solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning, så forholdet mellem ydelse og pris for solvarmeanlægget forbedres yderligere.

Endelig skal nævnes, at en stor del af den viden, som indhøstes ved lagerundersøgelser, er af general karakter. Altså kan resultaterne anvendes ikke blot i forbindelse med solvarmeanlæg, men i alle sammenhænge og systemer, hvori der indgår et varmelager.

Appendix A. Målenøjagtighed

Størrelserne af de forventede måleubestemtheder for varmetabskoefficienten når solfangeren er i drift, varmelagringskapaciteten, varmetabskoefficienten når solfangeren ikke er i drift og varmeoverførselsevnen beregnes for nogle typiske eksempler. De anvendte måleubestemtheder er angivet i tabel 8. Der benyttes en propylenglykol/vand-blanding, som er frostsikret til $\pm 20^{\circ}\text{C}$, som solfangervæske.

Ubestemthed af temperaturmåling	$S_T = 0,5^{\circ}\text{C}$
Ubestemthed af temperaturdifferensmåling	$S_{\Delta T} = 0,05^{\circ}\text{C}$
Relativ ubestemthed af tidsspring	$\frac{S_{\Delta \tau}}{\Delta \tau} = 0,005$
Relativ ubestemthed af volumenstrøm	$\frac{S_m}{m} = 0,01$
Relativ ubestemthed af solfanger-væskens varmefylde	$\frac{S_{C_{p_t}}}{C_{p_t}} = 0,02$

Tabel 8. Anvendte måleubestemtheder.

Varmetabskoefficienten når solfangeren er i drift, K_d

Varmetabskoefficienten beregnes af formlen:

$$K_d = \frac{m \cdot C_{p_{T_m}} \cdot (T_f - T_r)}{T_1 - T_o}$$

Ubestemtheden bestemmes af:

$$S_{K_d} = \sqrt{\left(\frac{\partial K_d}{\partial m} S_m\right)^2 + \left(\frac{\partial K_d}{\partial C_{p_{T_m}}} S_{C_{p_{T_m}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial K_d}{\partial (T_f - T_r)} S_{(T_f - T_r)}\right)^2 + \left(\frac{\partial K_d}{\partial T_1} S_{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial K_d}{\partial T_o} S_{T_o}\right)^2}$$

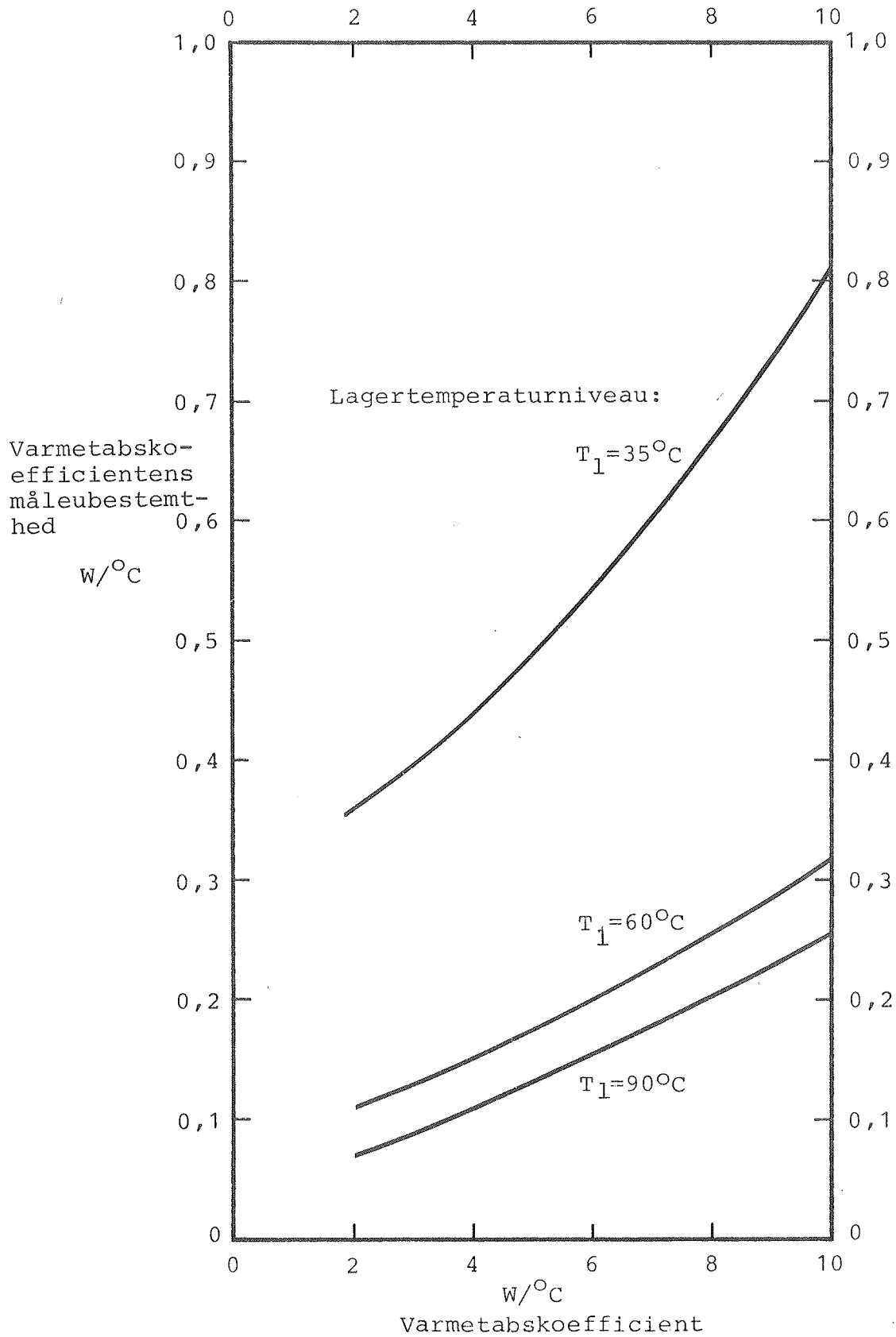
$$= K_d \cdot \sqrt{\left(\frac{S_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{S_{C_{p_{T_m}}}}{C_{p_{T_m}}}\right)^2 + \left(\frac{S_{(T_f - T_r)}}{T_f - T_r}\right)^2 + \left(\frac{S_{T_1}}{T_1 - T_o}\right)^2 + \left(\frac{S_{T_o}}{T_1 - T_o}\right)^2}$$

Solfangervæskeflowet er 1 l/min og lagerets omgivelsestemperatur $T_o = 25^{\circ}\text{C}$. For forskellige varmetabskoefficienter og lagertemperaturniveauer beregnes ubestemtheden af ovenstående ligning, og resultaterne er givet i tabel 9 og figur 20.

T_l $^{\circ}\text{C}$	35		60		90	
K_d $\text{W}/^{\circ}\text{C}$	S_{K_d} $\text{W}/^{\circ}\text{C}$	relativ ubestemt- hed for K_d %	S_{K_d} $\text{W}/^{\circ}\text{C}$	relativ ubestemt- hed for K_d %	S_{K_d} $\text{W}/^{\circ}\text{C}$	relativ ubestemt- hed for K_d %
2	0,36	18,0	0,11	5,6	0,07	3,5
3	0,40	13,2	0,13	4,3	0,09	3,0
5	0,50	9,9	0,18	3,6	0,13	2,7
10	0,81	8,1	0,32	3,2	0,25	2,5

Tabel 9. Eksempler på størrelsen af varmetabskoefficientens måleubestemthed.

På baggrund af disse eksempler må målenøjagtigheden anses at være af en rimelig størrelsesorden. For små varmetabskoefficienter målt ved det lave temperaturniveau er måleubestemtheden dog relativ stor.



Figur 20. Beregnet måleubestemthed for varmetabskoefficienten som funktion af varmetabskoefficienten og lagertemperaturniveauet.

Varmelagringskapaciteten, C

Varmelagringskapaciteten beregnes af formlen:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta\tau_i \cdot [m_i \cdot C_{p_{T_{m_i}}} \cdot (T_f - T_r)_i - K_{d_i} \cdot (T_{l_i} - T_{o_i})]}{T_{slut} - T_{start}} = \sum_{i=1}^N C_i$$

Forudsættes S_{C_i} igennem hele opvarmningsforløbet at være konstant, kan varmelagringskapacitetens ubestemthed S_C bestemmes af:

$$\begin{aligned} S_C &= \sqrt{N} \cdot S_{C_i} = \sqrt{N} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial C_i}{\partial \Delta\tau_i} S_{\Delta\tau_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_i}{\partial m_i} S_{m_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_i}{\partial C_{p_{T_{m_i}}}} S_{C_{p_{T_{m_i}}}}\right)^2 +} \\ &\quad \left(\frac{\partial C_i}{\partial (T_f - T_r)_i} S_{(T_f - T_r)_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_i}{\partial K_{d_i}} S_{K_{d_i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_i}{\partial T_{l_i}} S_{T_{l_i}}\right)^2 +} \\ &\quad \left(\frac{\partial C_i}{\partial T_{o_i}} S_{T_{o_i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_i}{\partial T_{slut}} S_{T_{slut}}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_i}{\partial T_{start}} S_{T_{start}}\right)^2 =} \\ &\quad \sqrt{N} \cdot \sqrt{\left(\frac{C_i}{\Delta\tau_i} S_{\Delta\tau_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\tau_i \cdot C_{p_{T_{m_i}}} \cdot (T_f - T_r)_i}{T_{slut} - T_{start}} S_{m_i}\right)^2 +} \\ &\quad \left(\frac{\Delta\tau_i \cdot m_i \cdot (T_f - T_r)_i}{T_{slut} - T_{start}} S_{C_{p_{T_{m_i}}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\tau_i \cdot m_i \cdot C_{p_{T_{m_i}}}}{T_{slut} - T_{start}} S_{(T_f - T_r)_i}\right)^2 +} \\ &\quad \left(\frac{\Delta\tau_i \cdot (T_{l_i} - T_{o_i})}{T_{slut} - T_{start}} S_{K_{d_i}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\tau_i \cdot K_{d_i}}{T_{slut} - T_{start}} S_{T_{l_i}}\right)^2 + \left(\frac{K_{d_i} \cdot \Delta\tau_i}{T_{slut} - T_{start}} S_{T_{o_i}}\right)^2} \\ &\quad \left(\frac{C_i}{T_{slut} - T_{start}} S_{T_{slut}}\right)^2 + \left(\frac{C_i}{T_{slut} - T_{start}} S_{T_{start}}\right)^2} \end{aligned}$$

I dette beregningseksempel forudsættes det, at lageret opvarmes fra 20°C til 70°C på 10 timer, som opdeles i halvtimer, $\Delta\tau_i = 1800 \text{ s}$. Solfangervæskeflowet er $0,02 \text{ l/min}$ pr. l lager og effektoverførslen til lageret er 6 W pr. l lager. Lagerets omgivelsestemperatur $T_o = 25^{\circ}\text{C}$, lagerets varmetabskoefficient under solfangerdrift er $5 \text{ W}^{\circ}\text{C}$ og varmetabskoefficientens måleubestemtheder er $0,3 \text{ W}^{\circ}\text{C}$. For forskellige lagervolumen beregnes ubestemtheden af ovenstående ligning. Resultaterne er givet i tabel 10.

Vandlager- volumen	Varmelagrings- kapacitet, C	Varmelagrings- kapacitetens ubestemthed, S_c	Relativ ube- stemthed for varmelagrings- kapaciteten
l	J°C	J°C	%
100	418 000	3001	0,7
200	836 000	5679	0,7
300	1254 000	8426	0,7
400	1672 000	11191	0,7
500	2090 000	13964	0,7

Tabel 10. Eksempler på størrelsen af varmelagringskapacitetens måleubestemthed.

Varmetabskoefficienten når solfangeren ikke er i drift, K_s

Varmetabskoefficienten beregnes af formlen:

$$K_s = - \frac{C}{\tau_s} \cdot \ln \left(\frac{T_{\text{slut}} - \frac{Q_{\text{tilf}}}{C} - T_o}{T_s - T_o} \right)$$

Ubestemtheden bestemmes af:

$$\begin{aligned}
 S_{K_s} = & \sqrt{\left(\frac{\partial K_s}{\partial \tau_s} S_{\tau_s}\right)^2 + \left(\frac{\partial K_s}{\partial C} S_C\right)^2 + \left(\frac{\partial K_s}{\partial T_{slut}} S_{T_{slut}}\right)^2 +} \\
 & \left(\frac{\partial K_s}{\partial Q_{tilf}} S_{Q_{tilf}}\right)^2 + \left(\frac{\partial K_s}{\partial T_o} S_{T_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial K_s}{\partial T_s} S_{T_s}\right)^2 = \\
 & \sqrt{\left(\frac{-K_s}{\tau_s} S_{\tau_s}\right)^2 + \left(\left(\frac{K_s}{C} - \frac{Q_{tilf}}{\tau_s \cdot C \cdot (T_{slut} - \frac{Q_{tilf}}{C} - T_o)}\right) S_C\right)^2 +} \\
 & \left(\frac{-C \cdot S_{T_{slut}}}{\tau_s \cdot (T_{slut} - \frac{Q_{tilf}}{C} - T_o)}\right)^2 + \left(\frac{S_{Q_{tilf}}}{\tau_s \cdot (T_{slut} - \frac{Q_{tilf}}{C} - T_o)}\right)^2 + \\
 & \left(\frac{-C \cdot (T_{slut} - \frac{Q_{tilf}}{C} - T_s) \cdot S_{T_o}}{\tau_s \cdot (T_s - T_o) \cdot (T_{slut} - \frac{Q_{tilf}}{C} - T_o)}\right)^2 + \left(\frac{C \cdot S_{T_s}}{\tau_s \cdot (T_s - T_o)}\right)^2
 \end{aligned}$$

I dette beregningseksempel forudsættes det, at afkølingsperioden på 24 timer efterfølges af en 3 timers opvarmningsperiode med et solfangervæskeflow på 10 l/min og en effektoverførsel på 1000 W. Opvarmningsperioden opdeles i halvtimer. Lagervolumenet er 300 l, lagertemperaturen ved starten af afkølingsperioden er 60°C, lagerets omgivelsestemperatur er 25°C, lagerets varmetabskoefficient under solfangerdrift er 5 W/°C, ubestemtheden for lagerets varmetabskoefficient under solfangerdrift er 0,3 W/°C og den relative % ubestemthed for varmelagringskapaciteten er 0,7. For forskellige varmetabskoefficienter beregnes ubestemtheden af ovenstående ligning. Resultaterne er angivet i tabel 11.

Varmetabs- koefficient, K_S	Varmetabs- koefficientens ubestemthed, S_{K_S}	Relativ ube- stemthed for varmetabskoeff- ficienten %
$W/^\circ C$	$W/^\circ C$	
2	0,32	16,2
3	0,34	11,4
4	0,36	9,0
5	0,38	7,6

Tabel 11. Eksempler på størrelsen af varme-
tabskoefficientens måleubestemthed.

Målenøjagtigheden er for typiske størrelser af varmetabskoefficienten tilfredsstillende. Den relative ubestemthed er dog temmelig stor for små varmetabskoefficienter.

Varmeoverføringsevnen, H

Varmeoverføringsevnen beregnes af formlen:

$$H = -m C_{p_{T_m}} \cdot \ln \left(1 - \frac{T_f - T_r}{T_f - T_l} \right)$$

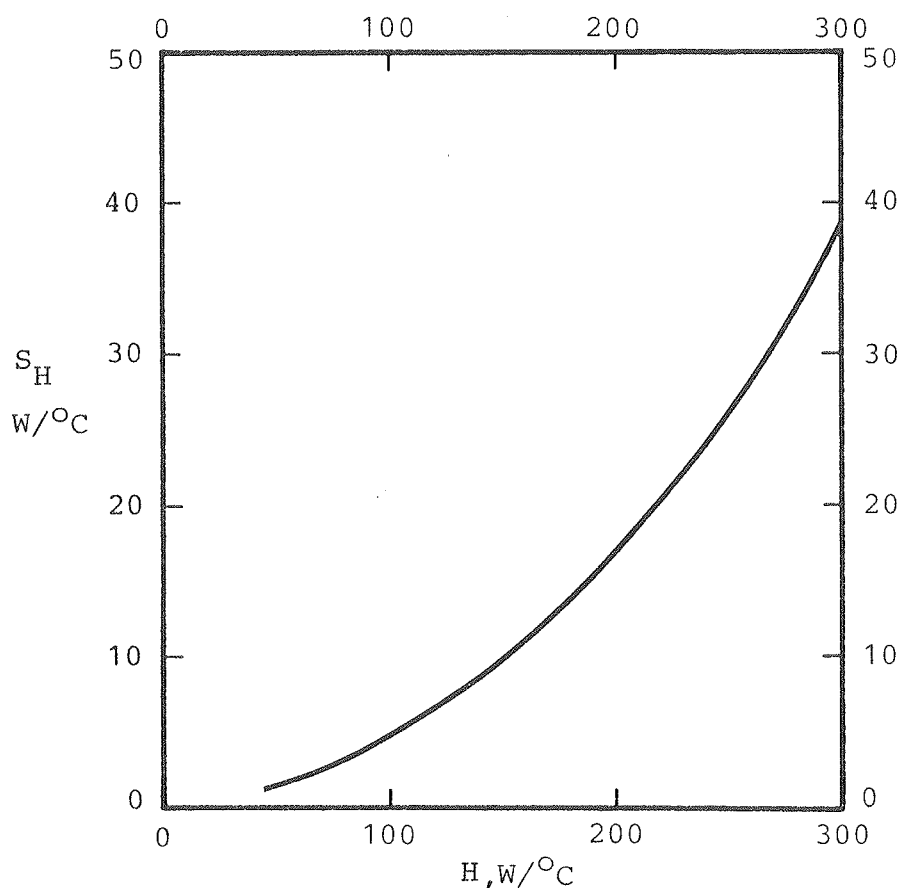
Ubestemtheden bestemmes af:

$$S_H = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial m} S_m \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial C_{p_{T_m}}} S_{C_{p_{T_m}}} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial (T_f - T_r)} S_{(T_f - T_r)} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial T_f} S_{T_f} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial T_l} S_{T_l} \right)^2} = \sqrt{\left(\frac{H}{m} S_m \right)^2 + \left(\frac{H}{C_{p_{T_m}}} S_{C_{p_{T_m}}} \right)^2 + \left(\frac{-m \cdot C_{p_{T_m}} \cdot S_{(T_f - T_r)}}{T_f - T_l - (T_f - T_r)} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{m \cdot C_{p_{T_m}} \cdot (T_f - T_r) S_T}{(T_f - T_l) \cdot (T_f - T_l - (T_f - T_r))} \right)^2}$$

I dette beregningseksempel forudsættes det, at lagervolumenet er 300 l. Solfangervæskeflowet er 0,02 l/min pr. l lager og effekttilførslen til lageret er 6 W pr. l lager. De beregnede ubestemtheder for forskellige varmeoverføringssevner er angivet i tabel 12 og figur 21.

Varmeoverførings- evne, H $W/^{\circ}C$	Varmeoverførings- evnens ubestemt- hed, S_H $W/^{\circ}C$	Relativ ubestemthed for varmeoverførings- evnen %
100	4,7	4,7
150	9,8	6,5
200	16,9	8,5
300	38,0	12,7

Tabel 12. Eksempler på størrelsen af varmeoverførings-
evnens måleubestemthed.



Figur 21. Beregnet måleubestemthed for varme-
overføringssevnen som funktion af
varmeoverføringssevnen.

Målenøjagtigheden er for typiske størrelser af varmeoverføringssevnen tilfredsstillende. Det bemærkes, at den relative ubestemthed vokser kraftigt med voksende varmeoverførings-evne.

Referencer

- [1] "Prøvning af varmelagerunits til solvarmeanlæg". Simon Furbo. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. Energiministeriets Varmelagerprojekt. Rapport nr. 5, April 1980.
- [2] "Solar Energy Thermal Processes". J.A. Duffie & W.A. Beckman. Solar Energy Laboratory. University of Wisconsin-Madison. 1974.
- [3] "Prøvning af varmelager til solvarmeanlæg til brugsvand, fabrikat Metro", Ole Ravn. Laboratoriet for Varmeisolering, rapport nr. 82-38, juli 1982, prøvning foretaget for prøvestationen for solvarmeanlæg.
- [4] "Matematiske modeller til simulering af varmelagres termiske egenskaber". Ole Ravn. Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 81-31. December 1981. Konsulentarbejde for prøvestationen for solvarmeanlæg.
- [5] "Prøvning af varmelagre". Jan-Erik Larsen. Laboratoriet for Varmeisolering. Rapport nr. 82-61.
- [6] "Prøvning af varmelager til solvarmeanlæg til brugsvand, fabrikat Dansk Solvarme". Ole Ravn. Laboratoriet for Varmeisolering, rapport nr. 82-32, juli 1982, prøvning foretaget for prøvestationen for solvarmeanlæg.
- [7] "Prøvning af varmelager til solvarmeanlæg til brugsvand, fabrikat AR-CON Solvarme ApS". Ole Ravn. Laboratoriet for Varmeisolering, rapport nr. 82-33, juli 1982, prøvning foretaget for prøvestationen for solvarmeanlæg.

- [8] "Prøvning af varmelager til solvarmeanlæg til brugsvand, fabrikat AR-CON Solvarme ApS". Ole Ravn. Laboratoriet for Varmeisolering, rapport nr. 82-34, juli 1982, prøvning foretaget for prøvestationen for solvarmeanlæg.

- [9] "Prøvning af varmelager til solvarmeanlæg til brugsvand, fabrikat Sdr. Højrup Maskinfabrik a/s". Ole Ravn. Laboratoriet for Varmeisolering, rapport nr. 82-35, juli 1982, prøvning foretaget for prøvestationen for solvarmeanlæg.

- [10] "Prøvning af varmelager til solvarmeanlæg til brugsvand, fabrikat Sdr. Højrup Maskinfabrik a/s". Ole Ravn. Laboratoriet for Varmeisolering, rapport nr. 82-36, juli 1982, prøvning foretaget for prøvestationen for solvarmeanlæg.

- [11] "Prøvning af varmelager til solvarmeanlæg til brugsvand, fabrikat HS Kedler". Ole Ravn. Laboratoriet for Varmeisolering, rapport nr. 82-37, juli 1982, prøvning foretaget for prøvestationen for solvarmeanlæg.

- [12] "Solindfald og solvarmeanlæg - målt og beregnet". Henrik Lawaetz. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Oktober 1980. Meddelelse nr. 106.

ENERGIMINISTERIETS MINDRE VARMELAGRE,
Projekt under Solvarmeprogrammet

Projektorganisation

Styregruppe

Energiministeriet har fra september 1981 udpeget følgende styregruppe for solvarmeprogrammet:

V. Korsgaard, professor, Lab. for Varmeisolering, DTH, (formand).
P. Ahrenst, kontorchef, Boligselskabernes Landsforening.
P. Alling, direktør, Dansk Solvarme K/S.
E. Christoffersen, afd.leder, Statens Byggeforskningsinstitut.
P. Dirks, afdelingsingeniør, Dansk Kedelforening.
J. Fischer, direktør.
K. Hallgreen, ingeniør, Danfoss A/S.
O. Dietrich, kontorchef, dr.phil, Energiministeriet.
E. Jerking, Byggestyrelsen, energikontoret.
N.I. Meyer, professor, Fys. Lab. III, DTH.
J.S.R. Nielsen, civilingeniør, Birch og Krogboe.
V.S. Pejtersen, civilingeniør, Risø.
E. Petersen, lektor, Kem. Lab. I, H.C. Ørstedes Instituttet.
P. Steensen, civilingeniør, Teknologisk Institut.
P.J. Snare, civilingeniør, Energistyrelsen.

Projektmedarbejdere fra

Laboratoriet for Varmeisolering, DTH:

S. Eidorff, civilingeniør, lic.techn.
S. Furbo, civilingeniør, stud. lic. techn.
K.K. Hansen, akademiingeniør, lic.techn.
P.N. Hansen, lektor, lic.techn.
J.E. Larsen, akademiingeniør.
N. Mejlhede Jensen, civilingeniør, lic.techn.
O. Dyrnum, civilingeniør.
S. Pedersen, civilingeniør, lic.techn.
V. Ussing, civilingeniør, (projektleder).

Liste over udkomne rapporter

- Nr. 1 Litteraturundersøgelser og vurdering af kemiske varmelagre. 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. Anker Nielsen, februar 1980.

- Nr. 4 Beregning af energiforbrug i bygninger (EFB-1) Brugervejledning for TI-59. Anker Nielsen, februar 1980.

- Nr. 5 Prøvning af varmelagerunits til solvarmeanlæg. Simon Furbo, april 1980.

- Nr. 6 Beregning af ruminddelte bygningers energiforbrug. Anker Nielsen, oktober 1980.

- Nr. 7 Vinduets betydning for enfamiliehusenes energiforbrug. Anker Nielsen, november 1980.

- Nr. 8 Heat Storage with an incongruently melting salt hydrate as storage medium based on the extra water principle. Simon Furbo, december 1980.

- Nr. 9 Enfamiliehuse med glasbeklædte uderum. Anker Nielsen, marts 1981.

- Nr. 10 Kemiske varmelagre. Teori og praksis. Peter L. Christensen, december 1981.

- Nr. 11 Varmtvandsforbrug i boliger. Niels Mejlhede Jensen, februar 1982.

ABSTRACT

Test facilities for heat storages for solar heating systems for domestic hot water supply have been constructed. Test procedures for the heat storages have been developed. The test procedures have been used to test heat storages marketed in Denmark. In this way experiences concerning the test procedures and different constructions of heat storages have been gained.

The test facilities and test procedures are described. The following characteristics for each heat storage are measured/investigated:

- the thermal loss coefficient during a period with the solar collector in operation.
- the thermal loss coefficient during a period without solar collector operation.
- the heat storage capacity.
- the heat transfer power per °C temperature difference between the solar collector fluid and the heat storage for different storage temperatures.
- the pressure drop across the heat storage for different solar collector fluid volume flows.
- the dynamic behaviour of the heat storage.

The results of one of the tested heat storages are given. Further, the experiences concerning the test procedures and the design of heat storages gained during the tests are described.