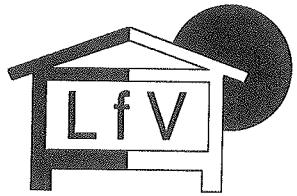


TEMPERATURSTRATIFICERING I VARMELAGRE



PETER FAGERLUND CARLSSON

MEDDELELSE 272. JANUAR 1995
LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET

Forord

Denne rapport beskriver resultaterne af mit Ph.D.-studium, som er udført ved Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Universitet, under vejledning af hovedvejleder professor Svend Svendsen og medvejleder Ph.D. Simon Furbo.

Ph.D.-studiet startede februar 1992 og er finansieret af Danmarks Tekniske Universitet. Ph.D.-studiet afsluttes februar 1995.

Delresultater fra projektet er beskrevet i notatet: "Heat Storage for Large Low Flow Solar Heating Systems", som blev præsenteret på ISES Solar World Congress i Budapest, Ungarn. Dette notat er medtaget som appendiks 1.

Energistyrelsen har finansieret opbygningen af forsøgsopstillingen i Laboratoriets forsøghal og indkøb af måleudstyr til solvarmeanlægget i Glostrup. Uden denne støtte havde det ikke været muligt at udføre de praktiske målinger, der er beskrevet i denne rapport. Jeg er yderst taknemmelig for den økonomiske støtte fra Energistyrelsen.

En tak til Svend Svendsen, Simon Furbo og de øvrige medarbejdere på Laboratoriet for Varmeisolering for vejledning og et inspirerende arbejdsmiljø.

Peter Fagerlund Carlsson
Januar 1995

Indholdsfortegnelse

	Side
Resumé	1
Summary	2
1. Indledning	3
1.1 Baggrund for projektet	3
1.2 Projektets formål	4
2. Varmelagerets principielle udformning	5
2.1 Lager	6
2.1.1 Varmeveksler	6
2.1.2 Temperaturlagdeling	7
3. Eksperimentelle undersøgelser af lager	9
3.1 Forsøgsopstilling og måleprincipper	9
3.1.1 Indløbsudformninger	13
3.2 Måleresultater	16
3.2.1 Varmetab fra lageret	16
3.2.2 Tapning af brugsvand fra lageret	17
3.2.3 Suppleringskredsens indflydelse på temperaturlagdelingen	17
3.2.4 Cirkulationskredsens indflydelse på temperaturlagdelingen	21
3.2.5 Solopvarmning	28
3.2.6 Forsøg med alle kredse i drift	29
4. Måling på lager i mellemstort solvarmeanlæg	31
4.1 Lageropbygning og målesystem	31
4.2 Eksempler på måleresultater	33
4.3 Månedsværdier for de første seks måneder	37
5. Beregningsmodel	41
5.1 Lager	41
5.1.1 Beregningsmodel med et variabelt antal lag	45
5.2 Beregningsmodel for solvarmeanlæg	53
6. Sammenligning mellem målinger og beregninger	59
6.1 Lager i forsøgsopstilling	59
6.2 Lager i mellemstort solvarmeanlæg	62
7. Årssimuleringer med parametervariationer for anlæg	65
8. Konklusion	69

	Side
Referencer	71
Symbolliste	73
Figurliste	75
Tabelliste	77
Ph.D. afhandlinger fra Laboratoriet for Varmeisolering	79
Appendiks 1 "Heat Storage for Large Low Flow Solar Heating Systems"	81
Appendiks 2 Måleusikkerheder	87

Resumé

Rapporten beskriver et eksperimentelt og teoretisk arbejde vedrørende temperaturlagdeling i varmelagre. Der tages udgangspunkt i lagre til mellemstore solvarmeanlæg, hvor den øverste del af lageret opvarmes af suppleringsenergi og den nederste del af lageret opvarmes af solvarme. Det er uheldigt, hvis forhold i lageret forårsager opblanding mellem det suppleringsopvarmede vand i toppen og koldere vand nedenunder. En opblanding vil reducere solvarmeanlæggets ydelse betragteligt.

I forsøgene er anvendt en $2,0 \text{ m}^3$ lodretstående forrådsbeholder som varmelager, hvor varmeudveksling i suppleringskreds og solarmekreds foregår via pladevarmevekslere.

Indløbsudformningen til lageret for de enkelte kredse og volumenstrømmenes størrelse har stor betydning for temperaturlagdelingen i lageret.

Der er udført forsøg med fem forskellige indløbsudformninger. Målingerne fra forsøgsopstillingen viser, at en bøjning der fører vandet vandret ud langs beholdervæggen, er den indløbsudformning, der har de dårligste egenskaber. Dette skyldes, at bøjningen sætter hele lagervolumenet i rotation og dermed forårsager en kraftig opblanding i lageret. Desværre har en del beholderfabrikanter anvendt denne løsning på deres beholdere gennem de seneste mange år. Det kan under ingen omstændigheder anbefales at anvende en bøjning som indløbsudformning.

Direkte indløb og perforeret rør kan kun anbefales anvendt ved små volumenstrømme.

T-stykket er en god indløbsudformning og kan anbefales til større volumenstrømme.

Ved meget store volumenstrømme, f.eks. i cirkulationskredsen, vil parallelle plader med fordel kunne anvendes. Løsningen består af to horisontale cirkulære plader placeret i midten af lageret, hvormellem vandet ledes ud i lageret.

Erfaringerne fra forsøgene er anvendt ved udformningen af lageret til et 78 m^2 solvarmeanlæg i Glostrup. Målinger på temperaturlagdelingen i lageret viser, at der kun sker en ganske lille opblanding i lageret, selv om volumenstrømmene i de enkelte kredse gennem lageret er op til $4 \text{ m}^3/\text{h}$.

Der er udviklet en numerisk beregningsmodel for lageret. Den én-dimensionale beregningsmodel beregner temperaturlagdelingen ved anvendelse af et variabelt antal fuldt opblandede lag, der både kan ændre størrelse og placering fra tidsskridt til tidsskridt.

Resultater fra beregningsmodellen sammenlignet med målinger viser en tilfredsstillende overensstemmelse.

Beregningsmodellen for lageret er sammenkædet med en beregningsmodel for solfangerfeltet, således at et solvarmeanlægs årsydelse kan beregnes. Beregninger viser, at det er muligt at opnå en årsydelse på ca. $500 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ år})$, under forudsætning af et veldimensioneret anlæg med en dækningsgrad på ca. 50 % ekskl. cirkulationstab.

Målinger på solvarmeanlægget i Glostrup fra den 1. juli til 31. december 1994 viser en ydelse på $200 \text{ kWh}/\text{m}^2$.

Summary

The report describes an experimental and theoretical piece of work concerning temperature stratification in heat storage tanks. Heat storage tanks for large solar heating systems are taken as starting point. The upper part of the storage tank is heated by auxiliary energy and the lower part of the storage tank is heated by solar energy. It would be disadvantageous if conditions in the storage tank cause mixing of the auxiliary heated water at the top and the colder water underneath. A mixing would reduce the performance of the solar heating system considerably.

In the tests a 2.0 m³ vertical storage tank was used as heat storage tank in which the heat exchanger in the auxiliary loop and the solar heating loop takes place through plate heat exchangers.

The design of the inlet to the storage tank of the single loops and the size of the volume flow rates have a great influence on the temperature stratification in the storage tank.

Tests have been made with five different designs of inlet. The measurements from the test set-up show that a bent leading out the water horizontally along the storage tank wall is the design of inlet that has the poorest qualities. This is owing to the fact that the bent makes all the storage volume rotate causing a heavy mixing in the storage tank. Unfortunately, some tank manufacturers have applied this solution to their storage tanks for many years. Under no circumstances it can be recommended to use a bent as a design of inlet.

Direct inlet and perforated pipe can only be recommended at small volume flow rates.

The T-piece is a good design of inlet and can be recommended for larger volume flow rates.

At very large volume flow rates in e.g. the circulation loop parallel plates may be used with advantage. The solution consists of two horizontal circular plates placed in the middle of the storage tank between which the water is led into the storage tank.

The experiences from the tests have been used at the design of the storage tank for a solar heating system of 78 m² in Glostrup. Measurings of the temperature stratification in the storage tank show that there is only a slight mixing in the storage tank even though the volume flow rates in the single loops through the storage tank are up to 4 m³/h.

A numerical calculation model has been developed for the storage tank. The one-dimensional calculation model calculates the temperature stratification at the use of a various number of fully mixed layers which can change size as well as placing from time step to time step.

Results from the calculation model compared with measurements show a satisfactory similarity.

The calculation model for the storage tank is linked up with a calculation model for the solar collector section so that the annual performance of a solar heating system can be calculated. Calculations show that it is possible to obtain an annual performance of about 500 kWh/(m²year), assuming a well-dimensioned system with a solar fraction of about 50% exclusive of loss of circulation.

Measurements of the solar heating system in Glostrup from 1 July to 31 December 1994 show a performance of 200 kWh/m².

1. Indledning.

Efter fremlæggelsen af handlingsplanen Energi 2000 er der sat fokus på, hvordan bl.a. CO₂ belastningen af miljøet begrænses mest muligt. Udnyttelse af vedvarende energikilder belaster miljøet mindre end anvendelse af fossile brændsler.

Anvendelse af solvarme er steget markant de seneste år. Specielt mindre solvarmeanlæg til parcelhuse er populære. Dette skyldes befolkningens ønske om at værne om miljøet, men også et tilskud fra staten på op til 30 % af anlægsinvesteringen har gjort solvarme interessant.

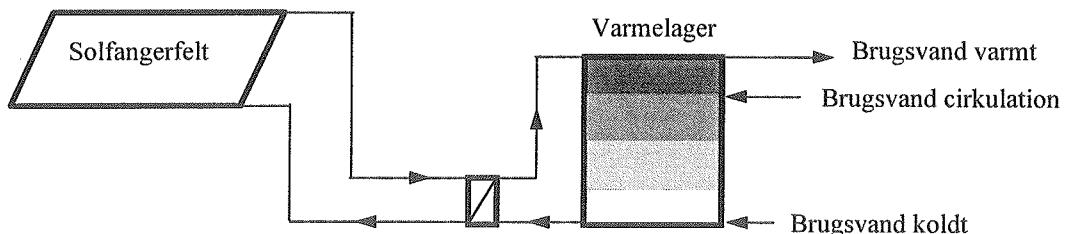
Mellemløse solvarmeanlæg til bl.a. institutioner og boligblokke er også et område i stærk udvikling. I takt med at bygherrer og rådgivere får større kendskab til de tekniske og økonometriske forhold, opføres nu flere mellemløse solvarmeanlæg.

1.1 Baggrund for projektet.

Solvarmeanlæggets varmelager har stor betydning for solvarmeanlæggets ydelse. Det er derfor vigtigt med et korrekt dimensioneret og velfungerende varmelager, hvor temperaturstratificeringen oprettholdes i størst muligt omfang. Temperaturstratificeringen benævnes også temperaturlagdelingen og er et udtryk for temperaturvariationerne mellem det varme vand i toppen og det kolde vand i bunden af varmelageret.

Erfaringer fra et mellemløst solvarmeanlæg i Sønderborg viste, at det er vigtigt med et velfungerende varmelager.

I 1987 blev der på Statens Søfartsskole i Sønderborg opført et 44 m² stort solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning, med en 2,0 m³ varmtvandsbeholder som varmelager, se /1/.



Figur 1.1 Principskitse af solvarmeanlæg i Sønderborg.

Målinger på dette anlæg viste, at solvarmeanlæggets ydelse var væsentligt lavere end man havde forventet. En nærmere undersøgelse af solvarmeanlægget viste, at den lavere ydelse skyldtes en ødelæggelse af temperaturlagdelingen i varmelageret.

Det viste sig, at den fordelagtige temperaturlagdeling i varmelageret blev væsentligt forringet af cirkulationsledningens væskestørrelse gennem varmelageret. Den manglende temperaturlagdeling i varmelageret blev midlertidigt afhjulpet ved at nedsætte den cirkulerende vandmængde i cirkulationsledningen fra ca. 2000 l/h til 400 l/h. Nedsættelsen af volumenstrømmen forårsagede dog for lave temperaturer i brugsvandssystemet med efterfølgende klager fra Søfartsskolens elever.

En forespørgsel hos beholderfabrikanter viste, at det var et kendt problem, at væskestørme gennem varmelageret kan ødelægge temperaturlagdelingen. Beholderfabrikanternes kendskab til problemet stammede specielt fra fjernvarmeopvarmede varmelagre, hvor ødelæggelse af temperaturlagdelingen i varmelageret medførte en uønsket dårlig afkøling af fjernvarmenvandet.

Beholderfabrikanterne havde forskellige forslag til, hvordan sådanne problemer kunne undgås. Nogle af beholderfabrikanterne påsvejste som standard en bøjning ved indløbene til varmelageret, således at bøjningen fører vandet vandret ud langs beholdersiden. Denne løsningsmetode mente nogle af beholderfabrikanterne var langt bedre end at føre vandet direkte ind i varmelageret. I tilfælde med store cirkulerende vandmængder, f.eks. i cirkulationsledningen, påsatte nogle af beholderfabrikanterne et perforeret rør, der består af et rørstykke, som stikker vandret ind i varmelageret, hvori der er boret mange små huller.

Beholderfabrikantens forbedringer viste sig desværre ikke i alle tilfælde at kunne afhjælpe problemet med opblanding i varmelageret. Dette viste, at det er nødvendigt med forskning inden for varmelagerets termiske virkemåde.

1.2 Projektets formål.

Projektets formål er at optimere varmelageret for mellemstore solvarmeanlæg til brugs-vandsopvarmning. Ud fra målinger i Laboratoriets forsøgshal undersøges hvordan væskestømmene gennem varmelageret påvirker temperaturlagdelingen, og hvordan varmelageret udformes, således at temperaturlagdelingen opretholdes.

Erfaringer fra målingerne anvendes til at udforme et varmelager, der anvendes til et mellemstort solvarmeanlæg. Efterfølgende målinger på solvarmeanlæggets varmelager skal vise, om temperaturlagdelingen opretholdes.

En præcis beregning af et solvarmeanlægs årsydelse kræver en beregningsmodel, der efterligner varmelagerets termiske virkemåde bedst muligt. Det er derfor et ønske at anvende en beregningsmodel, der regner præcist - også i de tilfælde, hvor der er mange væskestømme gennem varmelageret. Derfor udvikles en beregningsmodel for varmelageret, og beregningerne sammenlignes med målinger. Varmelagermodellen sammenkædes med en beregningsmodel for solfangerfeltet, således at et solvarmeanlægs årsydelse kan beregnes.

2. Varmelagerets principielle udformning.

Ved projektering af solvarmeanlæg skal følgende vurderes:

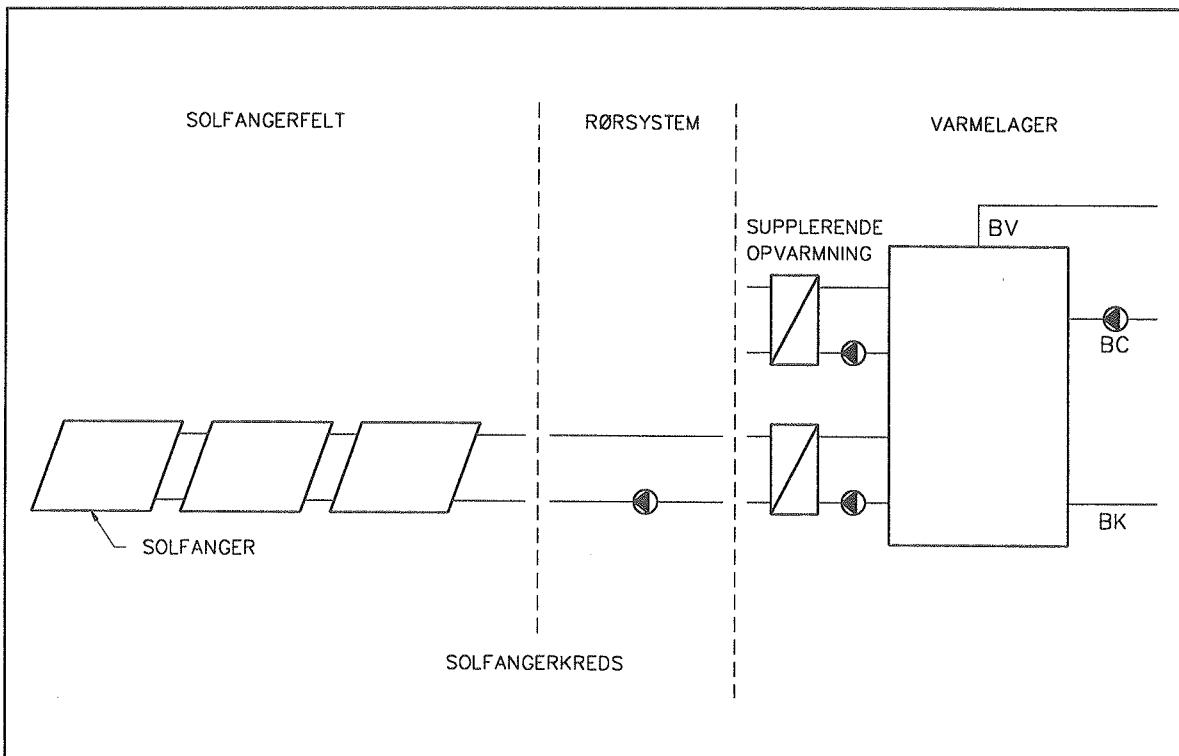
- Teknisk udformning.
- Ydelse og energibesparelse.
- Pris.

Som værktøj til den tekniske udformning kan bl.a. peges på BPS-publikation 94, /2/. Ud fra BPS-publikation 94 kan den projekterende udforme et solvarmeanlæg.

Solvarmeanlæggets ydelse kan vurderes ud fra simplificerede beregningsmetoder, f.eks. ydelseskurver fra /2/. Endvidere kan anvendes mere avancerede beregningsprogrammer, der beregner ydelsen mere præcist.

Prisen for anlægget kan bestemmes ud fra kendskab til materialepriser, arbejdsløn etc. Et hurtigt prisoverslag kan bl.a. bestemmes ud fra priskatalog for større solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning, /3/.

Opbygningen af et typisk solvarmeanlæg er vist på figur 2.1. Den energi, som solfangerfeltet producerer, transporterer via rørsystemet til varmelageret, hvor energien lagres. Varmelageret er opbygget af beholder og varmevekslere inkl. pumper. Varmelager forkortes i det efterfølgende til lager.



Figur 2.1 Principopbygning af solvarmeanlæg.

Solfangerfeltet er opbygget af solfangere. Solfangerfeltet og rørsystemet kaldes solfangerkredsen. For en detaljeret gennemgang af en solfangers opbygning henvises til /4/. For en detaljeret beskrivelse af lagerudformning og lagerets termiske virkemåde henvises til /2/ og /5/.

2.1 Lager.

I solvarmanlæggets lager lagres solenergien til senere brug. Lagringsmediet er normalt vand. Solarmen tilføres gennem solarmeveksleren i den nederste del af lageret.

Den øverste del af lageret opvarmes via suppleringsvarmeveksleren. Der kan derfor altid tappes varmt brugsvand (BV) fra toppen af lageret, selvom solen ikke skinner. Når der er varmtvandsforbrug tilføres koldt vand (BK) i bunden af lageret, se figur 2.1.

På de fleste større anlæg tilsluttes en cirkulationsledning til lageret, så der altid er varmt vand fremme ved tappestederne. Cirkulationsledningen har normalt et stort varmetab, men forhindrer vandspild, når der forbruges vand ved tappestederne. Returvandet fra cirkulationsledningen (BC) føres ind i den øverste del af lageret.

Størrelsen af lageret, der opvarmes af suppleringsvarmen, dimensioneres ud fra kendskab til bebyggelsens varmtvandsforbrug. Lagervolumenet mellem underkanten af det suppleringsopvarmede volumen og underkanten af solarmeveksleren opvarmes af solarmen. Størrelsen af solarmevolumenet dimensioneres ud fra solfangerarealet. Det volumen, der ligger under det solopvarmede volumen, opvarmes ikke og anvendes til opsamling af kalkslam i lageret.

2.1.1 Varmeveksler.

Varmevekslere anvendes til varmeudveksling mellem to væsker.

Solarmeveksleren anvendes, fordi solfangervæsken og brugsvandet ikke må blandes, og fordi det store tryk i lageret vil kunne ødelægge solfangeren.

Varmevekslerens kapacitet udtrykkes ved varmevekslerens varmeoverføringsevne [W/K].

Varmeveksleren er enten placeret i beholderen eller placeret uden for beholderen. Valg af varmevekslertype afhænger hovedsageligt af varmevekslerkapacitet og pris.

Spiralvarmevekslere er et eksempel på en varmeveksler, der placeres i beholderen. Spiralvarmevekslere giver en god varmeoverføringsevne, men pladsforhold i beholderen kan gøre spiralvarmevekslere uegnet, samtidig med at den er vanskelig at servicere, f.eks. rense for kalk.

Pladevarmevekslere placeres uden for beholderen. Anvendelse af pladevarmevekslere medfører brug af en ekstra pumpe, og der sker ekstra varmetab fra varmeveksleren. Til gengæld en den forholdsvis nem at servicere, f.eks. rengøre for kalk.

Solarmeveksleren afkøler væsken i solfangerkredsen og opvarmer brugsvand, der cirkulerer gennem varmeveksleren. I det efterfølgende benævnes brugsvandskredsen for solkredsen.

2.1.2 Temperaturlagdeling.

I temperaturområdet fra 5 °C til 100 °C får vand lavere densitet ved stigende temperatur. Denne egenskab samt vands lave varmeledningsevne muliggør, at der opbygges en stor temperaturlagdeling i lageret.

Et korrekt dimensioneret lager med størst mulig temperaturlagdeling er en vigtig forudsætning for størst mulig solfangerydelse. Solfangerens effektivitet afhænger af middelvæsketemperaturen i solfangeren, således at lavere middeltemperatur giver større effektivitet. Ved stor temperaturlagdeling i lageret vil solfangeren producere solenergi ved en lavere middeltemperatur, end hvis lageret havde været opblandet.

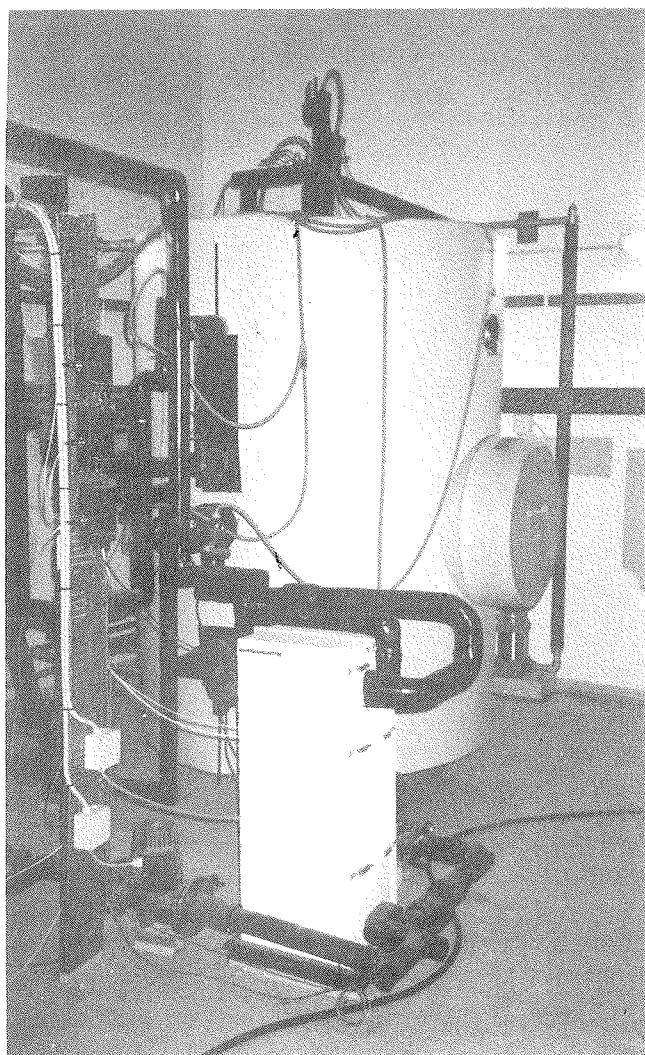
En stor temperaturlagdeling er en nødvendighed i et lager, der både opvarmes af solenergi og en supplerende energikilde. Det er nødvendigt med ca. 55 °C i toppen af lageret, og det vil være meget uheldigt, hvis denne varme breder sig nedad og hermed ødelægger temperaturlagdelingen i lageret. Væskestrømmene gennem lageret opbygger temperaturlagdelingen i lageret. Som eksempel på disse væskestrømme kan nævnes solopvarmning og tapning af varmt brugsvand.

3. Eksperimentelle undersøgelser af lager.

Varmelagres optimale udformning, herunder indløbsudformningens indflydelse på temperaturlagdelingen i lageret er forsøgt belyst ved hjælp af en forsøgsopstilling, der til lejligheden er opbygget i Laboratoriets forsøgshal.

3.1 Forsøgsopstilling og måleprincipper.

Varmelageret i forsøgsopstillingen er en $2,0 \text{ m}^3$ opretstående forrådsbeholder leveret af Kähler & Breum beholder- og maskinfabrik. Det er tilstræbt, at forsøgsopstillingen skal kunne efterligne de driftssituationer et lager normalt udsættes for. Figur 3.1 viser et udsnit af forsøgsopstillingen i Laboratoriets forsøgshal.



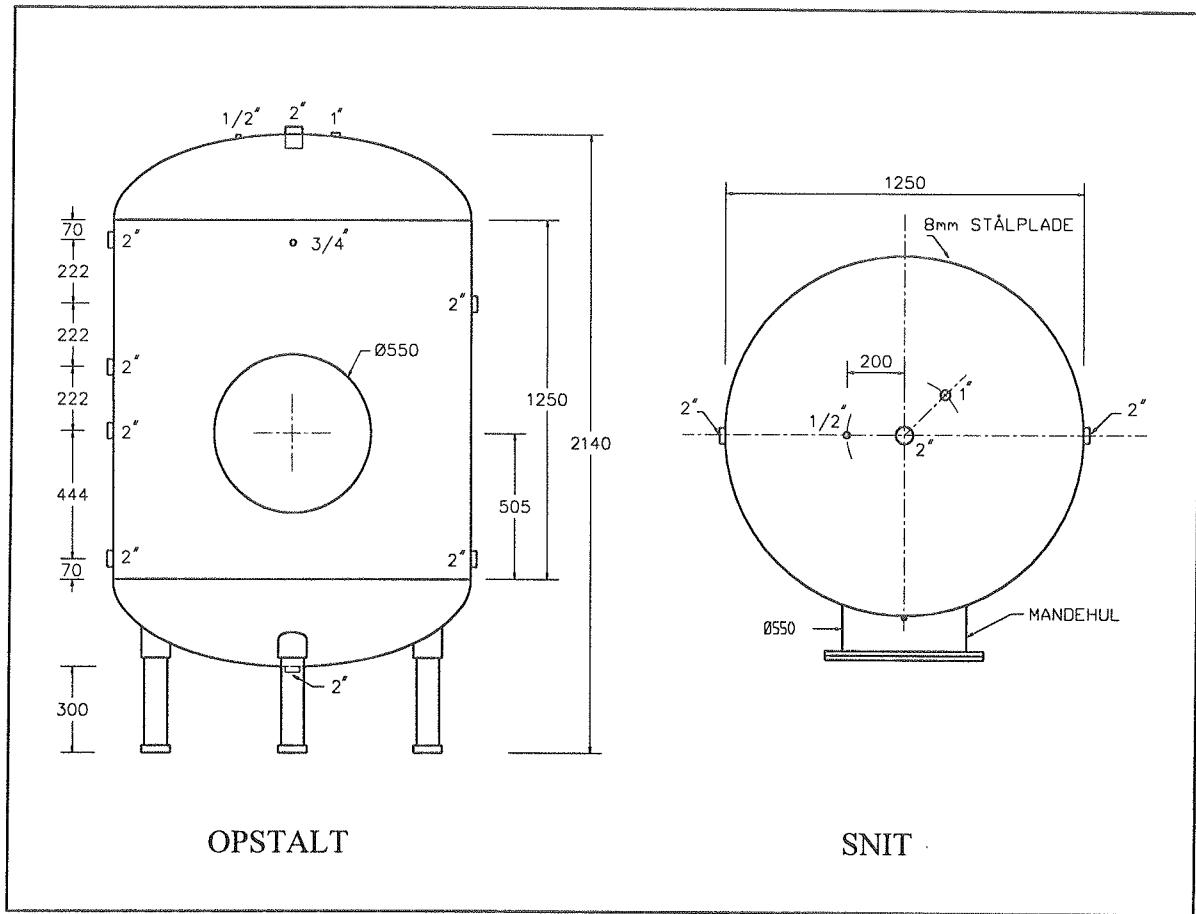
Figur 3.1 Forsøgsopstilling i Laboratoriets forsøgshal.

I forgrunden ses solvarmeveksleren og i baggrunden den $2,0 \text{ m}^3$ opretstående forrådsbeholder. Lageret er isoleret med en fabriksfremstillet $0,08 \text{ m}$ isoleringskappe, der er skræddersyet til lageret.

Stålbeholderens ydre diameter er $1,25 \text{ m}$, og den totale højde ekskl. ben er $1,8 \text{ m}$. Mandehul i beholderen muliggør indvendig inspektion, samt udskiftning af f.eks. indløbsudformninger.

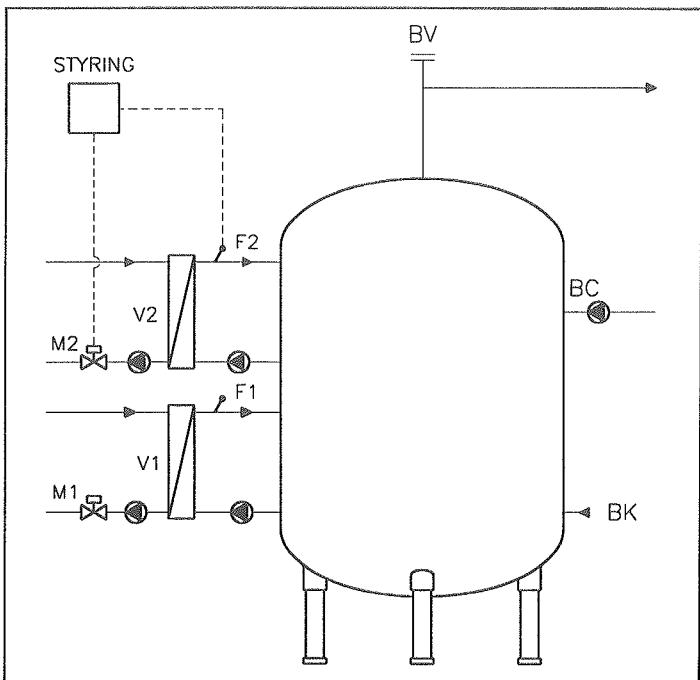
Lagerets nøjagtige volumen er målt til $1,97 \text{ m}^3$, fordelt på følgende måde:

Supp. opvarmet volumen:	$0,88 \text{ m}^3$
Solopvarmet volumen:	$0,80 \text{ m}^3$
Slam volumen:	$0,29 \text{ m}^3$



Figur 3.2 Lagerdimensioner.

Figur 3.2 viser udformningen af det anvendte lager. Alle 2" studse har et gennemgående indvendigt gevind, således at der nemt kan påmonteres forskellige indløbsudformninger inde i lagerets top. På lagerets top er der placeret 3 studse med hvert sit formål. 2" studsen anvendes til tapning af varmt brugsvand. Studsen er ført ca. 0,05 m ned i lageret, hvorved evt. luft i lageret ikke bliver ført ud i rørsystemet. 1/2" studsen anvendes til en automatisk luftudlader. 1" studsen anvendes til målerør, således at temperaturen inde i lageret kan måles. Udformningen af dette målerør er beskrevet senere i dette afsnit.



Figur 3.3 Lageropbygning.

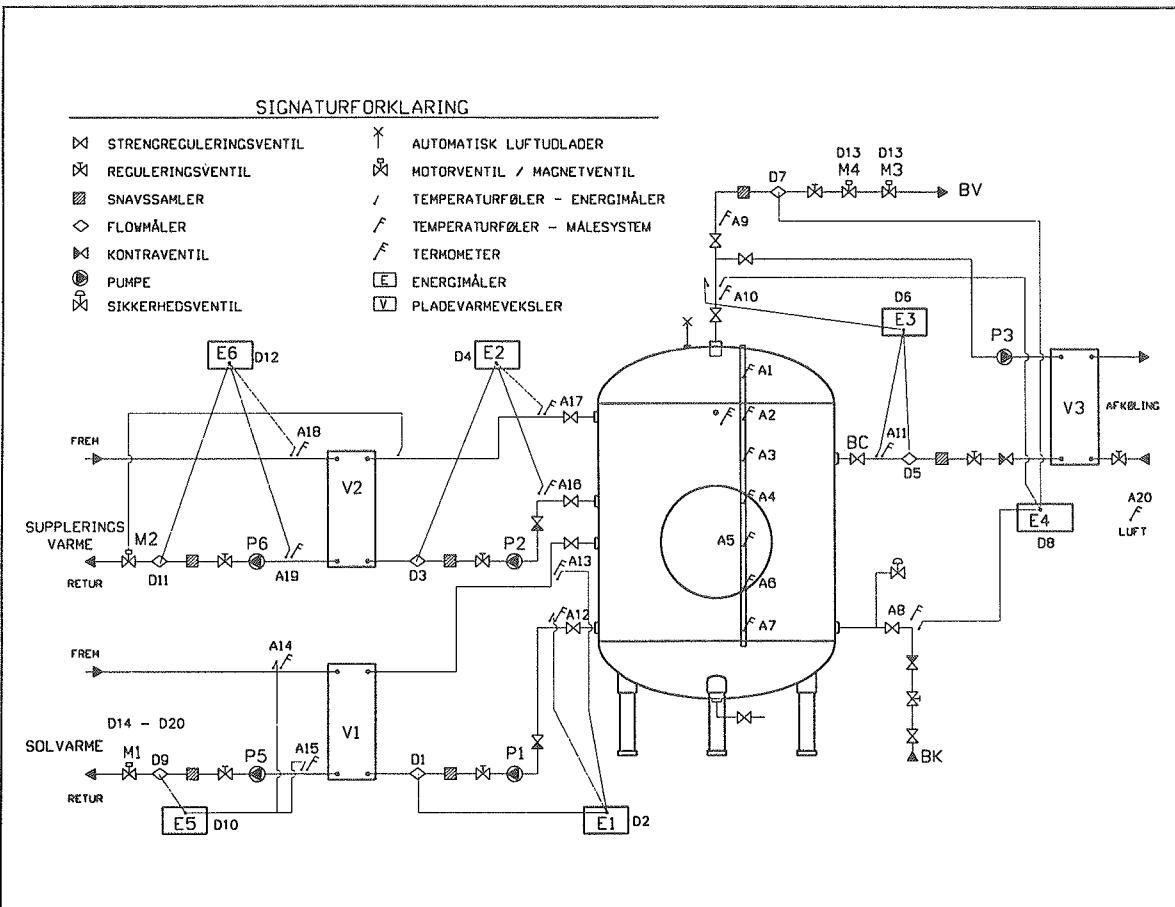
Den nederste del af lageret opvarmes via pladevarmeveksleren V1, som simulerer solvarmetilførslen til lageret. Energitilførslen reguleres af motorventil M1, se figur 3.3.

Den øverste del af lageret opvarmes af den supplerende energikilde via pladevarmeveksleren V2.

Konstant indløbstemperatur til lageret reguleres af motorventil M2.

Under tapninger fra toppen af lageret (BV) tilføres koldt brugsvand (BK) i bunden af lageret.

Cirkulationsledningen (BC) er tilsluttet lageret i den øverste del.



Figur 3.4 Udformning af forsøgsopstilling og målepunktsplacering.

Et avanceret målesystem der styres af en PC'er, registrerer alle vigtige måledata. Måleudstyret er af fabrikat Schlumberger og består af et stk. analogkort IMP 35951 C og et stk. digitalkort IMP 35952 A. Begge kort har 20 kanaler.

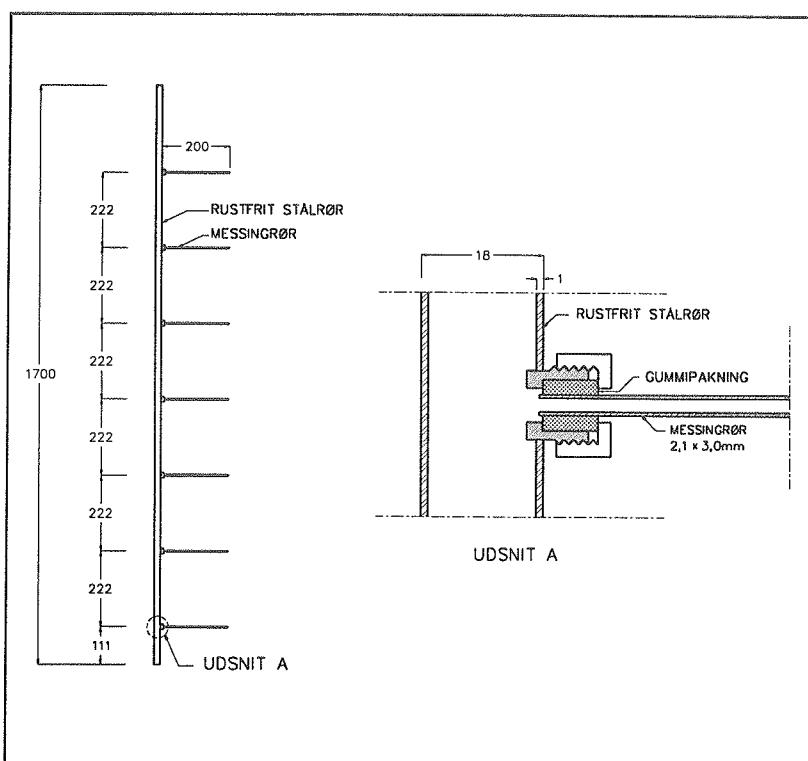
Et omfattende programmeringsarbejde har givet et fleksibelt målesystem, der, foruden at måle, også styrer motor- og magnetventiler M1, M3 og M4, se figur 3.4. Udskrift af programmet, der styrer målesystemet, findes i [6].

Temperaturmålinger måles med kobber-konstantan termoelementer, type TT. Disse målepunkter er på figur 3.4 angivet med A1 til A20. Temperaturdifferencer mellem ind- og udløb for solkreds, suppleringskreds, tappekreds og cirkulationskreds måles med termosøjler. Termosøjlerne er udført med fem følerelementer. Termosøjlerne er kalibreret og måleresultaterne fra kalibreringsforsøgene findes i appendiks 2.

Volumenstrømme måles med kombineret volumenstrøm- og energimåler type Grundfos EM25. Digitale signaler fra energimålerne E1 - E6 omdannes i målesystemet til volumenstrømme. Målerne er kalibreret og resultaterne af kalibreringsforsøgene findes i appendiks 2. Digitale måle- og styrepunkter er på figur 3.4 angivet med D1 til D20.

Et vigtigt led i forsøgene er en præcis måling af temperaturerne i lageret. Temperaturen måles syv steder i lageret, nummereret fra A1 til A7 på figur 3.4. Følgende forhold er blandt de vigtigste, når et målerør skal udformes:

- Temperaturer skal måles præcist i bestemte niveauer.
- Fysiske belastninger, f.eks. vandtryk op til seks bar.
- Målerøret skal påvirke måleresultaterne mindst muligt.



Figur 3.5 Udformning af målerør til måling af lagertemperaturer.
Termotråde og mineraluld er ikke vist.

Målerøret er udført af et 18 mm rustfrit stålør, hvori termotrådene føres. I hvert måleniveau tilsluttes et tyndt messinrør, som fastholdes af en gummidækning. Termotråd føres ud i hvert messinrør, således at målingen foretages i en afstand af 0,2 m fra det rustfri stålør.

I messinrøret skabes god kontakt til termotråden ved anvendelse af varmeledende pasta.

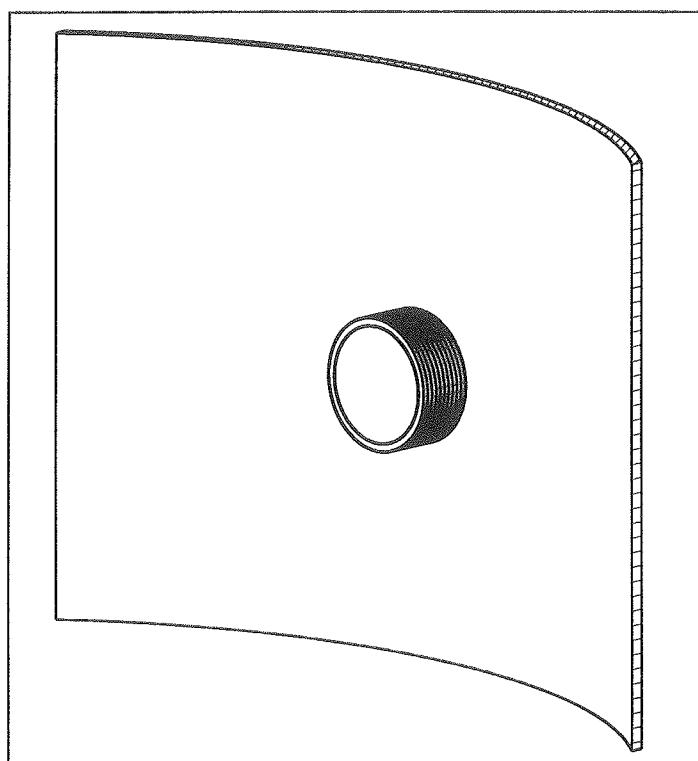
Varmeledningen mellem det rustfri stålrør og messingrøret er nedsat pga. gummipakningen. Interne luftstrømninger i det rustfri stålrør formindskes ved at fyldte røret med mineraluld. Det tynde rustfrit stålrør forårsager omrent samme varmeledning som det vandvolumen, det fortrænger.

3.1.1 Indløbsudformninger:

Udformningen af indløbet er vurderet til at have en væsentlig indflydelse på temperatur-lagdelingen i lageret. Derfor er egnetheden af fem forskellige indløbsudformninger undersøgt eksperimentelt. De fem indløbsudformninger er følgende:

- 1 Direkte indløb.
- 2 Bøjning.
- 3 T-stykke.
- 4 Perforeret rør.
- 5 Parallelle plader.

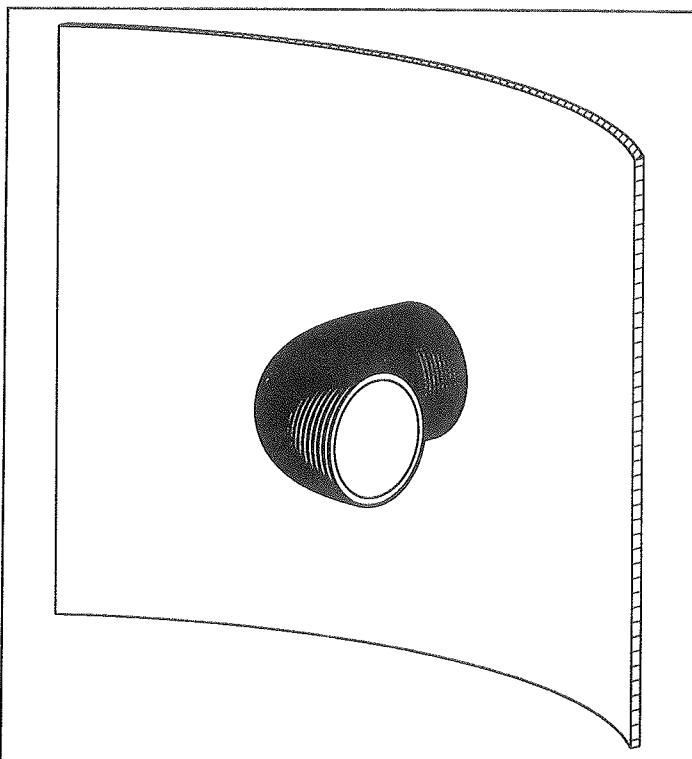
Tegninger af de undersøgte indløbsudformninger er vist på figur 3.6 til figur 3.10.



Figur 3.6 Direkte indløb.

Det direkte indløb fører vandet direkte ind i lageret. Det anvendte direkte indløb har en dimension på 2" med en indvendig diameter på ca. 53 mm. Denne indløbsudformning er valgt som reference for de fem indløbsudformninger. Der er desuden udført forsøg med 5/4" direkte indløb, som gør det muligt at se forskellen mellem indløbstørrelser for samme type indløb. Et 5/4" rør har en indvendig diameter på ca. 36 mm.

Denne udformning er enkel og billig.

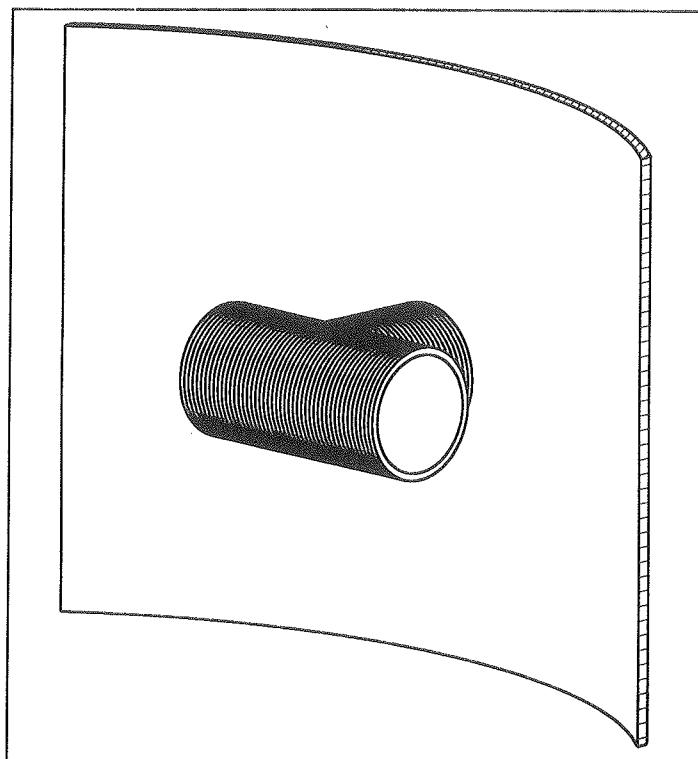


Figur 3.7 Bøjning.

Bøjningen leder vandet vandret ind i lageret langs beholdervæggen. I forsøgene er anvendt en 2" svejsebøjning, hvor afstanden fra centrum af indløbet til beholdervæggen er 0,10 m.

Denne uformning er ofte anvendt og betragtes som velegnet blandt en del beholderfabrikanter.

Løsningen er relativt billig.

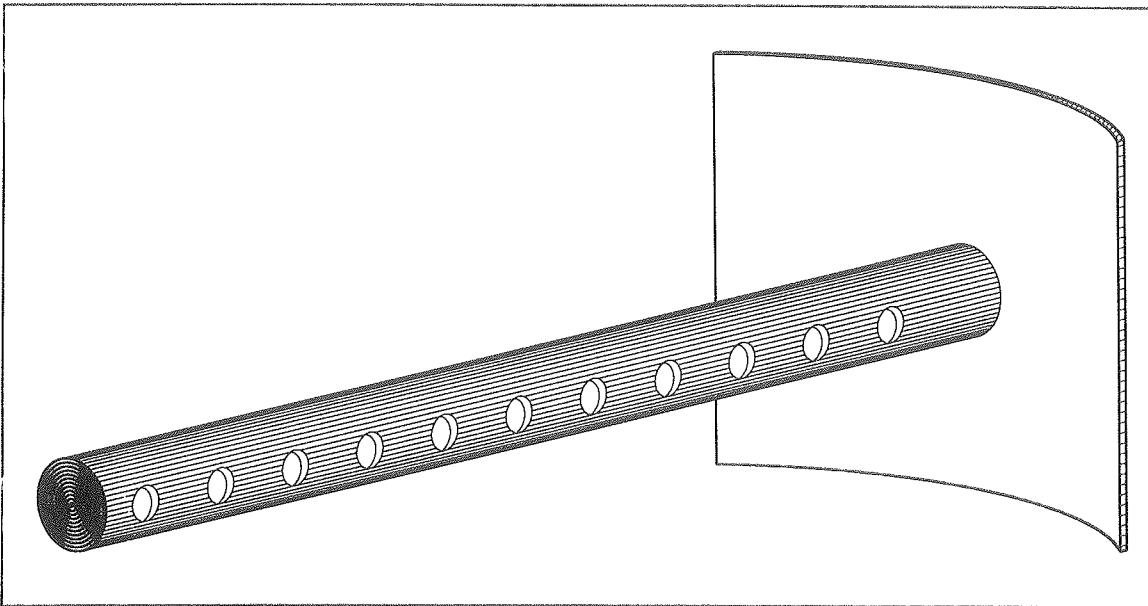


Figur 3.8 T-stykke.

T-stykket leder vandet vandret ud langs beholdervæggen, men kun med den halve middelhastighed i forhold til det direkte indløb og bøjningen. Der er anvendt et 2" T-stykke, hvor afstanden fra centrum af indløbene til beholdervæggen er 0,10 m.

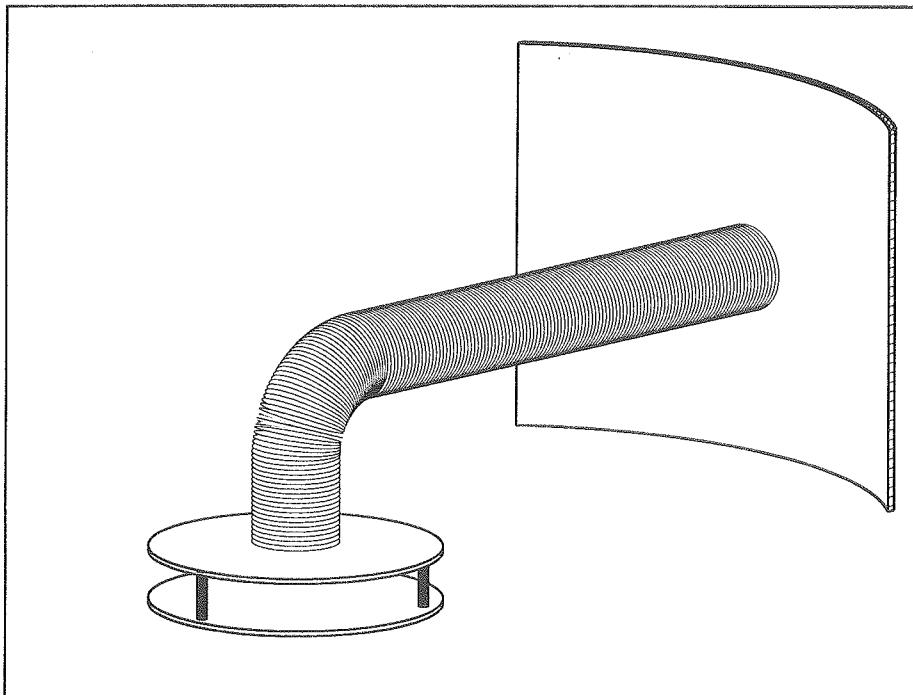
Denne uformning er kun sjældent anvendt.

T-stykket er ca. 10 gange dyrere end bøjningen.



Figur 3.9 Perforeret rør.

Det perforerede rør leder vandet vandret ud i lageret gennem huller i røret. I forsøgene er anvendt et 2" rør, hvor der er boret 22 stk. Ø25 huller. Det samlede tværsnitsareal er ca. 5 gange større end tværsnitsarealet for et 2" rør. Hullerne har en indbyrdes afstand på 0,10 m og første og sidste hul er placeret 0,12 m fra beholdervæggen. Målsat tegning findes i /7/.



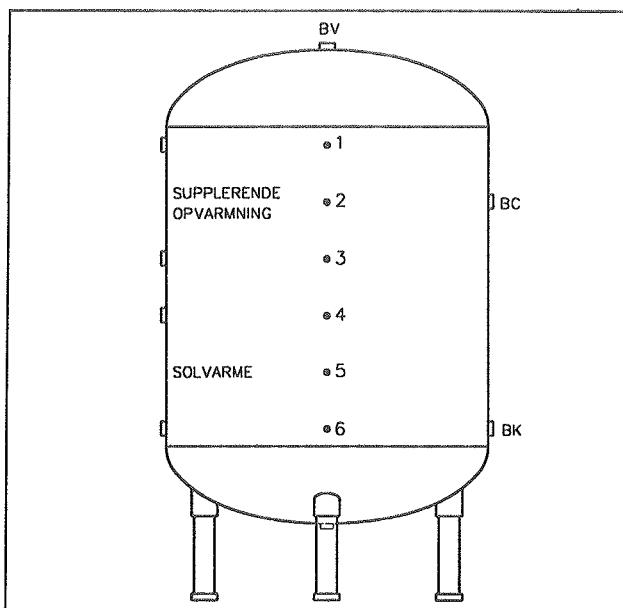
Figur 3.10 Parallelle plader.

Parallelle plader er opbygget af to horisontale cirkulære plader med en diameter på 0,30 m og afstand på 0,05 m. Et 2" rør fører vandet ind i midten af lageret, hvorefter vandet ledes

vandret ud mellem pladerne. Denne indløbsudformning forøger indløbsarealet ca. 20 gange i forhold til det direkte indløb.

3.2 Måleresultater.

Forsøgene med varmelageret skal belyse lagerets virkemåde under forskellige driftssituatoner. Hovedparten af forsøgene belyser cirkulationskredsens indflydelse på temperaturlagdelingen i lageret. Måleresultaterne stammer fra over 70 forsøg med en gennemsnitlig varighed på 20 timer. Under forsøgene er der udført målinger hvert 20. sekund, som i målesystemet er midlet til værdier over enten 1, 2 eller 5 minutter.



Figur 3.11 Målepunktsplacering i lager.

3.2.1 Varmetab fra lageret.

Lageret er isoleret med 0,08 m blødt skumgummi, med et ydre dæklag af vaskbart PVC. Beholderfabrikanten oplyser at isoleringens varmeledningsevne er $0,036 \text{ W}/(\text{m K})$ ved 20°C . Det antages, at varmeledningsevnen stiger med ca. 0,5 % for hver grad middeltemperaturen af isoleringen er højere end 20°C .

Teoretisk beregning af varmetabet ud fra ovenstående oplysninger giver en varmetabskoefficient for lageret ekskl. varmevekslere på $4,3 \text{ W/K}$ ved 20°C og $4,8 \text{ W/K}$ ved 65°C . Beregningen tager ikke hensyn til kuldebroer i isoleringen, f.eks. rørgennemføringer.

Varmetabet fra lageret ekskl. varmevekslere, er målt ved at holde lageret opvarmet til 65°C via solvarmeveksleren. Volumenstrømmen målt med energimåler E1 samt temperaturdifferensen mellem målepunkt A12 og A13 anvendes til beregning af varmetabet, se figur 3.4. Varmetabskoefficienten er målt til 11 W/K ved en omgivelsestemperatur på 20°C . Den faktiske varmetabskoefficient er ca. 2,5 gange større end den teoretisk beregnede.

På figur 3.11 er lagertemperaturerne angivet med et nummer fra 1 til 6, hvor 1 er øverst i lageret i niveau med indløb fra suppleringeskredsen og 6 er nederst i lageret i niveau med koldt-vandstilgangen (BK).

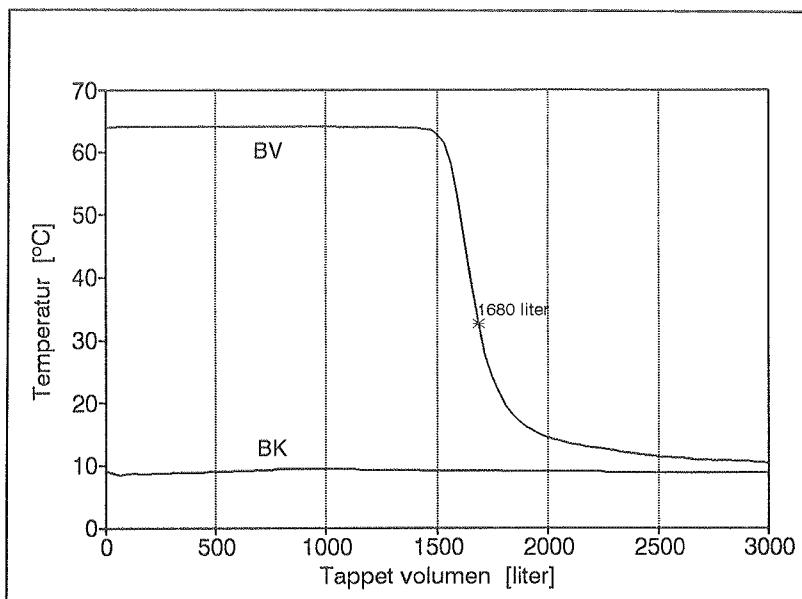
Afstanden mellem målepunkterne er 0,22 m. Der er et målepunkt i niveau med alle vandrette indløb til og udløb fra lageret.

Hvis ikke andet er nævnt vil indløbs/udløbsudformningen være 2" direkte indløb.

3.2.2 Tapning af varmt brugsvand fra lageret.

Der er udført tappeforsøg med forskellige volumenstrømme. Forsøgene er udført ved at opvarme det effektive lagervolumen til en konstant temperatur. Det effektive lagervolumen er her summen af det supplerende opvarmede volumen og det solopvarmede volumen - i alt $1,68 \text{ m}^3$. Der er ikke under tapningerne tilført energi til lageret.

Koldtvandstilgangens indløb er udformet som 2" direkte indløb. Volumenstrømmen under tapningerne er 600 l/h, 1800 l/h og 3000 l/h. På figur 3.12 er tappeforsøget med 1800 l/h vist.



Figur 3.12 Temperaturforhold under tapning af varmt brugsvand fra lager. Volumenstrøm 1800 l/h.

Ved forsøgets start er lagerets effektive volumen opvarmet til $64 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperaturen af det kolde brugsvand (BK) er under hele forsøget ca. $9 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperaturen af det varme brugsvand (BV) holder sig de første ca. 1500 l næsten konstant på ca. $64 \text{ }^\circ\text{C}$, hvorefter temperaturen falder drastisk. Det betyder, at ca. 95 % af lagerets effektive volumen kan tappes med konstant temperatur.

Dette viser, at opblandingen under tapningen kun foregår i meget begrænset omfang. Disse målinger underbygges af tappeforsøget med en volumenstrøm på kun 600 l/h. Her er temperaturforholdene praktisk taget identiske med figur 3.12.

Ved en volumenstrøm på 3000 l/h er der udført forsøg med direkte indløb og T-stykke. I begge disse forsøg er temperaturforholdene også praktisk taget identiske med figur 3.12.

Tappeforsøgene viser, at der sker ingen nævneværdig opblanding i lageret under tapninger, ved de undersøgte indløbsudformninger og volumenstrømme.

3.2.3 Suppleringskredsens indflydelse på temperaturlagdelingen.

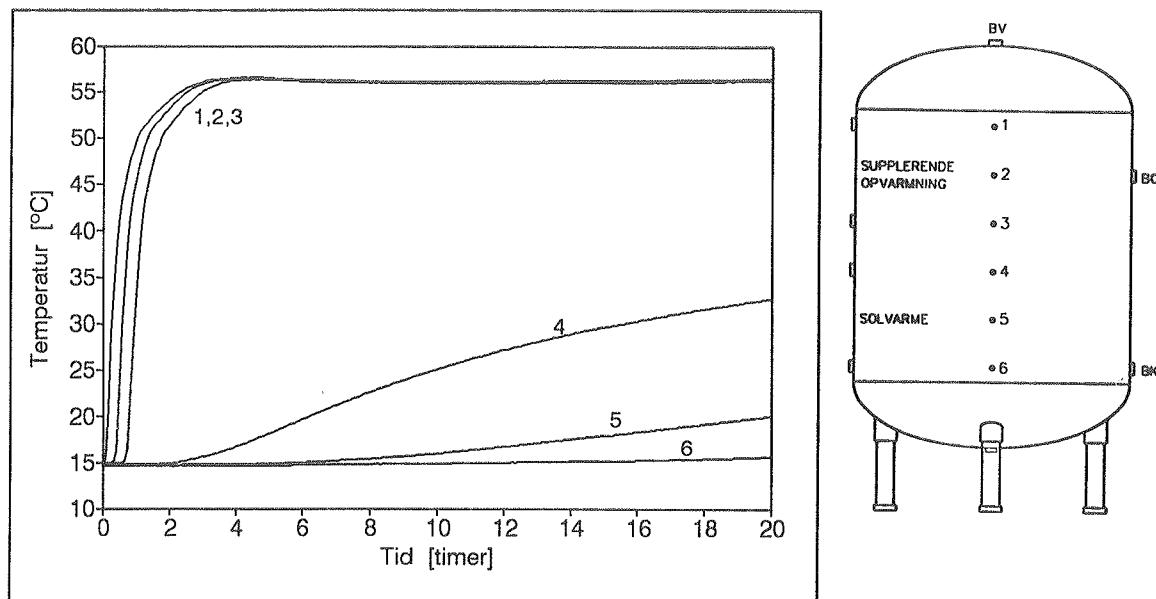
Under disse forsøg skal det undersøges om opvarmningen af lageret med suppleringskredsen giver en tilfredsstillende temperaturlagdeling eller om volumenstrømmen i supple-

ringskredsen giver anledning til opblanding i lageret mellem det varme vand i toppen af lageret og koldt vand nedenunder.

Der er udført forsøg med forskellige indløbsudformninger. Der er under forsøgene anvendt samme indløbsudformning på både indløb til og udløb fra suppleringskredsen. Undersøgte indløbsudformninger i suppleringskredsen er

1. 2" direkte indløb.
2. 2" bøjning.
3. 2" T-stykke.
4. 5/4" direkte indløb.

Som reference sker den supplerende opvarmning med ca. 800 l/h og en opvarmning af vandet til ca. 55 °C. Der cirkulerer vand gennem lageret under hele forsøget. Under denne opvarmning er temperaturforløbet i lageret som vist på figur 3.13.

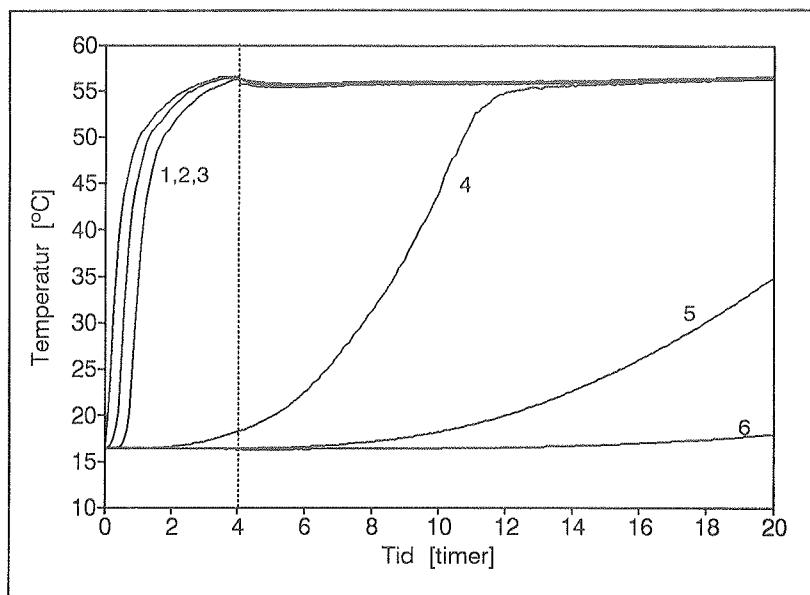


Figur 3.13 Lagertemperaturer. Anvendelse af 2" direkte indløb ved supplerende opvarmning med ca. 800 l/h.

Forsøgets varighed er 20 timer og hele lageret har til tiden 0 timer en temperatur på ca. 15 °C. I de første fire timer sker der en kraftig temperaturstigning i toppen af lageret. Derefter er temperaturerne 1, 2 og 3 konstante på ca. 56 °C. Temperaturmålingerne 4, 5 og 6 stiger kun lidt, fordi disse målepunkter er placeret nedenunder det opvarmede volumen. Stigningen skyldes hovedsagelig varmeledning i vandet og stålbehældervæggen. Temperaturudviklingen i lageret viser en fordelagtig temperaturlagdeling i lageret. I det efterfølgende vil temperaturforløbet vist på figur 3.13 blive betegnet som "ingen målbar opblanding".

Der er udført forsøg med 2" direkte indløb med forskellige volumenstrømme i suppleringskredsen. I de fire første timers opvarmning er volumenstrømmen 800 l/h, hvorefter volumenstrømmen er ændret til den givne volumenstrøm. Herved opnås ensartede begyndelsesbetingelser efter fire timer.

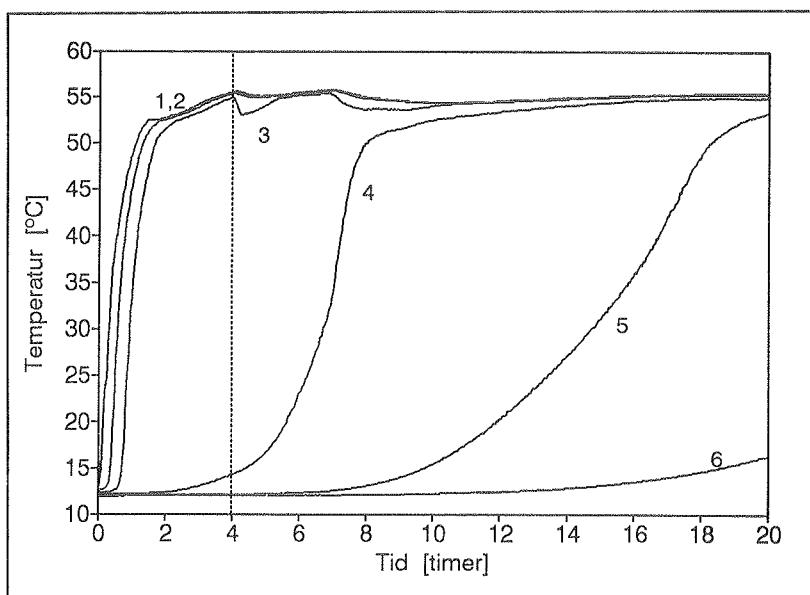
Volumenstrømme i suppleringskredsen på 400 l/h og 1600 l/h giver praktisk taget samme temperaturforløb som ved 800 l/h. Figur 3.14 viser temperaturforløbet ved en volumenstrøm på 2400 l/h. Den lodrette stiplede linje ved 4 timer viser tidspunktet, hvor volumenstrømmen ændres fra 800 l/h til 2400 l/h.



Figur 3.14 Lagertemperaturer. Anvendelse af 2" direkte indløb ved supplerende opvarmning med ca. 2400 l/h.

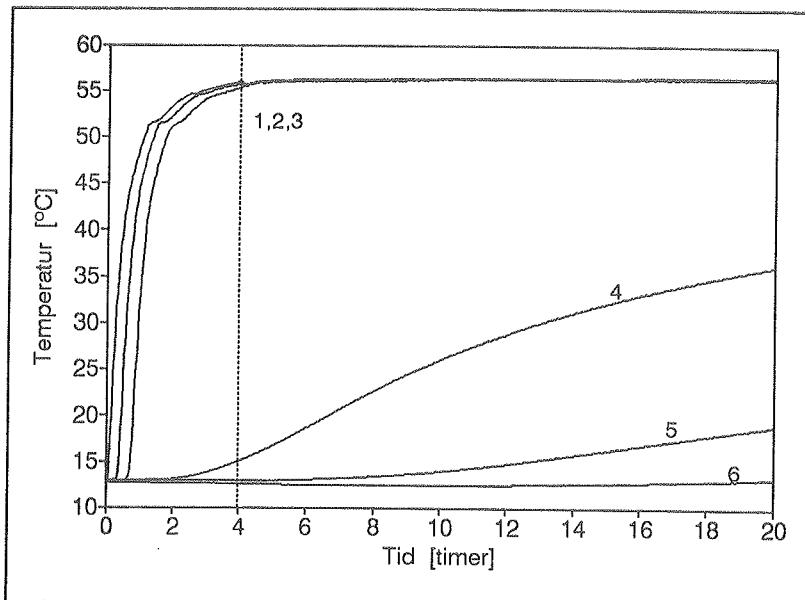
Efterfølgende figurer viser temperaturlagdelingen i lageret under opvarmning ved en volumenstrøm på ca. 2400 l/h ved anvendelse af forskellige indløbsudformninger. Samtlige forsøg med 800 l/h viser ingen opblanding.

Temperaturerne 4, 5 og 6 viser størrelsen af opblandingen forårsaget af suppleringskredsen. Specielt temperatur 4 stiger meget og opnår efter ca. 12 timer samme temperatur som toppen af lageret. Opblandingens størrelse i lageret må dog karakteriseres som moderat.



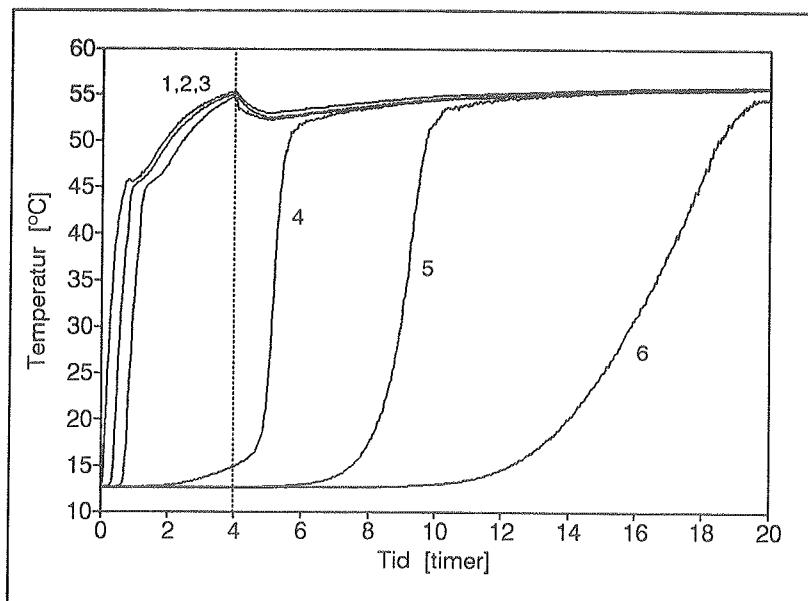
Bøjningen forårsager større opblanding i lageret end det direkte indløb. Allerede efter 8 timer har temperaturmåling 4 næsten samme temperatur som toppen af lageret. Måling 5 er også berørt nævneværdigt af opblandingen.

Figur 3.15 Lagertemperaturer. Anvendelse af 2" bøjning ved supplerende opvarmning med ca. 2400 l/h.



Figur 3.16 Lagertemperaturer. Anvendelse af 2" T-stykke ved supplerende opvarmning med ca. 2400 l/h.

Forsøg med T-stykket og en volumenstrøm på ca. 2400 l/h viser ingen målbar opblanding i lageret.



Figur 3.17 Lagertemperaturer. Anvendelse af 5/4" direkte indløb ved supplerende opvarmning med ca. 2400 l/h.

5/4" direkte indløb har en indvendig diameter på ca. 36 mm, og tvær-snitsarealet udgør kun ca. 46 % af tvær-snitsarealet for et 2" rør.

5/4" direkte indløb forårsager en relativt kraftig omrøring i lageret ved en volumenstrøm på 2400 l/h i suppleringskredsen. Ved forsøgets afslutning efter 20 timer er hele lageret opvarmet til ca. 55 °C.

Af de undersøgte indløbsudformninger i 2" dimension er T-stykket den mest velegnede til at modvirke opblanding i lageret. Bøjningen viste sig at være dårligst.

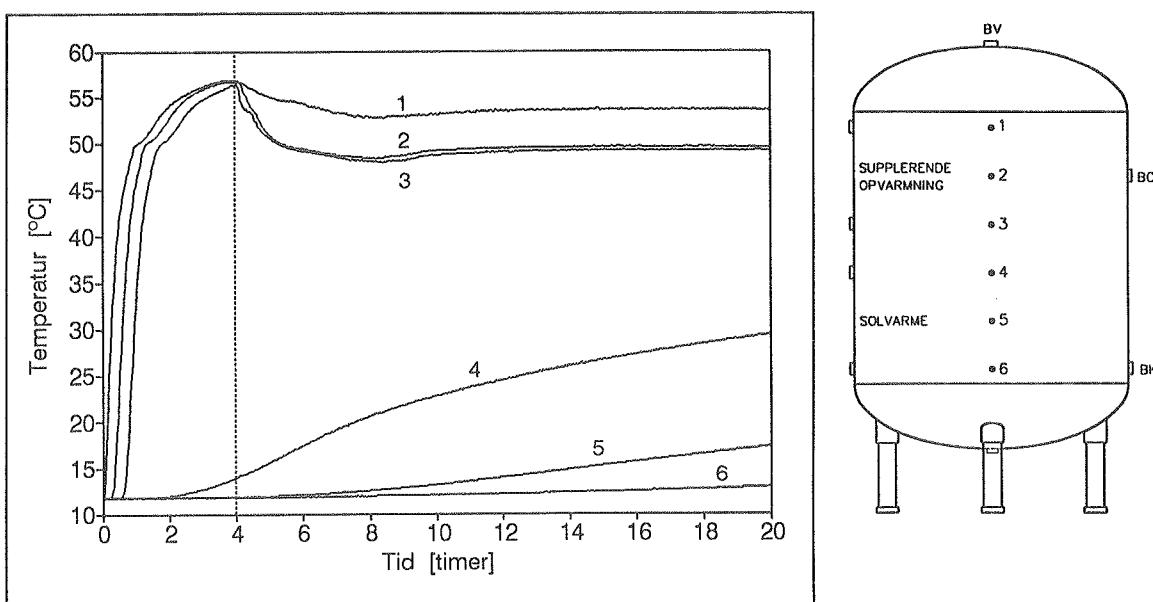
3.2.4 Cirkulationskredsens indflydelse på temperaturlagdelingen.

Cirkulationskredsens indflydelse på temperaturlagdelingen i lageret er forsøgt belyst ved følgende parametrevariationer:

1. Volumenstrøm i cirkulationskreds (0 til 5000 l/h)
2. Udformning af cirkulationsindløb (fem indløbsudformninger, se afsnit 3.1.1)
3. Varmetab fra cirkulationsledning (0 til 10 kW)

Hvis ikke andet er nævnt, vil suppleringskredsen opvarme lageret med en volumenstrøm på ca. 800 l/h i hele forsøgsperioden. For forsøgene med direkte indløb, bøjning og T-stykke er indløbsudformningen for suppleringskredsen og cirkulationskredsen ens. Ved anvendelse af perforeret rør og parallelle plader på cirkulationsindløbet er der anvendt direkte indløb i suppleringskredsen. Det vurderes, at dette forhold ikke påvirker en sammenligning af måleresultaterne. Cirkulationskredsens pumpe er i drift i hele forsøgsperioden. De første fire timer cirkulerer en lille volumenstrøm gennem cirkulationskredsen, således at vandet i cirkulationsledningen også opvarmes. Efter fire timer, hvor hele det supplerende opvarmede volumen er opvarmet til ca. 55 °C, reguleres volumenstrømmen i cirkulationskredsen til den undersøgte værdi. Dette tidspunkt er på de efterfølgende figurer vist med en lodret stiplæt linie.

Figur 3.18 viser temperaturlagdelingen i lageret ved en volumenstrøm i cirkulationskredsen på ca. 900 l/h og en afkøling på ca. 5 kW. Afkølingen svarer til et temperaturfald på ca. 5 K. Indløbsudformningen er 2" direkte indløb.

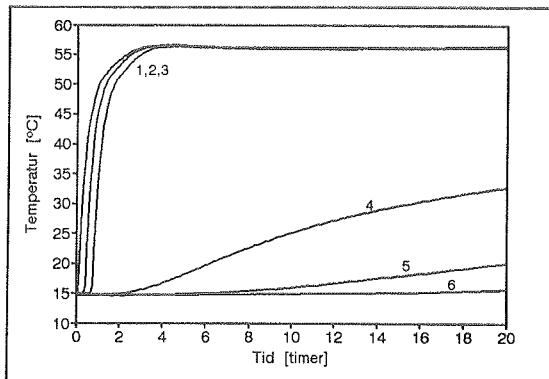


Figur 3.18 Lagertemperaturer. Cirkulation ca. 900 l/h gennem 2" direkte indløb og ca. 5 kW varmetab.

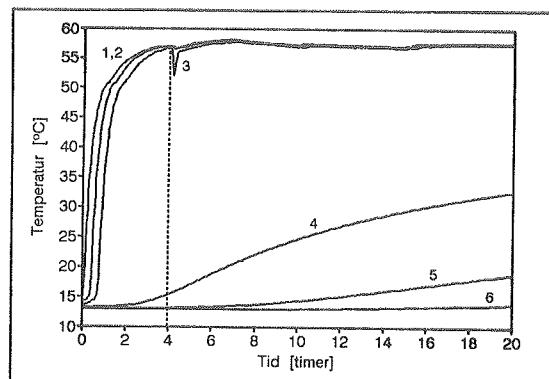
Efter fire timer falder temperaturerne 1, 2 og 3 på grund af afkølingen af vandet i cirkulationsledningen. Temperaturfaldet er størst for temperaturerne 2 og 3. Temperatur 4, 5 og 6 influeres ikke nævneværdigt af volumenstrømmen i cirkulationskredsen. Ved forsøgene med 900 l/h uden varmetab og med 10 kW varmetab, ligner temperaturforløbet for temperatur 4, 5 og 6 temperaturudviklingen på figur 3.18.

Ud fra disse indledene forsøg med cirkulationskredsen i drift vurderes det, at varmetabet fra cirkulationskredsen ikke har nævneværdig indflydelse på opblandingens størrelse i lageret. Efterfølgende forsøg med cirkulationskredsen i drift er derfor udført uden varmetabet.

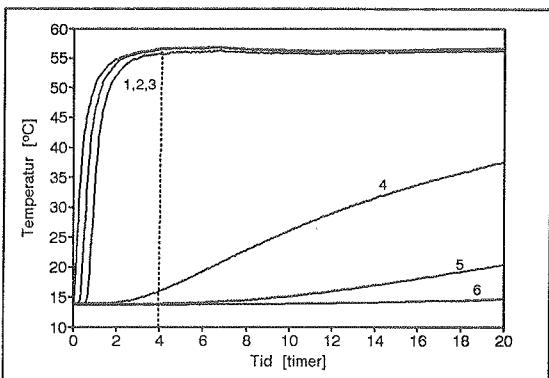
Cirkulationskredsens indflydelse på temperaturlagdelingen i lageret vises nedenfor. Forsøgene er udført med 2" direkte indløb.



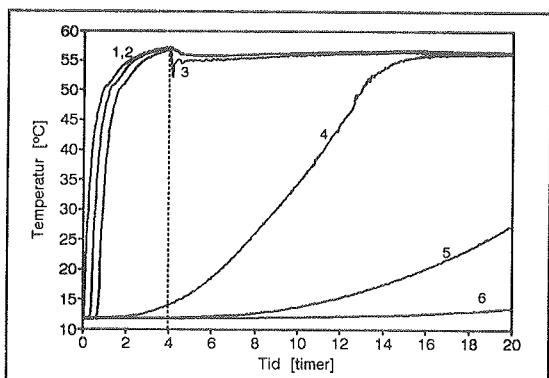
a. cirkulation 0 l/h



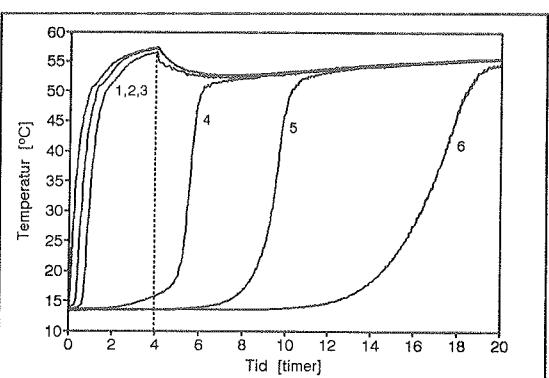
b. cirkulation ca. 900 l/h



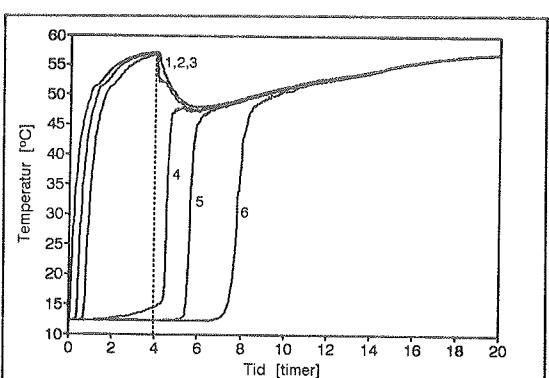
c. cirkulation ca. 1800 l/h



d. cirkulation ca. 2400 l/h



e. cirkulation ca. 3600 l/h



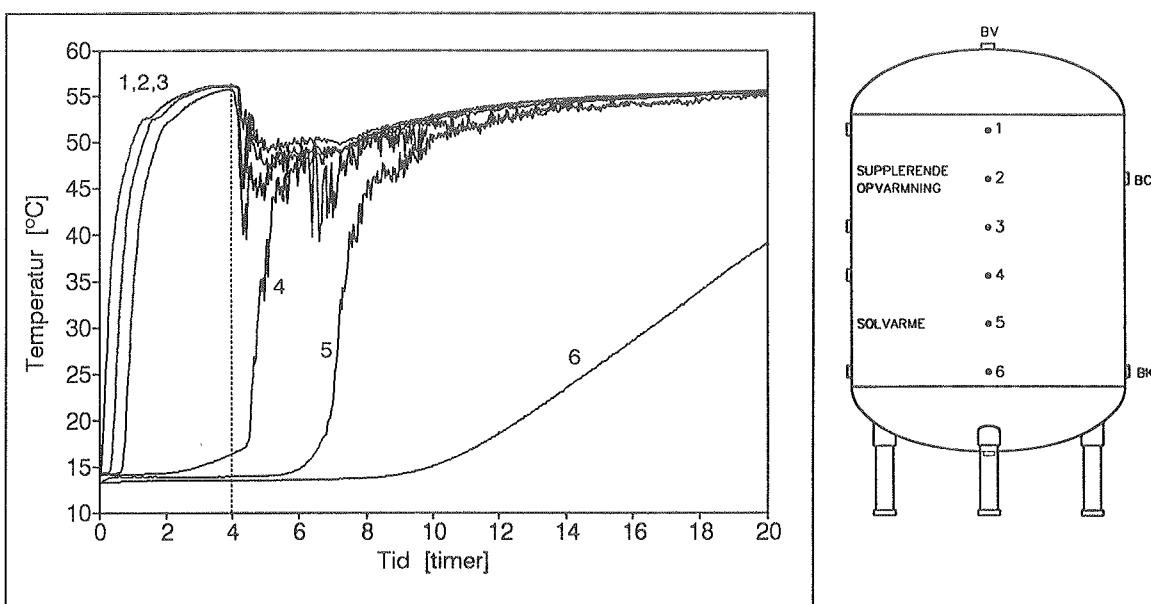
f. cirkulation ca. 5000 l/h

Figur 3.19 Lagertemperaturer. Cirkulation gennem 2" direkte indløb.

Volumenstrømmen i cirkulationskredsen forårsager en målbar opblanding i lageret ved volumenstrømme større end ca. 1800 l/h, se figur 3.19. Temperaturforløbet i lageret ved en volumenstrøm på ca. 2400 l/h, se figur 3.19 d, adskiller sig kun lidt fra suppleringsopvarmning med ca. 2400 l/h, se figur 3.14.

Figur 3.19 f viser en kraftig opblanding i lageret. Efter blot fire timers cirkulationsdrift med ca. 5000 l/h er lageret totalt op blandet. Karakteristisk ved temperaturudviklingen for 4, 5 og 6 er en pludselig temperaturstigning. Dette tyder på, at det supplerende opvarmede vand bevæger sig hurtigt nedad gennem lageret.

Der er herefter påsat en 2" bøjning på cirkulationsindløbet og i suppleringskredsen. Forsøg er udført med en volumenstrøm på ca. 900 l/h, 2400 l/h og 3600 l/h. Ved en volumenstrøm på ca. 900 l/h sker der ikke nogen nævneværdig opblanding i lageret. Derimod sker der noget meget iøjefaldende ved ca. 2400 l/h som vist på figur 3.20.



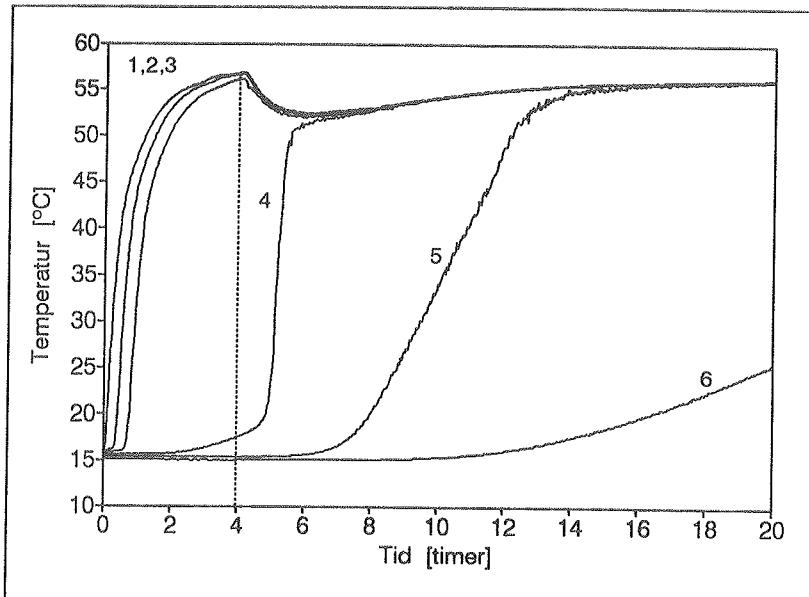
Figur 3.20 Lagertemperaturer. Cirkulation ca. 2400 l/h gennem 2" bøjning.

Bøjningen forårsager en meget uhedlig opblanding i lageret, hvor temperaturen i et givet niveau varierer meget, nogle gange op til 10 K inden for ganske få minutter.

Ved en volumenstrøm på ca. 3600 l/h forårsager bøjningen ødelæggelse af temperaturlagdelingen, der overstiger opblandingen for 5000 l/h med 2" direkte indløb.

En sandsynlig forklaring på, hvorfor bøjningen forårsager denne uhedlige opblanding er, at volumenstrømmen gennem bøjningen sætter hele lagervolumenet i rotation.

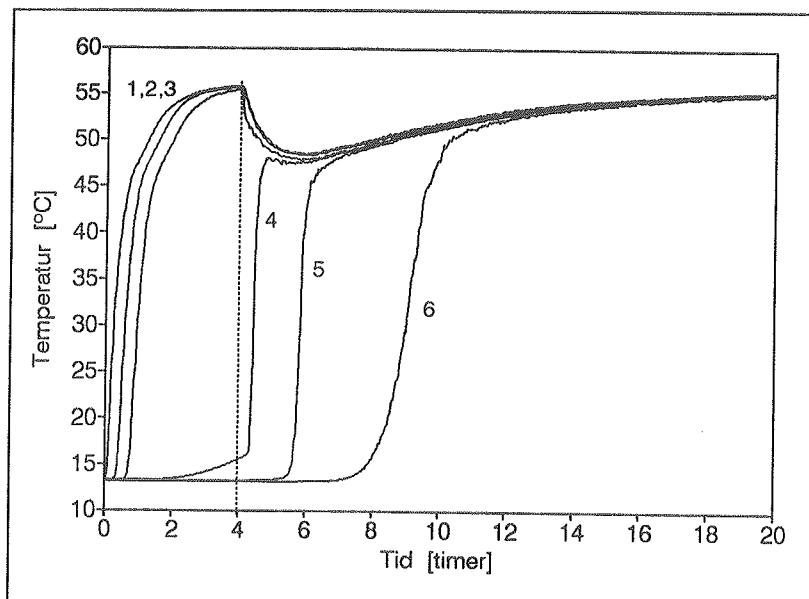
For indløb udformet som T-stykket, perforeret rør og parallelle plader vises her temperaturudviklingen ved en volumenstrøm på 5000 l/h i cirkulationskredsen.



Figur 3.21 Lagertemperaturer. Cirkulation ca. 5000 l/h gennem 2" T-stykke.

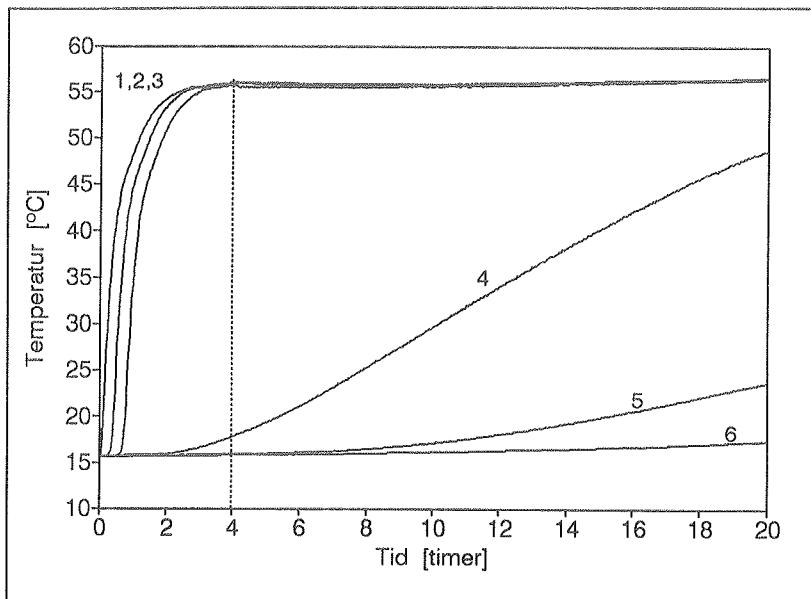
For T-stykket sker der en opblanding i lageret ved 5000 l/h, men den er mindre end ved f.eks. direkte indløb. T-stykket har dermed en positiv indvirkning på temperaturlagdelingen i lageret.

T-stykket er langt bedre end bøjningen, bl.a. fordi den ikke sætter hele lagervolumenet i rotation.



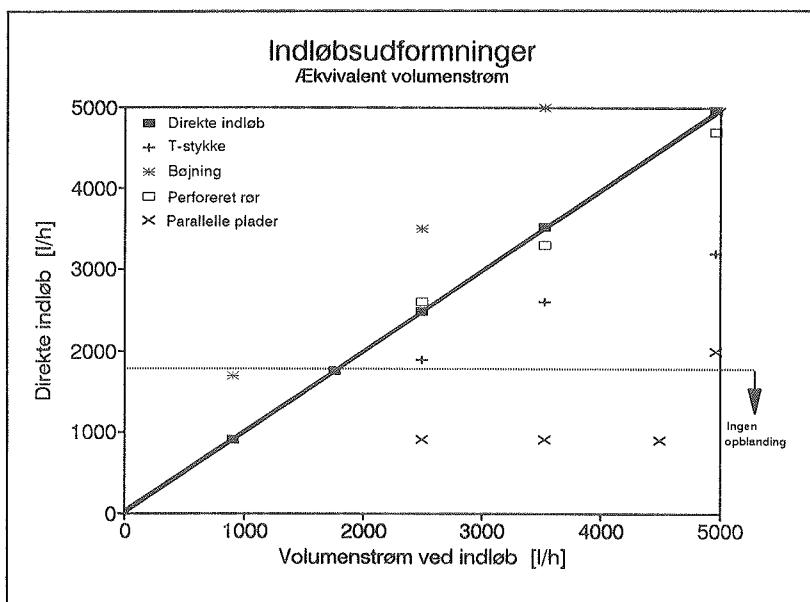
Opblanding i lageret ved 5000 l/h viser, at det perforerede rør ikke har bedre egenskaber end det direkte indløb.

Figur 3.22 Lagertemperaturer. Cirkulation ca. 5000 l/h gennem perforeret rør.



Figur 3.23 Lagertemperaturer. Cirkulation ca. 5000 l/h gennem parallelle plader.

Ved en sammenligning af temperaturforholdene i lageret ved forskellige volumenstrømme og indløbsudformninger er det muligt at udarbejde en figur, der viser opblandingens størrelse i forhold til den opblanding, der ville have været, hvis der var anvendt et direkte indløb. Figur 3.24 viser denne sammenligning med 2" direkte indløb som reference.



Figur 3.24 Sammenligning af 2" indløbsudformninger i cirkulationskredsen.

Et eksempel: Ved en volumenstrøm på 3600 l/h i cirkulationskredsen og anvendelse af 2" bøjning vil opblandingen i lageret være af samme størrelse, som med en volumenstrøm på ca. 5000 l/h ved anvendelse af 2" direkte indløb.

Parallelle plader har en meget gunstig indflydelse på temperaturlagdelingen i lageret. Ved 5000 l/h sker der kun en meget begrænset opblanding i lageret. Et forsøg med 4500 l/h viste, at der ingen målbar opblanding skete i lageret. Denne udformning er derfor meget velegnet til at forhindre opblanding og den bedste blandt de afprøvede indløbsudformninger.

X-aksen angiver volumenstrømmen i cirkulationskredsen, og Y-aksen angiver ækvivalent volumenstrøm for det direkte indløb. Ved ækvivalent volumenstrøm forstås den volumenstrøm i cirkulationskredsen med direkte indløb, der forårsager samme temperaturforløb som den valgte indløbsudformning.

På figur 3.24 vil punkter, der ligger under den rette linie for det direkte indløb, være mere velegnet end det direkte indløb. I disse forsøg er det kun T-stykket og parallelle plader, der er væsentligt bedre end det direkte indløb.

Det skal her gøres klart, at figur 3.24 kun gælder for den anvendte $2,0 \text{ m}^3$ forrådsbeholder og anvendelse af de givne indløbsudformninger. Desuden er forsøgene udført uden afkøling af cirkulationsvandet, men det vurderes at afkølingens størrelse ikke har nævneværdig indflydelse på resultaterne.

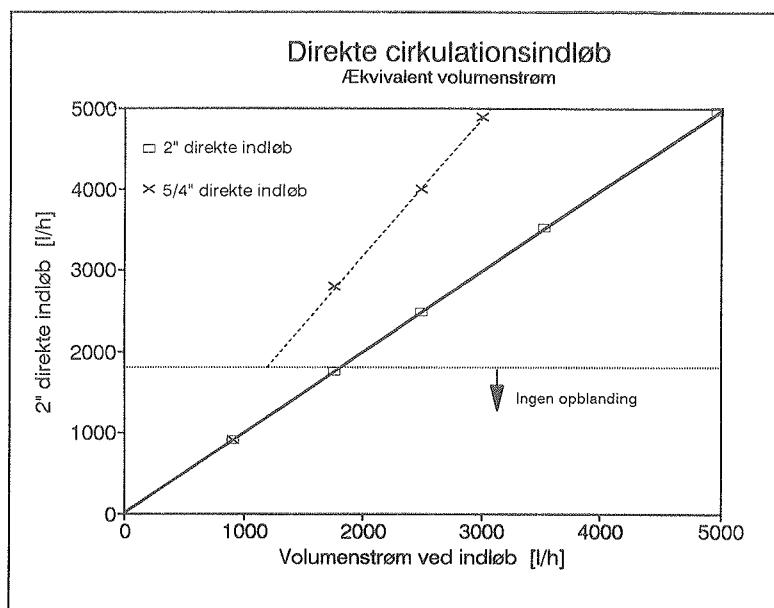
Nedenstående tabel 3.1 giver en oversigt over opblanding i lageret i forhold til volumenstrøm i cirkulationskredsen og indløbsudformning.

Indløbsudformning	Ingen målbar opblanding i lager ved volumenstrøm mindre end	Middelindløbshastighed
2" direkte indløb	1800 l/h	0,23 m/s
2" bøjning	1000 l/h	0,13 m/s
2" T-stykke	2500 l/h	0,16 m/s
2" perforeret rør	1800 l/h	0,04 m/s
2" parallelle plader	4800 l/h	0,03 m/s

Tabel 3.1 Indløbsudformningens egnethed med hensyn til opblanding.

Tabel 3.1 viser at det 2" direkte indløb ikke forårsagede målbar opblanding i lageret ved en volumenstrøm mindre end 1800 l/h i cirkulationsledningen. 1800 l/h svarer til en middelindløbshastighed på 0,23 m/s for 2" direkte indløb. Bøjningen er klart den af de fem indløbsudformninger der er mindst egnet. Bøjningen sætter hele beholdervolumenet i rotation, og opblanding i lageret opstår allerede ved 1000 l/h. T-stykket er en god indløbsudformning, specielt når den enkle og kompakte opbygning tages i betragtning. I målingerne viste det perforerede rør sig ikke specielt velegnet. Parallelle plader er helt klart den bedste udformning. Ved volumenstrømmme helt op til 4800 l/h skete der ingen målbar opblanding. I dette tilfælde er middelindløbshastigheden ved indløbet 0,03 m/s. Perforeret rør og parallelle plader har dog den ulempe, at de i visse anlægsopbygninger kan have en uheldig placering i lageret, således at indvendig inspektion og rensning af lageret vanskeliggøres.

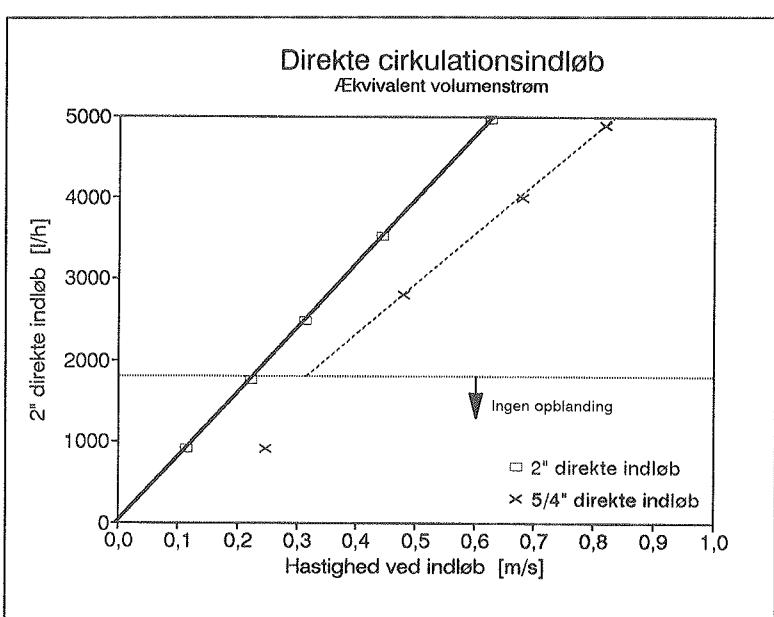
Afslutningsvis er der som indløbsudformning for cirkulationsledningen anvendt et 5/4" direkte indløb. Temperaturlagdelingen i lageret nedbrydes hurtigere ved anvendelse af det 5/4" direkte indløb end det 2" direkte indløb. F.eks. viser målinger, at en volumenstrøm på 3000 l/h gennem det 5/4" direkte indløb forårsager en opblanding i lageret af samme størrelse som ved ca. 4800 l/h og 2" direkte indløb. En sammenligning af de to indløb ses på figur 3.25.



Figur 3.25 Sammenligning af direkte indløb for cirkulationsstuds.

Det kunne have været ønskeligt med flere målinger, således at det helt sikkert kunne fastslås, om punkterne for 5/4" direkte indløb ligger på en ret linie, eller om der er en anden afhængighed til 2" direkte indløb.

Opblandingens størrelse i forhold til middelindløbshastigheden for det direkte indløb ses på figur 3.26.



Figur 3.26 Sammenligning af middelindløbshastigheder for direkte indløb.

Ved en volumenstrøm på ca. 900 l/h sker der ikke opblanding i lageret, og temperaturudviklingen i lageret er ens for begge indløbsudformninger.

Over 1800 l/h ligger punkterne for 5/4" direkte indløb tilnærmelsesvis på en ret linie. Den indsatte stiplede linie har en hældning, der er ca. 1,8 gange større end linien for 2" direkte indløb.

Der er igen indlagt en stiplet linie gennem 5/4" punkterne. Afstanden mellem linierne er ca. 0,1 m/s ved 1800 l/h og 0,2 m/s ved 5000 l/h ækvivalent volumenstrøm.

Ved en indløbshastighed på f.eks. 0,4 m/s er volumenstrømmen ca. 3200 l/h for 2" direkte indløb. For 5/4" direkte indløb med en indløbshastighed på 0,4 m/s vil volumenstrømmen give samme opblandingsforhold som for 2" direkte indløb ved ca. 2200 l/h.

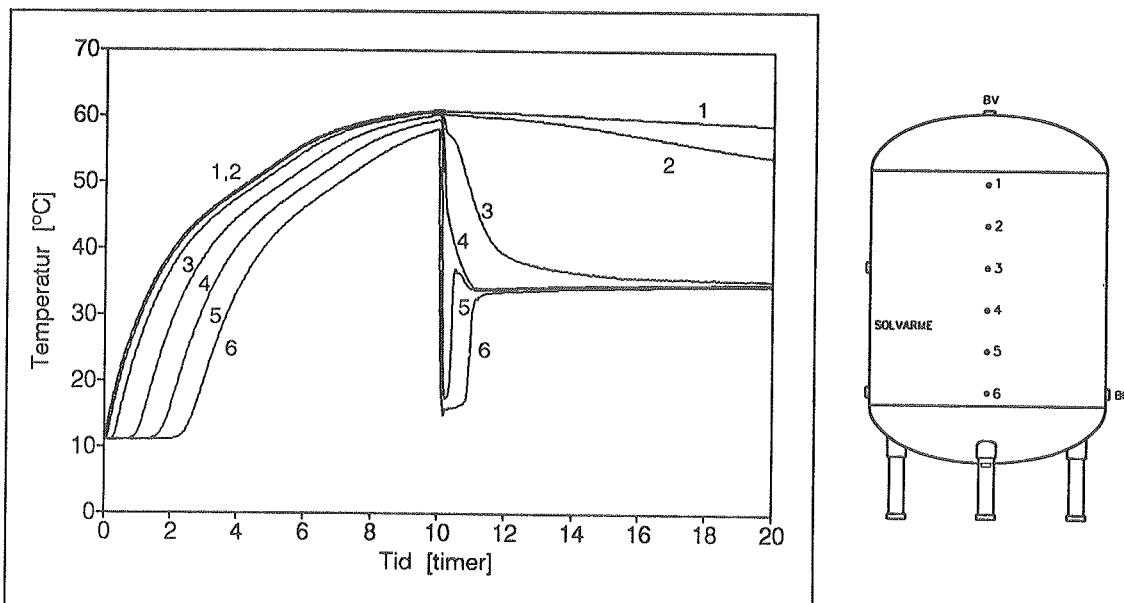
Ud fra figur 3.25 og 3.26 ses at indløbshastigheden for det direkte indløb har betydning for opblandingens størrelse i lageret. Anvendelse af det 2" direkte indløb tillader middelindløbshastigheder, der i gennemsnit er ca. 0,15 m/s lavere end middelindløbshastigheden for det 5/4" direkte indløb for at forårsage samme opblandingsforhold i lageret. Dette viser, at det ikke kun er middelindløbshastigheden, der har betydning for størrelsen af opblanding, men også indløbets tværsnitsareal og dermed volumenstrømmen.

3.2.5 Solopvarmning.

Der er udført forsøg med solkredsen i drift. Varigheden af det udvalgte forsøg er 20 timer og har til formål at belyse temperaturlagdelingen i lageret under solopvarmning og vise, i hvor stor grad der sker opblanding i lageret, når indløbstemperaturen fra solkredsen er lavere end lagertemperaturen i niveau med indløbsstudsen.

I dette forsøg er indløbsstudsen fra solkredsen flyttet op således, at den ligger i niveau med målepunkt 3, se figur 3.11. Denne ændring skyldes, at det herved er muligt at opbygge en større temperaturlagdeling i lageret, i forhold til den normale placering, hvor indløbsstudsen er i niveau med målepunkt 4.

Figur 3.27 viser temperaturlagdelingen i lageret, når vandet i solkredsen cirkulerer med en volumenstrøm på 360 l/h igennem hele forsøget. De første 10 timer sker der en opvarmning således, at indløbstemperaturen er ca. 60 °C. Efter 10 timer tappes 500 l med en volumenstrøm på 3000 l/h, og opvarmningen i solfangerkredsen stoppes.



Figur 3.27 Solopvarmning af lager.

De første 10 timer opbygges ingen nævneværdig temperaturlagdeling over solkredsens indløbsstuds (1, 2, og 3) ved solopvarmningen. Dette viser, at det ca. 60 °C varme vand fra solkredsen løber ind i lageret, hvorefter masseydeforskelle fører vandet opad i lageret. Under denne opdrift sker der en næsten fuldstændig opblanding med vandet oven over

indløbet fra solkredsen. Under indløbsstudsen opbygges de første timer en relativt stor temperaturlagdeling (4, 5 og 6).

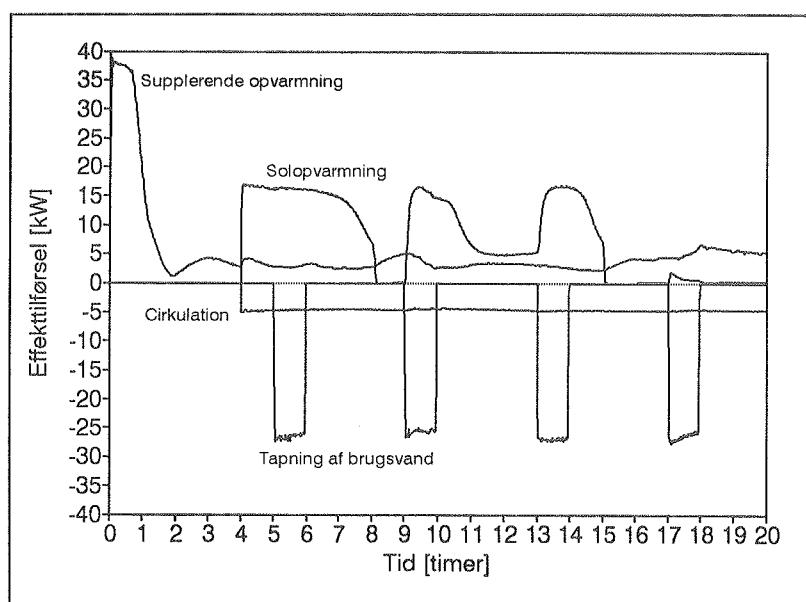
Efter tapningen sker der en opblanding i lageret, fordi koldt vand fra bunden af lageret føres via solkredsen ind i varmere vand højere oppe. Temperaturerne i toppen af lageret (1 og 2) berøres ikke nævneværdigt af den kraftige opblanding nedenunder. Temperaturfaldet her skyldes hovedsageligt varmeledning og varmetab. To timer efter tapningen er der sket en næsten fuldstændig opblanding af det solopvarmede volumen. Det havde været ideelt, hvis temperaturerne 5 og 6 var forblevet kold og temperaturerne 3 og 4 forblevet varm.

3.2.6 Forsøg med alle kredse i drift.

Der er udført et forsøg, hvor alle fire kredse er i drift. Forsøgets varighed er 20 timer og har til formål at belyse temperaturlagdelingen i lageret under supplerende opvarmning, solopvarmning, tapning af varmt brugsvand og cirkulationstab fra cirkulationskredsen.

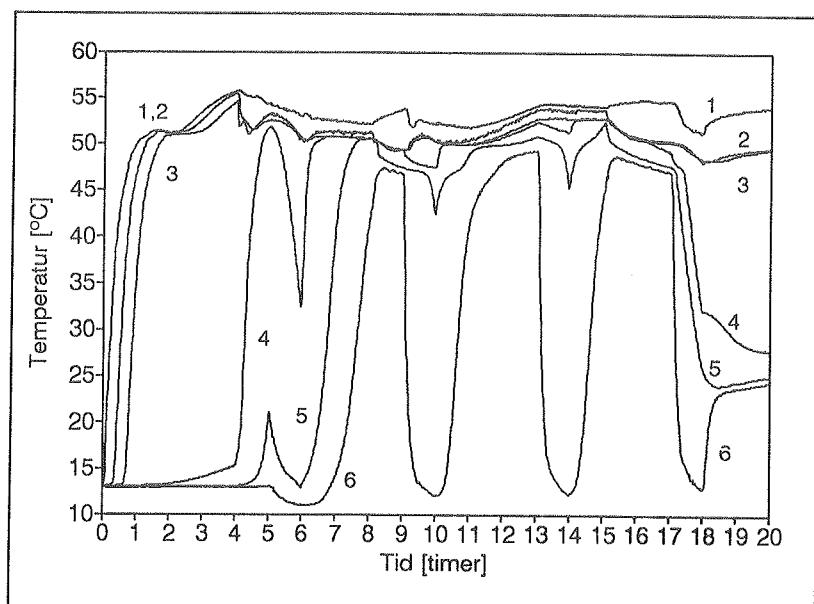
I dette forsøg er samtlige indløbsstudse 2" direkte indløb og væskestrømmene i samtlige kredse er mindre end 1000 l/h.

Figur 3.28 viser effektilførslen til lageret. Der foregår en supplerende opvarmning af lageret i hele forsøgets varighed, med en volumenstrøm på ca. 800 l/h og med en indløbstemperatur på ca. 55 °C. Den supplerende opvarmning afgiver i den første time ca. 38 kW til lageret. Derefter falder effektilførslen til ca. 5 kW. Solopvarmningen medfører en effektilførsel til lageret på op til ca. 17 kW. Tapning af varmt brugsvand fra lageret foregår med en volumenstrøm på ca. 500 l/h og tapningerne startes efter 5, 9, 13 og 17 timer og har hver en varighed på 1 time. Tapningerne resulterer i en varmestrøm på ca. 27 kW. Cirkulationspumpen opstartes efter 4 timer og volumenstrømmen i cirkulationskredsen er ca. 900 l/h. Temperaturfaldet i cirkulationskredsen er ca. 5 K, hvilket medfører et varmetab på ca. 5 kW.



Figur 3.28 Målt effektilførsel til lager ved forsøg med alle kredse i drift.

Effektilførslen til lageret resulterer i et temperaturforløb i lageret som vist på figur 3.29.



Forsøget startes med et ca. 13 °C koldt lager.

Temperaturerne fra de seks målepunkter viser en stor temperaturlagdeling i lageret.

I perioder med stor solopvarmning bliver temperaturforskellen mellem øverste og nederste målepunkt dog kun ca. 5 K.

Figur 3.29 Målte lagertemperaturer ved forsøg med alle kredse i drift.

4. Måling på lager i mellemstort solvarmeanlæg.

Glostrup Boligselskab fik i foråret 1994 installeret et solvarmeanlæg i afdeling 8 på Hovedvejen 121 i Glostrup. Næsten optimale betingelser for placering af solfangerfeltet sammen med en planlagt tagrenovering gjorde bebyggelsen til et velegnet sted for installering af et solvarmeanlæg. Bebyggelsens samlede etageareal på 6900 m^2 er fordelt på 67 lejligheder og 15 mindre erhvervsmål.



Figur 4.1 Solvarmeanlægget i Glostrup. Solfangerfeltet er placeret på tagfladen.

Solfangerfeltet er på 78 m^2 og leveret af solarmefirmaet Batec. Varmelageret består af en $3,2\text{ m}^3$ lodretstående varmtvandsbeholder, og pladevarmevekslere står for varmeudvekslingen. Varmelageret er leveret af Kähler & Breum beholder- og maskinfabrik. Solvarmeanlægget er projekteret af det rådgivende ingeniørfirma Danakon.

Solvarmeanlæggets hovedformål er opvarmning af varmt brugsvand, men i overgangsperioderne mellem sommer og vinter skal anlægget også leve rumopvarmning.

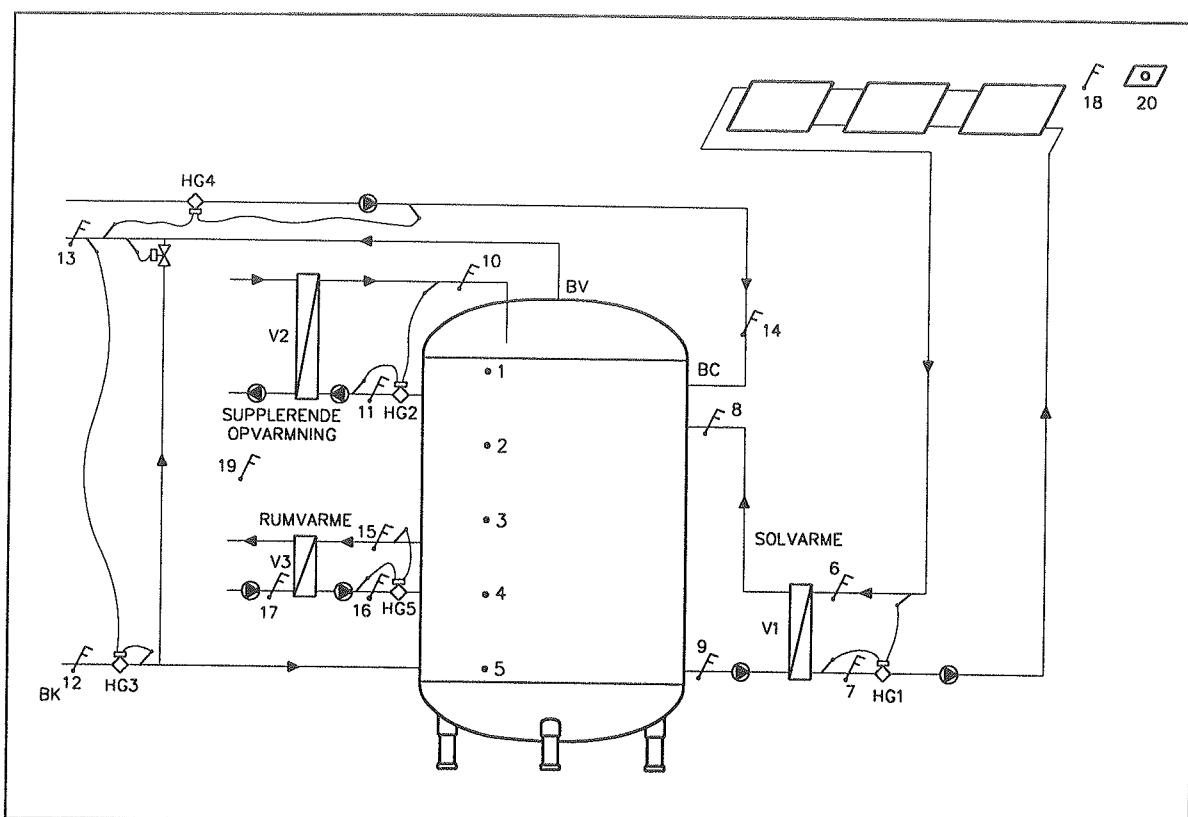
Varmtvandsforbruget i bebyggelsen er forud for installeringen af solvarmeanlægget målt til ca. $100\text{ m}^3/\text{måned}$, varierende fra ca. $80\text{ m}^3/\text{måned}$ om sommeren til ca. $120\text{ m}^3/\text{måned}$ om vinteren.

4.1 Lageropbygning og målesystem.

Principskitse af lageret og solfangerkredsen ses på figur 4.2. Udformningen af solvarmeanlægget er foretaget på baggrund af edb-beregninger med EMGP3, se /8/.

Under forbrug af varmt brugsvand tilføres koldt brugsvand (BK) i bunden af lageret, og varmt brugsvand tappes fra toppen af lageret (BV). Der er tilsluttet en skoldningssikring, der forhindrer højere brugsvandstemperaturer end ca. $60\text{ }^\circ\text{C}$. Cirkulationsledningen til brugsvandet føres retur til den øverste del af lageret (BC).

Solvarmen opvarmer den nederste del af lageret, og varmeudvekslingen sker via pladevarmeveksleren V1. Når solvarmen har opvarmet lageret, er der mulighed for rumopvarmning. Under rumopvarmning overføres energi fra lageret gennem pladevarmeveksleren V3 til vandet i centralvarmekredsens returledning. Den supplerende opvarmning af den øverste del af lageret stammer fra en gaskedel og sker gennem pladevarmeveksleren V2.



Figur 4.2 Principopbygning af solvarmeanlæg og placering af målepunkter og energimålere.

Stålbeholderens udvendige diameter er 1,40 m og højde ekskl. ben er 2,30 m. Lageret er isoleret med 0,10 m mineraluld.

Lagerets volumen er fordelt på følgende måde:

Det supplerende opvarmede volumen:	$0,6 \text{ m}^3$
Det solopvarmede volumen:	$2,2 \text{ m}^3$
Slamvolumen:	$0,4 \text{ m}^3$
I alt:	$3,2 \text{ m}^3$

Solfangerkredsen er dimensioneret til en volumenstrøm på ca. $0,2 \text{ l}/(\text{min } \text{m}^2)$ eller ca. 1000 l/h. Solvarmevekslerens varmeoverføringsevne er dimensioneret til ca. $50 \text{ W}/(\text{K pr } \text{m}^2 \text{ solfanger})$. Volumenstrømmen på solvarmevekslerens sekundære side, solkredsen, er ca. 900 l/h. Den relativ lille volumenstrøm gennem lageret forårsaget af solopvarmningen medfører valg af 1½" T-stykke ved indløbet til lageret.

Volumenstrømmen i tappekredsen varierer meget over døgnet. For at kunne imødegå selv store tapninger under spidsbelastning er koldtvandsstudsen udformet som et 2½" T-stykke.

Volumenet, der opvarmes af den supplerende energikilde, er valgt relativt lille, hvilket medfører volumenstrømme gennem lageret på op til 2500 l/h. Indløbsudformningen er valgt til 2½" T-stykke, som er placeret ved beholdervæggen og leder vandet vandret ud langs beholdervæggen.

En vurdering af varmetabet fra cirkulationsledningen viser, at der med stor sandsynlighed er tale om en betragtelig cirkulerende vandmængde i cirkulationsledningen. Cirkulationsindløbet er derfor valgt som parallelle plader med omtrent samme udformning som omtalt i kapitel 3.

Rumvarmekredsen er dimensioneret til en volumenstrøm på ca. 1500 l/h. Fordi indløbet til lageret skal placeres i nærheden af mandehullet, er det vurderet at et T-stykke kan få en uheldig indflydelse på temperaturlagdelingen i lageret, hvis væskestømmen gennem T-stykket rammer mandehullet. Derfor er indløbet valgt som 2" direkte indløb.

Måleudstyret er det samme som omtalt i kapitel 3, dog måles kun absolutte temperaturer. Energimålerne er af fabrikat HG INSTRUMENTER og resultaterne fra kalibreringsforsøgene er vist i appendiks 2.

På figur 4.2 er placeringen af målepunkterne og energimålerne vist. Målepunkterne 1-19 er temperaturmålinger og i målepunkt 20 måles den totale solbestrålungsstyrke på solfangerplanet. Energimålerne er angivet med betegnelserne HG1 til HG5.

Energimålerne er kombinerede volumenstrøms- og energimålere og anvendes til bestemmelse af øjeblikkelige volumenstrømme i de enkelte kredse. Af økonomiske hensyn er der ikke installeret en energimåler på solvarmevekslerens sekundære side, men volumenstrømmen i denne kreds bestemmes ud fra temperaturmåling 8 og 9 samt kendskabet til overført effekt i solvarmeveksleren.

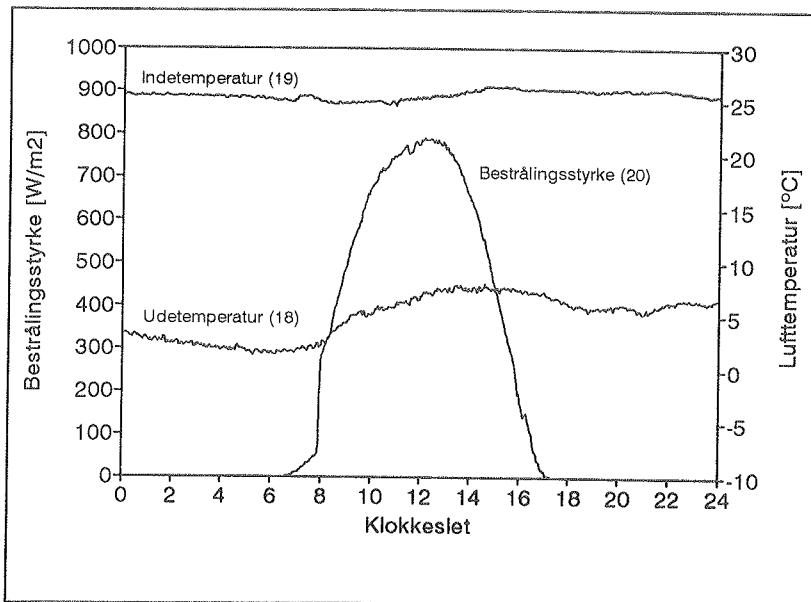
I lageret måles fem temperaturer, som på figur 4.2 er angivet fra 1 til 5. Den indbyrdes afstand mellem lagermålepunkterne er 0,40 m. Lagertemperaturerne måles gennem en dyklomme i beholdervæggen, der går 0,1 m ind i lageret.

4.2 Eksempler på måleresultater.

Fra 1. juli 1994 og frem til 31. december 1994 er der foretaget detaljerede målinger på solvarmeanlægget. På samtlige målekanaler er der målt hvert 20. sekund, og middelværdier over 2 minutter er gemt i PC'eren. Måleprogrammet foretager desuden middelværdiberegning på time- og døgnbasis. På nær nogle enkelte dage foreligger der detaljerede målinger for hele måleperioden.

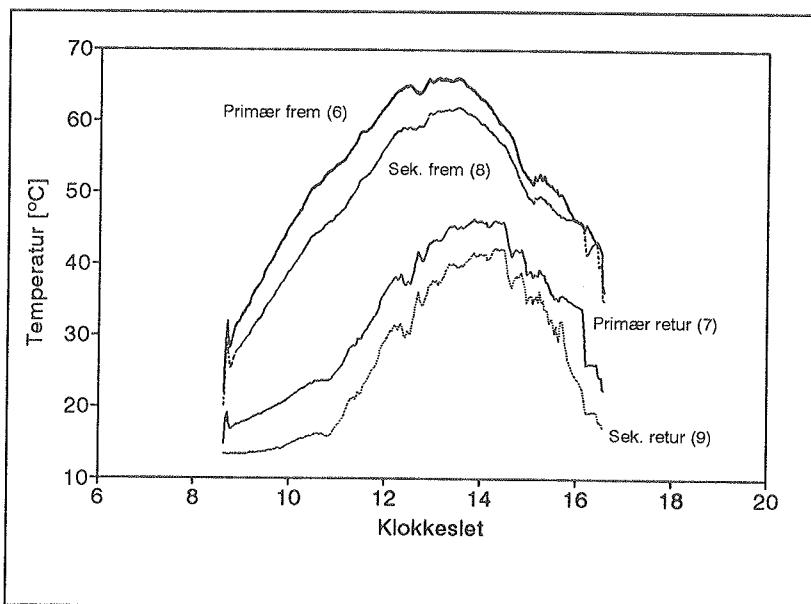
Det er i dette afsnit forsøgt at give nogle ganske få eksempler på de detaljerede målinger. Den 18. oktober 1994 er udvalgt, fordi solen skinnede fra en næsten skyfri himmel, samtidig med at der var relativt lave udetemperaturer og dermed rumopvarmningsbehov. På de efterfølgende figurer refererer tallene i parentes til målepunkterne på figur 4.2.

Figur 4.3 viser bestrålungsstyrken på solfangerplanet, samt inde- og udetemperaturen.



Figur 4.3 Bestrålingsstyrke og lufttemperaturer den 18. oktober 1994.

Temperaturerne målt ved solvarmeveksleren er vist på figur 4.4. I de perioder solfangerkredsen er i drift, er volumenstrømmen på primær- og sekundærsiden af solvarmeveksleren hhv. ca. 1000 l/h og 900 l/h. Væsken anvendt i solfangerkredsen er en 30 % propylenglykol-/vandblanding.



Figur 4.4 Temperaturer ved solvarmeveksleren den 18. oktober 1994.

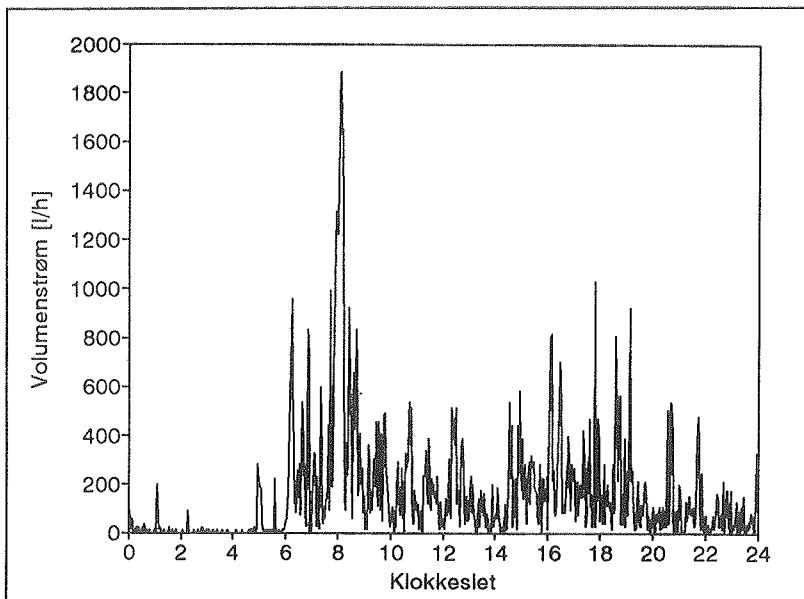
Kl. 12.00 er bestrålingsstyrken målt til ca. 800 W/m². Døgnværdi for solstrålingen den 18. oktober er målt til 5,0 kWh/m².

Indetemperaturen er omgivelsestemperaturen for lageret. Indetemperaturen er ca. 26 °C hele døgnet.

Udetemperaturen varierer mellem ca. 2 °C om natten til ca. 7 °C midt på dagen.

Pumpen i solfangerkredsen starter ca. kl. 8.30 og standser ca. kl. 16.30.

Kl. 13 opvarmes brugs-vandet fra 38 °C til 61 °C, og solfangervæsken afkøles fra 65 °C til 43 °C. Dette svarer til, at varmeveksleren overfører ca. 25 kW.

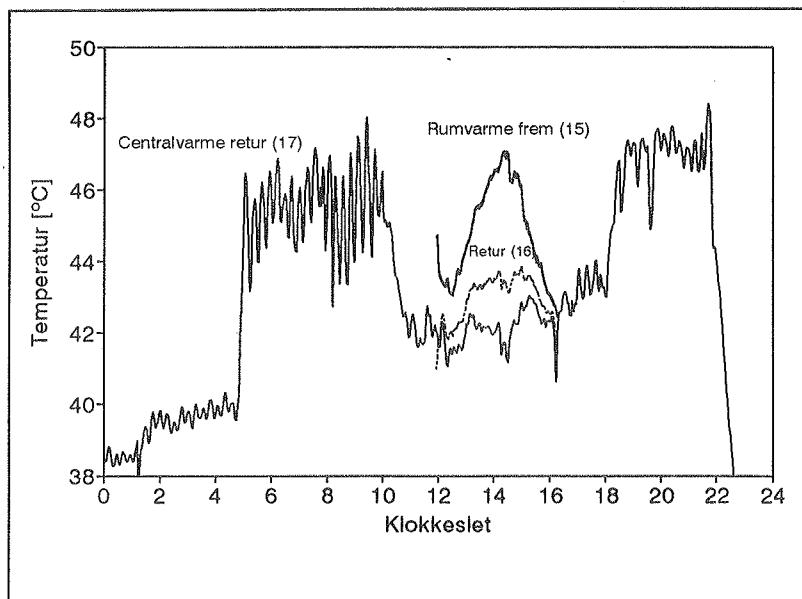


Figur 4.5 Varmtvandsforbrugets variation den 18. oktober 1994.

Det maksimale varmtvandsforbrug forekommer ca. kl. 8.00 og er målt til ca. 1900 l/h.

Mellem kl. 0 og frem til kl. 6 tappes kun ganske lidt varmt brugsvand.

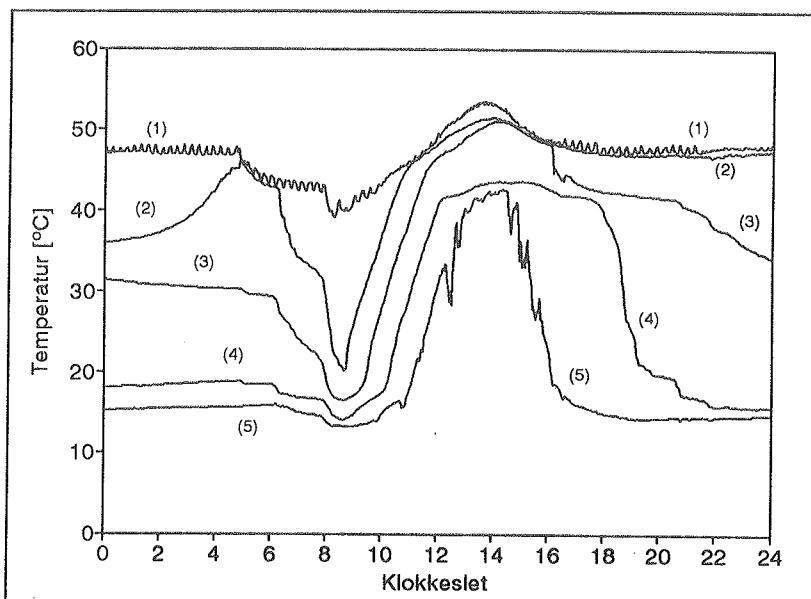
Det solrige vejr giver mulighed for rumopvarmning. Temperaturerne ved rumvarmevekslerne er vist på figur 4.6. Returtemperaturen i centralvarmekredsen (17) varierer i løbet af døgnet. Der er natsænkning i bebyggelsen mellem kl. 22 og kl. 5 næste morgen. Returtemperaturen i centralvarmekredsen under opvarmning er relativt lav mellem kl. 11 og kl. 18, hvilket er en fordel, når lageret skal levere energi til rumopvarmning.



Mellem kl. ca. 12.00 og kl. 16.30 leverer lageret energi til rumopvarmning.

Figur 4.6 Temperaturer målt ved rumvarmekredsen den 18. oktober 1994.

Lagertemperaturerne i de fem forskellige niveauer i lageret er vist på figur 4.7.



Figur 4.7 Målte lagertemperaturer den 18. oktober 1994.

Temperaturerne målt i øverste lagermålepunkt (1) er i gennemsnit ca. 48 °C, varierende fra ca. 40 °C under spidsbelastningen kl. 8 til 52 °C kl. 14 ved stor solvarmepræproduktion.

Det ses, at der er en relativt god temperaturlagdeling i lageret.

Temperaturerne (1) og (2) nærmer sig hinanden mellem kl. 0 og kl. 5. Dette skyldes varmedeling ned gennem lageret, men også en minimal opblanding i den øverste del af lageret forårsaget af cirkulationskredsen.

Volumenstrømmene i hhv. suppleringskreds, cirkulationskreds og rumvarmekreds er målt til ca. 1800 l/h, ca. 3600 l/h og ca. 1800 l/h.

Målte døgnværdier af total volumenmængde gennem lageret og tilført energi til varmelageret den 18. oktober 1994, afrundet til to betydende cifre, er vist i tabel 4.1.

	Total volumenmængde gennem lager	Tilført energi til lager
Solkreds	6,0 m ³ /døgn	+160 kWh/døgn
Suppleringskreds	43 m ³ /døgn	+460 kWh/døgn
Varmt brugsvand	3,8 m ³ /døgn	-160 kWh/døgn
Cirkulationskreds	87 m ³ /døgn	-450 kWh/døgn
Rumvarmekreds	8,0 m ³ /døgn	-18 kWh/døgn

Tabel 4.1 Målte døgnværdier for 18. oktober 1994.

Den 18. oktober 1994 tappes 3,8 m³ varmt brugsvand fra lageret. Volumenstrømmen i cirkulationskredsen forårsager en total volumenmængde gennem lageret på 87 m³/døgn. I alt udskiftes lagervolumenet ca. 50 gange i løbet af den 18. oktober.

Varmebalancen for lageret den 18. oktober stemmer, når der tages højde for varmetabet fra lageret og ændring af lagerets energiindhold. Solfangerfeltet udnytter ca. 40 % af det totale solindfald på solfangerne til opvarmning af varmt brugsvand. Forbruget af varmt brugsvand i bebyggelsen er relativt lavt. I gennemsnit tappes under 50 l varmt brugsvand pr. lejlighed og erhvervsmål. I bebyggelsen bor mange ældre mennesker og kun få børnefamilier, hvilket kan forklare det lave varmtvandsforbrug.

Cirkulationsledningstabet er af en betragtelig størrelse. Energimængden anvendt til dækning af cirkulationsledningstabet er ca. tre gange større end energimængden anvendt til opvarmning af det tappede brugsvand.

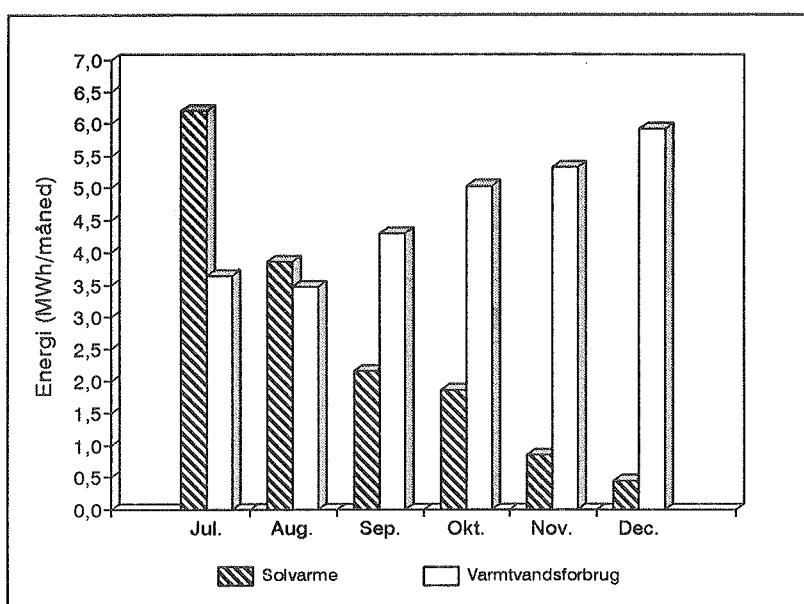
Ca. 10 % af den tilførte solenergimængde til lageret videreføres til rumopvarmning.

4.3 Månedsværdier for de første seks måneder.

Månedsværdierne er bestemt ved aflæsning af energimålerne HG1 til HG5.

Perioden fra den 1. juli til 31. december 1994 var kendtegnet ved ca. 5 % større globalstråling end et normalår. Specielt juli måned var meget solrig med høje lufttemperaturer.

Målte månedsværdier for solenergi tilført lager (HG1) og varmtvandsforbrug (HG3) ses på figur 4.8. I hver måned er vist to søjler, hvor venstre søjle viser solenergi og højre søjle viser energiforbruget til varmt brugsvand. Højden af søjlerne repræsenterer energimængden, som aflæses på den venstre lodrette akse.



Figur 4.8 Målte månedsværdier for solenergi og varmtvandsforbrug.

Solarmeydelsen falder gennem hele perioden og i december er ydelsen nede på 0,45 MWh. Energiforbruget til varmt brugsvand er relativt lavt i sommerferieperioden juli og august, men stiger derefter, og i julemåneden december er energiforbruget til varmt brugsvand oppe på 5,9 MWh. Koldtvandstemperaturen varierer mellem ca. 14 °C i juli og

I juli måned ydede solvarmeanlægget 6,2 MWh, og varmtvandsforbruget er aflæst til 3,6 MWh.

I både juli og august er der tilført mere solenergi til lageret, end der er anvendt til varmt brugsvand. Den resterende solenergi er bl.a. anvendt til at dække en del af cirkulationsledningstabet.

ca. 10 °C i december, hvilket forklarer lidt af stigningen. Den resterende stigning skyldes et større varmtvandsforbrug.

Variationen i varmtvandsforbruget er ikke til fordel for solvarmeanlæggets ydelse, fordi perioder af året med de største varmtvandsforbrug ligger i perioden med mindst solindfald.

Solvarmeanlæggets dækningsgrad ekskl. cirkulationsledningstab defineres som forholdet mellem tilført solenergi til lageret og varmtvandsforbruget. I dækningsgraden inkl. cirkulationsledningstab medregnes cirkulationsledningstabet til varmtvandsforbruget.

Måned i 1994	Dækningsgrad ekskl. cirkulations- ledningstab	Dækningsgrad inkl. cirkulations- ledningstab
juli	1,7	0,34
august	1,1	0,23
september	0,50	0,12
oktober	0,37	0,09
november	0,16	0,04
december	0,08	0,02
juli - december	0,56	0,13

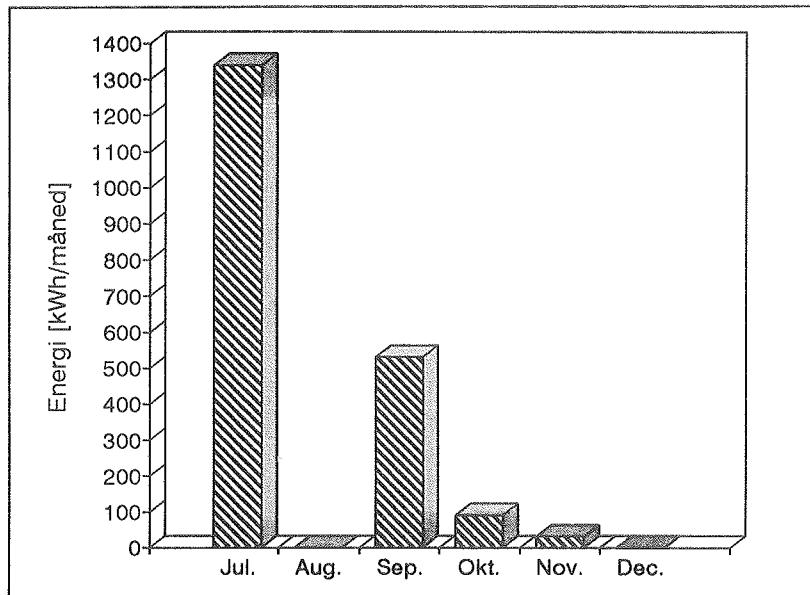
Tabel 4.2 Målte dækningsgrader for solvarmeanlægget i Glostrup.

Tabel 4.2 viser målte dækningsgrader for solvarmeanlægget. I september er dækningsgraden ekskl. og inkl. cirkulationsledningstab hhv. 0,50 og 0,12. Fra juli til december er den totale dækningsgrad ekskl. cirkulationsledningstab målt til 0,56.

Cirkulationstabet er stort og andrager ca. 14 MWh/måned. Første uge af november blev der installeret Circon ventiler i brugsvandssystemet, der regulerer volumenstrømmen i cirkulationsledningen således, at returtemperaturen bliver ca. 42 °C. Indsættelsen af disse temperaturbegrænsende ventiler nedsatte volumenstrømmen i cirkulationsledningen fra ca. 3600 l/h. til ca. 2200 l/h. Samtidig blev varmetabet fra cirkulationsledningen nedsat med ca. 10 %.

Efter nedsættelsen af volumenstrømmen i cirkulationsledningen til ca. 2200 l/h er der nu ingen målbar opblanding i den øverste del af lageret forårsaget af cirkulationskredsen.

Rumopvarmningskredsen har været i drift i juli og september til december. Foruden enkelte kælderlokaler var der et meget begrænset rumopvarmningsbehov i juli måned. I august var rumvarmekredsen sat ud af drift, fordi man ønskede en måleperiode uden rumopvarmning. Energimængden leveret til centralvarmekredsen ses på figur 4.9.



Figur 4.9 Målt energimængde overført fra lager til rumopvarmning.

	Energimængde fra juli til december
Solvarme (HG1)	15 MWh
Supplerende opvarmning (HG2)	100 MWh
Varmt brugsvand (HG3)	28 MWh
Cirkulationsledningstab (HG4)	84 MWh
Rumopvarmning (HG5)	2,0 MWh

Tabel 4.3 Målte energimængder fra juli til december 1994.

Solvarmeanlæggets ydelse i hele perioden er målt til 15,4 MWh, hvilket svarer til ca. $200 \text{ kWh}/\text{m}^2$. Omkring 13 % af solenergien er anvendt til rumopvarmning. Det vurderes, at lagerets varmetab i perioden andrager ca. 1 MWh.

I perioden er der tappet 680 m^3 varmt brugsvand eller ca. $3,7 \text{ m}^3/\text{døgn}$, svarende til ca. $50 \text{ l}/(\text{døgn } \text{m}^2)$. Største varmtvandsforbrug foregik den 24. december med $6,1 \text{ m}^3$.

Ydelsen er lidt lavere end forventet, hvilket bl.a. kan forklares ved nogle uheldige driftsproblemer i juli og august. En fejl i solkredsens pumpe medførte, at pumpens kapacitet faldt dagligt med ca. 5 %. Dette medførte forhøjede temperaturer i solfangerkredsen og forårsagede efter nogle uger kogning i solfangerkredsen. De høje temperaturer viste sig senere at have forårsaget tilkalkning af solvarmeveksleren med en væsentligt forringet varmeoverføringsevne til følge.

Det vurderes, at solvarmeanlægget vil kunne yde ca. $500 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ år})$ uden driftsproblemer.

I juli måned leverede rumopvarmningskredsen 1,3 MWh til centralvarmekredsen.

Oktober til december leveres kun en ganske lille energimængde til rumopvarmning.

5. Beregningsmodel.

Årsydelsen af et solvarmeanlæg kan beregnes ved anvendelse af et edb-program, når bl.a. anlægsopbygning, varmtvandsforbrug og vejrdata kendes. Når der ses bort fra programmets beregningsnøjagtighed, vil nøjagtigheden af beregningen bl.a. afhænge af kendskabet til anlæggets komponenter, varmtvandsforbruget, cirkulationstabets og vejrdata.

Programmet skal være fleksibelt, således at det kan anvendes til flest mulige anlægsopbygninger.

Målsætningen i dette projekt er udvikling af en beregningsmodel, der kan beregne årsydelsen for et mellemstort solvarmeanlæg bestående af solfangerfelt, rørsystem og lager. Lagermodellen betragtes i dette projekt som værende den centrale del, bl.a. fordi temperaturlagdelingen i lageret har stor betydning for et solvarmeanlægs årsydelse. Det er muligt at sammenligne beregningerne med lagermålingerne beskrevet i kapitel 3 og 4.

Der er gennem årene udviklet mange beregningsprogrammer til solvarmeanlæg. Som eksempler på disse kan nævnes EMGP3 /8/ og TRNSYS /9/, som begge er udenlandske programmer.

5.1 Lager.

Opbygning af temperaturlagdelingen i lageret afhænger hovedsagelig af lagerets udformning og lagerets ydre påvirkninger, herunder energitilførsel og energiforbrug.

Ved udvælgelse af beregningsmetode i dette projekt er det vigtigt med en præcis beregning af temperaturlagdeling i lageret ved op til fem forskellige kredse tilsluttet lageret. De fem kredse er solopvarmningskreds, suppleringskreds, tapning af varmt brugsvand, cirkulationskreds og rumopvarmningskreds.

Som tilnærmede anvendes en én-dimensional beregningsmetode, hvilket medfører, at der kun regnes på temperaturforskelle i lagerets vertikale udstrækning. Desuden gøres den antagelse, at lageret er udformet som en lodretstående cylinder. Disse to forhold reducerer programmeringsarbejdet betydeligt, samtidigt med at det er rimelige forudsætninger.

Følgende to beregningsmetoder er blandt de mest anvendte:

- Lagermodel med et KONSTANT antal lag.
- Lagermodel med et VARIABELT antal lag.

I metoden med et konstant antal lag opdeles lageret i N fuldt opblandede lag. Valg af N afhænger af ønsket om beregningsnøjagtighed, således at større N normalt giver en bedre beregningsnøjagtighed. Hvis $N = 1$ regnes på et fuldt opblændet lager uden temperaturlagdeling. Der er mulighed for, at lagene kan have forskellige volumener, men volumenet og placeringen af det enkelte lag holdes konstant under beregningerne.

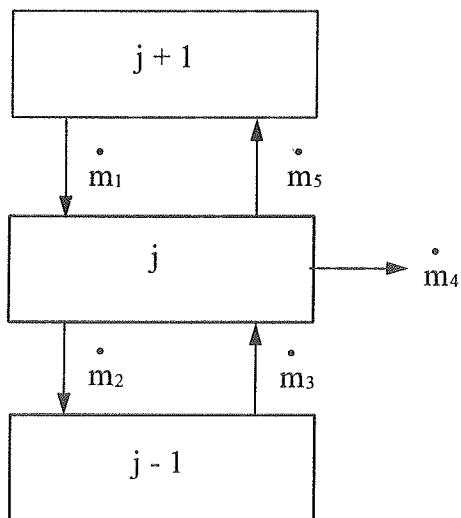
For hvert enkelt lag opstilles en ligning over energibalancen, hvorefter de N ligninger løses eksplisit og de nye temperaturer findes. Energibalancen for lag j er

$$C_j \frac{dT_j}{dt} = \sum q_j \quad (5.1)$$

- C_j : Lagets effektive varmekapacitet [J/K]
- $\frac{dT_j}{dt}$: Lagets temperaturændring [K]
- dt : Tidsskridtet [s]
- q_j : Energistrømme til og fra laget [W]

Under den numeriske løsning af ligning (5.1) inddeltes beregningerne i små tidsskridt, hvor de nye temperaturer i slutningen af tidsskridtet udregnes ud fra temperaturforhold og varmestrømme ved tidsskridtets start. Under beregningerne kan tidsskridtets længde afgøres således, at temperaturændringen i laget ikke er større end en vis fastsat grænse, f.eks. 1,0 K. Herved opnås en nøjagtigere beregning.

Væskestrømmenes indflydelse på temperaturændringen i laget behandles som vist på figur 5.1. Der vises tre lag et sted i lageret, hvor det midterste lag er nr. j. Ned gennem lageret er der en væskestrøm forårsaget af f.eks. solopvarmning og en væskestrøm opad forårsaget af f.eks. tapning af varmt brugsvand. I eksemplet er der et udløb fra lageret i lag nr. j.



I et givet tidsskridt vil energibalancen for lag j afhænge af væskestrømmene til og fra lag j.

I tidsskridtet vil massestrømmen \dot{m}_4 forårsage en energistrøm ud af laget.

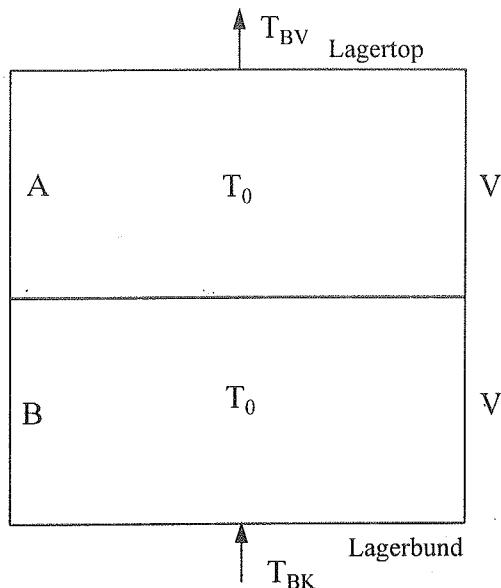
Den resulterende massestrøm af \dot{m}_1 og \dot{m}_5 anvendes til beregning af energistrømmen mellem lag j og lag $j+1$.

Den resulterende massestrøm af \dot{m}_2 og \dot{m}_3 anvendes til beregning af energistrømmen mellem lag j og lag $j-1$.

Figur 5.1 Væskestrømme mellem lag for beregningsmetode med et konstant antal lag.

I metoden med et variabelt antal lag beregnes temperaturlagdelingen ved anvendelse af et variabelt antal fuldt opblandede lag, der både kan ændre størrelse og placering fra tidsskridt til tidsskridt. Den vigtigste forskel mellem de to beregningsmetoder er hvordan væskestrømmene i lageret behandles. På figur 5.1 forårsager væskestrømmene energiuudveksling mellem lagene, men i beregningsmetoden med et variabelt antal vil væskestrømmene ikke forårsage energiuudveksling mellem lagene. Væskestrømmene vil derimod ændre størrelse og placering af lagene i beregningsmodellen.

Forskellen mellem de to beregningsprincipper illustreres bedst ved et simpelt eksempel. I eksemplet ses bort fra varmetab fra lageret og intern varmeledning i lageret.



Et lager til et solvarmeanlæg er opvarmet til temperaturen T_0 . Til tidspunktet $t = 0$ tappes vand fra toppen af lageret med temperaturen T_{BV} , og der tilføres koldt vand i bunden af lageret med temperaturen T_{BK} . Lageret er i beregningerne opdelt i to lag, A og B, med samme volumen V .

I hvert tidsskridt tappes en volumenmængde på halvdelen af V . Forudsætningen i beregningen er, at T_{BK} er lavere end T_0 , således at der ikke sker opblanding i lageret.

Figur 5.2 Beregningsmæssig udformning af lager.

I lagerelementerne tegnes temperaturprofilet med en stiplet linie, således at lagets venstre side repræsenterer en lavere temperatur end lagets højre side.

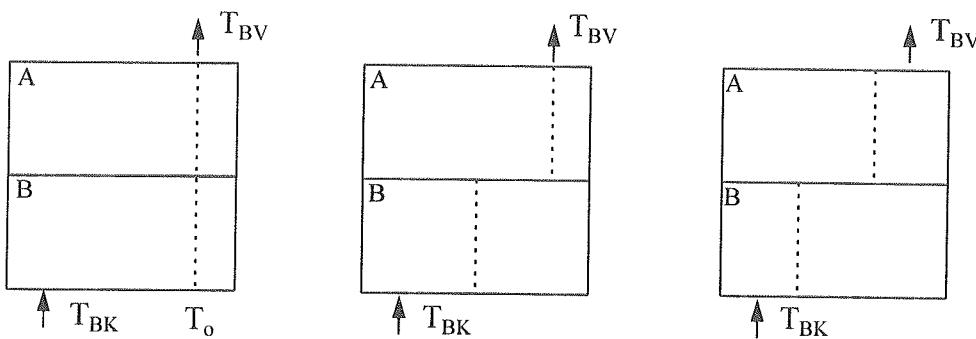
Figur 5.3 viser temperaturlagdelingen i lageret i to tidsskridt, når beregningsmetoden med et konstant antal lag anvendes. Efter to tidsskridt er der tappet halvdelen af lagerets volumen. I startsituationen er der en konstant temperatur T_0 i begge lag hhv. A og B. Koldt-vandstemperaturen T_{BK} er lavere end T_0 , fordi indløbsspilen ligger til venstre for den stipede linie. I 1. tidsskridt tappes vand fra lag A med temperaturen T_0 . Der sker ingen ændring af temperaturen for lag A, fordi temperaturen af det vand, der strømmer ind fra lag B, har samme temperatur som lag A. Temperaturen falder derimod i lag B, fordi der strømmer koldt vand ind i laget med en temperatur på T_{BK} . Halvdelen af lagvolumenet flyttes, og den nye temperatur i laget er gennemsnitstemperaturen af T_0 og T_{BK} .

I 2. tidsskridt tappes igen et halvt lagvolumen, hvilket medfører, at både temperaturen af lag A og lag B falder. Udløbstemperaturen T_{BV} er stadigvæk T_0 , fordi udløbstemperaturen fra laget ikke berøres af indløbstemperaturer til laget i samme tidsskridt.

Figur 5.4 viser temperaturlagdelingen i lageret i to tidsskridt, når beregningsmetoden med variable lag anvendes. Begyndelsessituationen er den samme som på figur 5.3. I 1. tids-skridt tilføres vand i bunden af lageret. Dette medfører, at der dannes et nyt lag C, der har samme volumen som den volumenmængde, der er strømmet ind i bunden. Temperaturen af lag C er T_{BK} . Lag B ændrer hverken størrelse eller temperatur, men flyttes opad svarende til volumenet af lag C. Halvdelen af lag A tappes, og den resterende del flyttes op i toppen af lageret.

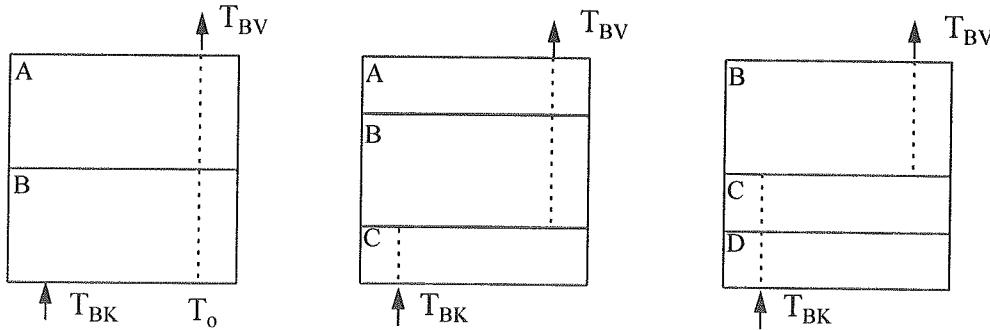
I 2. tidsskridt dannes et nyt lag D og lag A, B og C flyttes opad. Denne flytning medfører, at hele lag A tappes og dermed ikke mere findes i lageret. Den nederste halvdel af lageret har nu temperaturen T_{BK} , og den øverste halvdel har temperaturen T_0 .

Startsituation 1. tidsskridt 2. tidsskridt



Figur 5.3 Temperaturlagdeling i beregningsmodel med et konstant antal lag.

Startsituation 1. tidsskridt 2. tidsskridt



Figur 5.4 Temperaturlagdeling i beregningsmodel med et variabelt antal lag.

I beregningsmodellen med et konstant antal lag sker der en temperaturudjævning mellem lagene, som skyldes numerisk diffusion. Denne temperaturudjævning kan nedbringes ved at have flere lag i modellen. I specialet tilfældet, hvor alle lag er lige store, og et helt lagvolumen flyttes ad gangen, er det muligt at undgå numerisk diffusion. Beregningsmodellen med variable lag klarer sig i dette tilfælde bedre og beregner temperaturfordelingen i lageret matematisk korrekt. I beregningsmodellen med variable lag vil der i de fleste tilfælde hurtigt dannes mange lag i modellen, hvilket gør det nødvendigt at sammenlægge lag, hvis f.eks. temperaturforskellene mellem to nabolag er under en vis grænse. Når lag sammenlægges sker der numerisk diffusion, med den kan i de fleste tilfælde styres bedre end i beregningsmodellen med et konstant antal lag.

I det efterfølgende beskrives kort enkelte eksisterende programmer.

EMGP3 beregner temperaturlagdelingen i lageret efter beregningsmodellen med et konstant antal lag. Programmet er modulopbygget og derfor meget fleksibelt. Det er desuden muligt at anvende brugerdefinerede inddata til f.eks. lageret, således at brugeren selv kan vurdere, om der er god overensstemmelse mellem målinger og beregninger.

TRNSYS kan beregne temperaturlagdelingen i lageret med begge metoder. Maksimum antal lag er hhv. 15 og 50 for beregningsmodellen med et konstant antal lag og et variabelt antal lag. Beregningsmodellen med et variabelt antal lag kaldes i TRNSYS for plug flow. TRNSYS kan dog kun regne på to forskellige volumenstrømme gennem lageret, samtidig med at der er faste regler for placering af indløb til og udløb fra lageret. Dette gør TRANSYS til et mindre fleksibelt program, som derfor ikke kan anvendes i dette projekt. Beregningsproceduren anvendt i TRNSYS er bl.a. beskrevet i /10/.

PCSOL /11/ er et dansk udviklet program der anvender beregningsmodellen med et variabelt antal lag. Programmet er udviklet til brug for mindre solvarmeanlæg. Programmet kan ikke anvendes i dette projekt, fordi det kun kan regne på én væskestrøm gennem lageret forårsaget af tapning af varmt brugsvand.

På Laboratoriet er der udviklet mange detaljerede beregningsprogrammer, se f.eks. /5/ og /15/.

En vurdering af hvilken af de to beregningsmetoder der bør anvendes i det videre arbejde peger på, at beregningsmetoden med et variabelt antal lag er mest velegnet, når der som i dette tilfælde skal regnes på op til fem forskellige væskestrømme gennem lageret. Fremover vil der derfor kun ses på beregningsmetoden med et variabelt antal lag.

5.1.1 Beregningsmodel med et variabelt antal lag.

Det er naturligvis et ønske, at beregningsprogrammet er fleksibelt, således at det kan anvendes til flest mulige anlægsopbygninger. Udviklingen af et fleksibelt program med en flot brugerflade er dog så tidskrævende, at det i dette projekt er nødvendigt at begrænse programmeringsarbejdet. Derfor er der specielt lagt vægt på at udvikle en velfungerende lagermodel.

Lagermodellen er tiltænkt mellemstore solvarmeanlæg, hvor der anvendes eksterne varmevekslere. Interne varmevekslere som f.eks. spiralvarmevekslere, der normalt anvendes i mindre solvarmeanlæg, er ikke medtaget i lagermodellen, men kan senere medtages uden større problemer.

I beregningsmetoden med et variabelt antal lag vil der i hvert tidsskridt, med strømninger gennem lageret, dannes nye lag i lagermodellen. Nogle lag vil ændre størrelse og placering og andre igen fjernes fra lagermodellen. Dette beregningsprincip er derfor vanskeligere at administrere end beregningsmetoden med et konstant antal lag, hvor lagene hverken kan ændre størrelse eller placering. Programmeringsmæssigt er det en fordel at anvende dynamiske datastrukturer, pointere, der som en harmonika han udvides og formindskes under afviklingen af programmet. Pointere vil blive beskrevet senere.

Under udviklingen af lagermodellen er der anvendt følgende forudsætninger:

- Én-dimensional beregningsmodel med et variabelt antal fuldt opblandede lag.
- Lager udformet som lodretstående cylinder.
- Konstant varmekapacitet, densitet og varmeledningsevne for væsker og materialer.
- Beholdermaterialet medtages ikke i lagerets effektive varmekapacitet.
- Konstant varmeoverføringsevne for pladevarmevekslere.
- Konstant varmetabskoefficient for hhv. top, bund og sider af lagerbeholder.
- Koldt nedfald langs beholdersiderne medtages ikke.
- Indløbsudformninger til lageret skaber kun omrøring i lageret omkring en brugerdefineret op blandingszone omkring indløbet.

Den én-dimensionale beregningsmodel kan anvendes, fordi konvektive forhold i lageret udjævner temperaturgradienter på tværs at lagerets længderetning.

Lagerets udformning som en lodret cylinder er en tilnærmelse, som i de fleste tilfælde kan forsvarer. Lagerbeholderens udformning adskiller sig mest fra en lodret cylinder ved de hvælvede endebunde, således at lageret kan modstå høje tryk. Desuden er lagerbeholderen forsynet med et mandehul.

Konstant varmekapacitet, densitet og varmeledningsevne for vand medfører først og fremmest kortere beregningstid. Volumenændringer af vandet ved opvarmning medtages ikke, hvilket er en stor lettelse under programmeringsarbejdet, samtidig med at det er en forsvarlig tilnærmelse. Tabel 5.1 viser stofværdier for vand ved forskellige temperaturer, der allmindeligt forekommer i et lager.

Temperatur [°C]	Densitet [kg/m ³]	Varmekapacitet [kJ/(kg K)]	Varmeledningsevne [W/(m K)]
10	999,7	4,182	0,603
30	995,7	4,178	0,618
50	988,0	4,181	0,643
70	977,7	4,190	0,662
Største afvigelse i forhold til værdier ved 30 °C, [%]	1,8	0,3	7,0

Tabel 5.1 Stofværdier for vand ved forskellige temperaturer, fra /12/.

Vands densitet, varmekapacitet og varmeledningsevne ved 30 °C er anvendt. For densitet og varmekapacitet ligger den største afvigelse i temperaturintervallet 10 °C til 70 °C på hhv. 1,8 % og 0,3 % i forhold til stofværdier ved 30 °C, se tabel 5.1. Vands varmeledningssevne stiger ved stigende temperatur, og her er afvigelsen op til 7 %. Det kan forsvarer at regne varmeledningsevnen konstant, fordi varmeledningsevnen for beholdermaterialet normalt ikke kendes med stor nøjagtighed, og fordi varmeledningen kun har lille indflydelse på temperaturlagdelingen i lageret.

Beholdermaterialet har normalt stor indflydelse på varmeledningen ned gennem lageret og medtages derfor. For almindelig stål anvendes $60 \text{ W}/(\text{m K})$ som varmeledningsevne, fra /12/. Varmekapaciteten af beholdermaterialet og isoleringen medtages ikke, hvilket er en tilnærmelse, der normalt kan forsvarer.

Koldt nedfald langs beholdersiderne forårsaget af varmetabet fra lageret medtages ikke. Dette kan forsvarer fordi det kolde nedfald er beskedent, når der er en stor temperaturlagdeling i lageret.

Det er meget vanskeligt at beregne indløbsudformningens indflydelse på temperaturlagdelingen i lageret. Det forudsættes derfor, at den opblanding, indløbsudformningen forårsager i lageret, udregnes efter en brugerdefineret opblandingszone omkring indløbet. Størrelsen af opblandingszonen er konstant for det givne indløb under alle driftsforhold. I zonen vil der ske en opblanding således, at hele volumet får samme temperatur.

Beregningerne inddeltes i små tidsskridt, hvor det indstrømmende volumen i tidsskridtet beregnes som et volumen med én middeltemperatur. Volumenet, der strømmer ud af et udløb i et tidsskridt, repræsenteres ligeledes af et volumen med én middeltemperatur.

Jo mindre tidsskridt, jo præcisere bliver beregningen af lagerets termiske virkemåde. I løbet af tidsskridtet vil de enkelte kredse levere en vis volumenmængde til lageret V_{ind} . Tidsskridtets længde kan f.eks. vælges således, at dette volumen højst udgør en vis del af lagerets totale volumen V_{lager} .

Beregningsgangen i programmet angående lagerdelen er som følger, hvor elementernes størrelse, placering og temperaturændring beregnes som følge af én påvirkning ad gangen.

1. Vand føres ind i lageret for de kredse, der er i drift, og nye lag dannes i forhold til indstrømmet volumen i tidsskridtet. Lagerets volumen bliver derfor beregningsmæssigt større. Alle lag får beregnet deres nye placering og størrelse i lageret.
2. Der foretages en opblanding mellem lagene, hvis der forefindes lag med højere temperatur under lag med lavere temperatur. Lag der opblandes til samme temperatur sammenlægges.
3. Vand føres ud af lageret for de kredse, der er i drift. Der startes med nederste udløb i lageret og afsluttes med øverste. Udløbet tager vandet fra lageret i niveau med udløbet og opefter. Lagerets volumen er nu igen det samme som i startsituationen.
4. Der foretages en implicit beregning af varmetab fra lagene og varmeledning mellem lagene.
5. Lag, der har en indbyrdes temperaturforskæl lavere end en vis grænse, sammenlægges. Herved minimeres antal af lag, men samtidig sker der numerisk diffusion.
6. Ny beregning udføres for næste tidsskridt.

Det ses, at alle væskestrømme gennem lageret behandles først, hvorefter varmetab og varmeledning behandles senere i beregningsforløbet. Dette skyldes, at væskestrømmene gennem lageret normalt har meget større indflydelse på temperaturlagdelingen i lageret end varmeledning og varmetab. Det er desuden valgt at først føre vand ind i lageret og derefter tage vand ud igen. Herved opnås, at indløbstemperaturen til lageret kan have indflydelse på udløbstemperaturen fra lageret i samme tidsskridt. Valg af denne beregningsform forudsæt-

ter at alle indløbstemperaturer kendes ved tidsskridtets start. Dette er muligt hvis systemet udenfor lageret består af elementer med kendte temperaturer.

Programmering af beregningsprogrammet er foretaget i Pascal version 6.0, se /13/. Helt centralt i programmeringen er anvendelse af dynamiske datastrukturer, også kaldet pointere. Hvert lag i lagermodellen repræsenteres af en pointervariabel, hvis type i dette tilfælde er en record, som er en samling af data vedrørende ét element.

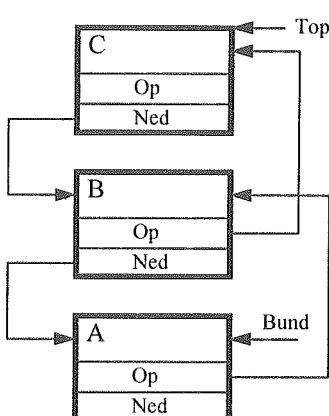
Lag. L	Placering af lagets underkant i forhold i lagerets underkant, [m].
Lag. X	Lagets tykkelse, [m].
Lag. V	Lagets volumen, [m^3].
Lag. T_{gl}	Lagets temperatur før beregning, [$^{\circ}C$].
Lag. T_{ny}	Lagets temperatur efter beregning, [$^{\circ}C$].
Lag. Varmekapacitet	Lagets effektive varmekapacitet, [J/K].
Lag. Op	Peger på laget ovenover.
Lag. Ned	Peger på laget nedenunder.

Figur 5.5 Opbygning af pointervariabel i beregningsprogram.

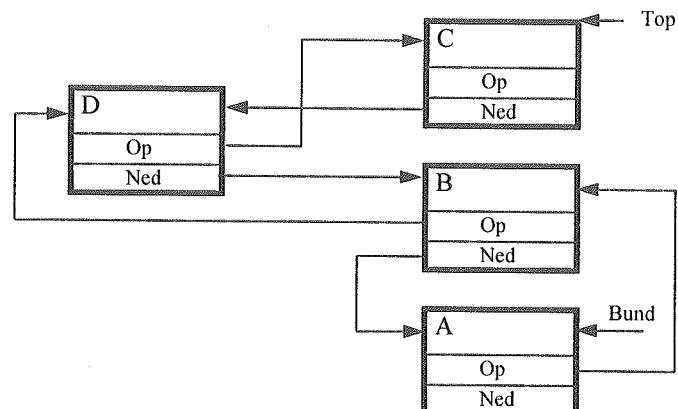
Alle lag i lagermodellen er opbygget af en pointervariabel som vist på figur 5.5. De enkelte lag forbinder ved hjælp af Lag.Op og Lag.Ned, der hhv. peger på laget ovenover og nedenunder. Når f.eks. Lag.Op aktiveres, flyttes ét lag op. Lagene i modellen har i principippet ingen nummerering, bortset fra at der holdes styr på nederste og øverste lag i lagermodellen.

Eksempel på indsættelse af lag i lagermodellen vises på figur 5.6.

Før indsættelse af element D



Efter indsættelse af element D



Figur 5.6 Eksempel på lageropbygning vha. pointervariable. Indsættelse af lag.

På figur 5.6 er lagermodellen opbygget af tre lag A, B og C. Disse tre lag er kædet sammen med pile. Pilen Bund peger på nederste lag, og pilen Top peger på øverste lag. Når et nyt lag indsættes i lagermodellen, gøres dette ved at flytte pilene, således at det nye element D indgår i kæden af elementer. På lignende måde kan der også fjernes lag fra lagermodellen.

Lageret defineres ved den indvendige diameter D_i og indvendige højde H_i . Beholdermaterialets godstykke t_b defineres ligeledes. Alle placeringer af indløb/udløb defineres ved den lodrette afstand fra overkanten af lagerbunden til centrum af indløbet/udløbet.

Hvert enkelt lag er defineret ved placering L , tykkelse X og volumen V . Placeringen L bestemmes ud fra den lodrette afstand mellem overkant af lagerbund og lagets underkant. For lag j er tykkelsen X_j

$$X_j = L_{j+1} - L_j \quad [m] \quad (5.2)$$

hvor lag $j+1$ er nabolaget ovenover.

Volumenet af lag j bestemmes ud fra formlen

$$V_j = X_j \pi \frac{D_i^2}{4} \quad [m^3] \quad (5.3)$$

Den effektive varmekapacitet C_j for lag j bestemmes ud fra formlen

$$C_j = V_j c_{vand} \rho_{vand} \quad [J/K] \quad (5.4)$$

Varmebetet fra lageret beregnes ud fra kendskabet til fordelingen af varmetabskoefficienten $(UA)_{tab}$. Varmetabskoefficienten for hhv. lagertop, lagerside og lagerbund benævnes $(UA)_{tab,top}$, $(UA)_{tab,side}$ og $(UA)_{tab,bund}$ og har enheden $[W/K]$. Varmetabskoefficienterne bestemmes ud fra kendskab til isoleringsmateriale og isoleringstykke. For lag j , som hverken er det nederste eller øverste lag, beregnes varmetabskoefficienten ud fra formlen

$$(UA)_{tab,j} = \frac{X_j}{H_i} (UA)_{tab,side} \quad [W/K] \quad (5.5)$$

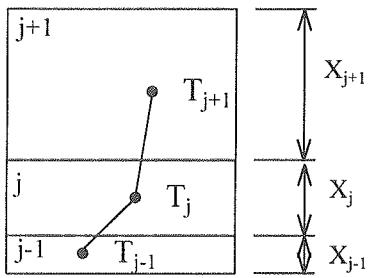
I beregning af varmetabskoefficienten for det nederste lag tillægges $(UA)_{tab,bund}$, og ved det øverste lag $(UA)_{tab,top}$. Varmebetet $q_{tab,j}$ fra lag j bestemmes ved at multiplicere varmetabskoefficienten for lag j med temperaturdifferensen mellem lag j og omgivelsestemperaturen T_{omg} .

$$q_{tab,j} = (UA)_{tab,j} (T_j - T_{omg}) \quad [W] \quad (5.6)$$

Varmeledningen ned gennem lageret foregår både i vandet og i beholdermaterialet. Til beregning af varmeledningen anvendes Fouriers varmeledningsligning med den tilnærmelse, at temperaturforløbet mellem to nabolag er den samme som i en stationær situation. Denne tilnærmelse danner grundlag for de fleste numeriske metoder til beregning af varmeledning.

Varmeledningen mellem lag j og $j-1$ bestemmes af formel (5.7), hvor λ_{res} og A_{res} er hhv. den resulterende varmeledningsevne og tværsnitsareal for vand og beholdermateriale.

$$L_{j,j-1} = A_{res} \frac{\lambda_{res}}{(X_j + X_{j-1}) / 2} \quad [W/K] \quad (5.7)$$



Tilnærmelsen med stationære forhold under varmeledning forudsætter et retliniet temperaturforløb mellem midten af hvert lag. Tilnærmelsen kan forsvarer, så længe lagtykkelerne ikke er for store. Derfor er det i programmet muligt at indføre en maksimal størrelse af et lag, således at beregningen bliver så præcis som muligt.

Figur 5.7 Beregning af varmeledning.

Den resulterende varmeledningsevne bestemmes som en middelværdi af varmeledningsevnen for vand og beholdermateriale i forhold til deres varmeledningsevne og arealforhold.

$$\lambda_{\text{res}} = \frac{\lambda_{\text{vand}} A_{\text{vand}} + \lambda_{\text{beholder}} A_{\text{beholder}}}{A_{\text{vand}} + A_{\text{beholder}}} \quad [\text{W}/(\text{m K})] \quad (5.8)$$

$$A_{\text{vand}} = \pi \frac{D_i^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (5.9)$$

$$A_{\text{beholder}} = \pi \frac{(D_i + 2t_b)^2 - D_i^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (5.10)$$

Varmebalancen og varmeledningens indflydelse på temperaturerne i lageret bestemmes ved en implicit beregning. Varmebalancen for lag j opstilles for et givet tidsskridt Δt .

$$\frac{dQ_j}{dt} = \frac{C_j dT}{dt} \approx \frac{C_j (T_j^{\text{ny}} - T_j^{\text{gl}})}{\Delta t} \quad (5.11)$$

$$\frac{C_j (T_j^{\text{ny}} - T_j^{\text{gl}})}{\Delta t} = L_{j,j+1} (T_{j+1}^{\text{ny}} - T_j^{\text{ny}}) - L_{j,j-1} (T_j^{\text{ny}} - T_{j-1}^{\text{ny}}) - (UA)_{\text{tab},j} (T_j^{\text{ny}} - T_{\text{omg}}) \quad (5.12)$$

Ligning (5.12) kan omskrives til en ligning med fire konstanter $A1$, $A2$, $A3$ og $A4$, hvor det forudsættes at omgivelsestemperaturen T_{omg} ikke influeres af varmetabet fra lageret.

$$A1_j T_{j-1}^{\text{ny}} + A2_j T_j^{\text{ny}} + A3_j T_{j+1}^{\text{ny}} = A4_j \quad (5.13)$$

$$A1_j = L_{j,j-1}$$

$$A2_j = -\frac{C_j}{\Delta t} - L_{j,j+1} - L_{j,j-1} - (UA)_{\text{tab},j}$$

$$A3_j = L_{j,j+1}$$

$$A4_j = -\frac{C_j}{\Delta t} T_j^{\text{gl}} - (UA)_{\text{tab},j} T_{\text{omg}}$$

Ligning (5.11) løses for hvert enkelt lag i lagermodellen. Ligningerne kan samles i ét ligningssystem:

$$\begin{bmatrix} A_{2_1} & A_{3_1} \\ \vdots & \vdots \\ A_{1_j} & A_{2_j} & A_{3_j} \\ \vdots & \vdots \\ A_{1_n} & A_{2_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1^{ny} \\ \vdots \\ T_j^{ny} \\ \vdots \\ T_n^{ny} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{4_1} \\ \vdots \\ A_{4_j} \\ \vdots \\ A_{4_n} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Koefficientmatricen i (5.14) har nuller uden for de tre hoveddiagonaler og kan løses ved Gauss-elimination som beskrevet i bl.a /14/. Række 1 er nederste lag i lagermodellen og række n refererer til øverste lag i lagermodellen.

Energitilførslen til lageret for kreds j $q_{kreds\ j}$, bestemmes ud fra massestrømmen $m_{kreds\ j}$ i kredsen multipliceret med varmekapaciteten for vand c_{vand} og middeltemperaturdifferensen mellem indløbstemperaturen T_{ind} og udløbstemperaturen T_{ud} i kredsen.

$$q_{kreds\ j} = m_{kreds\ j} c_{vand} (T_{ind} - T_{ud}) \quad [W] \quad (5.15)$$

På figur 5.8 vises et eksempel på, hvordan beregningerne foregår. Lageret opvarmes med solvarme, og under forbrug tappes varmt brugsvand fra lageret. Pilene viser placeringen af indløb til og udløb fra lageret. Højden af de enkelte lag repræsenterer et volumen, således at større laghøjde medfører større volumen. Lageret er ved tidsskridtets start inddelt i fire lag, nummereret fra 1 til 4. Volumenet af de enkelte lag er V_1 til V_4 med temperaturerne T_1 til T_4 . De lodrette stiplede linier viser temperaturen i lageret. Afstanden mellem venstre beholdervæg og den stipede linie repræsenterer lagets temperatur, således at større afstand medfører højere temperatur i laget.

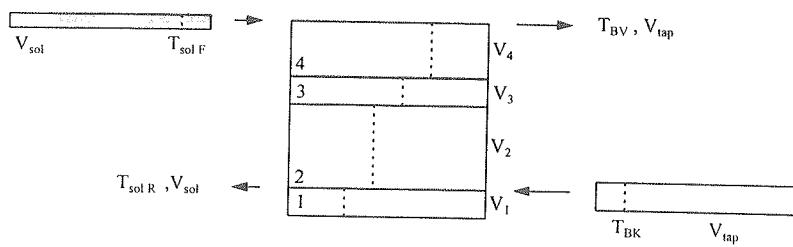
I det udvalgte tidsskridt er solkredsen i drift og leverer en volumenmængde V_{sol} med en temperatur $T_{sol\ F}$ i toppen af lageret, se figur 5.8. Temperaturen af vandet, der løber tilbage til solfangeren, benævnes $T_{sol\ R}$. I samme tidsskridt tappes vand fra lageret med temperaturen T_{BV} , og der tilføres koldt brugsvand i den nederste del af lageret med et volumen på V_{tap} og en temperatur T_{BK} .

I 1. step føres vandet fra de to kredse ind i lageret, hvorved der dannes to nye lag. Lageret bliver nu beregningsmæssigt større svarende til V_{sol} og V_{tap} . I højde med et indløb skal der være en laggrænse mellem to lag, således at den indstrømmende volumenmængde i tids-skridtet placeres mellem de to lag. F.eks. føres V_{tap} ind mellem volumenerne V_1 og V_2 . Placeringen af udløbene i forhold til lagerbundens overkant ændres ikke.

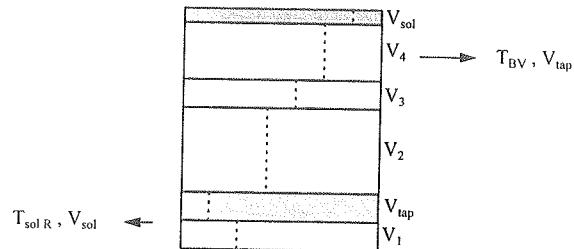
I 2. step sker der en opblanding i lageret, hvis der findes varmere lag under koldere lag. I dette tilfælde er temperaturen T_1 højere end T_{BK} , hvorfor der sker en sammenlægning af de to lag med et volumen beregnet som summen af V_1 og V_{tap} . Der foretages en beregning af middeltemperaturen vægtet i forhold til volumenstørrelserne af de to lag.

I 3. og 4. step føres vand ud af lageret i niveau med udløbene. Der startes med nederste udløb og afsluttes med øverste udløb. Udløbet tager vandet fra lageret i niveau med udløbet og opefter. Det nederste udløb i eksemplet fjerner volumenmængden V_{sol} fra lageret. I dette

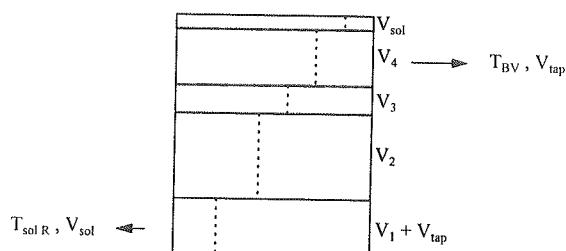
Start



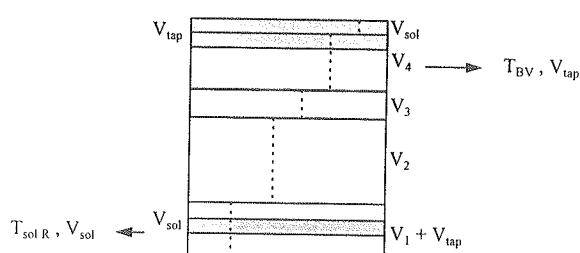
1. step - vand føres ind



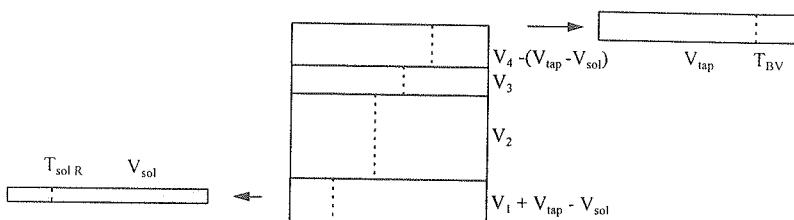
2. step - opblanding



3. step - placering af vandvolumener der skal føres ud



4. step - vand føres ud



Figur 5.8 Eksempel på beregning med lagermodel med variabelt antal lag.

tilfælde er volumenet mellem udløbet og laggrænsen mellem de to nederste lag større end V_{sol} , hvorfor alt vandet kommer fra nederste lag. Nederste lag bliver derfor V_{sol} mindre.

Efter hvert udløb ændres lagenes placering i forhold til den volumenmængde, der er fjernet fra lageret. Efter at der er ført vand ud af alle udløb, er lagerets volumen nu igen det samme som i startsituationen. Der er nu fire lag i beregningsmodellen.

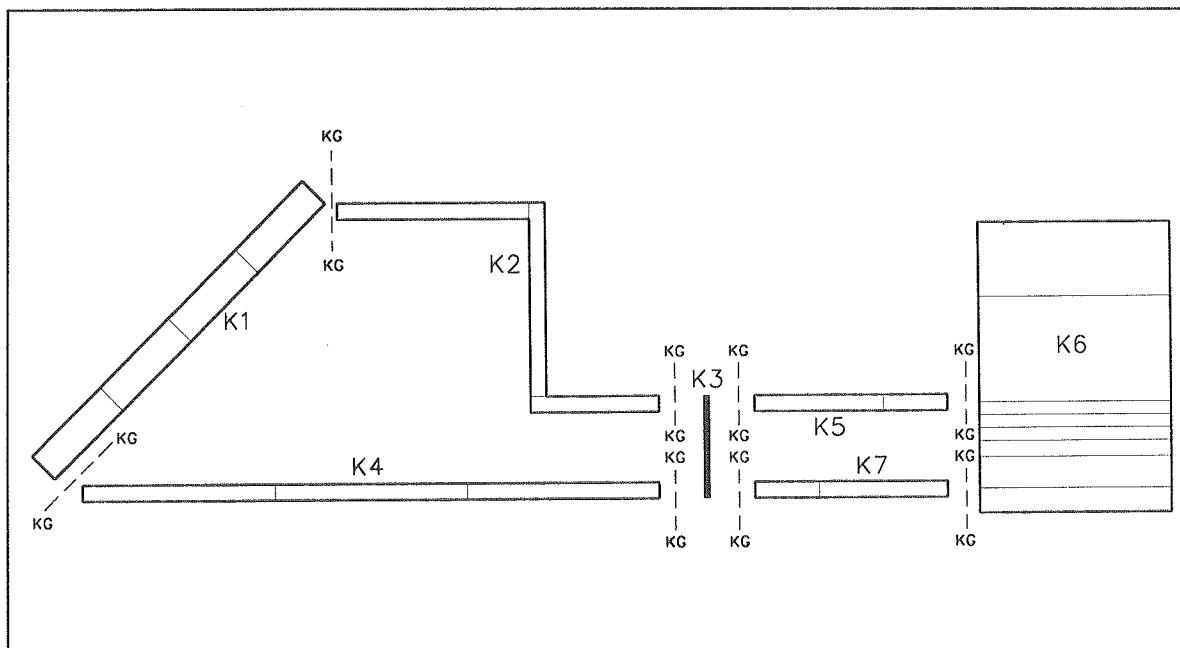
Efter 4. step beregnes varmetab og varmeledning som beskrevet tidligere i dette kapitel. Desuden sammenlægges lag, hvis deres indbyrdes temperaturforskælf er under en vis størrelse. Beregningen for tidsskridtet er færdigt.

5.2 Beregningsmodel for solvarmeanlæg.

Til beregning af solvarmeanlægs årsydeler, er det nødvendigt at kunne regne på alle komponenter i et solvarmeanlæg. Som eksempler på solvarmeanlæggets komponenter kan nævnes solfangerfelt, rørsystemer og lager.

Det er her valgt at anvende samme beregningsprincip som i lagermodellen, dvs. alle komponenter deles op i volumenelementer, som flyttes rundt i beregningsmodellen. Mellem to komponenter dannes en komponentgrænse, f.eks. mellem rør og solfangerfelt. Komponentgrænsen ændres ikke under beregningerne. Elementer, der passerer en komponentgrænse i et tidsskridt, slås sammen til et volumen med én middeltemperatur. Herved opstår numerisk diffusion, men til gengæld forkortes beregningstiden betragteligt.

Et eksempel på principopbygning af beregningsmodel for solvarmeanlæg ses på efterfølgende figur 5.9. Anlægget viser et solvarmeanlæg med solfangerfelt, lager, varmeveksler og tilhørende rørsystem.



Figur 5.9 Eksempel på principopbygning af beregningsmodel for anlæg.

Anlægget består af syv komponenter nummereret fra K1 til K7 adskilt af otte komponentgrænsen, KG, som på figur 5.9 vises med stiplede linier.

Hver komponent består af et antal elementer med hver deres volumenindhold. På figur 5.9 er volumenindholdet af et elementet udtrykt ved arealet af elementet.

De syv komponenter er som følger:

- K1 Solfangerfelt
- K2 Rørsystem fra solfangerfelt til varmeveksler
- K3 Pladevarmeveksler
- K4 Rørsystem fra varmeveksler til solfangerfelt
- K5 Rørsystem fra varmeveksler til lager
- K6 Lager
- K7 Rørsystem fra lager til varmeveksler

Hvert enkelt element i samtlige komponenter repræsenterer en volumenmængde med tilhørende effektiv varmekapacitet.

Beregningsmodellen kan simplificeres ved følgende forudsætninger:

- Konstante forhold i et givet tidsskridt.
- Konstant længde af tidsskridt.
- Konstante volumenstrømme i de enkelte rør- og solfangerkomponenter, når de er i drift, ellers ingen volumenstrøm.
- I rørkomponenters effektive varmekapacitet medregnes kun væskens varmekapacitet.
- Varmevekslerens volumenindhold fordeles til tilstødende rørelementer.

Solfangerfeltet opdeles i et konstant antal lige store elementer med samme volumenindhold. I hvert tidsskridt flyttes præcist volumenmængden af et solfangerelement til det næste solfangerelement, under forudsætning af at solfangerkredsen er i drift. Tidsskridtets længde afpasses i forhold til solfangerelementernes volumen og volumenstrøm. Der er også mulighed for at vælge solfangerfeltet som en komponent med et element. I dette tilfælde repræsenteres solfangerfeltet med én temperatur, og temperaturfordelingen gennem solfangeren er ikke så nøjagtigt bestemt, som når solfangerkomponenten er opdelt i flere elementer.

Der kan ikke forefindes rørkomponenter i anlægsopbygningen, hvor der flyttes et større volumen i et tidsskridt end det totale volumenindhold i rørkomponenten. Tidsskridtet kan derfor ikke være længere end svarende til volumenindholdet af mindste komponent divideret med volumenstrømmen.

I eksemplet vist på figur 5.9 vil der under de givne forudsætninger f.eks. være samme volumenindhold i øverste solfangerelement i komponent K1 som i første rørelement i komponent K2. Ved en flytning i solfangerkredsen flyttes alle elementer i komponenterne K1, K2 og K4. Det ses at rørkomponent K2 har et mindre volumen end rørkomponent K4, hvilket f.eks. kan være forårsaget af en kortere rørstrækning i K2 end K4. F.eks. skal sidste element i rørkomponent K2, nærmest varmeveksleren, flyttes ned i rørkomponent K4 efter forudgående varmeveksling i varmeveksleren K3. Dette rørelement har et mindre volumen end det totale volumen, der flyttes i det givne tidsskridt. Den resterende volumenmængde skal derfor tages fra naboelementet i rørkomponent K2, som derfor bliver mindre.

I det efterfølgende beskrives de beregningsmæssige forhold vedrørende de enkelte komponenter i beregningsmodellen.

Model for solfangerfelt.

Beregningsdelen for solfangerfeltet inkl. vejrdata er hentet fra edb-programmet SOLSIM /15/, der er udviklet på Laboratoriet for Varmeisolering.

Faktorerne i solfangerens effektivitetsligning bestemmes ud fra målinger. T_m beregnes i SOLSIM som $(T_{ind} + T_{ud})/2$

$$\eta = \eta_o - k_0 \frac{T_m - T_{omg}}{E} - k_1 \frac{(T_m - T_{omg})^2}{E} \quad (5.16)$$

hvor

η : Solfangerens effektivitet [-]

η_o : Solfangerens starteffektivitet [-]

k_0 : Varmetabskoefficientens startværdi [$W/(K \text{ m}^2)$]

k_1 : Varmetabskoefficientens temperaturkoefficient [$W/(K^2 \text{ m}^2)$]

T_m : Middeltemperaturen af solfangervæsken [${}^\circ\text{C}$]

T_{omg} : Lufttemperaturen [${}^\circ\text{C}$]

E : Solbestrålingsstyrken på solfangerplanet [W/m^2]

Solfangerelementets temperaturvariation udregnes ud fra energibalancen. Ligning 5.17 beskriver solfangerelementets energibalance, som er anvendt i SOLSIM.

$$C_{sol,eff} A \frac{dT_{ud}}{dt} = AE\eta + \dot{mc}_{væske} (T_{ind} - T_{ud}) \quad (5.17)$$

hvor

\dot{m} : Massestrøm gennem solfanger [kg/s]

$C_{sol,eff}$: Solfangerens effektive varmekapacitet [$\text{J}/(\text{K m}^2)$]

A : Solfangerens areal [m^2]

T_{ind} : Indløbstemperatur til solfangerelement [${}^\circ\text{C}$]

T_{ud} : Udløbstemperatur fra solfangerelement [${}^\circ\text{C}$]

Ækvivalent med beregningsmodellen for lageret indeles beregningerne i små tidsskridt. Beregningen foretages eksplisit, hvilket bl.a. medfører den tilnærmelse, at udløbstemperaturen fra elementet i et givet tidsskridt ikke influeres af ydre påvirkninger der sker i løbet af tidsskridtet.

Model for rørsystem.

Ved tidsskridtets start flyttes alle elementer i rørkomponenten i forhold til volumenstrøm, tidsskridtets længde og rørdimension. Hvis flere end ét element flyttes over en komponentgrænse, sammenlægges det samlede volumen til et element med én middeltemperatur.

I denne version af programmet beregnes varmetabet fra alle elementer i en rørkomponent ud fra samme varmetabskoefficient og omgivelsestemperatur. Beregningen af varmetabet fra røret samt energitilførsel fra evt. pumpe beregnes i slutningen af tidsskridtet.

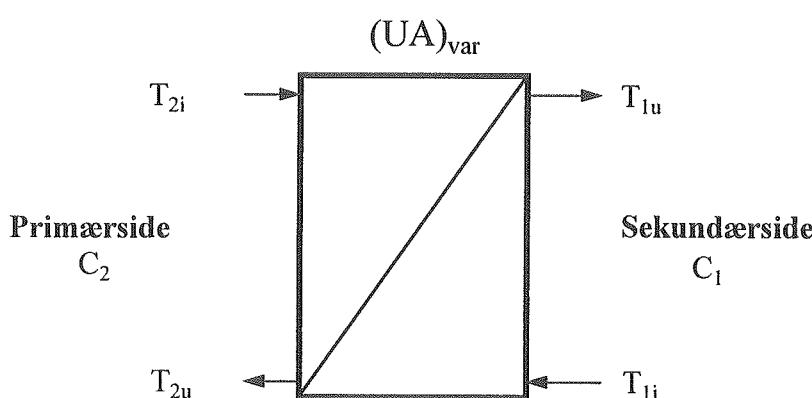
Varmabetet fra elementet beregnes ud fra elementets længde $L_{rør}$ og varmetabskoefficienten pr. længdeenhed $(UA)_{tab,rør}$. Pumpens effektilførsel til væsken $P_{rør}$ medregnes, når rørkomponenten er i drift, og pumpens placering svarer til rørelementet. Rørelementets effektive varmekapacitet $C_{rør,eff}$ beregnes ud fra elementets volumen $V_{rør}$ og væskedata. Der tages ikke hensyn til rørmaterialets varmekapacitet. Rørmaterialets effektive varmekapacitet udgør for kobberrør kun en lille del af den effektive varmekapacitet af væsken.

$$C_{rør,eff} = V_{rør} \rho_{væske} c_{væske} \quad [J/K] \quad (5.18)$$

$$T_{rør}^{ny} = T_{rør}^{gl} + \Delta t \frac{(UA)_{tab,rør} L_{rør} (T_{omg} - T_{rør}^{gl}) + P_{rør}}{C_{rør,eff}} \quad [^{\circ}C] \quad (5.19)$$

Model for varmeveksler.

Beregning af pladevarmevekslerens udløbstemperaturer beregnes ud fra ϵ, N_{TU} -metoden som beskrevet i /12/. Det forudsættes i denne metode, at varmevekslerens varmeoverføringsevne $(UA)_{var}$ og kapacitetsstrømmene er konstante. Det forudsættes desuden, at der ikke sker varmetab fra varmeveksleren til omgivelserne. Varmevekslerens sekundære side, indeks 1, har indløbstemperaturen T_{1i} og udløbstemperaturen T_{1u} . Kapacitetsstrømmen C_1 for sekundæreriden beregnes ud fra massestrøm m_1 og varmekapacitet c_1 for vand. Primæreriden har indeks 2.



Figur 5.10 Beregningsmæssig udformning af varmeveksler.

Kapacitetsstrømmene beregnes ud fra (5.20).

$$C_i = m_i c_i \quad [W/K] \quad (5.20)$$

Den mindste af kapacitetsstrømmene betegnes C_{\min} og den største C_{\max} .

Til beregning af udløbstemperaturerne anvendes tre dimensionsløse størrelser.

$$N_{TU} = \frac{(UA)_{var}}{C_{\min}} \quad (5.21)$$

$$\gamma = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (5.22)$$

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-(1 - \gamma)N_{TU}]}{1 - \gamma \exp[-(1 - \gamma)N_{TU}]} \quad \gamma \neq 1 \quad (5.23)$$

$$\varepsilon = \frac{N_{TU}}{1 + N_{TU}} \quad \gamma = 1$$

N_{TU} er forholdet mellem varmevekslerens varmeoversføringsevne og den mindste af de to kapacitetsstrømme C_{\min} . Kapacitetsforholdet γ varierer mellem 0 og 1. Effektiviteten ε afhænger af strømningsarrangementet og er for en modstrømsvarmeveksler beskrevet ved ligning (5.23).

Udløbstemperaturerne T_{1u} og T_{2u} for hhv. sekundærsiden og primærsiden beregnes ud fra ligning (5.24) og (5.25).

$$T_{1u} = T_{1i} - \varepsilon \frac{C_{\min}}{C_1} (T_{1i} - T_{2i}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.24)$$

$$T_{2u} = T_{2i} + \varepsilon \frac{C_{\min}}{C_2} (T_{1i} - T_{2i}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.25)$$

Styring.

Alle komponenter i solvarmesystemet kan styres efter to forskellige styringsprincipper.

1. Differensstyring
2. Tidsstyring

Differensstyringen mäter temperaturen to steder i systemet, hhv. lav og høj temperatur. Når temperaturdifferensen mellem høj og lav temperatur er større end startdifferensen startes og der stoppes igen når stopdifferensen nås. Denne styring anvendes f.eks. i solfangerkredsen og ved den supplerende opvarmning af brugsvandet.

Tidsstyringen styrer efter tidspunkter i løbet af døgnet. Denne styring anvendes f.eks. i tappeskredsen og cirkulationskredsen for det varme brugsvand.

Begrænsninger i nuværende version af programmet.

Nuværende version af programmet kan beregne årsydelsen af et simpelt opbygget solvarmeanlæg. Begrænsningerne skyldes en tidsnødvendig begrænsning af opgavens størrelse.

Solfangerkredsens rørsystem består af to rørelementer mellem solfangerfelt og solvarmeveksler og to rørelementer mellem solvarmeveksler og solfangerfelt. Både solfanger- og rørelementer afpasses med tidsskridtet således, at der flyttes præcist et volumenindhold i hvert tidsskridt. Solkredsen består af et rørelement mellem lager og solvarmeveksler og et rør mellem solvarmeveksler og lager. Pumperne i solfangerkredsen og solkredsen styres efter en differensstyring mellem øverste solfangerelement og et givet sted i lageret.

Den supplerende energikilde opvarmer den øverste del af lageret gennem en pladevarmeveksler. Det forudsættes at brugsvandet, der cirkulerer gennem varmeveksleren, bliver opvarmet til en konstant temperatur. Den supplerende opvarmning styres af en differensstyring.

Tapning af varmt brugsvand styres af et brugerdefineret tappeprofil, der beskriver tapningens størrelse i forhold til tidspunkt af døgnet. Koldtvandstemperaturen regnes konstant, og tapningens størrelse kan enten være en volumenmængde eller en energimængde.

Cirkulationskredsen til det varme brugsvand opbygges af op til 10 rørelementer, hvor rørdimensioner afpasses efter volumenstrøm og tidsskridt. I hvert tidsskridt flyttes præcist volumenet af et rørelement.

I de tilfælde, hvor der er tilsluttet en rumopvarmningskreds til lageret, skal der ske brugerdefineret inddata af opvarmningsbehov, og hvilke temperaturer varmen ønskes leveret ved.

6. Sammenligning mellem målinger og beregninger.

Der foretages sammenligninger mellem målinger og beregninger for lageret i forsøgsopstillingen og lageret i det mellemstore solvarmeanlæg i Glostrup. Sammenligningen foretages ved, at beregningsmodellen for lageret udsættes for målte indløbstemperaturer og volumenstrømme, hvorefter den beregnede temperaturfordeling i lageret sammenlignes med målingerne. Målte energimængder sammenlignes med beregnede. På de efterfølgende figurer vil beregnede temperaturer vises med stiplede linier.

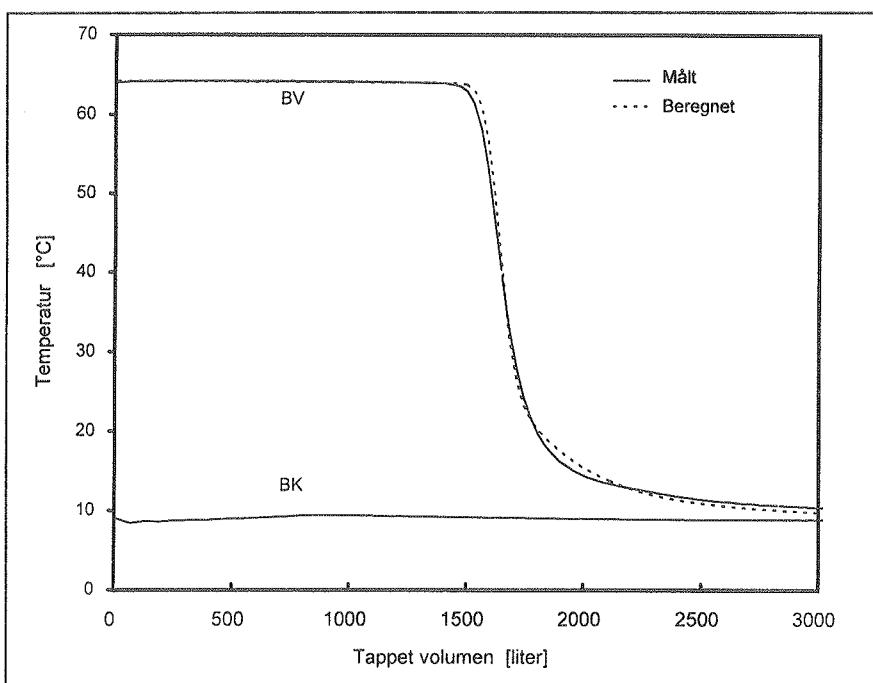
6.1 Lager i forsøgsopstilling.

Der er foretaget tre sammenligninger for lageret i forsøgsopstillingen.

1. Tapning af varmt brugsvand fra lageret.
2. Supplerende opvarmning af lageret og cirkulationskredsen i drift.
3. Solopvarmning, supplerende opvarmning, tapning af varmt brugsvand og cirkulationskredsen i drift.

Beregningerne i dette afsnit er udført med følgende forudsætninger. Maksimal lagtykkelse i beregningerne er fastsat til 0,05 m, specielt med henblik på præcis beregning af varmeledningen ned gennem lageret. Der foretages ingen brugerdefineret opblanding i en zone omkring indløbene. Tidsskridtets længde i beregningerne svarer til de intervaller, målingerne er foretaget med. Forudsætningerne medfører beregninger med mellem ca. 50 og 150 lag i lagermodellen.

Sammenligningen af udløbstemperatur fra lager under tapning af varmt brugsvand fra lageret ses på figur 6.1. For en nærmere beskrivelse af forsøget henvises til afsnit 3.2.2.



Beregningerne er udført med et tids-skridt på 60 sekunder.

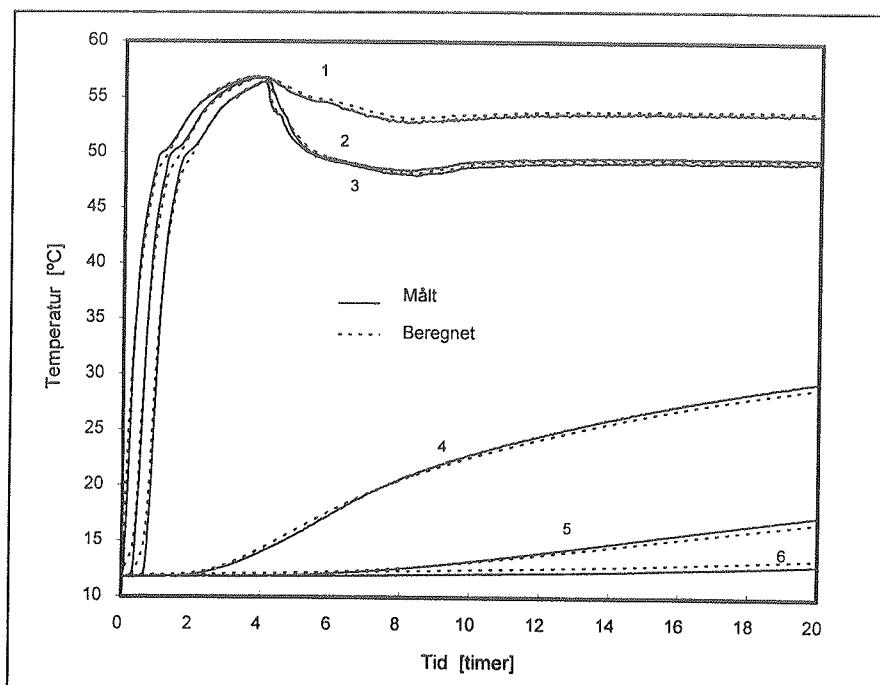
Den beregnede udløbstemperatur viser god overensstemmelse med den målte udløbs-temperatur.

Efter tapning af 3000 liter vand er den tappede energimængde målt og beregnet til 109 kWh.

Figur 6.1 Sammenligning af udløbstemperatur fra lageret under tapning af varmt brugsvand.

Forholdet mellem indstrømmet volumen til lageret i et tidsskridt V_{ind} og lagervolumet V_{lager} er maksimalt 0,02 for forsøget vist på figur 6.1, dvs. at der i tidsskridtet maksimalt indstrømmer et volumen på 2 % af lagerets volumen.

Efterfølgende forsøg viser supplerende opvarmning og cirkulationskredsen i drift med et varmetab på ca. 5 kW. For en nærmere beskrivelse af forsøget henvises til afsnit 3.2.4.



Figur 6.2 Sammenligning af lagertemperaturer under supplerende opvarmning og cirkulationskredsen i drift

Varmeledningen ned gennem lageret har stor indflydelse på temperaturudviklingen i målepunkt 4, 5 og 6. Tilsyneladende beregnes varmeledningen præcis.

Energimængden leveret fra suppleringskredsen er målt til 134 kWh og beregnet til 135 kWh. Cirkulationskredsens varmetab er målt til 79,9 kWh og beregnet til 81,7 kWh. Værdierne er opgivet med tre betydende cifre, således at forskellene bedre kan vurderes. Afvigelsen mellem målte og beregnede energimængder er under ca. 2 %.

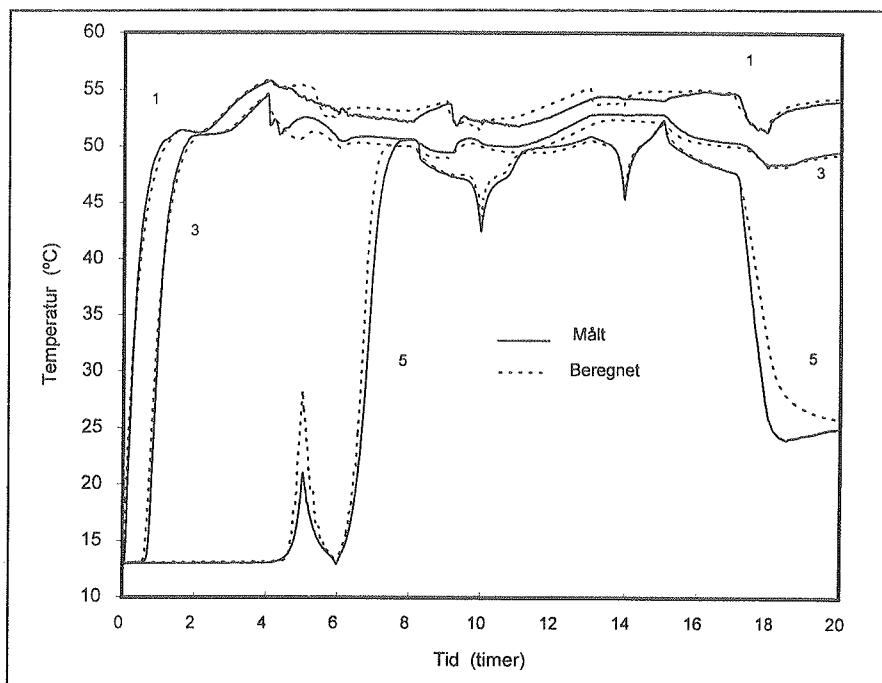
Sidste sammenligning mellem målinger og beregninger i forsøgsopstillingen er foretaget med solopvarmning, supplerende opvarmning, tapning af varmt brugsvand og cirkulationskredsen i drift. For en nærmere beskrivelse af forsøget henvises til afsnit 3.2.6.

Sammenligningen vises på to figurer, således at lagertemperaturerne i målepunkterne 1, 3 og 5 vises på figur 6.3 a, og målepunkterne 2, 4 og 6 vises på figur 6.3 b.

Beregningerne er udført med et tids-skridt på 120 sekunder.

V_{ind}/V_{lager} er i beregningerne maksimalt 0,03.

Målte og beregne-de lagertemperatu-rer viser god overensstemmelse under hele forsøg- et.

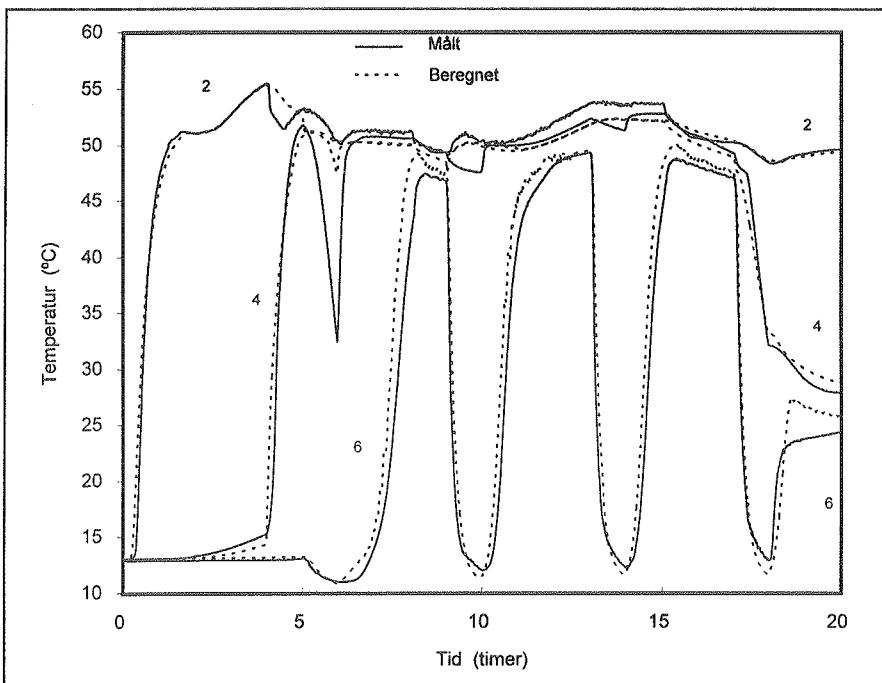


Figur 6.3 a Målte og beregnede lagertemperaturer i målepunkt 1, 3 og 5 for forsøg med fire kredse i drift.

Beregningerne er udført med et tids-skridt på 60 sekunder.

V_{ind}/V_{lager} er i beregningerne maksimalt 0,02.

Målte og beregne-de lagertemperatu-rer viser rimelig god overensstem-melse.



Figur 6.3 b Målte og beregnede lagertemperaturer i målepunkt 2, 4 og 6 for forsøg med fire kredse i drift.

Målte og beregne-de lagertemperatu-rer viser rimelig god overensstem-melse.

Målte og beregnede energimængder i hele forsøget, samt afvigelser ses i tabel 6.1. Afvigel-serne i solkredsen og tappekredsen er under 2 %, hvorimod afvigelsen i suppleringskreds og cirkulationskreds er ca. 6 %. Den relativt store afvigelse i suppleringskreds og cirkulati-onskreds skyldes den kendsgerning, at temperaturdifferensen mellem indløb og udløb i

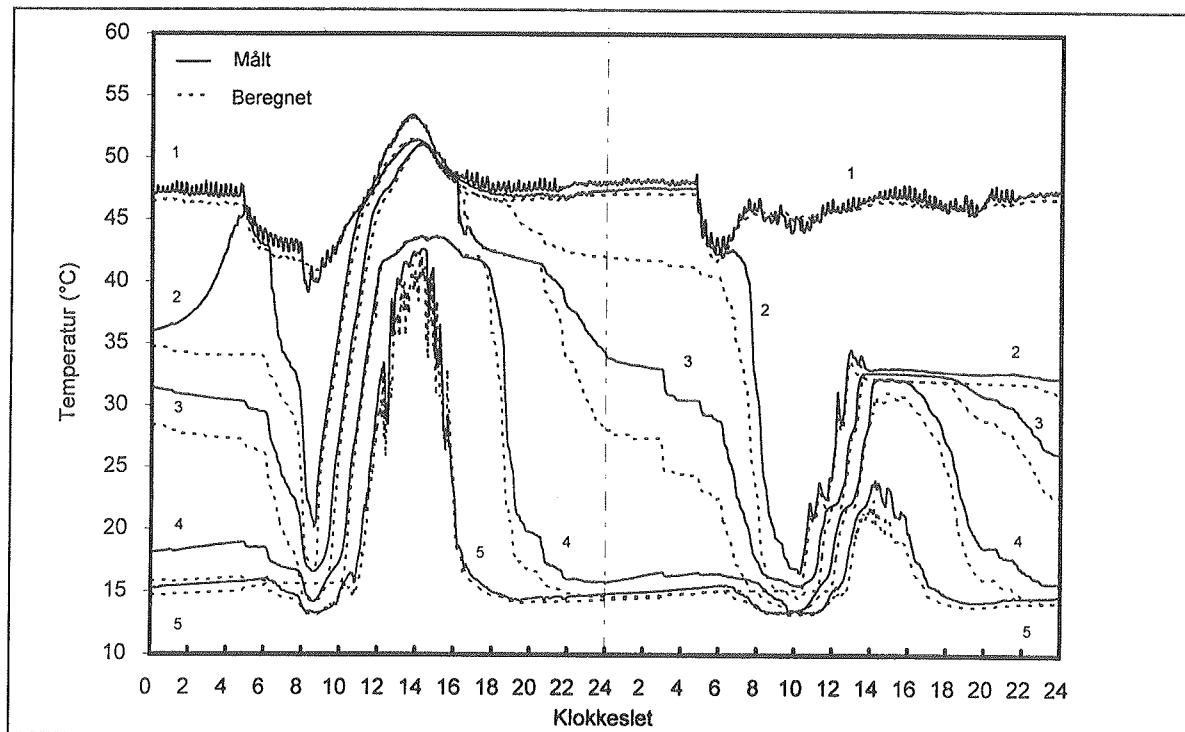
disse kredse i gennemsnit er relativt lille. En afvigelse på 1 K mellem målt og beregnet udløbstemperatur til cirkulationskredsen vil forårsage en afvigelse i energimængden på op til 20 %, under den forudsætning at temperaturfaldet i cirkulationskredsen er 5 K. Disse store afvigelser skyldes den måde, sammenligningen er foretaget på, hvor indløbstemperaturer og volumenstrømme er påtrykt lagermodellen. Disse afvigelser er derfor ikke et udtryk for afvigelser, der kan forventes ved f.eks. årsberegninger.

	Målt	Beregnet	Afvigelse
Solopvarmningskreds	126 kWh	124 kWh	-2 %
Suppleringskreds	106 kWh	113 kWh	+7 %
Tappekreds	100 kWh	100 kWh	0 %
Cirkulationskreds	73 kWh	78 kWh	+6 %

Tabel 6.1 Målte og beregnede energimængder for forsøg med fire kredse i drift.

6.2 Lager i mellemstort solvarmeanlæg.

Der er foretaget én sammenligning for lageret i solvarmeanlægget i Glostrup. Sammenligningen er foretaget for perioden 18. - 19. oktober 1994. For en nærmere beskrivelse af den 18. oktober henvises til afsnit 4.2. Vejret den 19. oktober er kendtegnet ved solrigt vejr med en del skyer. Den 19. oktober er der ikke leveret energi fra lageret til rumopvarmningskreds.



Figur 6.4 Målte og beregnede lagertemperaturer for den 18. og 19. oktober 1994.

Beregningerne i dette afsnit er udført med samme forudsætninger som sammenligningerne i afsnit 6.1, dog med den ændring at der er indført en brugerdefineret opblandingszone omkring indløbene. Generelt har opblandingszonen samme tykkelse som indløbsdimensionen, dog er indløbet for suppleringskredsen valgt til 0,12 m for at give en tilfredsstillende beregnet temperatur i toppen af lageret (1).

Beregningerne er udført med et tidsskridt på 120 sekunder. V_{ind}/V_{lager} er i beregningerne maksimalt 0,10. Simuleringen er startet den 17. oktober kl. 0.00 for at opnå realistiske startbetingelser den 18. oktober.

Målte og beregnede lagertemperaturer viser nogenlunde overensstemmelse. Specielt om natten kan afvigelsen mellem målte og beregnede temperaturer være op til 10 K. Forskellen skyldes hovedsagelig opblandingsfænomener inde i lageret, som beregningsprogrammet ikke tager i beregning. I perioder med solopvarmning er der betydelig bedre overensstemmelse mellem målte og beregnede temperaturer.

Målte og beregnede energimængder i perioden samt afvigelser ses i tabel 6.2. Afvigelserne i solkredsen er ca. 4 %, hvorimod afvigelsen i suppleringskreds og cirkulationskreds er ca. 6 %.

	Målt	Beregnet	Afvigelse
Solopvarmningskreds	210 kWh	220 kWh	+4 %
Suppleringskreds	1000 kWh	1060 kWh	+6 %
Tappekreds	300 kWh	300 kWh	0 %
Cirkulationskreds	900 kWh	960 kWh	+7 %
Rumvarmekreds	18 kWh	17 kWh	-4 %

Tabel 6.2 Målte og beregnede energimængder for den 18. og 19. oktober 1994.

7. Årssimuleringer med parametervariationer for anlæg.

For et solvarmeanlæg er der udført årsydelsesberegninger med beregningsmodellen beskrevet i kapitel 5. Der er bl.a. udført årsydelsesberegninger med følgende parametervariationer:

1. Forholdet mellem solfangerarealet og varmtvandsforbruget.
2. Volumenstrøm i solfangerkreds.
3. Cirkulationstabets størrelse i forhold til varmtvandsforbruget.
4. Solvarmevekslerens varmeoverføringsevne.

Solvarmeanlæggets årsydelse defineres som den energimængde, der fra solkredsen overføres til lageret.

Solvarmeanlægget, der anvendes som reference, har et solfangerareal på 100 m^2 og et lager på $5,5 \text{ m}^3$, fordelt på $2,5 \text{ m}^3$ opvarmet af suppleringskredsen, $2,5 \text{ m}^3$ opvarmet af solkredsen og $0,5 \text{ m}^3$ som slamvolumen.

Det 45° hældende og sydvendte solfangerfelt er opbygget med dækning af glas og selektiv absorber. Konstanterne i formel 5.15 er valgt til $\eta_0 = 0,78$, $k_0 = 5,0 \text{ W}/(\text{K m}^2)$ og $k_1 = 0,017 \text{ W}/(\text{K}^2 \text{ m}^2)$, som er værdier for en almindelig solfanger på det danske marked, se /16/. Volumenindholdet af solfangervæsken i solfangeren er ca. 1 liter pr. m^2 solfanger.

Solfangerkredsen består af to 60 m lange rør dimensioneret efter en væskehastighed på $0,5 \text{ m/s}$. Hele rørstrækningen er placeret i en omgivelsestemperatur på 20°C og er isoleret, så røret opnår en varmetabskoefficient på $0,3 \text{ W}/(\text{K m})$. Væsken i solfangerkredsen er en 50 % propylenglykol/vand-blanding. Styringen af solfangerkredsen foregår ved hjælp af en differenstermostat med en startdifferens på 6 K og en stopdifferens på 2 K . Følerne er placeret i toppen af solfangeren og ved udløbet fra lageret i solkredsen.

Lagerets forhold mellem højde og diameter er 1, og lageret forudsættes at have en varmetabskoefficient svarende til $0,05 \text{ m}$ mineraluld. Varmedveksling i lageret sker via pladevarmevekslere, og solvarmevekslerens varmeoverføringsevne er $50 \text{ W}/(\text{K pr. } \text{m}^2 \text{ solfanger})$. Volumenstrømmen i solfangerkredsen er som reference valgt til $0,2 \text{ l}/(\text{min m}^2)$. Volumenstrømmene på begge sider af solvarmeveksleren er ens. Indløbet til lageret i solkredsen er placeret i den øverste del af det solopvarmede volumen. Som reference forbruges dagligt 50 l varmt brugsvand pr. m^2 solfanger, opvarmet fra 10°C til 55°C . Tappeprogrammet er hentet fra SBI-anvisning 165 angående vandinstallationer /17/, under forudsætning af ca. 50 lejligheder i bebyggelsen. Suppleringskredsen opvarmer den øverste del af lageret til 55°C . Cirkulationsledningen har en konstant varmetabskoefficient, der ved en brugsvandstemperatur på 55°C forårsager et temperaturfald på 5 K . Forholdet mellem cirkulationstab og varmtvandsforbruget, forkortet C/V, er for referenceanlægget lig 1, dvs. at energiforbruget anvendt til dækning af cirkulationstab og varmt brugsvand er ens.

Der anvendes et konstant tidsskridt på 60 sekunder som er gennemstrømningstiden for den mindste komponent i systemet. Solfangerfeltet opdeles således, at der udskiftes et solfan-

gervolumen i hvert tidsskridt. Maksimal lagtykkelse i lageret er 0,05 m. Der foretages ingen brugerdefineret opblanding i en zone omkring indløbene. Forudsætningerne medfører beregninger med mellem ca. 50 og 100 lag i lagermodellen. Hvert 30. tidsskridt sammenlægges lag, hvis den indbyrdes temperaturforskæl mellem to lag er under 0,25 K. Med disse forudsætninger tager en årsberegning med danske referenceårsvejrdata ca. 8 timer på en 486 baseret PC'er.

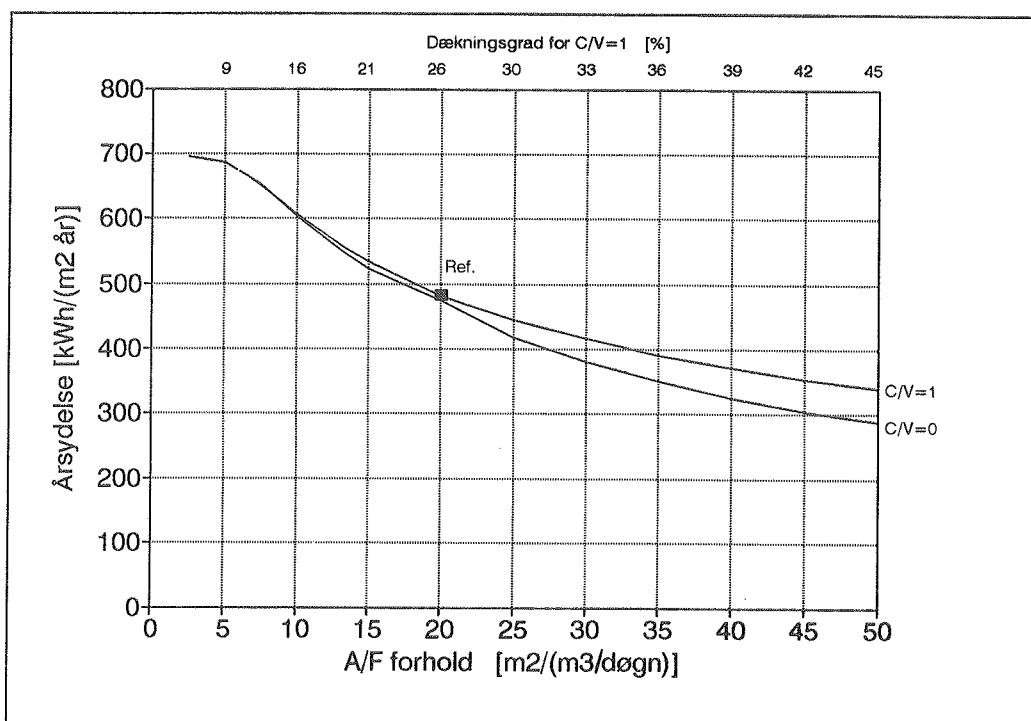
Årsberegning med referenceanlæg viser følgende varmebalance for lageret:

Solvarme tilført lager:	48 MWh	(Årsydelse = 480 kWh/m ²)
Supplerende opvarmning:	143 MWh	
Tappet energimængde:	94 MWh	
Cirkulationstab:	95 MWh	
Varmetab fra lager:	2 MWh	

Årsydelsen er beregnet til 480 kWh/m². Cirkulationstabet er lidt større end den tappede energimængde, fordi cirkulationstabet er større i de perioder, hvor lagertemperaturen er højere end 55 °C.

Den årlige driftstid for solfangerkredsen er beregnet til 2160 timer og kan anvendes til beregning af energiforbrug til pumper og styring. Maksimal solfanger- og lagertemperatur er beregnet til hhv. 90 °C og 63 °C. Dækningsgraden inkl. cirkulationstab er beregnet til 26 %. Dækningsgraden ekskl. cirkulationstab er beregnet til ca. 52 %.

Forholdet mellem solfangerarealet A og dagligt varmtvandsforbrug F i m³/døgn, forkortet A/F, har stor betydning for solvarmeanlæggets årsydelse. Et A/F forhold på f.eks. 40 vil for et 100 m² solvarmeanlæg medføre et varmtvandsforbrug på 2,5 m³/døgn. Referenceanlæget har et A/F forhold på 20.

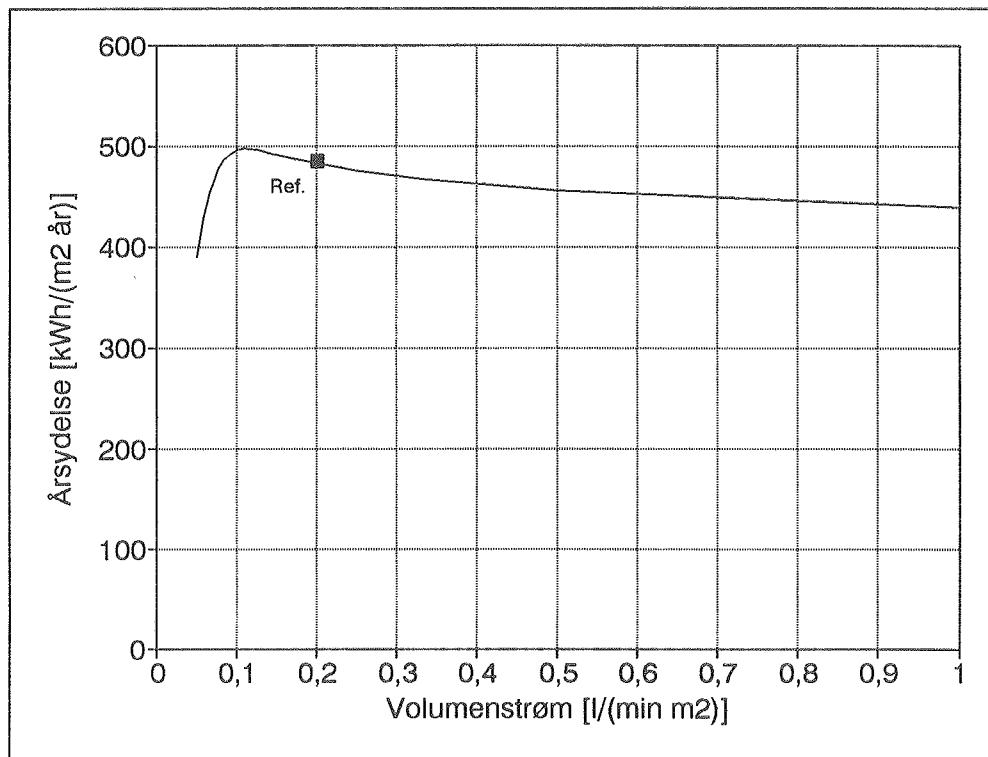


Figur 7.1 Beregnede årsydelser ved varierende A/F forhold.

Figur 7.1 viser beregnede årsydeler ved forskellige A/F forhold. De to kurver viser ydelsen for C/V forhold på hhv. 0 og 1. Dækningsgraden for C/V forhold lig 1 aflæses øverst på figuren. Beregningerne er udført ved at holde solfangerarealet konstant på 100 m^2 og variere varmtvandsforbruget.

Ved et A/F forhold på 40 og C/V forhold på 1, aflæses årsydelsen til ca. $370\text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ år})$. Dækningsgraden inkl. cirkulationstab aflæses øverst til 39 %. Mindre A/F forhold giver større ydelse og lavere dækningsgrad. For A/F forhold mindre end ca. 20 er der kun en ganske lille ekstra ydelse ved C/V forhold på 1 i forhold til C/V forhold på 0. For A/F forhold større end ca. 20 er den beregnede årsydelse afhængig af C/V forholdet. Ved et A/F forhold på 40 aflæses merydelsen til ca. $50\text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ år})$, svarende til en merydelse på ca. 15 %.

Volumenstrømmen i solfangerkredsen har betydning for solvarmeanlæggets årsydelse. Beregningerne er foretaget i intervallet fra $0,05\text{ l}/(\text{min m}^2)$ til $1,0\text{ l}/(\text{min m}^2)$. Beregningerne viser under de givne forudsætninger, at den optimale ydelsesmæssige volumenstrøm er ca. $0,12\text{ l}/(\text{min m}^2)$. Ved volumenstrømme under $0,1\text{ l}/(\text{min m}^2)$ falder årsydelsen drastisk og der kan desuden opstå kogningsproblemer i solfangeren.



Figur 7.2 Beregnede årsydeler ved varierende volumenstrøm i solfangerkreds.

Ved større volumenstrømme end ca. $0,12\text{ l}/(\text{min m}^2)$ er årsydelse svagt faldende for voksende volumenstrøm. Dette skyldes hovedsageligt, at der ved større volumenstrømme opbygges en mindre temperaturlagdeling i det solopvarmede lagervolumen.

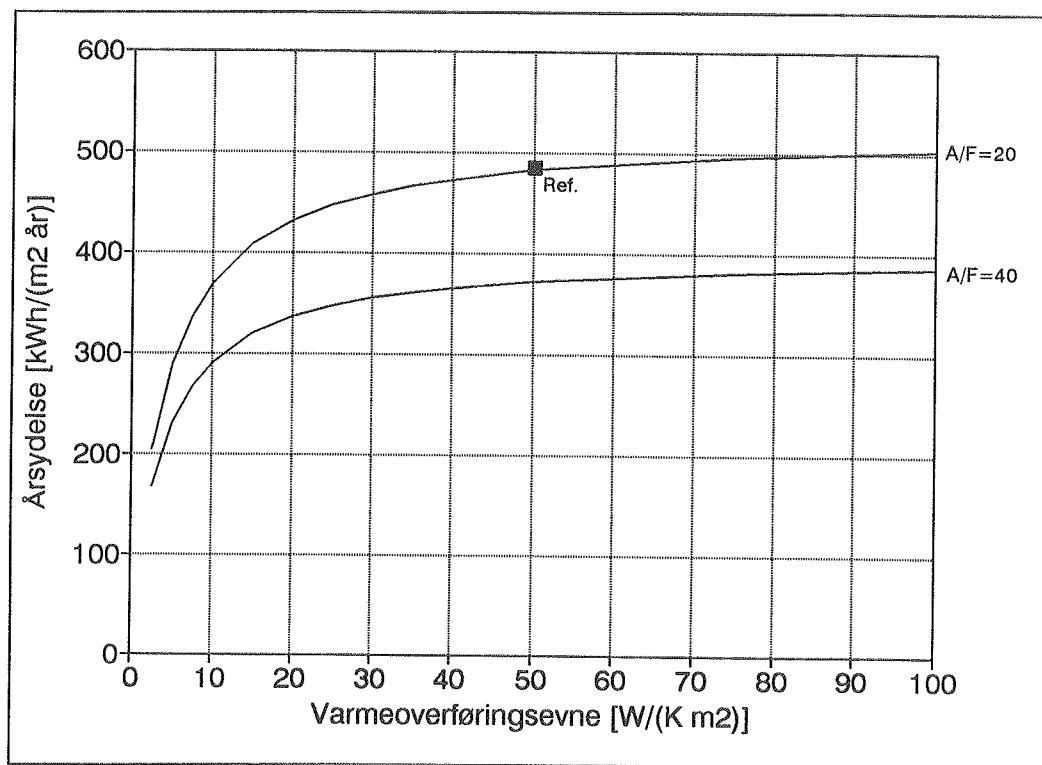
I referenceanlægget er valgt en volumenstrøm på $0,2\text{ l}/(\text{min m}^2)$. Dette skyldes hovedsageligt det forhold, at der ved meget små volumenstrømme vil være en relativt høj gennemsnit-

lig udløbstemperatur fra solfangerfeltet med efterfølgende risiko for hurtig tilkalkning af varmeverksleren.

Solvarmeverkslerens varmeoverføringsevne har indflydelse på årsydelsen som vist på figur 7.3. Ved en varmeoverføringsevne på 50 W/(K pr. m² solfanger) vil middeltemperatordifferensen mellem primær og sekundærsiden af solvarmeverksleren være ca. 5 - 10 K under typiske driftsforhold. Ved en forøgelse af varmeoverføringsevnen er det muligt at nedsætte denne temperatordifferens, således at returtemperaturen til solfangerne bliver lavere.

De to kurver på figur 7.3 viser den beregnede årsydelse for A/F forhold på 20 og 40. C/V forholdet er 1 for begge kurver.

For varmeoverføringsevner lavere end ca. 20 W/(K pr. m² solfanger) falder årsydelsen drastisk, og under ca. 10 W/(K m²) kan der opstå kogningsproblemer i solfangerkredsen. En varmeoverføringsevne på ca. 50 W/(K pr. m² solfanger) er normalt et fornuftigt valg, når både solvarmeanlæggets årsydelse og varmeverkslerens pris tages i betragtning.



Figur 7.3 Beregnede årsydelser som funktion af varmeoverføringsevnen for solvarmeverksleren.

Der er udført supplerende årsberegninger med referenceanlægget under driftsforhold, hvor cirkulationskredsen forårsager total opblanding i lageret. Beregningerne viser, at årsydelsen kan falde med op til 40 % i forhold til referenceanlæggets ydelse. I det opblandede lager skal solfangerne levere energi til lageret ved temperaturer større end cirkulationsledningens returtemperatur.

8. Konklusion.

Forsøg med et $2,0 \text{ m}^3$ varmelager, hvor der er tilsluttet en suppleringskreds, solkreds, tappekreds og cirkulationskreds, viser, at det er muligt at opretholde en stor temperaturlagdeling i lageret. Forsøgene viser at temperaturlagdelingen nedbrydes, hvis lageret udføres forkert. Indløbsudformningen til lageret og volumenstrømmene gennem lageret har indflydelse, på i hvor stor grad temperaturlagdelingen nedbrydes.

Der er udført forsøg med fem forskellige indløbsudformninger og volumenstrømme op til $5 \text{ m}^3/\text{h}$. Målingerne fra forsøgsopstillingen giver følgende resultat for cirkulationskredsen:

Indløbsudformning i cirkulationskreds	Ingen målbar opblanding i lager ved volumenstrøm mindre end	Vurdering af anvendelse
2" direkte indløb	1800 l/h	Kan anvendes ved mindre volumenstrømme
2" bøjning	1000 l/h	Bør under ingen omstændigheder anvendes
2" T-stykke	2500 l/h	Kan normalt anvendes med tilfredsstillende resultat
2" perforeret rør	1800 l/h	Kan anvendes ved mindre volumenstrømme
2" parallelle plader	4800 l/h	Meget velegnet ved alle volumenstrømme

2" direkte indløb forårsager ingen målbar opblanding i lageret ved en volumenstrøm mindre end 1800 l/h i cirkulationsledningen. Bøjningen er klart den af de fem indløbsudformninger, der er mindst egnet. Bøjningen sætter hele beholdervolumenet i rotation og opblanding i lageret opstår allerede ved 1000 l/h. T-stykket er en god indløbsudformning, specielt når den enkle og kompakte opbygning tages i betragtning. I forsøgene viste det perforerede rør sig ikke specielt velegnet. Parallelle plader er helt klart den bedste udformning. Ved volumenstrømme i cirkulationskredsen helt op til 4800 l/h skete der ingen målbar opblanding i lageret.

Erfaringerne fra forsøgene er anvendt ved udformningen af lageret til et 78 m^2 solvarmeanlæg i Glostrup. Målinger på temperaturlagdelingen i lageret viser, at der kun sker en minimal opblanding i lageret, selv om volumenstrømmene i de enkelte kredse gennem lageret er op til $4 \text{ m}^3/\text{h}$.

Den én-dimensionale beregningsmodel for lageret beregner temperaturlagdelingen ved anvendelse af et variabelt antal fuldt opblandede lag, der både kan ændre størrelse og placering fra tidsskridt til tidsskridt. Beregningsmodellen kan udføre præcise beregninger med op til 500 lag i lagermodellen. Indflydelsen af numerisk diffusion i beregningsmodellen er meget begrænset.

Resultater fra beregningsmodellen sammenlignet med målinger viser en tilfredsstillende overensstemmelse.

Beregningsmodellen for lageret er sammenkædet med en beregningsmodel for solfangerfeltet, således at et solvarmeanlægs årsydelse kan beregnes. Beregninger viser, at det er muligt

at opnå en årsydelse på ca. $500 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ år})$, under forudsætning af et korrekt dimensioneret anlæg, med en dækningsgrad på ca. 50 % ekskl. cirkulationstab.

Der er udført supplerende årsberegninger med solvarmeanlæg under driftsforhold, hvor cirkulationskredsen forårsager total opblanding i lageret. Beregningerne viser, at årsydelsen kan være op til 40 % lavere. I det op blandede lager skal solfangerne levere energi til lageret ved temperaturer større end cirkulationsledningens returtemperatur.

Målinger på solvarmeanlægget i Glostrup fra den 1. juli til 31. december 1994, viser en ydelse på $200 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ved en dækningsgrad på 56 % ekskl. cirkulationstab.

Volumenstrømmen gennem lageret forårsaget af cirkulationskredsen har i perioden indtil 1. november 1994 været ca. $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$. Indregulering af brugsvandssystemet med Circon ventiler nedsatte volumenstrømmen i cirkulationskredsen gennem lageret til ca. $2,2 \text{ m}^3/\text{h}$ og varmetabet fra cirkulationsledningen blev reduceret med ca. 10 % .

Referencer.

- /1/ "Måling og evaluering af et 44 m² low flow solvarmeanlæg på Sønderborg Søfartsskole". Esbensen, rådgivende ingeniører. 1991.
- /2/ "BPS-publikation 94 VVS-detaljer, solvarmeinstallationer - varmt brugsvand - store anlæg". BPS-centeret, DTI. 2. udgave 1994.
- /3/ "Priskatalog for større solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning". Wissenberg, rådgivende ingeniører. 1992.
- /4/ "Solar Engineering of Thermal Processes". John A. Duffie & William A. Beckman. Second Edition 1991.
- /5/ "Varmelagring til solvarmeanlæg". Simon Furbo, Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Meddelelse nr. 162. 1984.
- /6/ "Udskrift af edb-programmer udført under Ph.D. studium". Peter Fagerlund Carlsson, Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. 1995.
- /7/ "Større low flow solvarmeanlæg". Peter Fagerlund Carlsson, Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Meddelelse nr. 252. 1993.
- /8/ "Simulation of Thermal System. ENGP3". Willie L. Dutré. Kluwer Academic Publishers. 1991.
- /9/ "TRNSYS 13.1 User's manual". S. A. Klein, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. 1990.
- /10/ "Preformance Study of One-Dimensional Models for Stratified Thermal Storage Tanks". E. M. Kleinbach, W. A. Beckman and S. A. Klein, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. Solar Energy Vol. 50, No. 2, pp. 155-166, 1993.
- /11/ "Dokumentation af PC-SOL - et program til simulering af solvarmeanlæg, ver. 0.1". Jan Erik Nielsen og Nick Bjørn Andersen, Prøvestationen for Solenergi, DTI. 1991.
- /12/ "Varme- og klimateknik, Danvak grundbog". H. E. Hansen, P. Kjerulf-Jensen og Ole B. Stampe. 1. udgave.
- /13/ "Turbo Pascal 6.0". Per Amdal Steffensen og Leif Pehrsson. Forlaget Systime, 1. udgave 1991.
- /14/ "Løsning af lineære ligningssystemer - hæfte 23". Numerisk Institut, DTU. 1972.
- /15/ "SOLSIM - simuleringsprogram for aktive solvarmeanlæg". Svend Svendsen og Jens Rahbek, Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Meddelelse 273. 1995.
- /16/ "Prøvning af solfangeres effektivitet og driftsikkerhed foretaget for Prøvestationen for Solenergi". Finn Kristiansen, Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Rapport 93-06. 1993.
- /17/ "Vandinstallationer". Statens Byggeforskningsinstitut. SBI-anvisning 165. 1990.
- /18/ "Kalibreringscertifikat. HG Instrumenter A/S". Dantest, Force Institututterne. 1992.

Symbolliste.

A	: Transparent solfangerareal	[m ²]
A _{beholder}	: Tværsnitsareal af beholdervæg	[m ²]
A _{vand}	: Tværsnitsareal af vandvolumen i lager	[m ²]
A _{1, A₂, A₃, A₄}	: Værdier til beregning af varmeledning	[-]
C	: Kapacitesstrøm	[W/K]
C _j	: Effektiv varmekapacitet for lag j	[J/K]
C _{sol,eff}	: Effektiv varmekapacitet for solfanger	[J/(K m ²)]
C _{rør,eff}	: Effektiv varmekapacitet for rør	[J/K]
c	: Varmekapacitet	[J/(kg K)]
C/V	: Forhold mellem cirkulationstab og varmtvandsforbrug	[-]
D _i	: Indvendig diameter af beregningsmæssig stålbeholder	[m]
E	: Besträlingsstyrke på solfangerplan	[W/m ²]
F	: Dagligt varmtvandsforbrug	[m ³ /døgn]
H _i	: Indvendig højde af beregningsmæssig stålbeholder	[m ²]
k ₀	: Varmetabskoefficientens startværdi	[W/(K m ²)]
k ₁	: Varmetabskoefficientens temperaturkoefficient	[W/(K ² m ²)]
L	: Vertikal placering af lagelement i beregningsmodel	[m]
L	: Varmestrøm forårsaget af varmeledning	[W/K]
L _{rør}	: Rørlængde	[m]
m	: Massestrøm	[kg/s]
n	: Antal lag	[-]
P _{rør}	: Pumpens effektilførsel til væsken i røret	[W]
q	: Varmestrøm	[W]
q _{tab}	: Varmestrøm forårsaget af varmetab fra lager	[W]
q _{kreds}	: Varmestrøm til lager forårsager af kreds tilsluttet lager	[W]
t	: Tiden	[s]
t _b	: Tykkelse af beholdervæg	[m]
Δt	: Tidsskridt	[s]
T	: Temperatur	[°C]
T _{BK}	: Temperatur af koldt brugsvand	[°C]
T _{BV}	: Temperatur af varmt brugsvand	[°C]
T _{gl}	: Temperatur før beregning	[°C]
T _{ny}	: Temperatur efter beregning	[°C]
T _o	: Begyndelsestemperatur	[°C]
T _{omg}	: Omgivelsestemperatur	[°C]
T _m	: Middeltemperatur af solfangervæsken	[°C]
T _{ind}	: Indløbstemperatur	[°C]
T _{ud}	: Udløbstemperatur	[°C]
UA _{tab}	: Varmetabskoefficient for lager	[W/K]
UA _{tab,rør}	: Varmetabskoefficient for rør	[W/(K m)]
UA _{var}	: Varmeoverføringsevne for varmeveksler	[W/K]
V	: Volumen	[m ³]
X	: Lagtykkelse i lagermodel	[m]

Græske symboler

δ	: Densitet	[kg/m ³]
λ	: Varmeledningsevne	[W/(m K)]
λ_{res}	: Resulterende varmeledningsevne	[W/(m K)]
η	: Solfangerens effektivitet	[-]
η_0	: Solfangerens starteffektivitet	[-]
γ	: Kapacitetsforhold for varmeveksler	[-]
ϵ	: Effektivitet for varmeveksler	[-]

Figurliste.

- 1.1 Principskitse af solvarmeanlæg i Sønderborg.
2.1 Principopbygning af solvarmeanlæg.
3.1 Forsøgsopstilling i Laboratoriets forsøgshal.
3.2 Lagerdimensioner.
3.3 Lageropbygning.
3.4 Udformning af forsøgsopstilling og målepunktsplacering.
3.5 Udformning af målerør til måling af lagertemperaturer.
Termotråde og mineraluld er ikke vist.
3.6 Direkte indløb.
3.7 Bøjning.
3.8 T-stykke.
3.9 Perforeret rør.
3.10 Parallelle plader.
3.11 Målepunktsplacering i lager.
3.12 Temperaturforhold under tapning af varmt brugsvand fra lager.
Volumenstrøm 1800 l/h.
3.13 Lagertemperaturer. Anvendelse af 2" direkte indløb ved supplerende opvarmning med ca. 800 l/h
3.14 Lagertemperaturer. Anvendelse af 2" direkte indløb ved supplerende opvarmning med ca. 2400 l/h.
3.15 Lagertemperaturer. Anvendelse af 2" bøjning ved supplerende opvarmning med ca. 2400 l/h.
3.16 Lagertemperaturer. Anvendelse af 2" T-stykke ved supplerende opvarmning med ca. 2400 l/h.
3.17 Lagertemperaturer. Anvendelse af 5/4" direkte indløb ved supplerende opvarmning med ca. 2400 l/h.
3.18 Lagertemperaturer. Cirkulation ca. 900 l/h gennem 2"direkte indløb og ca. 5 kW varmetab.
3.19 Lagertemperaturer. Cirkulation gennem 2" direkte indløb.
3.20 Lagertemperaturer. Cirkulation ca. 2400 l/h gennem 2" bøjning.
3.21 Lagertemperaturer. Cirkulation ca. 5000 l/h gennem 2" T-stykke.
3.22 Lagertemperaturer. Cirkulation ca. 5000 l/h gennem perforeret rør.
3.23 Lagertemperaturer. Cirkulation ca. 5000 l/h gennem parallelle plader.
3.24 Sammenligning af 2" indløbsudformninger i cirkulationskredsen.
3.25 Sammenligning af direkte indløb for cirkulationsstud.
3.26 Sammenligning af middelinidløbshastigheder for direkte indløb.
3.27 Solopvarmning af lager.
3.28 Målt effektilførsel til lager ved forsøg med alle kredse i drift.
3.29 Målte lagertemperaturer ved forsøg med alle kredse i drift.
4.1 Solvarmeanlægget i Glostrup. Solfangerfeltet er placeret på tagfladen.
4.2 Principopbygning af solvarmeanlæg og placering af målepunkter og energimålere.
4.3 Bestrålingsstyrke og lufttemperaturer den 18. oktober 1994.

- 4.4 Temperaturer ved solvarmeveksleren den 18. oktober 1994.
- 4.5 Varmtvandsforbrugets variation den 18. oktober 1994.
- 4.6 Temperaturer målt ved rumvarmekredsen den 18. oktober 1994.
- 4.7 Målte lagertemperaturer den 18. oktober 1994.
- 4.8 Målte månedsværdier for solenergi og varmtvandsforbrug.
- 4.9 Målt energimængde overført fra lager til rumopvarmning.
- 5.1 Væskestørrelse mellem lag for beregningsmetode med et konstant antal lag.
- 5.2 Beregningsmæssig udformning af lager.
- 5.3 Temperaturlagdeling i beregningsmodel med et konstant antal lag.
- 5.4 Temperaturlagdeling i beregningsmodel med et variabelt antal lag.
- 5.5 Opbygning af pointervariabel i beregningsprogram.
- 5.6 Eksempel på lageropbygning ved hjælp af pointervariabel. Indsættelse af lag.
- 5.7 Beregning af varmeledning.
- 5.8 Eksempel på beregning med lagermodel med et variabelt antal lag.
- 5.9 Eksempel på principopbygning af beregningsmodel for anlæg.
- 5.10 Beregningsmæssig udformning af varmeveksler.
- 6.1 Sammenligning af udløbstemperatur fra lageret under tapning af varmt brugsvand.
- 6.2 Sammenligning af lagertemperaturer under supplerende opvarmning og cirkulationskredsen i drift
- 6.3 Målte og beregnede lagertemperaturer forsøg med fire kredse i drift.
- 6.4 Målte og beregnede lagertemperaturer for den 18. og 19. oktober 1994.
- 7.1 Beregnede årsydelser ved varierende A/F forhold.
- 7.2 Beregnede årsydelser ved varierende volumenstrøm i solfangerkreds.
- 7.3 Beregnede årsydelser som funktion af varmeoverføringsevnen for solvarmeveksleren.

Tabelliste.

- 3.1 Indløbsudformningens egnethed med hensyn til opblanding.
- 4.1 Målte døgnværdier for 18. oktober 1994.
- 4.2 Målte dækningsgrader for solvarmeanlægget i Glostrup.
- 4.3 Målte energimængder fra juli til december 1994.
- 5.1 Stofværdier for vand ved forskellige temperaturer, fra /12/.
- 6.1 Målte og beregnede energimængder for forsøg med fire kredse i drift.
- 6.2 Målte og beregnede energimængder for den 18. og 19. oktober 1994.

Ph.D.-afhandlinger fra Laboratoriet for Varmeisolering.

Rubinstein, Axel:

Metoder til bestemmelse af varmeledningstal, med særlig vægt på teorien for de instationære metoder samt målinger med en termosonde af egen konstruktion. 1963.

Petersen, Erwin:

Solindfald gennem vinduer. 1996.

Lund-Hansen, Per:

Fugttransport i byggematerialer. 1967.

Nicolajsen, Asta:

Fugttransportkoefficenter for gasbeton. 1973.

Nielsen, A.F.:

Fugtfordelinger i gasbeton under varme- og fugttransport. 1974.

Nielsen, Peter V.:

Strømningsforhold i luftkonditionerede lokaler. 1974.

Ravn-Jensen, Lars:

Vinduer og energi. 1977.

Laweatz, Henrik:

Solindfald og solvarmeanlæg. Beregnet og målt. 1980.

Svendsen, S.:

Solfangers effektivitet. Målt og beregnet. 1981.

Kielsgaard Hansen, Kurt:

Luftsofangere og varmelagring i jord. 1982.

Furbo, Simon:

Varmelagring til solvarmeanlæg. 1984.

Mørck, Ove:

Modelling and Simulation of Solar Heating Systems. 1985.

Olsen, Lars:

Solvægge, målt og beregnet. 1985.

Paludan-Müller, Casper:

Undersøgelse af solvægge ved hjælp af indendørs forsøgsopstillinger. 1987.

Christensen, Jørgen Erik:

Edb-programmer til beregning af passiv solvarme. 1987.

Berg, Peter:

Simulering af termiske forhold i solvarmeanlæg med sæsonlagring. 1988.

Pedersen, Carsten Rode:

Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions. 1990.

Jensen, Karsten Ingerslev:

Vinduer og solvægge med monolitisk silica aerogel. 1991.

Appendiks 1 "Heat Storage for Large Low Flow Solar Heating Systems"

HEAT STORAGE FOR LARGE LOW FLOW SOLAR HEATING SYSTEMS

Peter Fagerlund Carlsson
Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark
DK-2800 Lyngby, Denmark

ABSTRACT

The temperature stratified solar heating storage tank is very important for the performance of a low flow solar heating system. The circulation pipe connected to the heat storage tank can cause mixing and thus destroy the advantageous temperature stratification of the storage tank. Experiments were carried out with a 2.0 m³ heat storage tank and five different connection principles, in order to determine when the mixing occurs, and which inlet designs reduce mixing the most. The flow in the circulation pipe was varied between 0 and 5000 l/h and the circulation inlet was designed as direct inlet, bent, T-piece, perforated pipe and parallel plates. The experiments proved that it is possible to design a circulation inlet which does not cause mixing at a flow of 4500 l/h. Furthermore, experiments were carried out with solar heating through a plate heat exchanger placed outside the heat storage tank. The solar heat gain to the heat storage tank resulted in an advantageous temperature stratification of the storage tank.

KEYWORDS

Temperature stratified solar heating storage tank, domestic hot water system, circulation pipe, mixing, low flow, laboratory experiments.

INTRODUCTION

Large solar heating systems for DHW can be designed according to the low flow principle where the liquid of the solar collector loop is circulating with a flow of about 10 l/(h m²). The low liquid flow leads to a high temperature rise in the liquid as it passes through the solar collector after which the solar energy is stored in the heat storage tank so that an advantageous temperature stratification is built up. The upper half of the heat storage tank is heated to approx. 55°C by an auxiliary energy source. The lower half of the storage tank is exclusively heated by solar energy.

Normally, a circulation pipe is connected to the solar heating storage tank, a circulation pipe from which there is a substantial heat loss. Besides the DHW demand, the solar heating system can also cover some of the circulation heat loss. The circulation can cause mixing in the solar heating storage tank when the circulation flow forces the heated water downwards in the heat storage tank and thus results in mixing with the cold water underneath. The extent of this mixing depends mainly on the following:

- flow in the circulation pipe,
- flow rate at the inlet to the tank,
- design of the circulation inlet,
- design of the tank, e.g. diameter

EXPERIMENTS

Indoor experiments were carried out with a 2.0 m³ heat storage tank consisting of a vertical storage tank where the supplemental heating and solar heating take place through plate heat exchangers. An elementary diagram of a large low flow solar heating system and the tested solar heating storage tank are shown in Figure 1.

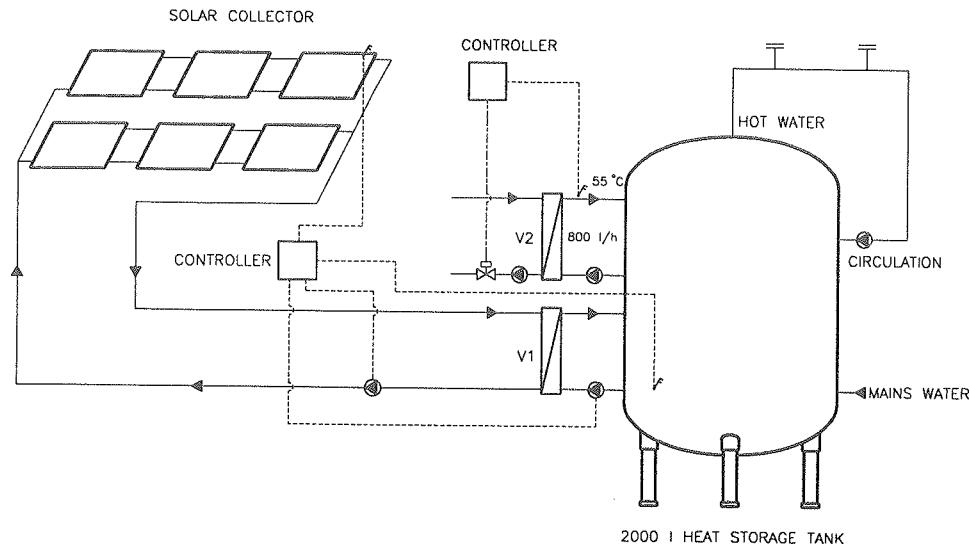


FIGURE 1. Elementary diagram of a large solar heating system for DHW.

The upper half of the heat storage tank is heated by circulating approx. 800 l/h through the heat exchanger (V2) which heats the domestic water to approx. 55°C and then returns it to the tank. Domestic hot water is tapped from the top of the tank and returned to the tank through the circulation inlet. The solar heat exchanger (V1) transfers the solar energy to the lower part of the heat storage tank. During the experiments solar collectors are not connected to the storage tank, but the test facility can transfer a variable effect to the storage tank. During tapping, mains water is supplied through the inlet in the bottom of the tank.

The temperatures in the tank are measured at six levels, which subsequently are used for the determination of the amount of the mixing. The design of the tank and placing of the measuring points are shown in Figure 2.

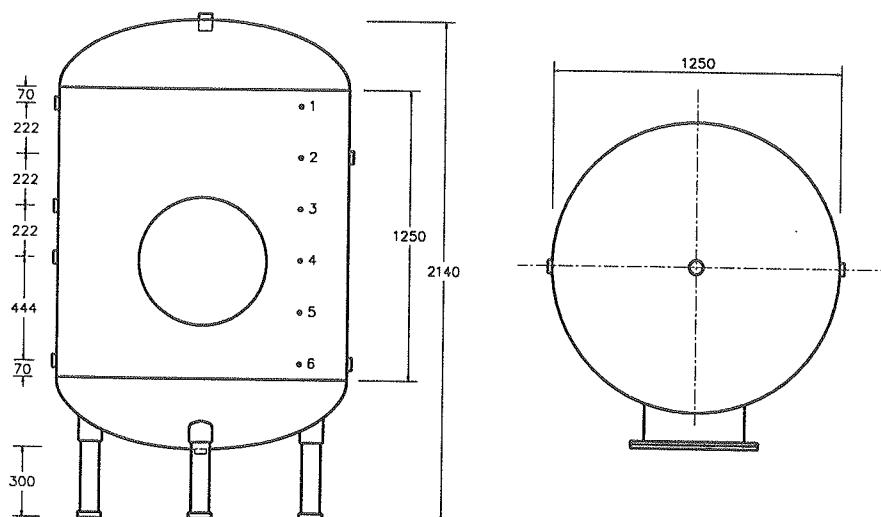


FIGURE 2. The design of the tank and placing of the measuring points.

The diameter is 1.25 m, and the distance between the measuring points is 0.222 m. Where not specified, the inlets are 2" with an internal diameter of 0.053 m. The designs of the circulation inlets are shown in Figure 3.

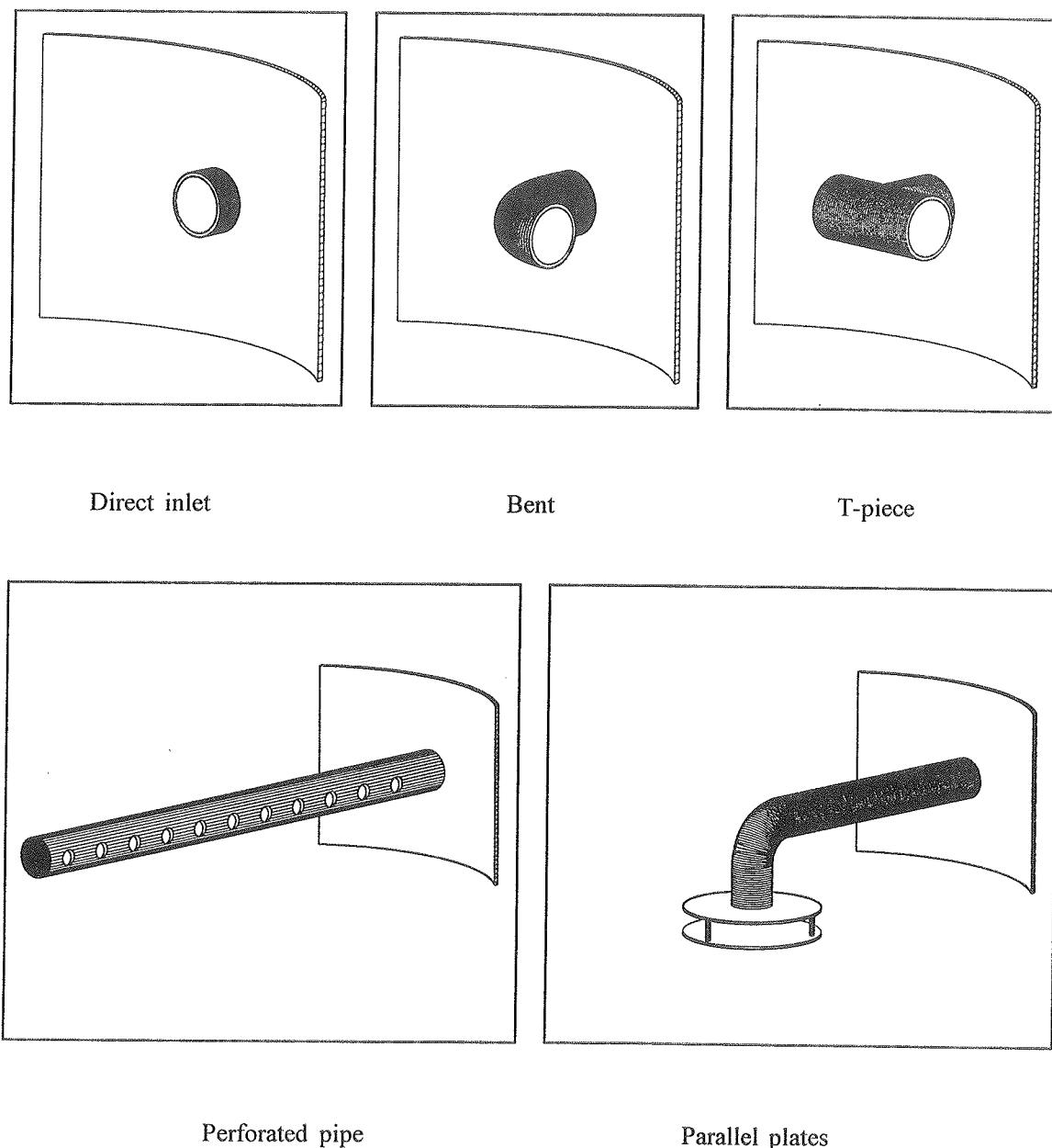


FIGURE 3. Different inlet designs for circulation pipe

For the direct inlet, experiments were carried out for inlet sizes of 2" and 5/4" to determine the influence of the flow in the circulation pipe and the inlet flow rate on the temperature stratification in the tank. 5/4" pipes have an internal diameter of 0.036 m. The bent and T-piece are both 2" fittings. The perforated pipe consists of a 2" steel pipe in which are bored 22 horizontal holes of a diameter of 0.025 m, at intervals of 0.10 m. In this way the outlet surface is increased approx. 5 times. The parallel plates consists of two horizontal circular plates with a diameter of 0.30 m and 0.05 m apart. Through this design the outlet surface is increased approx. twenty times. All the inlet designs result in a horizontal inlet direction of the circulation water in the tank.

RESULTS OF THE EXPERIMENTS

The duration of the experiments is twenty hours. The measuring takes place every 20 seconds, and mean values over 120 seconds are used for figure drawing. Figure 4 shows the tank temperatures when the auxiliary energy source is the only one used for heating.

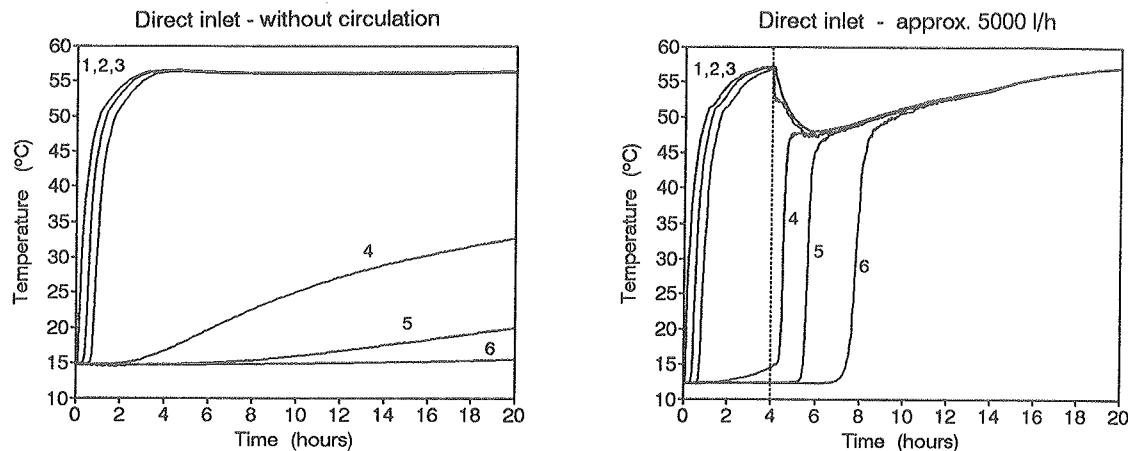


FIGURE 4. Tank temperatures at 2" direct inlet.

In Figure 4, left, heating with the auxiliary energy source and without circulation can be seen. The starting conditions are a cold storage tank with a temperature of approx. 15°C. The upper part of the tank is heated, and after 4 hours the temperatures 1, 2 and 3 are approx. 56°C. The experiment shows that it is possible to achieve a very advantageous temperature stratification in the storage tank because the temperatures 4, 5 and 6 only rise slightly because of the heating of the upper half of the tank. The minimum rise in temperatures 4, 5 and 6 is due to thermal conduction down through the storage tank.

Figure 4, right, shows the temperature stratification in the tank when the circulation pump starts after four hours, with a flow of approx. 5000 l/h. The inlet is 2" direct inlet, and the circulation water was not cooled. The experiment shows that a vigorous mixing occurs in the storage tank so that after four hours there are an even temperature in the entire heat storage tank. The temperatures 1, 2 and 3 fall approx. 10 K when the circulation pump is started after four hours. This fall in temperature is due to the fact that the auxiliary energy source is only dimensioned to heat 800 l/h to 55°C.

The measurements showed that a bent inlet creates an undesirable mixing in the storage tank, probably because it starts a rotation of all the volume of the tank.

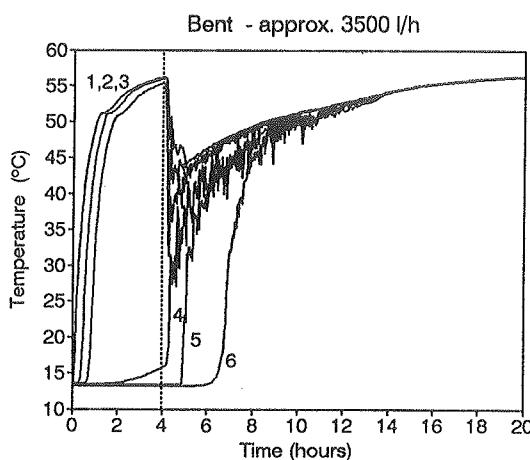


FIGURE 5. Tank temperatures at 2" bent.

Figure 5 shows that substantial temperature fluctuations take place in the tank when the flow in the circulation pipe is approx 3500 l/h. It can therefore be concluded that a bent inlet has a bad influence on the temperature stratification. The amount of the mixing corresponds approx. to 2" direct inlet at a flow of 5000 l/h.

The table below shows the amount of mixing compared to the flow and design of the circulation inlet.

Table 1. Amount of mixing for a 2.0 m³ vertical tank with a diameter of 1.25 m.

	No mixing	Total mixing after 16 hours	Total mixing after 4 hours	Overall estimation
2" Direct inlet	< 1800 l/h	3500 l/h	5000 l/h	Good
2" Bent	< 1000 l/h	2500 l/h	3500 l/h	Less good
2" T-piece	< 2500 l/h	5000 l/h	> 5000 l/h	Better
2" Perforated pipe	< 1800 l/h	3500 l/h	5000 l/h	Good
2" Parallel plates	< 4500 l/h	> 5000 l/h	> 5000 l/h	Best
5/4" Direct inlet	1000 l/h	2000 l/h	3000 l/h	

Table 1 shows that e.g. the T-piece does not cause mixing in the storage tank if the flow is smaller than approx. 2500 l/h. By no mixing is understood a temperature course as shown in Figure 4 left. At a flow of 5000 l/h a total mixing will take place in the storage tank after 16 hours of circulation operation. The overall estimation shows that a T-piece is better than e.g. the direct inlet. The parallel plates is the best design to maintain the temperature stratification in the tank. Even at a flow of approx. 4500 l/h there will be no mixing in the storage tank. The 5/4" direct inlet will give a faster mixing than the 2" direct inlet, see Table 1, because of the increased inlet velocity.

CONCLUSION

Measurements were carried out on a heat storage tank for a large low flow solar heating system. The measurements showed that the flow in the circulation pipe and the circulation inlet are very important for the temperature stratification in the temperature stratified solar heating storage tank. The experiments showed that if the circulation inlet to the tank is designed as a 2" direct inlet, no mixing will occur in the 2.0 m³ storage tank if the flow in the circulation pipe is under approx. 1800 l/h. However, there was a total mixing in the storage tank after four hours of circulation operation at a flow of 5000 l/h. The T-piece proved to have a beneficial influence on the temperature stratification, whereas the bent proved to be unsuitable, probably because it started a rotation of the entire tank volume. The parallel plates is the best of the tested designs because it prevents mixing at a flow in the circulation pipe of up to approx. 4500 l/h.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was funded by the Danish Energy Agency.

Appendiks 2 Måleusikkerheder.

Til vurdering af måleusikkerhed på måling af temperaturdifferenser, volumenstrømme og energimængder, er der foretaget kalibrering af måleudstyr.

Termosøjler til måling af temperaturdifferenser i forsøgsopstilling.

Der er anvendt fire termosøjler med fem følerelementer i hver.

Termosøjle 1: Tappekreds

Termosøjle 2: Cirkulationskreds

Termosøjle 3: Solkreds

Termosøjle 4: Suppleringskreds

Der er udført temperaturdifferensmålinger i termobade ved temperaturdifferenser på 10 K, 20 K, 30 K og 40 K. I samtlige forsøg har den laveste temperatur været ca. 30 °C. Referencemåleudstyret er af fabrikat Systemteknik AB type S1220 med en måleusikkerhed på 0,005 K.

Måleresultater:

Maksimal afvigelse på termosøjlerne er målt til 0,015 K, hvilket svarer til en maksimal afvigelse på under 0,2 % ved måling på temperaturdifferenser i området fra 10 K til 40 K.

Det vurderes, at termosøjlerne mäter meget præcist.

Volumenstrømsmålere i forsøgsopstilling.

Som volumenstrømsmålere er anvendt fabrikat Grundfos EM25, der mäter volumenstrømme mellem 0 og 5000 l/h. Grundfos oplyser, at den maksimale måleusikkerhed er 3 % i måleområdet fra 200 l/h til 5000 l/h. Den typiske måleusikkerhed oplyses til at være under 1 %. Under 200 l/h kan måleusikkerheden være op til 6 %.

Digitale signaler fra volumenstrømsmålerne overføres til dataopsamlingssystemet for hver 0,070 liter. Kalibreringen foregår ved at mæle vægten af vandet, der strømmer gennem volumenstrømsmåleren i måleperioden. I en måleperiode strømmer ca. 60 kg gennem målerne.

Placering af volumenstrømsmålerne i forsøgsopstillingen er vist på figur 3.4.

Måleresultater:

Volumenstrømsmålerens afigelser ved hhv. ca. 600 l/h og 1200 l/h.

	E1	E2	E3	E4	E5	E6
600 l/h	-1,3 %	-0,7 %	-0,9 %	-0,5 %	-0,9 %	-1,4 %
1200 l/h	-0,4 %	-0,4 %	-0,6 %	+0,5 %	-0,5%	+0,1 %

Det vurderes, at volumenstrømsmålerenes måleusikkerhed ligger under 2 %, ved de i forsøgsopstillingen anvendte volumenstrømme.

Volumenstrøms- og energimålerne anvendt i solvarmeanlægget i Glostrup.

Volumenstrøms- og energimålerne, der anvendes i solvarmeanlægget i Glostrup, er af fabrikat HG Instrumenter. Målernes placering er vist på figur 4.2. Målerne er kalibreret hos HG Instrumenter under forhold beskrevet i [18].

Måler	Placering	Type
HG1	Solfangerkreds	$Q_{maks.} = 3 \text{ m}^3/\text{h}$
HG2	Supplerende opvarmningskreds	$Q_{maks.} = 6 \text{ m}^3/\text{h}$
HG3	Tapning af varmt brugsvand	$Q_{maks.} = 12 \text{ m}^3/\text{h}$
HG4	Cirkulationskreds	$Q_{maks.} = 12 \text{ m}^3/\text{h}$
HG5	Rumvarmekreds	$Q_{maks.} = 6 \text{ m}^3/\text{h}$

Måleresultater ved 10 % af $Q_{maks.}$:

	Volumenmængde	Energi
HG1	0,0 %	- 0,7 %
HG2	+ 0,1 %	+ 0,2 %
HG3	+ 0,4 %	+ 0,2 %
HG4	+ 0,5 %	+ 0,4 %
HG5	- 0,2 %	- 0,4 %

Måleren HG1 er efterfølgende ændret således, at energimængden beregnes ud fra væskedata for en 30 % propylenglykol-/vandblanding.

Energimængden til den supplerende opvarmning, cirkulationstabet og rumopvarmningen beregnes ud fra temperaturdifferenser på ca. 5 K til 10 K, hvorimod beregning af energimængden for solvarmen og varmt brugsvand foregår ved temperaturdifferenser på i gennemsnit hhv. ca. 20 K og 40 K. Større temperaturdifferens medfører præcisere måling af energimængden.

Ovenstående kalibrering giver udtryk for meget præcise målere, men i solvarmeanlægget udsættes målerne for varierende temperaturforhold og volumenstrømme, der sandsynligvis medfører større måleusikkerhed en de ovennævnte værdier. Det vurderes, at måleusikkerheden kan være op til 2 - 4 % på den målte energimængde i de kredse med mindst temperaturdifferens og med mest varierende volumenstrøm.

