

HØJTYDENDE SOLVARMEANLÆG MED SMÅ VOLUMENSTRØMME

TEORETISKE UNDERSØGELSER

PETER BERG

MEDDELELSE NR. 209 MARTS 1990
LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

MEDVIRKENDE I PROJEKTET

Peter Berg, civilingeniør, lic. techn.

Simon Furbo, civilingeniør, lic. techn.

Sally Lykke Høgsted, programmør

Birthe Friis, korrespondent

FORORD

Denne rapport beskriver et arbejde som er gennemført under Energiministeriets solvarmeforskningsprogram, projektet: "Højtydende solvarmeanlæg med lille volumenstrøm", journal nr. 1353/87-3.

RESUME

Idet rapportens konklusion er udformet som et uddybende resume, skal der her blot henvises til konklusionen sidst i rapporten.

INDHOLDSFORTEGNELSE

MEDVIRKENDE I PROJEKTET

FORORD

RESUME

1. INDLEDNING	1
2. BESKRIVELSE AF DET UNDERSØGTE SOLVARMEANLÆG	3
3. EDB-MODEL FOR DET UNDERSØGTE SOLVARMEANLÆG	5
4. FORSØG TIL BESTEMMELSE AF KONVEKTIVE VARMEOVERGANGSTAL	9
5. VURDERING AF MODELLEN	17
6. ANALYSER MED MODELLEN	19
6.1 Variation af flowet i solfangerkredsen	22
6.2 Variation af kappens højde	24
6.3 Variation af elstavens og spiralens placering	26
6.4 Variation af temperaturniveauet i det vandvolumen der opvarmes af elstaven og spiralen	28
6.5 Variation af varmtvandsforbruget	30
6.6 Variation af isoleringstykkelsen på kappebeholde- rens top	32
6.7 Variation af kuldebro i bunden af kappebeholderen	34
6.8 Variation af solfangerfeltets størrelse	36
6.9 Variation af solfangerfeltets hældning	40
6.10 Variation af start- og stopdifferenserne i solfan- gerkredsens differenstermostatstyring	42
6.11 Undersøgelse af en solintensitetsstyring af pumpen i solfangerkredsen	44
6.12 Undersøgelse af en pilotsolfangerstyring af pumpen i solfangerkredsen	46
7. SAMMENLIGNING AF ET LOW-FLOW ANLÆG OG ET TRADITIONELT ANLÆG MED SPIRALBEHOLDER	48
8. FORTSÆTTELSE AF PROJEKTET	52
9. KONKLUSION	53
10. SUMMARY	55
REFERENCER	57

1. INDLEDNING

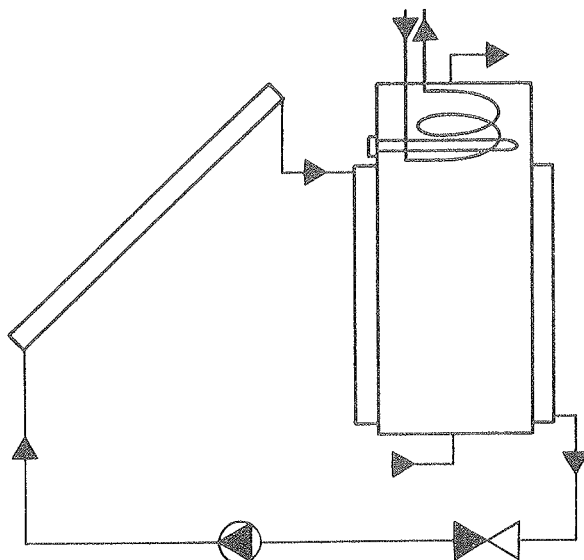
Gennem de senere år har der både i ind- og udland været en voksende interesse for mindre solvarmeanlæg med små volumenstrømme -såkaldte "low-flow" anlæg. Denne interesse skyldes at stort set alle undersøgelser viser at low-flow anlæg ydelsesmæssigt er særdeles attraktive sammenlignet med mere traditionelle anlæg. Noget af det væsentligste arbejde der er udført i udlandet vedrørende små low-flow anlæg er beskrevet i [1], [2], [3], [4], [5], [6] og [7]. Også i Danmark er der udført en væsentlig arbejdsindsats. Dette arbejde er beskrevet i [8], [9], [10], [11] og [12]. De højere ydelser for low-flow anlæg i forhold til traditionelle anlæg er konstateret uanset at der endnu ikke har fundet nogen egentlig optimering sted. Idet low-flow anlæg ydermere kan fremstilles billigere end traditionelle anlæg, er der god grund til at tro at den nye anlægstype kan medvirke til en mere udbredt anvendelse af solvarme.

Det arbejde der indtil nu er udført i Danmark omkring low-flow anlæg har i det væsentlige været begrænset til eksperimentelle undersøgelser. I udlandet er en række teoretiske undersøgelser derimod udført ved anvendelse af edb-modeller. Disse undersøgelser har dog forudsat en anlægsudformning med en beholdertype der er anderledes end den der anvendes i Danmark. I low-flow anlæg har netop beholderens udformning overordentlig stor betydning for anlæggets ydelse. Alle de danske anlæg der er opført både i forskningsøjemed og hos private brugere er baseret på en kappebeholder som solvarmelager.

I dette projekt er det et af formålene at udvikle en detaljeret edb-model for et low-flow anlæg med en udformning som den der anvendes i Danmark. En sådan model kan udgøre et vægtigt værktøj i teoretiske undersøgelser og dimensionering af denne nye anlægstype. Et andet formål er at udføre en række undersøgelser og analyser af low-flow anlægs ydelser og drift i Danmark.

2. BESKRIVELSE AF DET UNDERSØGTE SOLVARMEANLÆG

En illustration af det undersøgte solvarmeanlæg til dækning af varmt brugsvand i en enkelt husstand er vist på figur 1.



Figur 1. Skematisk illustration af den undersøgte anlægsudformning.

Som vist på figuren indeholder anlægsudformningen en kappebeholder der i volumenet over kappen er forsynet med en varmevekslerspiral og en elstav. Varmevekslerspiralen og elstavens funktion er at sikre et acceptabelt temperaturniveau i den øverste del af beholderen. Herved kan en tapning finde sted uden nogen form for "back-up" uden for lageret. Gennem varmevekslerspiralen, der er koblet til et fyr, leveres det nødvendige energitilskud i vinterhalvåret, medens elstaven er i drift i sommerhalvåret. Varmevekslerspiralen og elstaven styres begge vha. en temperaturføler der er anbragt i lageret over elstaven og spiralens vindinger.

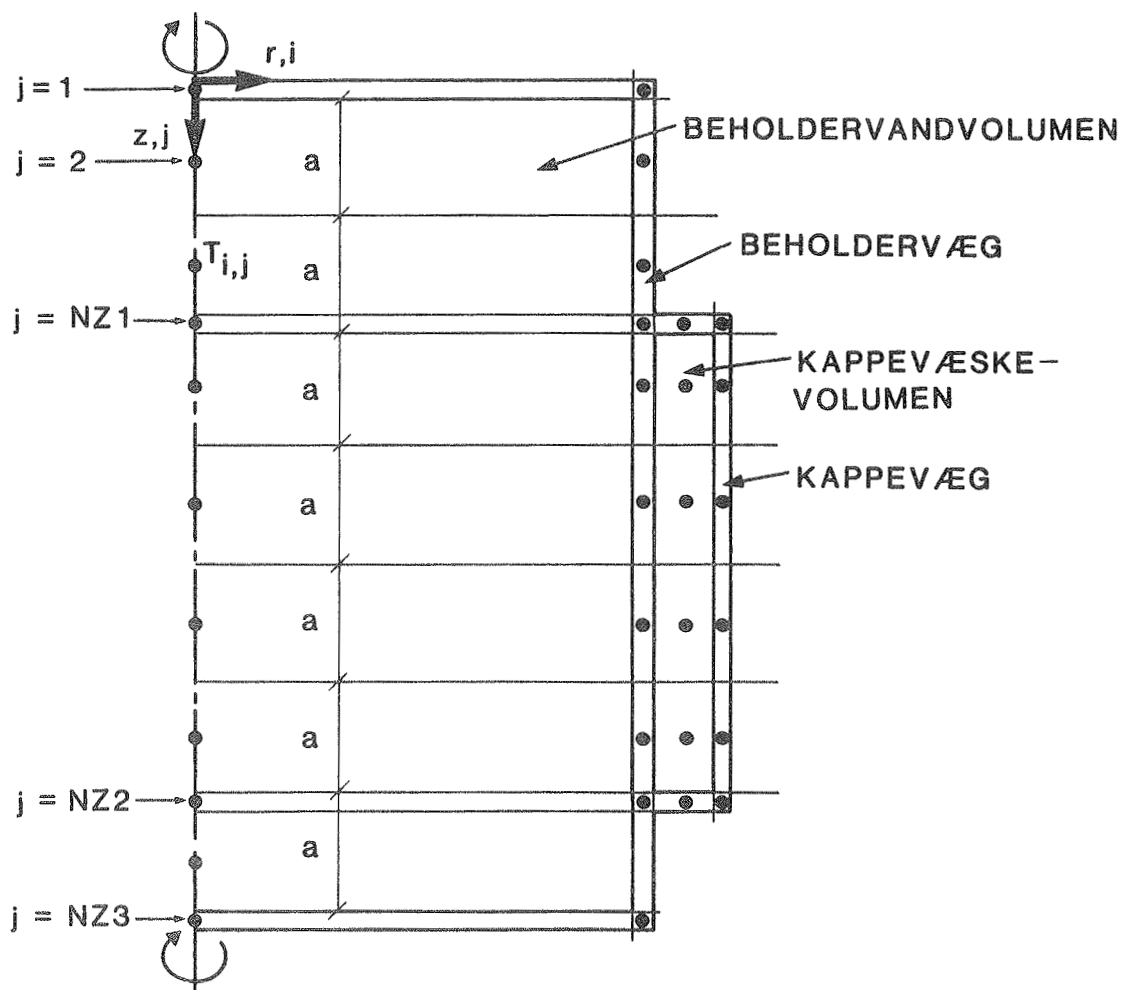
Flowet i solfangerkredsen er fremkaldt af en pumpe og har en størrelse således at anlægget kan karakteriseres som et low-flow anlæg ($0,1-0,2 \text{ l/min m}^2$ solfanger). Pumpen kan styres efter tre forskellige principper. En differenstermostatstyring, en pilotsolfangerstyring og en solintensitetsstyring. Ved differenstermostatstyringen er de to temperaturfølere anbragt henholdsvis øverst på solfangerens absorberplade og nederst i beholderkappen ved dennes udløb.

Den undersøgte anlægsudformning er endvidere forsynet med en blandeventil. Hvis temperaturen i lageret er højere end en ønsket tappetemperatur (fra hane), opblandes med koldt vand.

3. EDB-MODEL FOR DET UNDERSØGTE SOLVARMEANLÆG

Den matematiske edb-model der er udviklet for den undersøgte anlægsudformning er opdelt i delmodeller for de enkelte indgående anlægskomponenter (solfangerfelt, rørforbindelser, lager etc.). De største modeltekniske problemer, hvortil der ikke umiddelbart findes kendte løsninger, er knyttet til delmodellen for lageret. I dette kapitel er hovedvægten derfor lagt på beskrivelsen af lagermodellen. De anvendte delmodeller for solfangerfelt og rørforbindelser er beskrevet i [13]. Om disse modeller skal blot nævnes at flere specielle forhold der må tages hensyn til ved simulering af low-flow anlæg er tilgodeset i modellerne.

Lagermodellen er opbygget omkring en kontrolvolumeninndeling af kappebeholderen som vist på figur 2.



Figur 2. Kontrolvolumeninndeling af kappebeholder.

Det skal bemærkes at de simuleringer der beskrives senere alle er udført med et langt større antal kontrolvolumener i z-aksens retning end vist på figuren.

En simulering udføres ved at "marchere" frem i tiden i tidsskridt. Til hvert kontrolvolumen er knyttet en middeltemperatur som er lokaliseret i midten af kontrolvolumenet. I hvert tidsskridt beregnes nye temperaturer for hvert kontrolvolumen. Denne beregning finder sted i flere tempi som bl.a. indeholder en løsning af en koblet og implicit formuleret energibalance der omfatter alle kontrolvolumener. Den implicitte formulering er valgt for at opnå en stor frihed m.h.t. størrelsen af de tidsskridt en simulering udføres med. Som følge af de meget små kontrolvolumener der udgør "hjørnerne" i kappebeholderen ville en eksplicit formuleret energibalance medføre instabilitet i beregningen, med mindre ultra små tidsskridt anvendes.

I den implicit formulerede energibalance foregår al transport af energi udelukkende ved varmeledning. Med den valgte kontrolvolumeninddeling er varmeledningen i vandret og lodret retning i både kappebeholderens væskeindhold og stålvægge inkluderet i lagermodellen. Den energitransport der altid vil finde sted ved naturlig konvektion ved kappebeholderens vægge i lodret retning er negligeret. Denne beregningsmæssigt meget væsentlige forenkling er anvendt på grundlag af de analyser af naturlig konvektion i mindre beholdere der er beskrevet i [14] og [15]. En nærmere vurdering af forenklingen er givet i kapitel 5. Her skal blot nævnes at en præcis medregning af den naturlige konvektion vil medføre at årssimuleringer med modellen umuliggøres som følge af uacceptabelt lange beregningstider.

I de perioder hvor der er et påtrykt flow i kappen (når solfangerfeltet er i drift) udskiftes de enkelte og lige store kontrolvolumener, der tilsammen udgør kappevæskevolumenet, præcis en gang i hvert tidsskridt. De enkelte kontrolvolumeners væskeindhold flyttes så at sige nedad med en frekvens på et kontrolvolumen i hvert tidsskridt. Denne løsning er valgt for at undgå numerisk diffusion i kappen i lodret retning. Flytningen af de enkelte kontrolvolumeners indhold udføres i beregningen umiddelbart før den ovenfor beskrevne løsning af den implicit formulerede energibalance. I en simulering med modellen opnås det ønskede flow i kappen ved at afstemme tidsskridtet efter den valgte inddeling.

I de situationer hvor der tappes varmt vand fra beholderen udføres en række tilsvarende flytninger af indholdet i beholderens kontrolvolumeninddeling. Som det er antydnet på figur 2, er det summerede volumen af henholdsvis kontrolvolumenerne (NZ1-1 og NZ1) samt (NZ2 og NZ2+1) identiske med de øvrige kontrolvolumeners indhold. Ved en flytning af indholdet af beholderens kontrolvolumener regnes volumenerne henholdsvis (NZ1-1 og NZ1) samt (NZ2 og NZ2+1) for værende et kontrolvolumen. For at opnå præcis den ønskede tappemængde udgør den sidste af en serie flytninger ikke et helt kontrolvolumen.

Anvendes et passende antal kontrolvolumeninddelinger i en simulering, vurderes den beskrevne sammenlægning af kontrolvolumener samt den sidste flytning ikke at medføre nogen numerisk diffusion af betydning.

Som nævnt er al energitransport der medregnes i den implicit formulerede energibalance antaget at foregå udelukkende ved varmeledning. Derfor kan en ustabil og fysisk urealistisk temperaturlagdeling i beholderen beregnes, - typisk ved beholderens top og bund som følge af varmeudvekslingen med omgivelserne. Findes en sådan temperaturlagdeling ved løsningen af ligningssystemet, forkastes de aktuelle temperaturer, og nye beregnes ved en momentan og fuldstændig opblanding af de aktuelle kontrolvolumeners energiindhold. Denne søgning og en eventuel opblanding udføres i hvert tidsskridt og omfatter alle beholderens kontrolvolumener. Efter en sådan opblanding vil ustabile temperaturlagdelinger være erstattet af et lagermedium med en ensartet temperatur.

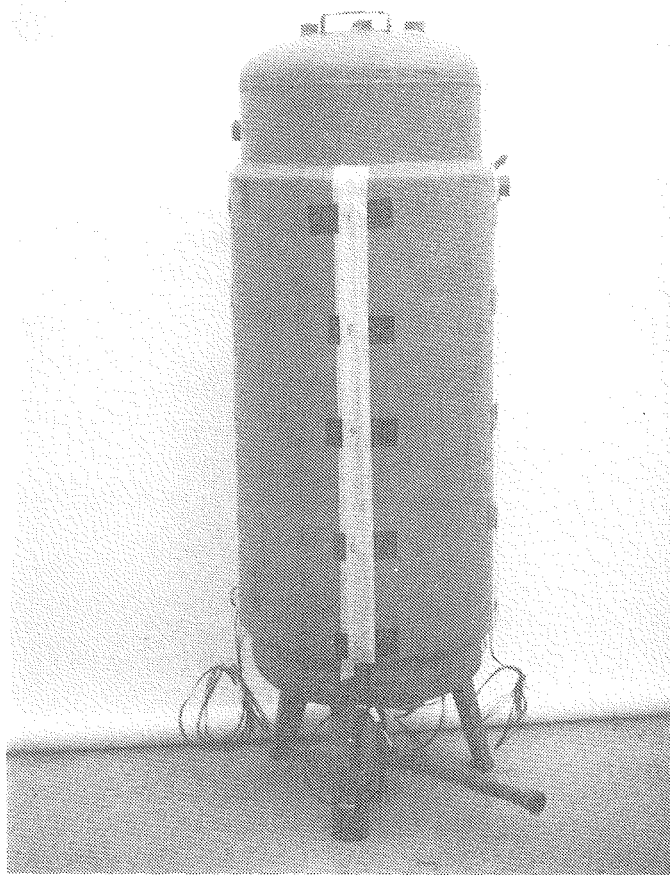
I de situationer hvor elstaven eller varmevekslerspiralen er i drift, tilføres de aktuelle energimængder til det kontrolvolumen hvor elstaven eller spiralens underkant er placeret i. Idet denne energitilførsel udføres umiddelbart før den ovenfor beskrevne opblanding, vil en ustabil temperaturlagdeling, fremkommet ved energitilførslen, straks blive udjævnet igen.

Som beskrevet ovenfor føres temperaturerne i lageret frem i tiden i flere tempi. Heraf er løsningen af det implicit formulerede ligningssystem den delberegning der er forbundet med langt det største beregningsarbejde. For at reducere dette beregningsarbejde og dermed opnå en væsentlig kortere beregningstid inverteres ligningssystemet og anvendes igen og igen når dette er muligt. Denne mulighed består så længe ligningssystemets koefficienter ikke ændres under en simulering. I disse koefficienter indgår konvektive varmeovergangstal for energiudvekslingen mellem væsken i kappen og vandet i beholderen. Erfaringerne med den beskrevne lagermodel har vist at de samme varmeovergangstal kan anvendes gennem lange perioder af en simulering. Herved kan det samme inverterede ligningssystem anvendes i mange på hinanden efterfølgende fremskrivninger af lagerets temperaturer med en kraftig reduktion af den samlede anvendte beregningstid til følge.

4. FORSØG TIL BESTEMMELSE AF KONVEKTIVE VARMEOVERGANGSTAL

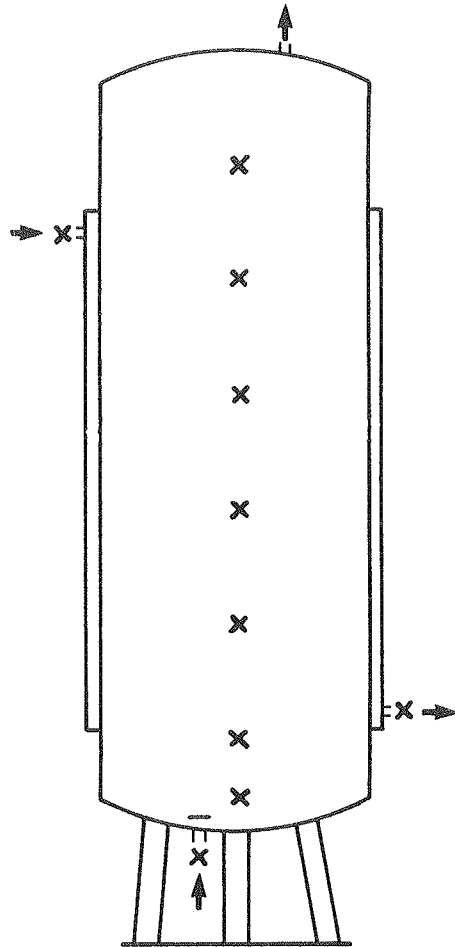
Modstanden for varmeudvekslingen mellem væsken i kappen og vandet i beholderen er sammensat af en ledningsmodstand og to konvektive varmeovergangstal. Heraf er ledningsmodstanden, gældende for energitransporten gennem beholderens stålvæg, langt den mindste og uden praktisk betydning. Størrelsen af de konvektive varmeovergangstal må derfor forventes at have stor betydning for resultaterne af en simulering. Samtidig er de konvektive varmeovergangstal afhængige af en lang række parametre, og en præcis bestemmelse af tallene er derfor meget kompleks. Under bestemmelsen af de konvektive varmeovergangstal har det dog vist sig at et forholdsvis enkelt variationsmønster for de konvektive varmeovergangstal kan anvendes i lagermodellen med et udmærket resultat. Variationsmønstrene for varmeovergangstallene er bestemt vha. tre laboratorieforsøg udført i en af laboratoriets lagerprøvestande.

I de tre forsøg er en 200 l velisoleret kappebeholder fra Sdr. Højrup Maskinfabrik benyttet. På figur 3 ses et billede af beholderen i uisoleret stand. Som solfangervæske i kappen er benyttet en 50% propylenglycol/vand-blanding.



Figur 3. Beholder anvendt til bestemmelse af variationsmønster for konvektive varmeovergangstal mellem væske i kappen og vandet i beholderen.

Beholderen er forsynet med 7 termoelementer der indkapslet i en glasstav er anbragt i forskellige højder i beholderens indre. Herudover er termoelementer monteret i ind- og udløbet af kappen samt i koldt vandstilførslen i beholderens bund. På billedet af beholderen ses endvidere 10 termoelementer påklæbet udvendigt på kappen. Disse 10 termoelementer er dog ikke benyttet i de her beskrevne forsøg. De termoelementer der er anvendt under forsøgene og deres placering fremgår af figur 4.

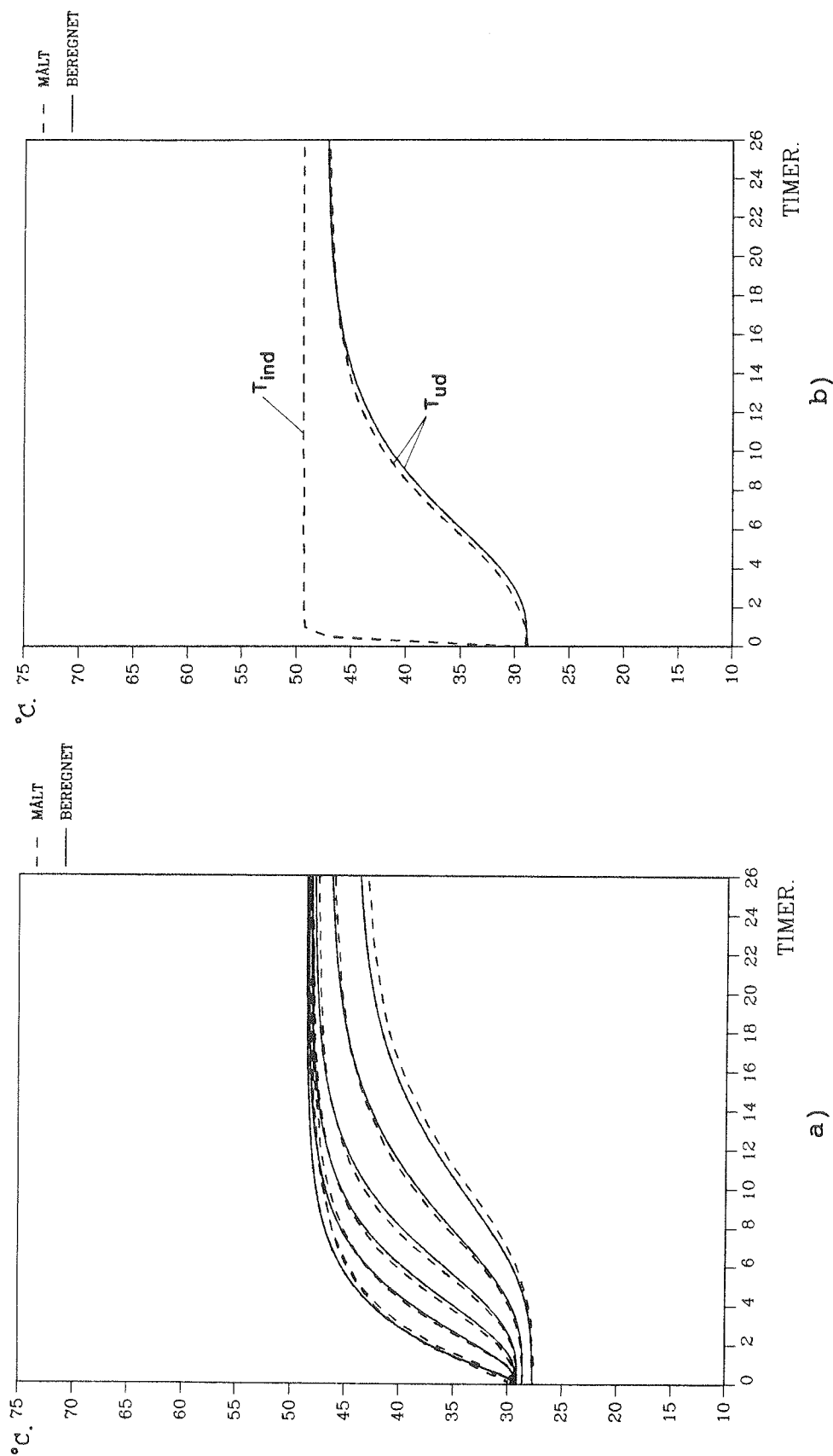


Figur 4. Skitse af de benyttede termoelementers placering i kappebeholderen. Termoelementerne er markeret med et kryds.

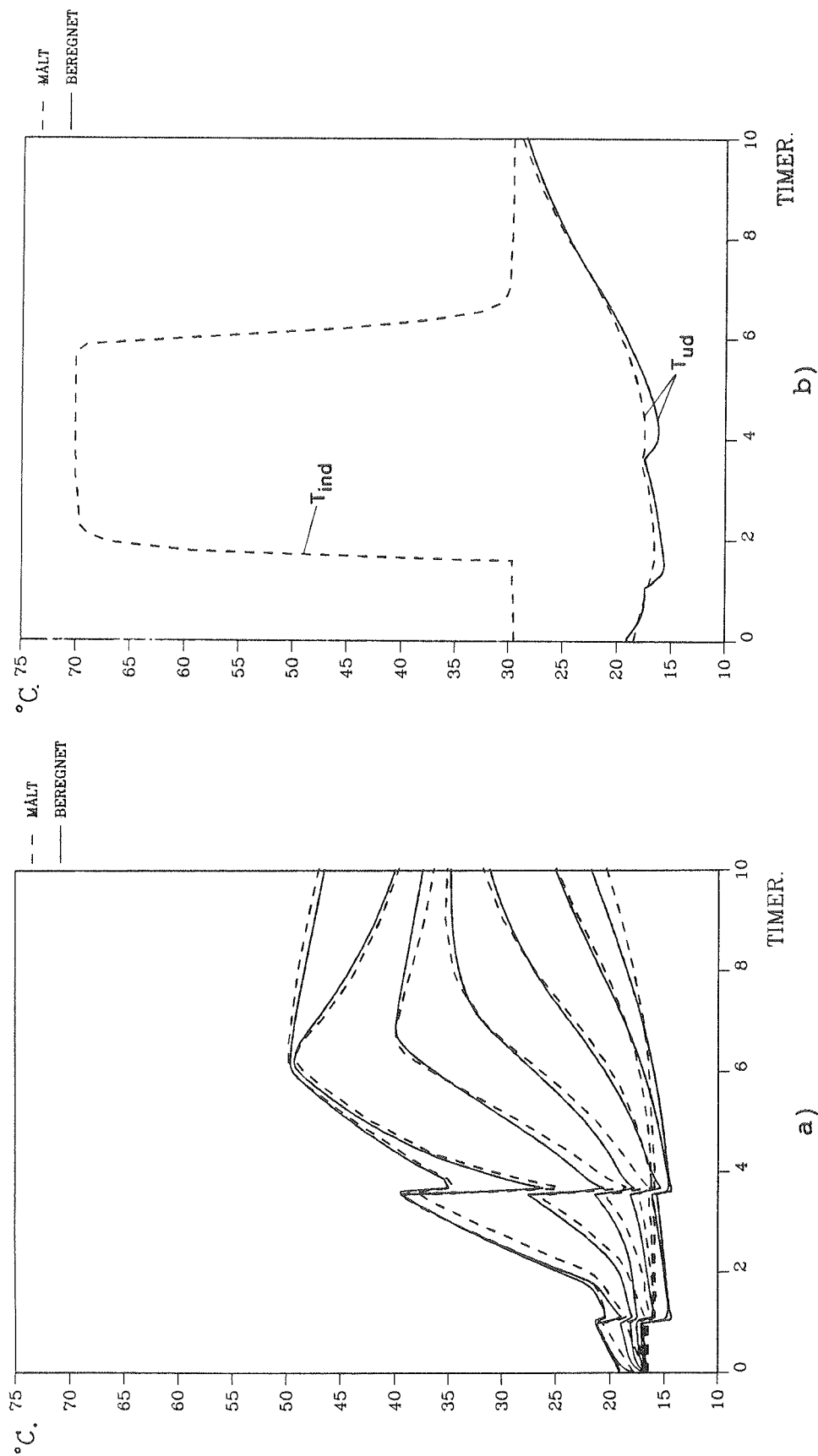
I de tre forsøg er der både udført tapninger fra samt opladninger og afkølinger af kappebeholderen. Under forsøgene er de 7 lagertemperaturer, ind- og udløbstemperatur for kappen samt temperaturen i koldt vandstilførslen målt. Det samme gælder omgivelsernes temperatur, volumenstrømmen i kappen og varmt vandstapningens størrelse.

Efter udførelsen af de tre forsøg er en lang række simuleringer udført med den udviklede model. I simuleringerne er målte værdier fra forsøgene anvendt som inddata. Nærmere bestemt udgør disse inddata de målte temperaturer af omgivelserne, i indløbet af kappen, i koldt vandstilførslen i beholderen, volumenstrømmen i kappen og varmt vandstapningens størrelse. I simuleringerne er mange forskellige variationsmønstre for de konvektive varmeovergangstal mellem væsken i kappen og vandet i beholderen foreskrevet. Ved at sammenligne de målte og de beregnede temperaturer i beholderen og i udløbet af kappen er et forholdsvis enkelt variationsmønster for de konvektive varmeovergangstal fastlagt. Dette mønster er fastlagt således at afvigelserne mellem de nævnte sammenlignede temperaturer bliver mindst mulig.

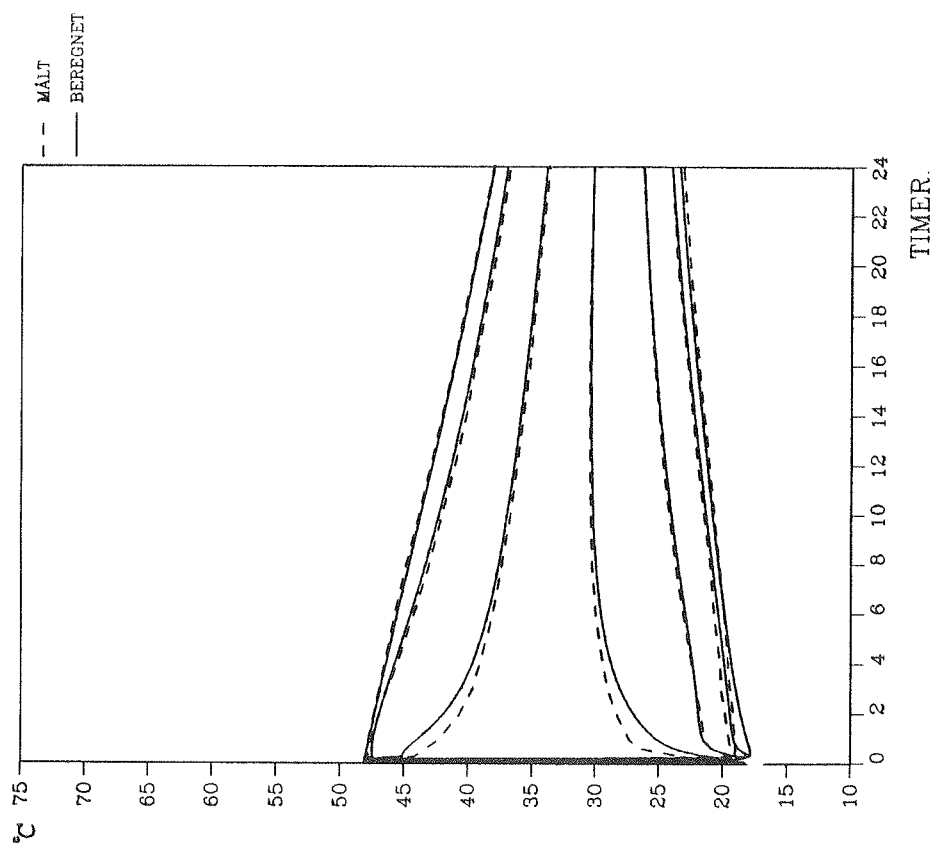
De målte og de beregnede temperaturer for de tre forsøg er vist på figur 5, 6 og 7. De beregnede temperaturer er bestemt på grundlag af det fastlagte mønster for de konvektive varmeovergangstal. Mønsteret for de konvektive varmeovergangstal er illustreret på figur 8.



Figur 5. Målte og beregnede temperaturer fra forsøg 1.
 a) Temperaturer i 7 forskellige højdeniveauer i beholderen.
 b) Temperaturer ved kappens ind- og udløb.
 Efter de 26 timer som forsøg 1 omfatter er stationære forhold næsten opnået. Der er således næsten balance mellem den energi der tilføres igennem kappen og varmetabet fra lageret. Under forsøget har det målte flow i kappen varieret mellem 0,37-0,52 l/min.



Figur 6. Målte og beregnede temperaturer fra forsøg 2.
 a) Temperaturer i 7 forskellige højdeniveauer i beholderen.
 b) Temperaturer ved kappens ind- og udløb.
 Forsøget indeholder 2 tapninger på hver 16 l. Fra forsøgsperiodens 2. til 6. time er en høj indløbstemperatur til kappen påtrykt. Før og efter denne periode er en mindre indløbstemperatur påtrykt. Forsøget minder derfor om de forhold et solvarmelager typisk udsættes for. Under forsøget har det målte flow i kappen varieret mellem 0,36-0,40 l/min.

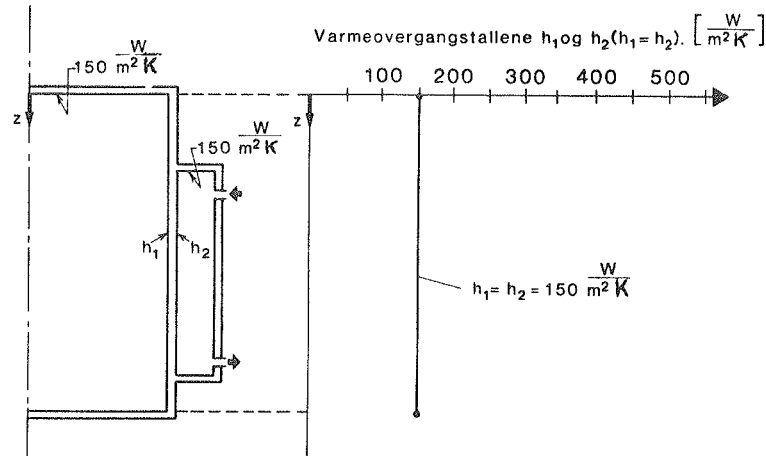


Figur 7. Målte og beregnede temperaturer fra forsøg 3. Temperaturer i 7 forskellige niveauer i beholderen. Forsøget er indledt med en tapning på 107 l, hvorefter lageret afkøles udelukkende som følge af et varmetab til omgivelserne.

1. TILFÆLDE :

Forudsætninger :

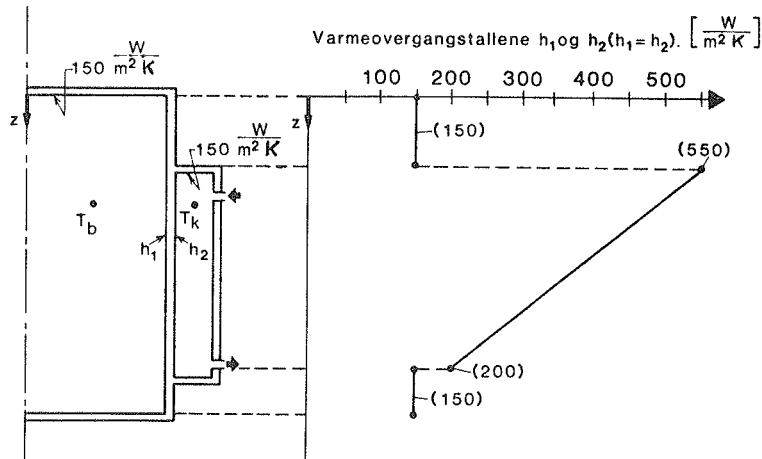
- a) Flow i kappe = 0



2. TILFÆLDE :

Forudsætninger :

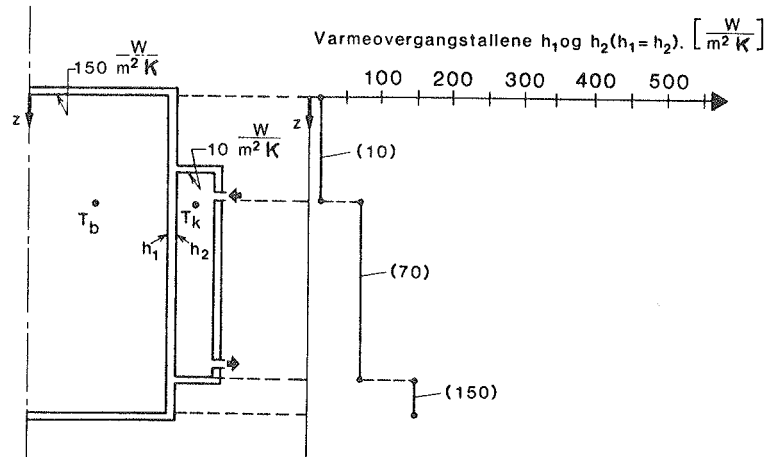
- a) Flow i kappe $\neq 0$
- b) $T_b < T_k$



3. TILFÆLDE :

Forudsætninger :

- a) Flow i kappe $\neq 0$
- b) $T_b > T_k$



Som det fremgår af figur 5, 6 og 7 er en god overensstemmelse mellem de målte og de beregnede temperaturer opnået ved anvendelse af det forholdsvis enkle variationsmønster for de konvektive varmeovergangstal. Forskellen mellem temperaturerne ved kappens ind- og udløb er et udtryk for den energi der er afsat i lageret. Derfor er såvel den afsatte energi som fordelingen af denne i beholderen, under de to opladningsforløb, beregnet med en god nøjagtighed. Det samme gælder den interne energiudveksling i lageret under afkølingsforløbet.

I den faglitteratur der omhandler konvektive varmeovergangsproblemer findes utallige udtryk for sådanne tal gældende under forskellige forudsætninger. Tendensen i mange af disse udtryk er indeholdt i det fundne variationsmønster for konvektive varmeovergangstal vist på figur 8. Sammenholdes fx. det 1. og det 2. tilfælde, hvorunder de mindste effekter overføres under det førstnævnte, ses tendensen at et varmeovergangstal alt andet lige vokser med en stigende overført effekt. Af samme grund falder varmeovergangstallene i det 2. tilfælde med voksende afstand fra kappens top hvor netop den største effekt overføres.

Varmeovergangstallene i det 3. tilfælde kan umiddelbart forekomme urealistiske, og disse skal derfor forklares nærmere. Som tidligere beskrevet er modellen for kappebeholderen baseret på antagne rotationssymmetriske forhold. I tilfælde 1 og 2 er denne antagelse yderst rimelig. I tilfælde 2 vil opdriftskræfter således medføre at en nogenlunde ensartet temperatur findes langs kappevæskenvolumenets omkreds. Dette forhold er konstateret under flere laboratorieforsøg udført i andre projekter. Det skal her erindres at kun små volumenstrømme tilføres kappen gennem dennes indløb. I tilfælde 3, hvor indløbstemperaturen i kappen er lavere end beholderens temperatur i samme niveau, vil opdriftskræfter have den modsatte effekt. Således vil den koldere solfangervæske, der tilføres igennem kappens indløb, så at sige "falde nedad" mod kappens bund i et bånd med en bredde på en begrænset del af kappens omkreds. Med andre ord reduceres det varmeoverførende areal, - men da modellen som nævnt forudsætter rotationssymmetri og hermed et varmeoverførende areal svarende til beholderens fulde omkreds, reduceres de konvektive varmeovergangstal i stedet. På tilsvarende vis og af samme grund reduceres også varmeovergangstallene for den del af kappen der ligger over kappens indløb. Idet en anseelig energitransport kan finde sted ved varmeledning i beholdervæggen over kappen, er reduktionen også udført for varmeovergangstallet ved den øverste del af beholdervæggen.

I mange driftssituationer vil forudsætningerne for tilfælde 3 være opfyldt over en vis højde i kappebeholderen, medens forudsætningerne for tilfælde 2 er opfyldt under denne højde. I sådanne situationer anvendes varmeovergangstallene fra begge de to tilfælde i hvert sit niveau i beholderen.

5. VURDERING AF MODELLEN

På flere punkter kan den beskrevne model forekomme meget simpel. Her tænkes bla. på den enkle beskrivelse af de konvektive varmeovergangstal ved kappebeholderens vægge. Endvidere er den energitransport der altid finder sted ved naturlig konvektion langs beholderens vægge negligeret. Det skal dog erindres at opdriftskræfternes indflydelse på varmeudvekslingen mellem kappe- og beholdervolumenet, omend på enkel vis, er inkluderet i det fastlagte variationsmønster for de konvektive varmeovergangstal.

Et formål med udviklingen af modellen har været at muliggøre udførelsen af årssimuleringen af low-flow anlæg. Derfor har det været tvingende nødvendigt at simplificere flere fysiske forhold i kappebeholderen. Spørgsmålet er så i hvor høj grad disse forenklinger påvirker "modellens nøjagtighed".

De energimængder der flyttes ved naturlig konvektion i en mindre beholder kan være anselige. Dette forhold og betydningen heraf er belyst i [14]. De nævnte energimængder der flyttes kan opdeles i to bidrag. Det ene bidrag er knyttet til en grænselagsstrømning langs beholderens vægge. Energi-transporten i grænselagsstrømningen kan være meget stor. Grænselagsstrømningen vil dog fremkalde en næsten lige så stor, men modsatrettet energitransport uden for grænselaget. Nettoeffekten af de to transportbidrag er uden betydning i de driftssituationer hvor stabile temperaturlagdelinger er til stede. Dette skyldes at selv en meget beskeden temperaturlagdeling har en overordentlig kraftigt bremsende effekt på en grænselagsstrømning og dermed på begge transportbidrag. Findes en temperaturlagdeling ikke, vil denne hurtigt dannes netop som følge af de naturlige konvektionsstrømme. En sådan lagdeling dannet på denne måde vil dog være yderst beskeden.

Betydningen af de naturlige konvektionsstrømme ved årssimulering af solvarmeanlæg med spiralbeholdere (lagertype hvor energiudvekslingen mellem solfanger og beholder sker gennem en varmevekslerspiral indbygget i bunden af beholderen) er undersøgt i [15]. Resultatet var at anlæggets ydelse på årsbasis kun ændres ca. 1 o/oo ved at medtage dette transportbidrag i simuleringer.

I en spiralbeholder, hvor opvarmningen sker fra bunden, vil eventuelle temperaturlagdelinger helt eller delvis ødelægges under opladning. I low-flow-anlæg med kappebeholdere dannes en temperaturlagdeling i sådanne opladningssituationer. En temperaturlagdeling vil derfor i langt højere grad være at finde i low-flow-anlæg.

På grundlag af de forklarede forhold vurderes negligeringen af de naturlige konvektionsstrømme at være en forenkling der ikke påvirker modellens nøjagtighed nævneværdigt.

De tre tidligere beskrevne laboratorieforsøg hvorefter mønstrene for de konvektive varmeovergangstal er fastlagt indeholder i det væsentlige alle de forskellige driftssituationer som kan forekomme i et solvarmelager. Som det endvidere

fremgår af figur 5, 6 og 7 er en god overensstemmelse uden undtagelse fundet mellem de beregnede og de målte temperaturer. En god overensstemmelse forventes derfor også at kunne opnås ved simulering af kappebeholderen som komponent i et solvarmeanlæg. En naturlig forudsætning herfor er at de konvektive varmeovergangstal ikke anvendes under forhold der afviger væsentligt fra dem der er knyttet til de tre forsøg. Her tænkes fx på kappebeholdere med helt andre dimensioner eller flow i kappen af helt andre størrelser. En vis variation vurderes dog udmærket at kunne tillades.

I en overordnet vurdering af den samlede model for low-flow anlægget forventes effekter/tendenser af en lang række parametervariationer at kunne bestemmes med en god nøjagtighed. Et vist forbehold må derimod tages mht. en præcis beregning af årsydelse for konkrete anlæg. Dette forbehold skyldes ikke et specifikt kendskab til mangler eller svagheder ved modellen. Forbeholdet skal ene og alene begrundes med at modellen ikke er valideret med målinger af komplette low-flow anlæg i drift. En sådan validering ville være yderst værdifuld, men ligger desværre uden for de økonomiske rammer i projektet.

6. ANALYSER MED MODELLEN

Med udgangspunkt i et veldefineret referenceanlæg er en række parameteranalyser udført med modellen. De væsentligste parametre for referenceanlægget er angivet herunder.

Solfanger (2 paneler fra Batec):

Solfangerareal	4,3 m ²
Starteffektivitet	0,78
Varmetabskoefficient for solf.	4,8 W/m ² K
Varmekapacitet for solf. (inkl. væske)	10000 J/m ² K
Hældning, målt fra vandret	45 °
Solfangerorientering	sydvendt

Flow, rørforbindelser, pumpe og styring (differenstermostatstyring):

Flow i solfangerkreds	0,15 l/min m ²
Længde af indv. rør fra lager til solf.	4 m
Længde af udv. rør fra lager til solf.	4 m
Længde af udv. rør fra solf. til lager	4 m
Længde af indv. rør fra solf. til lager	4 m
Varmetabskoefficient for rørforb.	0,24 W/m K
Varmekapacitet for rørforb. (inkl. væske)	300 J/m K
Pumpens energiforbrug (tilføres solfangerkredsen)	35 W
Temperaturdifferens for start af pumpe	5 K
Temperaturdifferens for stop af pumpe	0,5 K

Lager (200 l kappebeholder fra Sdr. Højrup Maskinfabrik):

Brugsvandsvolumen	200 l
Kappevolumen	27 l
Beholdervolumen over kappens overkant	33 l
Beholderens højde	1,35 m
Beholderens diameter	0,47 m
Kappens højde	0,90 m
Kappens diameter	0,51 m
Afstand mellem beholderens top og kappens top	0,27 m
Volumen over elstav og spiralens underkant	25 l
Varmetabskoefficient for lager (uisoleret bund, - ca. 5 cm mineral- uldisolering på side og top)	4,1 W/K
Elstavens effektafgivelse	1000 W
Spiralens effektafgivelse	1000 W

Forbrug, back-up og indetemperatur:

Varmtvandsforbrug (fordelt på 5 lige store tapninger)	150 l/døgn
Ønsket tappetemperatur (udgør også driftskriteriet for elstav og spiral)	50 °C
Koldtvandstemperatur	10 °C
Back-up leveres fra { elstav i: maj-sep spiral i: okt-apr	
Indetemperatur	20 °C

Nogle væsentlige resultater fra en årssimulering af referencelanlægget er givet herunder. Simuleringen er udført med referenceåret som inddata.

Energi leveret fra solfangerkreds til lager	1590 kWh
Energi leveret fra elstav til lager (maj-sep)	160 kWh
Energi leveret fra spiral til lager (okt-apr)	850 kWh
Varmetab fra lager	140 kWh
Energi tappet fra lager	2460 kWh
Soldækningsgrad (på årsbasis)	59 %
Soldækningsgrad (maj-sep)	84 %
Soldækningsgrad (okt-apr)	41 %
Anlæggets solydelse (på årsbasis)	340 kWh/m ²

I de følgende afsnit beskrives og kommenteres resultaterne af de udførte parameteranalyser. I hver parameteranalyse er referenceåret benyttet som inddata. I det omfang det har været muligt er en parameter ændret ad gangen i de enkelte analyser. For hver analyse er variationerne af to væsentlige beregnede størrelser vist grafisk. Den ene størrelse er den energimængde der tilføres lageret fra elstaven (i månederne maj-sep). Den anden størrelse udgør den tilsvarende energimængde der via spiralen tilføres fra et fyr (i månederne okt-apr).

6.1 Variation af flowet i solfangerkredsen

I den første analyse har det været naturligt at variere flowet i solfangerkredsen, - og herved se om modellen kunne pege på et optimalt flow. Analysen omfatter 13 årssimuleringer hvori flowet er varieret fra 0,025 til 1,5 l/min m². Resultaterne er vist på figur 9, hvor hver årssimulering er markeret med en prik. Simuleringen af referenceanlægget er markeret med en cirkel.

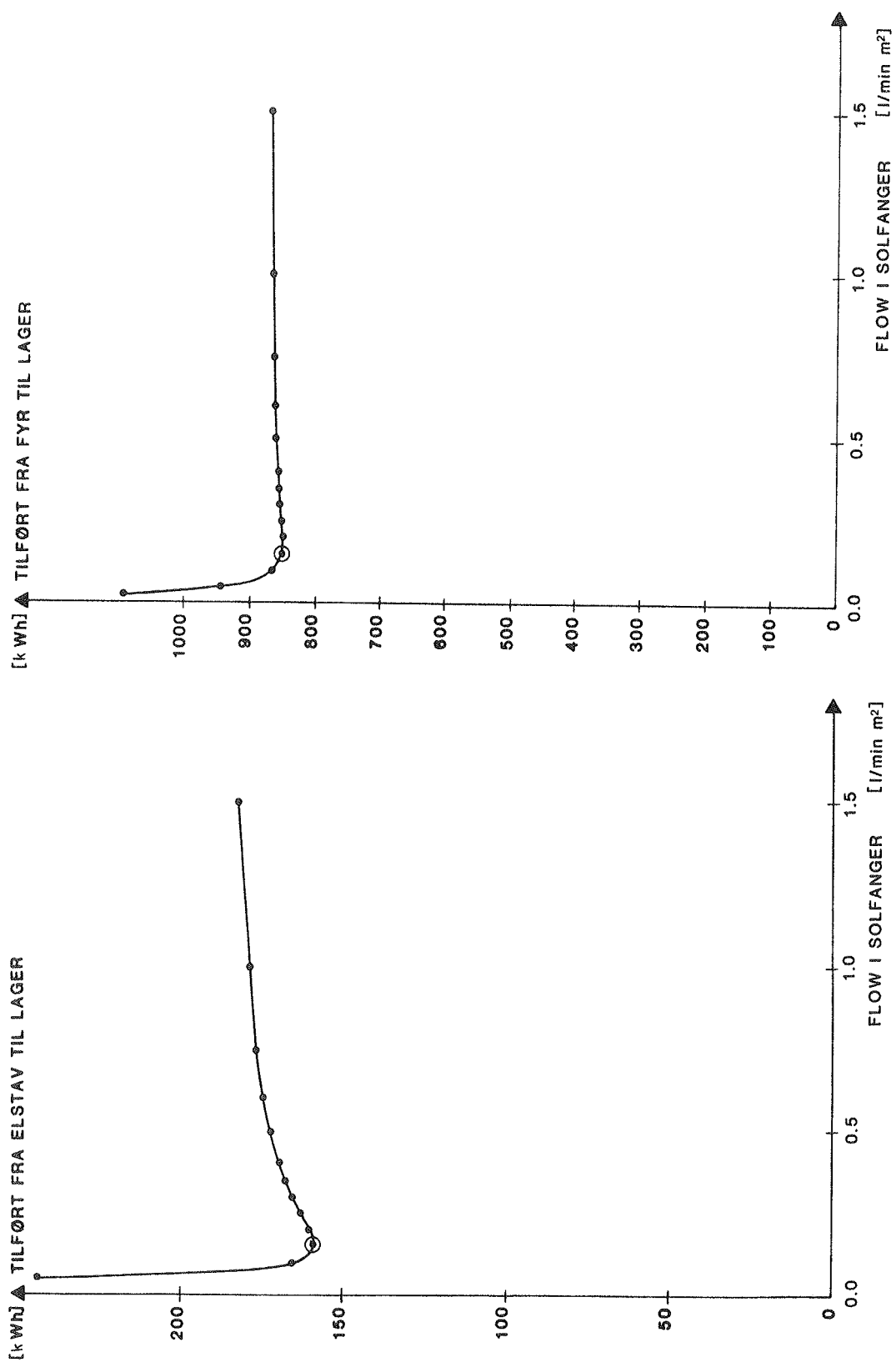
Som det fremgår af figuren er et optimalt flow beregnet til ca. 0,15 l/min m². Det skal bemærkes at resultaterne for de største flow formodes at være usikre, idet de konvektive forhold i kappen vil være væsentlig forskellige fra de forhold hvorunder de konvektive varmeovergangstal der anvendes i modellen er fastlagt. Dette gælder især i de driftssituationer hvor temperaturen i kappen er lavere end temperaturen i beholderen. For et større flow må en større opblanding i den øverste del af kappen formodes at finde sted, - med en større og u hensigtsmæssig afkøling af brugsvandet til følge. Derfor vurderes stigningen af de to kurver for voksende flow at være for lille.

Størrelsen af det optimale flow stemmer fint overens med det der er fundet i eksperimentelle undersøgelser beskrevet i [11]. Her er et optimalt flow bestemt til at ligge i intervallet mellem 0,1 og 0,2 l/min m². I et teoretisk arbejde [6], der omfatter solvarmeanlæg med en lidt anden udformning, er et optimalt flow beregnet til 0,12 l/min m². Der er således god grund til at tro at størrelsen af det optimale flow der er beregnet i dette arbejde er korrekt.

Eksistensen af et optimalt flow skal ses som et resultat af to forskellige forhold: For et faldende flow - alt andet lige, vil en større og hensigtsmæssig temperaturlagdeling i lageret kunne opbygges og udnyttes. For et faldende flow vil solfangeren som følge af en stigende absorbertemperatur yde mindre. Disse to forhold bevirker at et optimalt flow eksisterer.

Som det fremgår af figuren stiger de nødvendige energimængder der tilføres lageret både fra elstav og fra fyr drastisk ved flow mindre end det optimale. Da det endvidere i praksis er meget bekosteligt at opnå et præcist og konstant flow på 0,15 l/min m² ved dimensionering af solvarmeanlæg, bør snarere et større flow på ca. 0,2 l/min m² tilstræbes.

Det skal bemærkes at det er et tilfælde at det valgte flow for referenceanlægget er lig med det fundne optimale flow.



Figur 9. Energi tilført lageret gennem elstav og fra fyr (spiral) ved forskellige flow i solfangerkredsen. Hver årssimulering og simuleringer af referenceanlægget er markeret med henholdsvis en sort prik og en cirkel. Det beregnede optimale flow udgør 0,15 $l/min m^2$.

6.2 Variation af kappens højde

I den anden simuleringsserie er kappens højde varieret ved at ændre positionen af kappens top i forhold til beholderens top. Således er afstanden mellem kappens og beholderens top varieret fra 0,2 til 0,71 m. Herved varierer kappens højde fra 0,91 til 0,41 m. De beregnede resultater ses på figur 10. På figuren er placeringen af elstaven og spiralens underkant endvidere markeret.

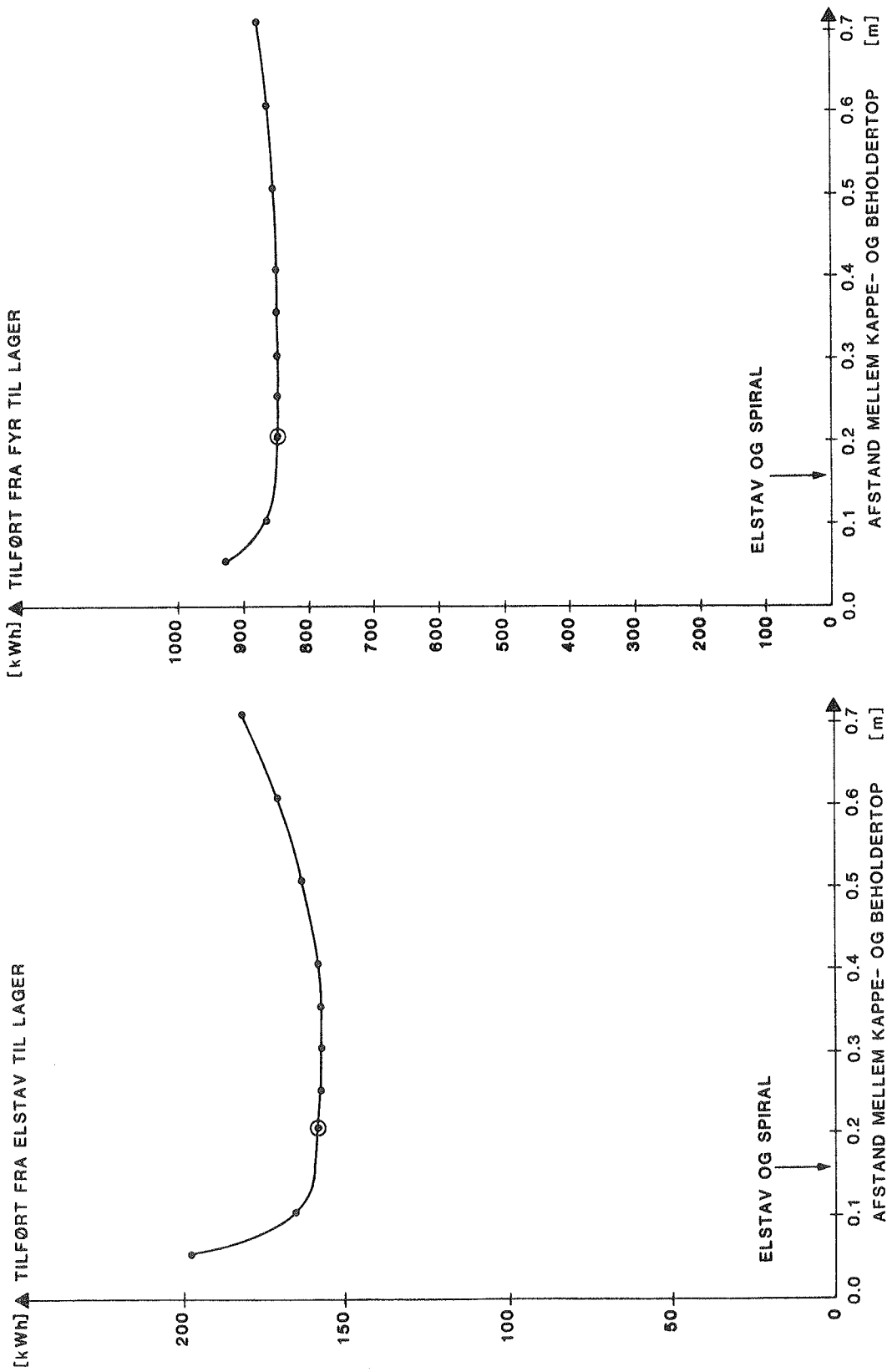
Som det fremgår af figuren er de tilførte energimængder stort set konstante i et vist interval. Uden for dette interval stiger de tilførte energimængder voldsomt ved små værdier for afstanden mellem kappens og beholderens top. Denne voldsomme stigning skyldes at elstaven og spiralen underkant er placeret under kappens top i de pågældende simuleringer. Herved opstår driftssituationer hvor solfangervæskens i kappens øverste del opvarmes af elstaven og spiralen og føres mod kappens bund hvor varmen afgives igen. Resultatet er at et større vandvolumen end det der ligger over elstaven og spiralens underkant tilføres energi fra elstaven og spiralen.

Stigningen i de tilførte energimængder for store afstande mellem kappens og beholderens top skyldes først og fremmest at det varmeoverførende areal mellem kappe og beholder bliver reduceret. Endvidere skønnes den mindre temperaturlagdeling der opbygges i den øverste del af beholderen ved store afstande mellem kappens og beholderens top også at have en vis effekt.

Det skal understreges at de beregnede resultater hørende til de yderste punkter i den aktuelle parametervariation er noget usikre. Dette skyldes som i den forrige analyse en væsentlig afvigelse fra de forhold hvorunder de konvektive varmeovergangstal der anvendes i modellen er fastlagt. Tendenserne i de beregnede resultater vurderes dog at være korrekte.

Med hensyn til dimensionering af kappebeholdere som komponent i solvarmeanlæg viser analysen at det er vigtigt at elstaven og spiralens underkant er placeret over kappens top. Herudover er placeringen af kappens top i forhold til beholderens top uden større betydning, - inden for et vist interval. Det skal bemærkes at dette forhold formodentlig kun gælder for mindre beholdere. For større beholdere, hvor forholdet mellem det varmeoverførende areal og volumenet er mindre, kan det være væsentligt at det varmeoverførende areal er så stort som muligt.

Flere markedsførte kappebeholdere har en kappe der næsten strækker sig fra beholderens top til beholderens bund. Ønskes en sådan beholder anvendt i et solvarmeanlæg, kan elstaven og spiralen ikke anbringes over kappens overkant. Beholderen kan dog formodentlig udmærket anvendes hvis kappen forsynes med et indløb i et niveau under elstaven og spiralens underkant. En sådan løsning kan som følge af de interne konvektionsstrømme i kappen under tilførsel af energi fra solfangeren meget vel være bedre end den her undersøgte beholder udformning. Montering af elstaven kompliceres dog ved denne løsning.



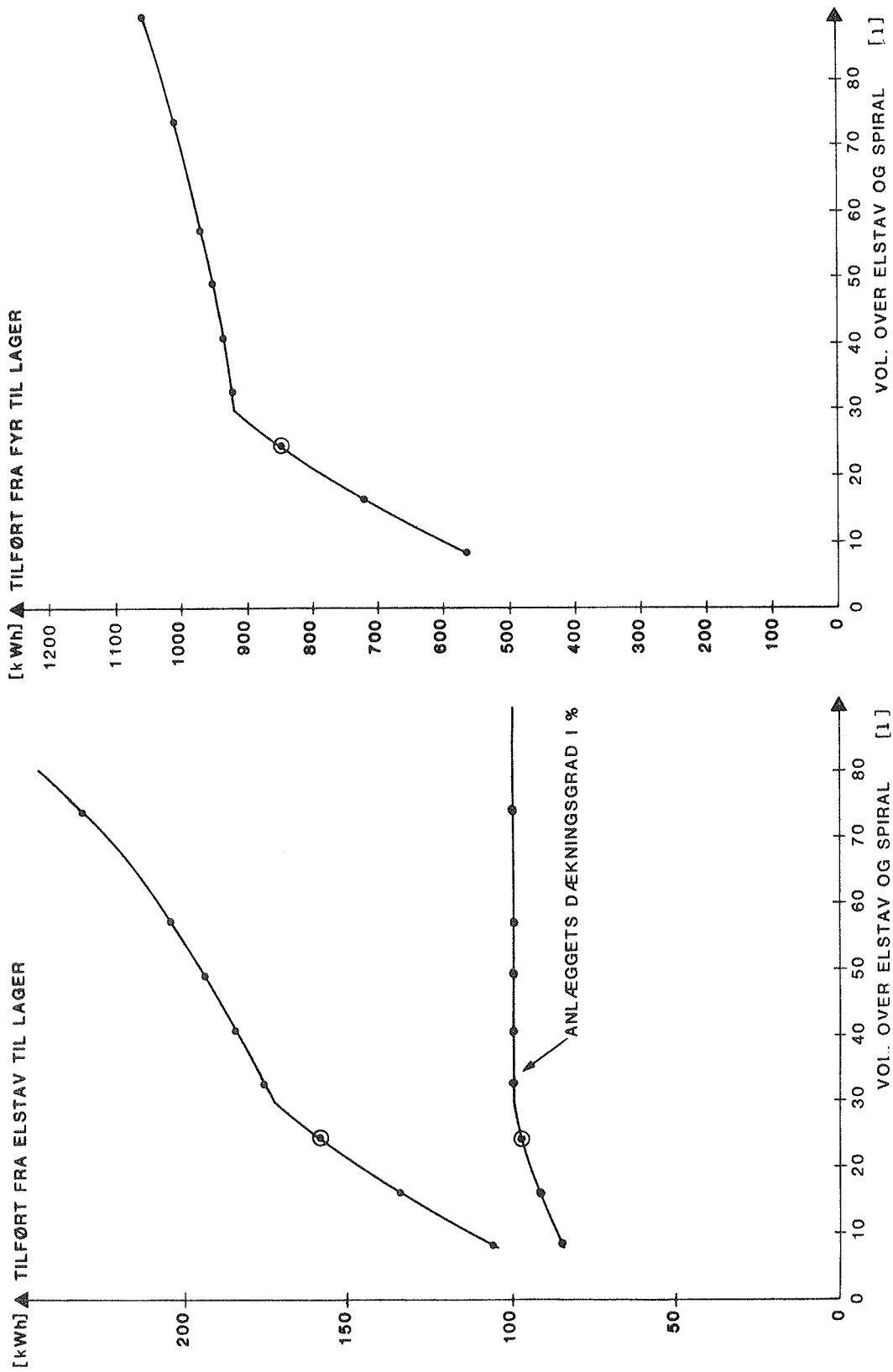
Figur 10. Energi tilført lageret gennem elstav og fra fyr (spiral) ved forskellige størrelser af kappens højde. Kappens højde er varieret ved at ændre positionen af kappens top i forhold til beholderens top.

6.3 Variation af elstavens og spiralens placering

I den tredje simuleringsserie er det vandvolumen der opvarmes af elstaven og spiralen varieret. Variationen er udført ved at ændre på elstavens og spiralens placering. På grundlag af resultaterne af den forrige simuleringsserie beskrevet i afsnit 6.2 er positionen af kappens top ændret i takt med elstaven og spiralens placering. Herved er en afstand fra elstaven og spiralens underkant til kappens top fastholdt på ca. 5 cm. Resultaterne af simuleringsserien er vist på figur 11. I de tilfælde hvor volumenet over elstaven og spiralens underkant er mindre end de enkelte tapninger fra lageret (5 tapninger à 30 l i døgnet) kan det samlede anlæg (inkl. back-up) ikke altid dække det aktuelle behov 100%. Derfor er også anlæggets samlede dækningsgrad på årsbasis vist på figuren.

Referenceanlæggets dækningsgrad er som det ses på figuren en anelse under 100%. Dette skyldes at volumenet over elstaven og spiralens underkant kun udgør ca. 25 l. Herved vil tappe-temperaturen i nogle tilfælde være mindre end de ønskede 50°C hen imod slutningen af tapningen.

Som det fremgår af figuren har størrelsen af det vandvolumen der opvarmes af elstaven og spiralen stor betydning for de energimængder der tilføres som back-up. Ved dimensionering af kappebeholdere som komponent i solvarmeanlæg bør elstaven og spiralen derfor anbringes så højt i beholderen som det af hensyn til forbrugeren kan forsvares.



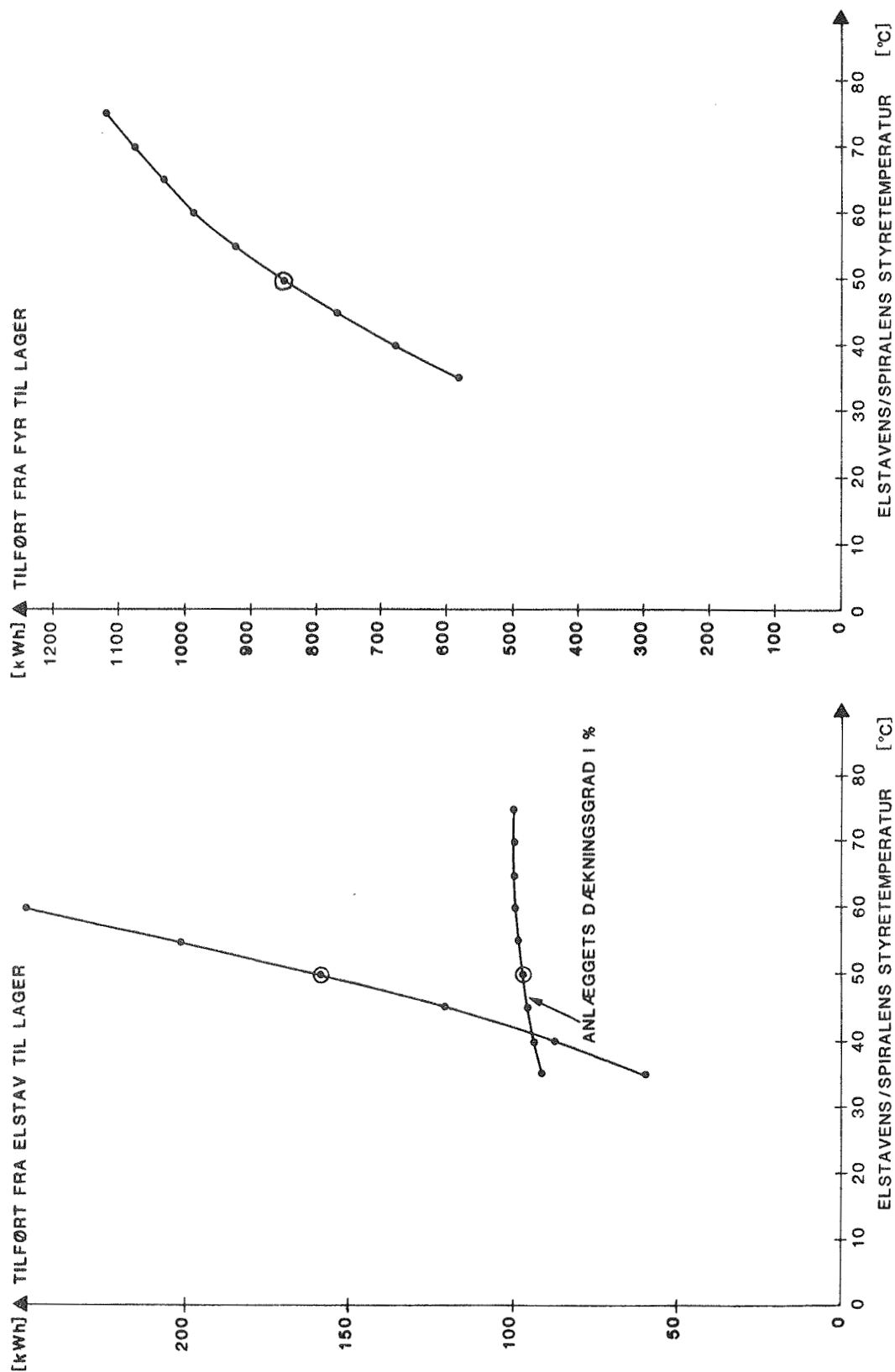
Figur 11. Energi tilført lageret gennem elstav og fra fyr (spiral) ved forskel-
lige volumener over elstaven og spiralens underkant. Endvidere ses
anlæggets samlede dækningsgrad på årsbasis (inkl. back-up).

6.4 Variation af temperaturniveauet i det vandvolumen der opvarmes af elstaven og spiralen

I den fjerde simuleringsserie er den styretemperatur, hvorefter energitilførslen fra elstaven og spiralen både startes og stoppes, varieret. Styretemperaturen udgør således en ønsket nedre grænse for temperaturen i brugsvandsvolumenet over elstaven og spiralens underkant. Kun i korte perioder og umiddelbart efter tapninger fra beholderen kan temperaturer der er væsentlig lavere end styretemperaturen forekomme i dette brugsvandsvolumen. Resultaterne af simuleringsserien er vist på figur 12. På figuren ses også anlæggets samlede dækningsgrad på årsbasis.

To forskellige forhold bevirker at dækningsgraden ikke er 100% i alle 9 parametervariationer. I de tilfælde hvor den varierede styretemperatur er lavere end den ønskede tappetemperatur (50°C) kan anlægget aldrig dække behovet 100%. Herudover har størrelsen af brugsvandsvolumenet, der opvarmes af elstaven og spiralen, også en vis betydning. Som nævnt i forrige afsnit er dette volumen (ca. 25 l) lidt mindre end de enkelte tapninger fra lageret (5 tapninger à 30 l i døgnet). Derfor opnås først en dækningsgrad på 100% når styretemperaturen er større end ca. 60°C og hermed resulterer i en opblanding med koldt brugsvand under tapninger fra lageret.

Som det fremgår af figuren har den varierede styretemperatur overordentlig stor betydning for de energimængder der tilføres lageret som back-up. Derfor bør den aktuelle styretemperatur for energitilførslen igennem elstaven og spiralen vælges så lavt som det af hensyn til forbrugeren kan forsvares.

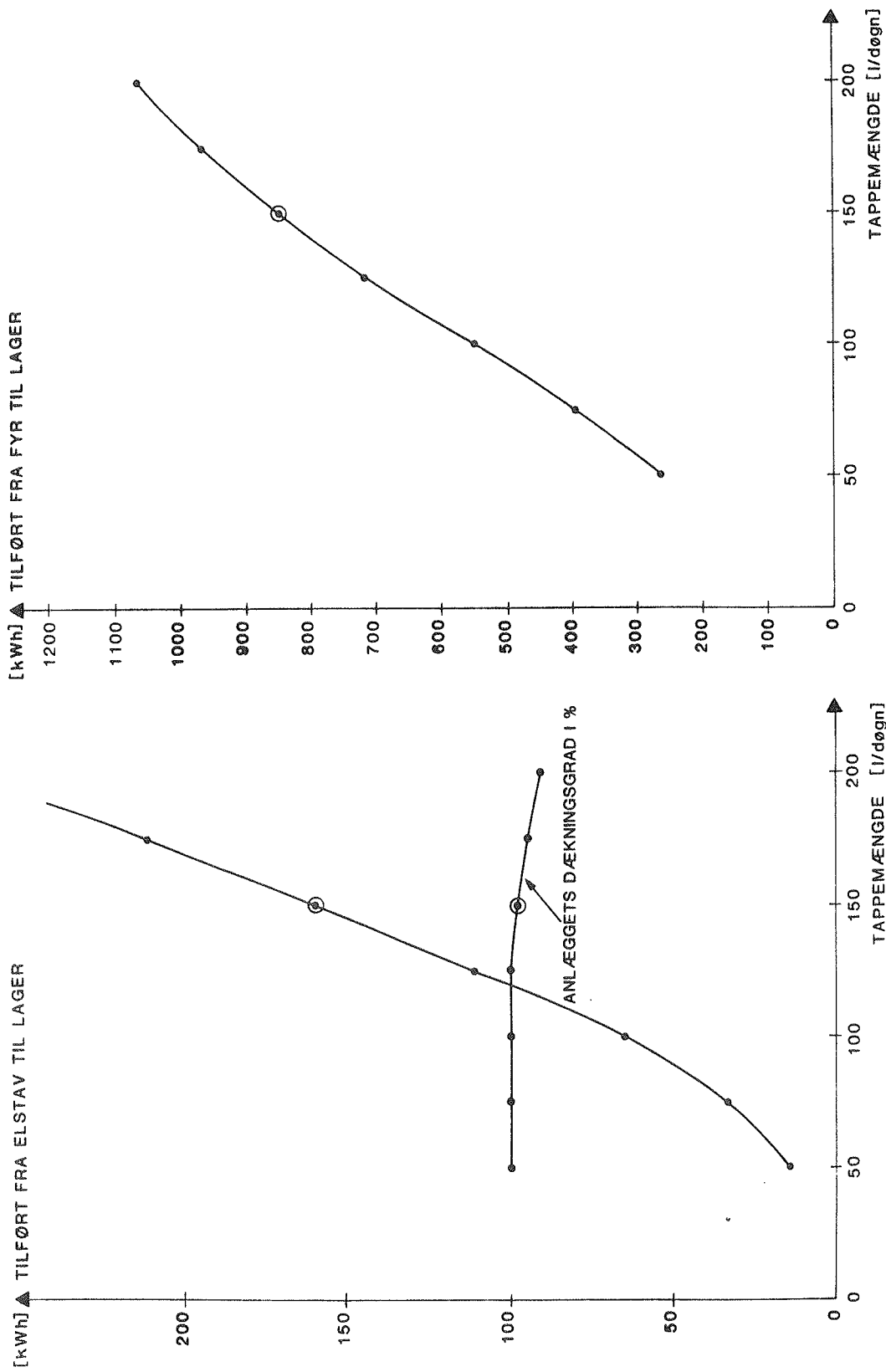


Figur 12. Energi tilført lageret gennem elstav og fra fyr (spiral) ved forskellige værdier for den styretemperatur hvorefter energitilførslen i elstaven og spiralen startes og stoppes. Endvidere ses anlæggets samlede dækningsgrad på årsbasis (inkl. back-up).

6.5 Variation af varmtvandsforbruget

I den femte simuleringsserie er størrelsen af varmtvandsforbruget varieret. Variationen er udført ved at ændre størrelsen af de 5 lige store tapninger der udføres pr. døgn. Resultaterne af simuleringsserien ses på figur 13. På figuren ses også anlæggets samlede dækningsgrad på årsbasis. I de tilfælde hvor de enkelte tapninger er større end det brugsvandsvolumen (ca. 25 l) der opvarmes af elstaven og spiralen, kan anlægget ikke dække forbruget 100%.

Om resultaterne er kun at sige at de energimængder der tilføres som back-up vokser som forventet med tapningens størrelse.

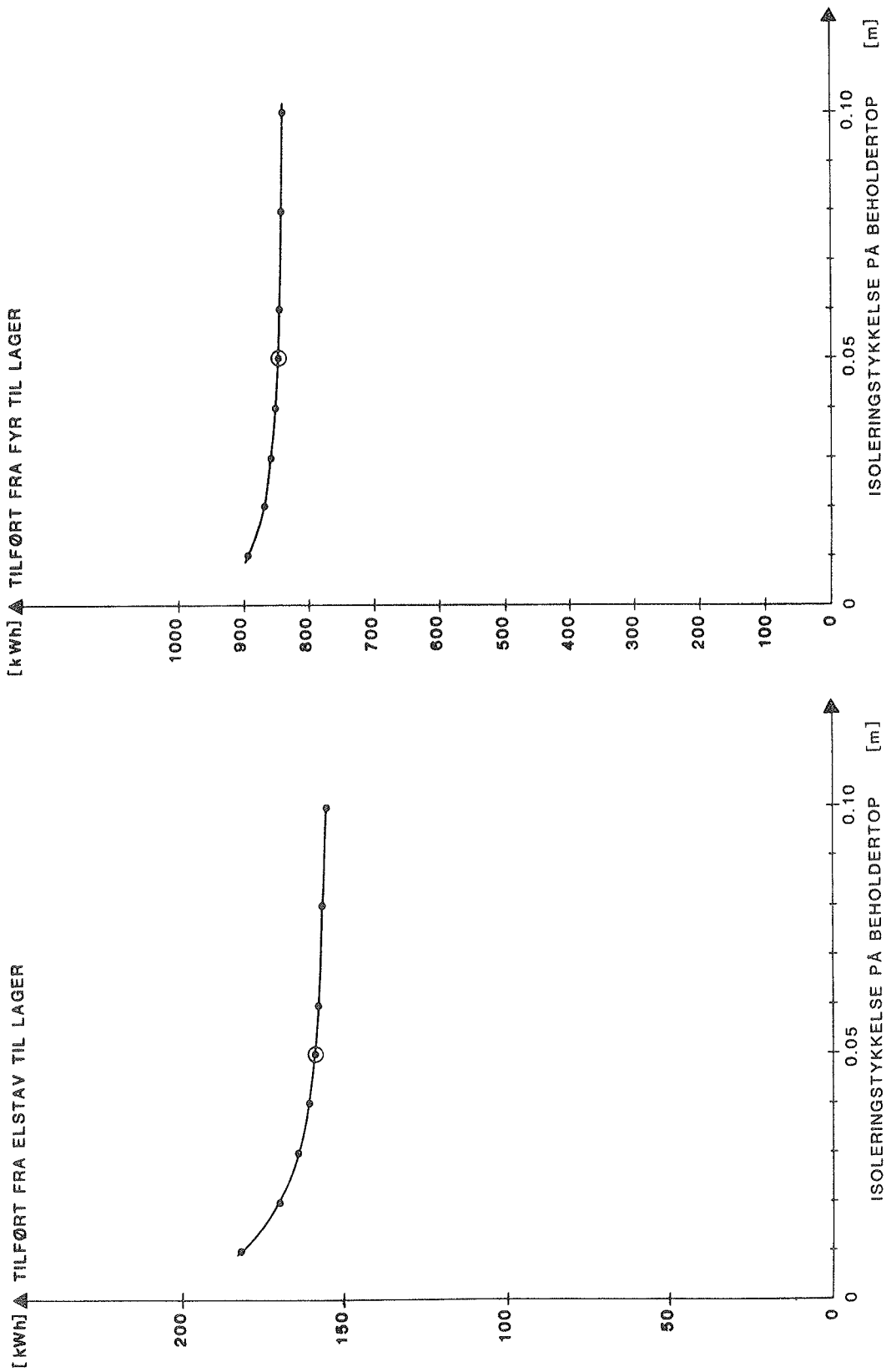


Figur 13. Energi tilført lageret gennem elstav og fra fyr (spiral) ved forskellige størrelser af de tapninger der udføres fra lageret pr. døgn. Endvidere ses anlæggets samlede dækningsgrad på årsbasis (inkl. back-up).

6.6 Variation af isoleringstykkelsen på kappebeholderens top

I den sjette simuleringsserie er tykkelsen af mineraluldsisoleringen på kappebeholderens top varieret. Resultaterne af simuleringsserien ses på figur 14.

Som det fremgår af figuren er effekten af en merisolering for isoleringstykkelser større end 4-5 cm meget begrænset. Dette resultat svarer ganske nøje til dem der er beskrevet i fx [15] af lignende analyser af mere traditionelle solvarmelagre (spiralbeholdere). De højere temperaturer der i perioder vil forekomme i den øverste del af kappebeholderen i et low-flow anlæg, sammenlignet med et traditionelt solvarmelager, giver således ikke umiddelbart grund til at anvende større isoleringstykkelser.



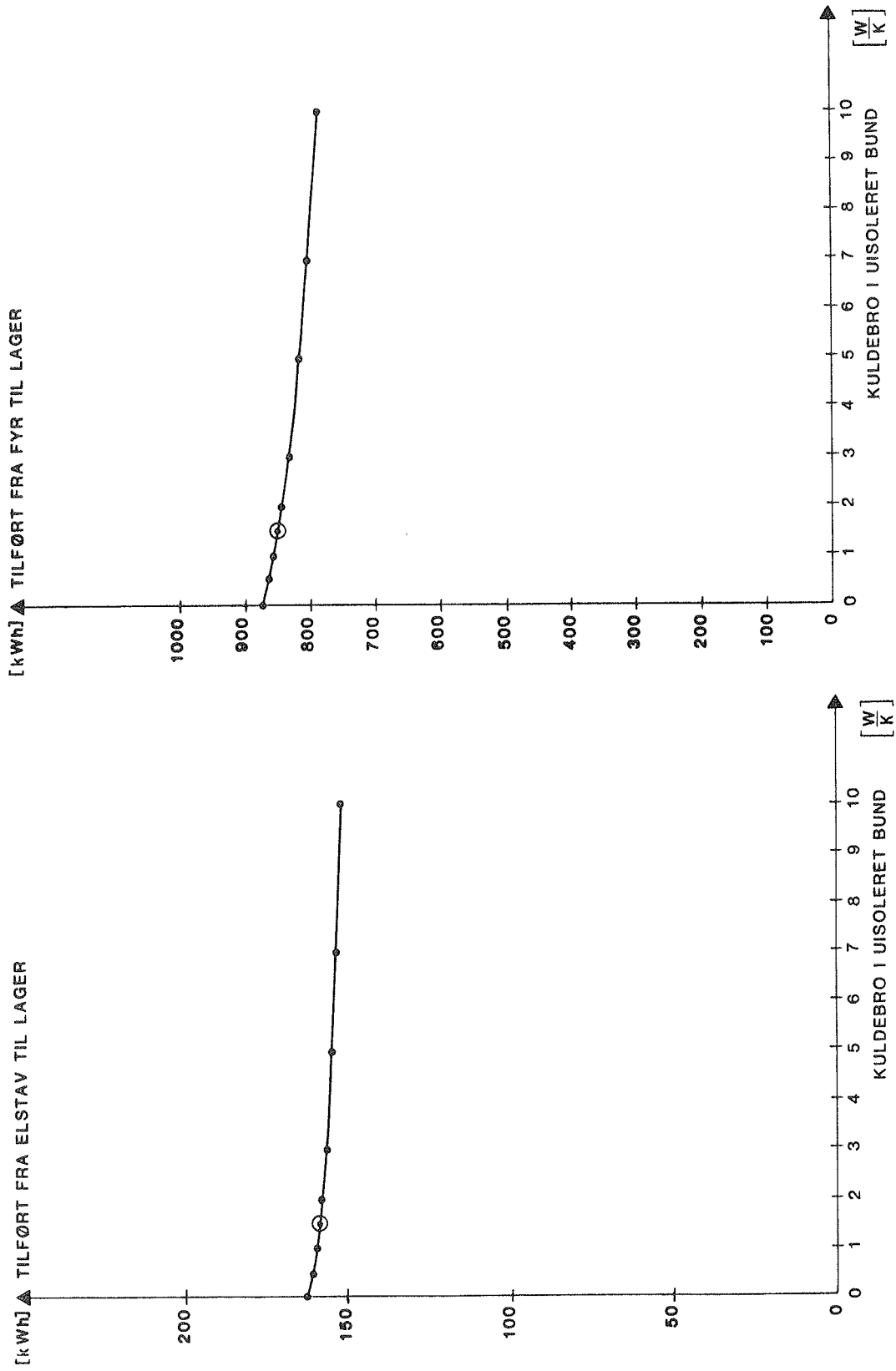
Figur 14. Energi tilført lageret gennem elstav og fra fyr (spiral) ved forskellige tykkelser af mineraluldsisolering på kappeholderens top.

6.7 Variation af kuldebro i bunden af kappebeholderen

I den syvende simuleringsserie er størrelsen af en kuldebro i den uisolerede bund af kappebeholderen varieret. Resultaterne af simuleringsserien ses på figur 15.

Som det fremgår af figuren tilføres mindre energi fra både elstaven og spiralen jo større kuldebroen er. Dette forhold skyldes at middeltemperaturen (både sommer og vinter) i det nederste brugsvandsvolumen i beholderen er lavere end omgivelsernes temperatur (20°C). Af samme grund vil en isolering af kappebeholderens bund aldrig være lønsom.

Analysen indikerer endvidere at alle rørgennemføringer i beholderen bør ske gennem beholderens bund, - hvor dette uden væsentlige komplikationer er muligt.



Figur 15. Energi tilført lageret gennem elstav og fra fyr (spiral) ved forskel-
lige størrelser af en kuldebros i beholderens bund.

6.8 Variation af solfangerfeltets størrelse

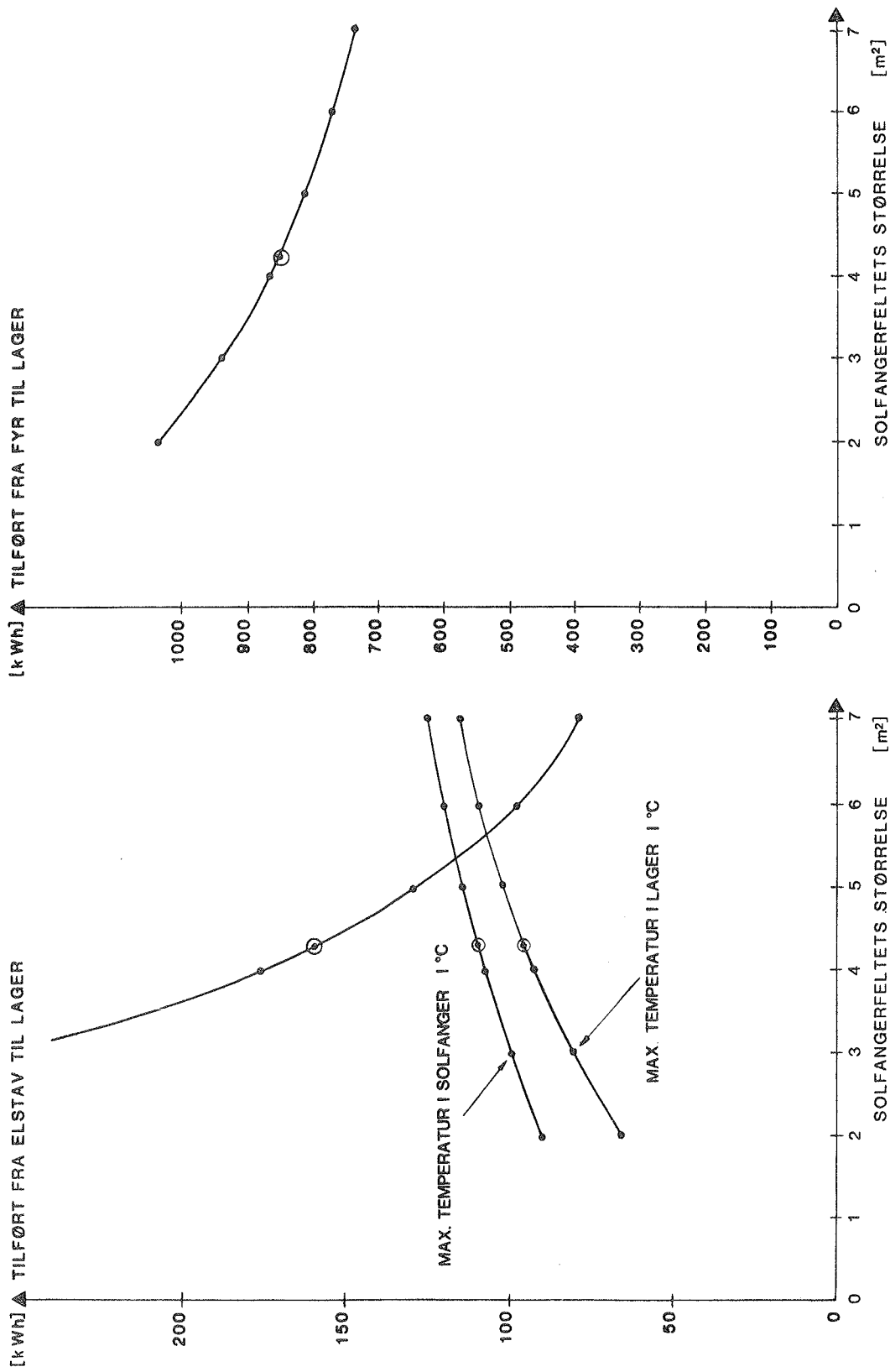
I den ottende simuleringsserie er størrelsen af solfangerfeltet varieret. Resultaterne af simuleringsserien ses på figur 16. Solfangerfeltets størrelse har stor indflydelse på de maksimale temperaturer der opnås i solfangeren og i lageret. Da der endvidere er en øvre grænse for hvor høje temperaturer der kan tillades i både solfangeren og i lageret, er beregnede værdier for disse maksimale temperaturer også vist på figuren.

Om de energimængder der tilføres lageret gennem elstaven og fra fyret er blot at sige at de falder kraftigt som forventet med et voksende solfangerareal.

De højeste temperaturer i solfangeren og i lageret, der er beregnet ved de største solfangerarealer, er uacceptabelt store. I solfangerkredsen er flere forskellige forhold bestemmende for hvor høje temperaturer der kan accepteres. Der må således altid tages hensyn til de maksimale temperaturer (og tryk) der kan tillades i de anlægskomponenter der indgår i solfangerkredsen (solfanger inkl. væske, rørføring, pumpe, trykexpansion, overtryksventil mm.). Er solfangerkredsen trykløs, må og kan selvsagt temperaturer højere end godt 100°C (solfangervæskens kogepunkt ved 1 atm) ikke forekomme. Kan et overtryk i solfangerkredsen tillades, fremkommer umiddelbart en anden øvre grænse, idet solfangervæsken (vand-glykolblanding) nedbrydes under dannelse af sure forbindelser ved temperaturer større end 115-120°C. De sure forbindelser vil afstedkomme en korrosion i solfangerkredsen og en efterfølgende udfældning af korrosionsprodukter. Det er uvist om korrosionen eller korrosionsprodukterne på længere sigt vil beskadige solfangerkredsen eller dens komponenter.

I lageret er ligeledes flere forhold afgørende for hvilke temperaturer der kan tillades. Således tåler nogle af de typer overfladebehandlinger der anvendes på de indvendige sider af beholderen ikke temperaturer højere end 90°C. I beholdere hvor overfladebehandlingen ikke stiller sådanne krav kan temperaturer over 100°C pga. det overtryk (vandværks-tryk) der er i beholderen, umiddelbart accepteres. Af hensyn til risikoen for et voldsomt dampudslip fra beholderen (og fra tappesteder) ved en defekt i installationen bør en øvre grænse for temperaturen i beholderen nok være 100°C.

De maksimale temperaturer i solfangeren og i lageret der er vist på figuren er bestemt under forudsætning af at der tappes 150 l brugsvand (ved 50°C) i døgnet. En stor variation i forbrugsmønsteret på døgnbasis må dog forventes, og højere temperaturer i solfangeren og i lageret kan derfor meget let forekomme. I en enkelt supplerende simulering (af reference-anlægget), hvor der ikke er tappet brugsvand fra lageret i de mest solrige sommerdage, er de maksimale temperaturer i solfangeren og i lageret således bestemt til henholdsvis 123 og 111°C.



Figur 16. Energi tilført lageret gennem elstav og fra fyr (spiral) ved forskellige solfangerarealer. Endvidere ses de maksimale temperaturer der opnås i solfangeren og i lageret.

En god og billig mulighed for at nedbringe de høje temperaturer i solfangeren og i lageret kunne være at undlade en isolering af (eller dele af) det indvendige fremløbsrør til solfangeren. Denne mulighed er undersøgt i en supplerende simuleringsserie.

Resultaterne viser dog at selv om hele fremløbsrøret (4 m) er uisolaret, er dette tiltag langt fra tilstrækkeligt. Således opnås kun en reduktion på godt 2% af de maksimale temperaturer i både solfangeren og i lageret.

Flere andre muligheder der kan nedbringe de høje temperaturer i solfangeren og i lageret eksisterer. Disse muligheder skal kort nævnes her:

- Anvendelse af solfangere med en lavere effektivitet ved høje temperaturer.
- Anbringelse af en større uisolaret trykekspressionsbeholder på fremløbet til solfangeren.
- Ingen eller kun ringe isolering af den nederste del af lageret.
- Dimensionering af solfangerkedsen så den væsentligste strømningsmodstand er knyttet til rørføringerne og så strømmingen i rørføringerne er laminar. Herved vil flowet (pga. viskositetsændring) automatisk øges med voksende temperatur i solfangerkedsen. En forøgelse af flowet på op til en faktor 3 er mulig.
- Forøgelse af flowet i solfangerkedsen ved høje temperaturer gennem en direkte regulering af pumpen eller ved anvendelse af en temperaturstyret ventil. Benyttes en ventil, bør denne åbne på et relativt tidligt tidspunkt (fx når temperaturen i lagerets top bliver 5°C større end den temperatur hvorved elstaven aktiveres). Herved kan solvarmeanlæggets ydelse desuden måske forøges.

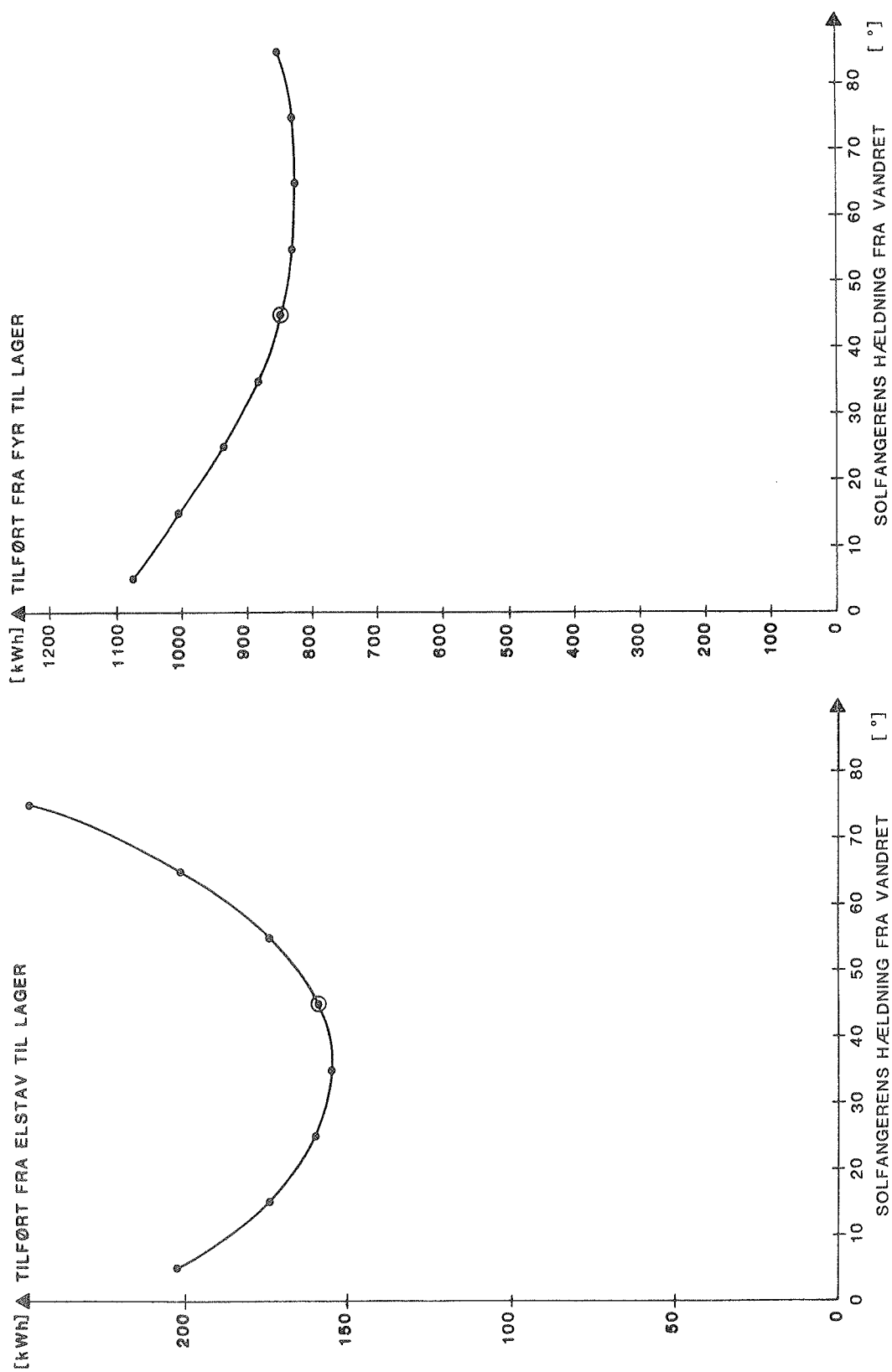
Ud over disse muligheder kan solfangerfeltets størrelse naturligvis altid reduceres. Herved vil solvarmeanlæggets ydelse dog samtidig faldes. En farbar vej at nedbringe de høje temperaturer i solfangeren og i lageret til et acceptabelt niveau er muligvis at anvende flere af de ovenfor nævnte tiltag i et i øvrigt fornuftigt udformet anlæg. Med andre ord kan et acceptabelt temperaturniveau i solfangeren og i lageret måske sikres hvis problemet i større grad indgår i dimensioneringen af anlægget. Er dette ikke muligt, synes kun en udformning af solfangerkedsen som et tømmesystem at være en effektiv løsning af problemet.

Det skal understreges at uacceptabelt høje temperaturer i solfangerkedsen og i lageret ofte også er et problem ved andre typer solvarmeanlæg.

6.9 Variation af solfangerfeltets hældning

I den niende simuleringsserie er solfangerfeltets hældning fra vandret varieret. Resultaterne af simuleringsserien ses på figur 17.

Som forventet er den optimale hældning mht. den energimængde der tilføres i de 5 sommermåneder (fra elstav) mindre end den tilsvarende optimale hældning for de 7 vintermåneder. De to optimale hældninger er fundet til henholdsvis 35° og 65° . På årsbasis udgør en hældning på $40-50^\circ$ en udmærket værdi.

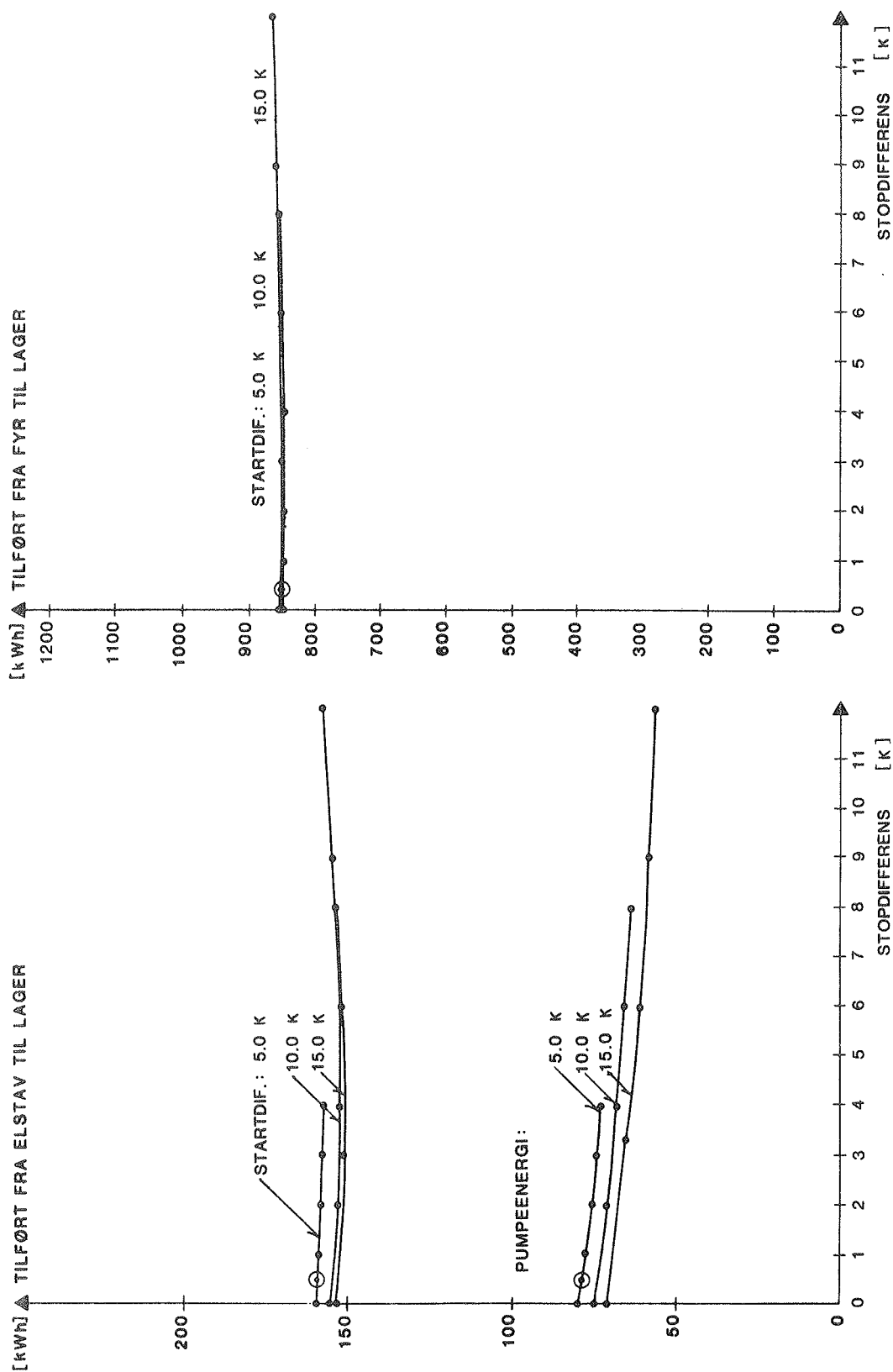


Figur 17. Energi tilført lageret gennem elstav og fra fyr (spiral) ved forskellige solfangerhældninger fra vandret.

6.10 Variation af start- og stopdifferenserne i solfangerkredsens differenstermostatstyring

I den ottende simuleringsserie er start- og stopdifferenserne i solfangerkredsens differenstermostatstyring varieret. Resultaterne af simuleringsserien ses på figur 18. Start- og stopdifferenserne har stor indflydelse på pumpens driftsbetingelser. Derfor er også pumpens energiforbrug på årsbasis vist. Det skal erindres at styringens to temperaturfølere er anbragt henholdsvis øverst på solfangerens absorberplade og nederst i beholderkappen ved dennes udløb.

Som det ses på figuren har start- og stopdifferenserne ikke den store betydning for størrelsen af de energimængder der tilføres lageret som back-up. De mindste værdier for disse energimængder opnås dog ved en startdifferens på 10-15 K og en stopdifferens på ca. 5 K. Tages pumpens energiforbrug i betragtning, vurderes en startdifferens på ca. 15 K og en stopdifferens på godt 5 K at være et fornuftigt valg. Det skal her bemærkes at disse værdier er væsentlig forskellige fra dem der normalt tilstræbes i et traditionelt solvarmeanlæg (spiralbeholderanlæg). Ligeledes er et traditionelt solvarmeanlæg langt mere følsomt over for især den anvendte stopdifferens end det her undersøgte low-flow anlæg. Disse forhold vurderes især at skyldes de meget højere temperaturdifferenser mellem ind- og udløb af solfangeren som et low-flow anlæg opererer med.



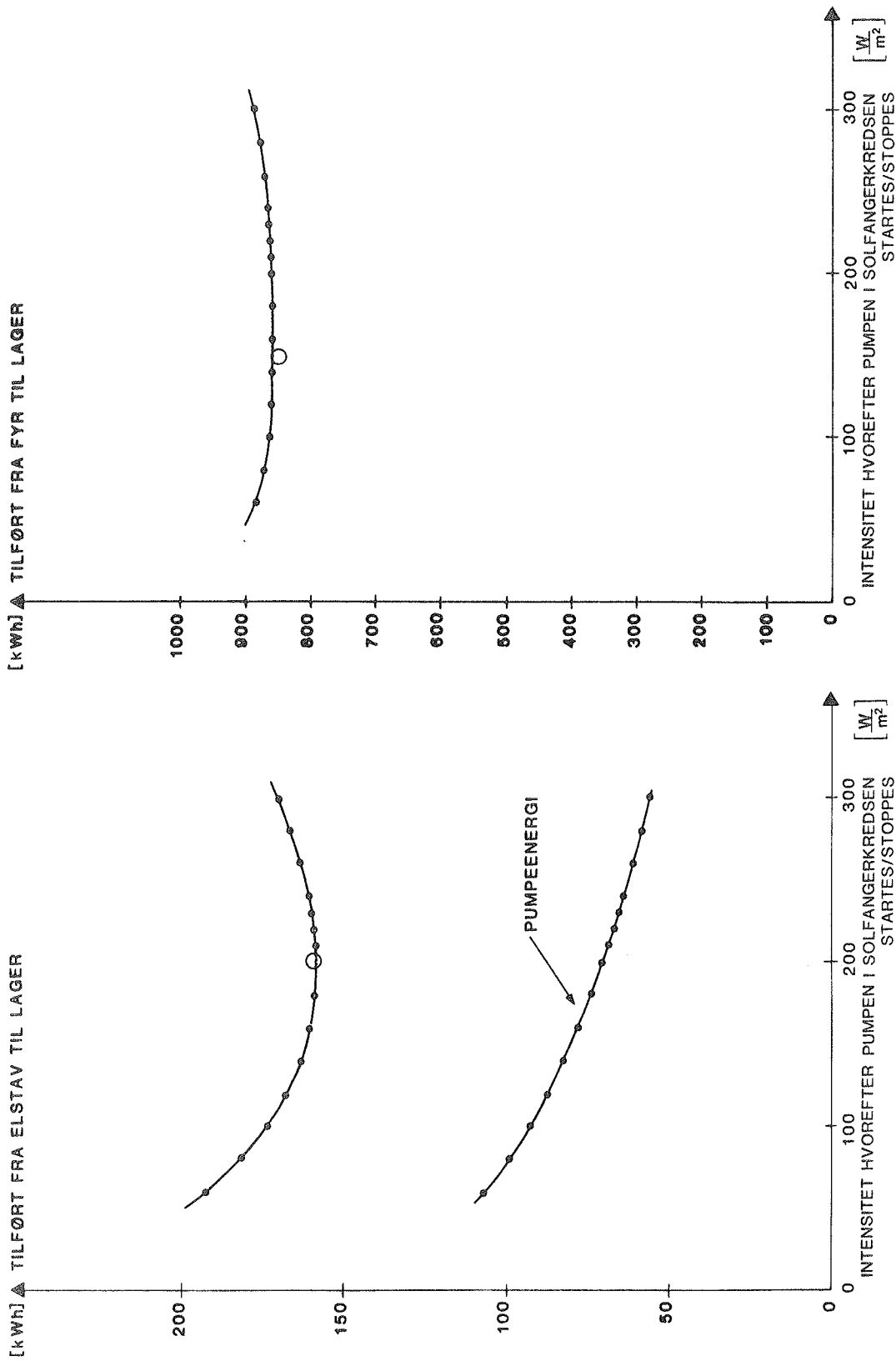
Figur 18. Energi tilført lageret gennem elstav og fra fyr (spiral) ved forskellige start- og stopdifferenser for solfangerkredsens differenstermostatstyring. Endvidere ses pumpens årlige energiforbrug.

6.11 Undersøgelse af en solintensitetsstyring af pumpen i solfangerkredsen

I den ellefte simuleringsserie er egnetheden af en solintensitetsstyring af pumpen i solfangerkredsen undersøgt. I simuleringsserien er størrelsen af den solintensitet, som udgør grænsen for om pumpen er i drift eller ikke, varieret. Resultaterne af simuleringsserien ses på figur 19. På figuren er også resultaterne for referenceanlægget markeret. Det skal erindres at referenceanlægget indeholder en differenstermostatstyring af pumpen i solfangerkredsen.

Som det fremgår af figuren svarer resultaterne for referenceanlægget stort set til de bedst opnåelige med en solintensitetsstyring. Jævnfør den forrige analyse er start- og stopdifferenserne (5 og 0,5 K) for referenceanlægget dog ikke optimale. Den reduktion af de tilførte energimængder i form af back-up der kan opnås med differenstermostatstyringen ved optimale start- og stopdifferenser er dog beskeden. Hertil kommer at solintensitetsstyringen kan fremstilles billigere. Derfor vurderes solintensitetsstyringen at være et udmærket alternativ til differenstermostatstyring. Det skal dog bemærkes at solintensitetsstyringen sammenlignet med differenstermostatstyringen kan medføre meget uheldige driftsmæssige forhold hvis dele af solfangerfeltet afskygges af omgivelserne medens solintensitetsføleren bestråles af solen. Under sådanne forhold er det meget sandsynligt at solfangerfeltet tilføres energi fra kappebeholderen. Tilsvarende kan der forekomme kogning i solfangeren hvis dele af denne bestråles af solen medens solintensitetsføleren samtidig afskygges.

Ses der bort fra pumpens energiforbrug, fremgår det af figuren at en start- og stopintensitet for pumpen i solfangerkredsen på ca. 200 W/m² udgør en optimal værdi. Tages pumpens energiforbrug i betragtning, bør snarere en lidt større værdi på omkring 250 W/m² vælges.



Figur 19. Energi tilført lageret gennem elstav og fra fyr (spiral) ved forskellige solintensiteter for start og stop af pumpen i solfangerkredsen ved en solintensitetsstyring. Endvidere er resultaterne for referencelanlægget, der er baseret på en differenstermostatsstyring, også markeret.

6.12 Undersøgelse af en pilotsolfangerstyring af pumpen i solfangerkredsen

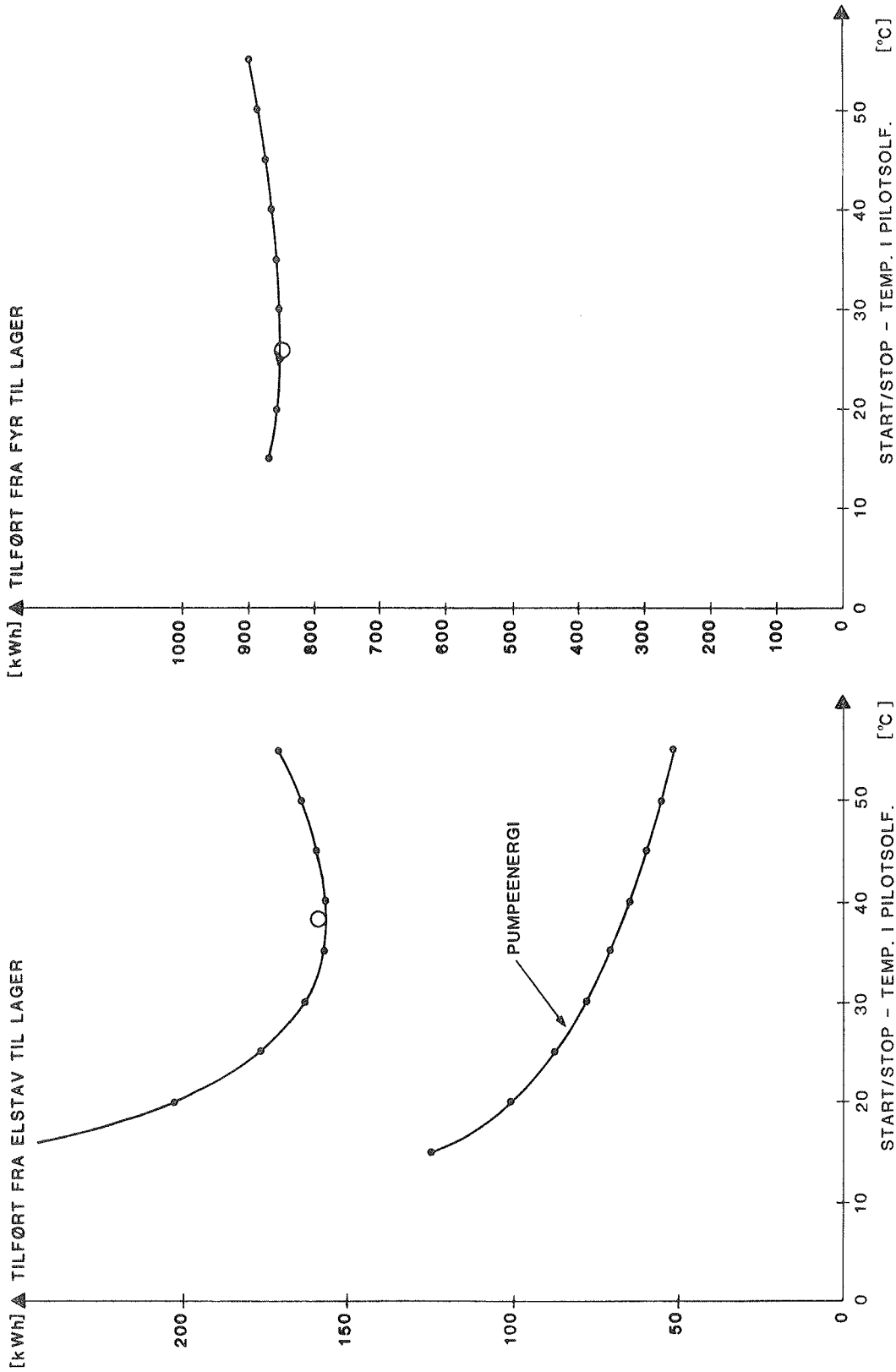
I den tolvte simuleringsserie er egnetheden af en pilotsolfangerstyring af pumpen i solfangerkredsen undersøgt. I simuleringsserien er størrelsen af den temperatur som i styringen sammenholdes med temperaturen i pilotsolfangeren og som udgør grænsen for om pumpen er i drift, eller ikke, varieret. Resultaterne af simuleringsserien ses på figur 20. På figuren er også resultaterne for referenceanlægget markeret.

Ved sammenligning af figur 19 og 20 ses at de viste kurver for pilotsolfanger- og solintensitetsstyringen stort set har samme forløb. Denne overensstemmelse skyldes den tætte sammenhæng der er mellem solens intensitet og temperaturen i en pilotsolfanger.

Et forhold der vurderes at kunne have betydning for en pilotsolfangerstyrings egnethed er pilotsolfangerens varmekapacitet. Er denne varmekapacitet stor, vil pumpen i solfangerkredsen, alt andet lige, både starte og stoppe senere. Især et forsinket stop af pumpen i solfangerkredsen vurderes at være uheldig. Det må dog forventes at en pilotsolfangers varmekapacitet er mindre end den egentlige solfanger (bla. indeholder pilotsolfangeren ingen væske). Derfor er en varmekapacitet for pilotsolfangeren på $1000 \text{ J/m}^2 \text{ K}$ anvendt i simuleringsserien (den ydende solfangers varmekapacitet er $10000 \text{ J/m}^2 \text{ K}$). For at undersøge betydningen af pilotsolfangerens varmekapacitet er nogle supplerende simuleringer udført med en varmekapacitet for pilotsolfangeren på $10000 \text{ J/m}^2 \text{ K}$. Resultaterne viser at de energimængder der tilføres gennem henholdsvis elstaven og spiralen herved forøges med ca. 5% og 1%. Dette resultat indikerer at en pilotsolfanger bør udformes så den har en så lav varmekapacitet som mulig.

Som allerede nævnt er resultaterne for pilotsolfanger- og solintensitetsstyringen stort set ens. Ligesom solintensitetsstyringen kan pilotsolfangerstyringen endvidere fremstilles noget billigere end en differenstermostatstyring. Derfor vurderes også pilotsolfangerstyringen at være et udmærket alternativ til differenstermostatstyringen. Det skal dog nævnes at de uheldige forhold der er beskrevet i forrige afsnit mht skygger også gælder for pilotsolfangerstyringen.

Som det fremgår af figuren er en start- og stoptemperatur på $40-45^\circ\text{C}$ et fornuftigt valg.



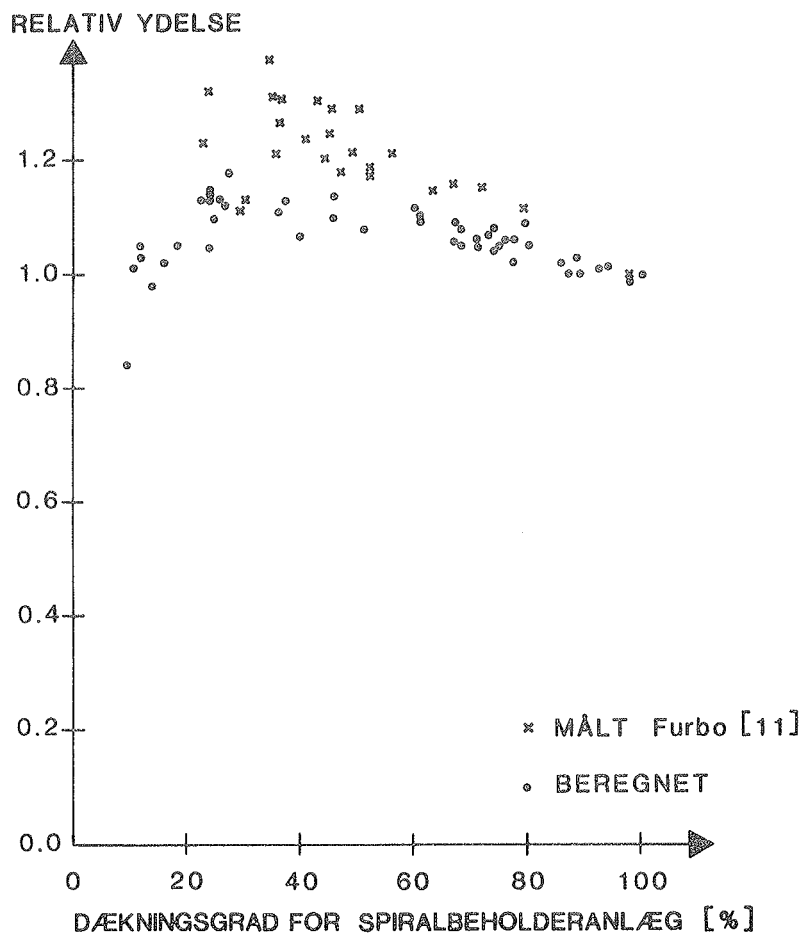
Figur 20. Energi tilført lageret gennem elstav og fra fyr (spiral) ved forskellige start- og stoptemperaturer for pumpen i solfangerkredsen ved en pilotsolfangerstyring. Endvidere er resultaterne for referenceanlægget, der er baseret på en differenstermostatstyring også markeret.

7. SAMMENLIGNING AF ET LOW-FLOW ANLÆG OG ET TRADITIONELT ANLÆG MED SPIRALBEHOLDER.

I den trettende undersøgelse er low-flow anlægget (referenceanlægget) beskrevet i indledningen til kapitel 6 sammenlignet med et traditionelt anlæg baseret på en spiralbeholder. Resultater for det traditionelle anlæg er beregnet med en tilpasset version af modellen for low-flow anlægget. I den ændrede version er kappen "flyttet ned" på siden af beholderen til et niveau hvor spiralen i en typisk spiralbeholder er anbragt. Endvidere er et varmeovergangstal mellem kappen og beholderen anvendt, der giver samme varmeoverføringskoefficient som for en typisk veldimensionet spiral (110 W/K). Endelig er et flow i solfangerkredsen på 0,5 l/min m² solfanger anvendt. Som en kontrol af simuleringen af det traditionelle anlæg er en supplerende beregning udført med en anden model, beskrevet i [15]. Denne model er udviklet netop for et spiralbeholderanlæg. De to simuleringer gav stort set de samme resultater.

Sammenligninger af low-flow anlægget (referenceanlægget) og det traditionelle spiralbeholderanlæg er udført ved at sammenholde beregnede ugeydelser (tappet energi fra lager minus tilført energi gennem elstav eller fra fyr) for de to anlæg. På figur 21 er relative ydelser (low-flow anlæggets ugeydelser divideret med det traditionelle anlægs ugeydelser) vist som funktion af de tilhørende soldækningsgrader for spiralbeholderanlægget. På figuren ses endvidere tilsvarende relative ydelser baseret på målinger af et low-flow og et spiralbeholderanlæg. Målingerne og forudsætningerne herfor er beskrevet [11].

Som det fremgår af figuren er højere ugeydelser beregnet for low-flow anlægget end for spiralbeholderanlægget. Stort set alle de beregnede relative ydelser er således større end 1. Variationen af de relative ydelser kan til en vis grad forklares. For soldækningsgrader på 100% dækker de to anlæg selvsagt hele det aktuelle forbrug med solenergi alene. Ugeydelserne for anlæggene er derfor ens, og den relative ydelse har værdien 1. For soldækningsgrader faldende fra 100% yder low-flow anlægget mere end spiralbeholderanlægget, og den relative ydelse stiger. For lave soldækningsgrader falder den relative ydelse igen og antager i nogle få tilfælde værdier under 1. En forsigtig vurdering af dette fald er at low-flow drift ikke er specielt velegnede i anlæg med lave soldækningsgrader. Faldet skyldes sandsynligvis at der kun opbygges meget beskedne temperaturlagdelinger i lageret.



Figur 21. Sammenligning af et low-flow anlæg (referenceanlægget) og et traditionelt anlæg (spiralbeholderanlæg). Figuren viser beregnede og målte relative ydelser (ugeydelser for low-flow anlægget divideret med ugeydelser for spiralbeholderanlægget) som funktion af de tilhørende soldækningsgrader for spiralbeholderanlægget.

Ved sammenligning af andre væsentlige resultater for de to simulerede anlægstyper kan det nævnes at der tilføres 19 og 5% mere energi henholdsvis gennem elstaven og fra fyret i det traditionelle anlæg end i low-flow anlægget. På årsbasis tilføres der i low-flow anlægget endvidere 3% mere energi fra solfangerkredsen til lageret. Disse tal viser meget tydeligt fordelene ved low-flow. Således yder solfangeren mere trods en væsentlig højere opvarmning af solfangervæsken. Dette må skyldes at indløbstemperaturen i solfangeren er betydelig lavere i low-flow anlæg end i spiralbeholderanlæg. Herudover opbygges der en fordelagtig temperaturlagdeling i beholderen ved tilførsel af energi fra solfangerkredsen. Herved opnås alt andet lige højere temperaturer på et tidligere tidspunkt i den øverste del af beholderne sammenlignet med et spiralbeholderanlæg. Resultatet er de lavere tilførte energimængder i form af back-up.

Som beskrevet i afsnit 6 er lagerbeholderen i low-flow anlægget (referenceanlægget) uisolaret i bunden. Det samme er derfor også antaget for beholderen i spiralbeholderanlægget. Middeltemperaturen i bunden af spiralbeholderen (energitilførslen fra solfangerkredsen sker ved bunden) er endvidere væsentlig højere end i kappebeholderen. Derfor kunne et større varmetab fra spiralbeholderanlægget helt eller delvis forklare de højere ydelser der er beregnet for low-flow anlægget. I to supplerende simuleringer af de to anlægstyper, hvor beholderne også er isoleret i bunden, er denne mulighed undersøgt. Ved sammenligning af de beregnede ugeydelser er stort set de samme relative ydelser som vist på figur 21 dog fundet.

Ved sammenligning af de beregnede og målte relative ydelser på figur 21 ses tydeligt at de målte relative ydelser er betydelig større end de beregnede. Det skal bemærkes at de to simulerede anlæg mht. dimensioner og belastning (påtrykt forbrug) kun afviger ubetydeligt fra de anlæg hvortil målingerne hører. Med andre ord er væsentlig højere merydelser fundet ved målinger af low-flow anlægget end ved beregning. Denne uoverensstemmelse vurderes hovedsageligt at have to forskellige årsager der skal forklares i det følgende.

Den væsentligste årsag formodes at være en utilstrækkelig beskrivelse af de dynamiske forhold i simuleringen af solfangerkredsen i modellen for low-flow anlægget. Som tidligere nævnt er værdier for udetemperaturen og solens intensitet fra referenceåret benyttet i alle simuleringerne. Alle værdier indeholdt i referenceåret er angivet som midlede timeværdier. Solens intensitet vil dog hyppigt variere meget inden for en time som følge af et varierende skydække. Svingninger i solens intensitet med en frekvens af størrelsesordenen minutter og ved en variation på flere hundrede procent vil ofte forekomme. Sådanne store variationer i solens intensitet vil resultere i lignende svingninger i udløbstemperaturen fra solfangeren og dermed også i indløbstemperaturen i lageret. I simuleringen af low-flow anlægget vurderes en negligering af disse svingninger ved anvendelse af de midlede timeværdier at have en ikke ubetydelig effekt. Dette skyldes at der i kappebeholderen under opladning tilføres energi i forskellige højdeniveauer afhængigt af indløbstemperaturen. Herved opbygges som før omtalt en gunstig temperaturlagdeling i beholderen, der som tidligere beskrevet er den væsentligste forklaring på de højere ydelser for low-flow anlæg. Idet de midlede timeværdier for solens intensitet benyttes i simuleringen, beregnes ofte for små temperaturlagdelinger med for lave anlægsydelser til følge. I simuleringen af spiralbeholderanlægget har en negligering af de aktuelle svingninger ikke den store betydning, idet energien fra solfangerfeltet tilføres i bunden af beholderen. Herved tilføres i langt de fleste driftssituationer energi til hele vandvolumenet i beholderen.

Den anden årsag til at højere relative ydelser er målt end beregnet er en for positiv modelbeskrivelse af opladningen af spiralbeholderanlægget. I denne anlægstype tilføres energien fra solfangerfeltet ved bunden af beholderen og frem-

kalder en naturlig konvektionsstrømning i de ovenfor liggende vandmasser. Denne strømning vil "erodere" på en eksisterende temperaturlagdeling i et højere niveau i beholderen. Erosionens styrke er afhængig af den tilførte effekt, den eksisterende temperaturlagdelings størrelse og afstanden fra spiralen til den højde hvor temperaturlagdelingen eroderes. Erosionen er påvist og beskrevet i [16] og [17]. Erosionen bevirker at større energimængder tilføres som back-up igennem elstaven og spiralen i toppen af beholderen. I simuleringen af spiralbeholderanlægget er denne erosion ikke medregnet.

8. FORTSÆTTELSE AF PROJEKTET

De i kapitel 7 to beskrevne forhold, der vurderes at give de højere målte relative ydelser end de beregnede, vil blive nærmere undersøgt i et netop bevilget projekt. I projektet vil bla. detaljerede, samtidige målinger for både low-flow og spiralbeholderanlægget blive sammenlignet med simuleringer af de to anlæg. I simuleringerne vil detaljerede målte vejrdato for de aktuelle måleperioder blive anvendt således at beregne og målte værdier (temperaturer i lager, tappede energimængder samt tilførte energimængder i form af back-up og fra solfangerfelt) direkte kan sammenholdes. Det nye projekt indeholder hermed også en meget værdifuld og påkrævet validering af den udviklede model. Endvidere vil edb-modellen blive udbygget hvor dette findes nødvendigt, så den beskrevne uoverensstemmelse elimineres.

9. KONKLUSION

En matematisk edb-model for et solvarmeanlæg der producerer varmt brugsvand er udviklet. Solvarmeanlægget kan karakteriseres som et low-flow anlæg og er baseret på en kappebeholder med en indbygget elstav og en varmevekslerspiral. Igennem elstaven og spiralen tilføres det nødvendige energisupplement i henholdsvis sommer- og vinterhalvåret. Det samlede anlæg kan derfor dække et forbrug 100%.

Edb-modellen er opdelt i delmodeller for de enkelte komponenter i solvarmeanlægget. Delmodellen for kappebeholderen er delvis valideret vha. målinger udført i en af laboratoriets lagerprøvestande. En god overensstemmelse er fundet mellem samtlige målinger og beregninger. En fuldstændig og meget værdifuld validering af den samlede model har det ikke været muligt at gennemføre inden for projektets snævre budgetramme.

Med modellen er en række analyser af solvarmeanlæggets udformning og drift udført. Resultaterne af disse analyser er kort sammenfattet herunder.

- Et optimalt flow i solfangerkredsen er bestemt til ca. 0,2 l/min m².
- En udformning af kappebeholderen bør tilståbes så kappens overkant er placeret under elstaven og spiralens underkant.
- Brugsvandsvolumenet over elstaven og spiralens underkant skal være så lille som det af hensyn til forbrugeren kan forsvares.
- Den temperatur som elstaven og spiralen opvarmer brugsvandet i toppen af beholderen til bør være så lav som mulig.
- Beholderens top og den øverste del af beholderens side bør være velisoleret. Derimod vil en isolering af beholderens bund være formålsløs. Alle rørgennemføringer i beholderen skal derfor såvidt muligt være placeret i beholderens bund.
- Med mindre et meget lille solfangerareal eller en solfanger med et stort varmetab anvendes, vil der opstå problemer med for høje temperaturer i såvel solfangerkreds som i lageret. Disse problemer bør i højere grad end nu indgå i udformningen og dimensioneringen af fremtidens solvarmeanlæg.
- En optimal solfangerhældning er bestemt til 40-50°.
- Ved en differenstermostatstyring af pumpen i solfangerkredsen udgør en start- og stopdifferens på ca. 15 og 5 K optimale værdier.

- Ved en solintensitetsstyring af pumpen i solfangerkredsen udgør et start- og stopkriterie på ca. 250 W/m^2 (målt på solfangerens plan) en optimal værdi.
- Ved en pilotsolfangerstyring af pumpen i solfangerkredsen udgør et start- og stopkriterie på $40\text{--}45 \text{ }^\circ\text{C}$ (mål i pilot-solfangeren) en optimal værdi.
- Stort set de samme anlægsydelse er beregnet for differenstermostat- solintensitet- og pilotsolfangerstyringen. Solintensitet- og pilotsolfangerstyringen vurderes derfor at være udmærkede alternativer til den formodentlig noget dyrere differenstermostatstyring. Solintensitet- og pilotsolfangerstyringen bør dog ikke anvendes hvis dele af solfangerfeltet (inkl. styring) afskygges i væsentlige perioder.

I en sidste analyse med modellen er et traditionelt solvarme-anlæg (et spiralbeholderanlæg) og et low-flow anlæg sammenlignet. Analysen viser at low-flow anlægget klart yder mest. De beregnede merydelser er dog ikke nær så store som de merydelser der er fundet i tilsvarende eksperimentelle undersøgelser i et tidligere projekt udført på laboratoriet [11]. Denne uoverensstemmelse skyldes formodentlig især en utilstrækkelig beskrivelse i modellen af de meget udtalte dynamiske forhold der ofte forekommer i solfangerkredsen i et low-flow anlæg. Uoverensstemmelsen vurderes dog ikke at have nogen nævneværdig indflydelse på resultaterne af de øvrige analyser beskrevet ovenfor.

10. SUMMARY

A detailed numerical model for a solar heating system producing domestic hot water has been developed. The solar heating system is based on a hot water tank with a mantle encircling the lower $3/4$ of the vertical tank surface. The mantle is functioning as a heat exchanger for solar energy collected under low flow operation.

The new model contains several novel approaches and allows PC-simulations of several years of performance without using prohibitive computing time.

Several calculated results compared with data measured in the laboratory show that a very good thermal description is obtained for the mantle heat storage.

The flow rate, different control systems and dimensions of the solar heating system were analyzed using the model. The optimal flow rate was found to be 0.2 l/min m^2 absorber.

One analysis indicates that mean hourly values for highly fluctuating solar radiation are not suitable for simulation of low flow solar heating systems.

REFERENCER

- [1] "The Actual Benefits of Thermally Stratified Storage in a Small and Medium Size Solar System". C.W.J. van Koppen, J.P.X. Thomas and W.B. Veltkamp, Sun II, Proceedings ISES Biennial Meeting, Atlanta, 1979.
- [2] "Thermal Stratification in Heat Storage". W.B. Veltkamp. Proceedings of the International TNO-Symposium "Thermal Storage of Solar Energy", November 1980.
- [3] "Passive Single Pass (series-connected) Solar Water Heaters". T.B. Scheffer and J.C. van Staden. Department of Physics, University of Pretoria. Advances in Solar Energy Technology. Volume 1. ISES Congress, Hamburg, September 1987.
- [4] "Thermal Performance Comparisons for Solar Hot Water Systems subjected to various Collector and Heat Exchanger Flow Rates". A.H. Fanney and S.A. Klein, Solar Energy, Vol. 40, No 1, 1988.
- [5] "An Experimental Comparison of Operating Strategies for Solar Water Systems". M.J. Carvalho, M. Collares-Pereira, F.M. Cunha and C. Vitorino, Solar Energy, Vol. 41, No 1, 1988.
- [6] "Recent Developments in Low-flow, Stratified-Tank Solar Water Heating Systems". K.G.T. Hollands, Solar Thermal Engineering Centre Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Canada. NORTH SUN '88, Borlänge, Sweden, August 1988.
- [7] "Progress in Low-Flow SDHW Systems - A critical review". Peter Case, Federal Office of Energy, Switzerland. December 1989.
- [8] "Selvcirkulerende solvarmeanlæg i Lyngby - resultater og erfaringer fra et års målinger". Søren Østergaard Jensen, Laboratoriet for Varmeisolering, meddelelse nr. 172, januar 1986.
- [9] "Is Low Flow Operation an Advantage for Solar Heating Systems?" Simon Furbo and Svend Erik Mikkelsen, Laboratoriet for Varmeisolering. ISES Solar World Congress, september 1987.
- [10] "Solvarmeanlæggene bliver fortsat bedre". Torben Skøtt. Vedvarende Energi 94, dec-jan 87/88.
- [11] "Fordele ved små volumenstrømme i solvarmeanlæg. Måling på 3 små brugsvandsanlæg". Simon Furbo, Laboratoriet for Varmeisolering. Meddelelse nr. 188, december 1987.

- [12] "Højtydende solvarmeanlæg med små volumenstrømme. Eksperimentelle undersøgelser". Simon Furbo, Laboratoriet for Varmeisolering. Meddelelse 205, marts 1989.
- [13] "Simulering af termiske forhold i solvarmeanlæg med sæsonlagring". Peter Berg, Laboratoriet for Varmeisolering, meddelelse nr. 190, 1988.
- [14] "Naturlig konvektion i mindre vandfyldte varmelagre". Peter Berg, Laboratoriet for Varmeisolering. Eksamenprojekt, juli 1983.
- [15] "Varmelagre til solvarmeanlæg". Simon Furbo, Laboratoriet for Varmeisolering. Meddelelse nr. 162, september 1984.
- [16] "Heat Transfer from Finned and Smooth Tube Heat Exchanger Coils in Hot Water Stores", R. Kübler, M. Bierer, E. Hahne, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, Advances in Solar Energy Technology, Proc. Biennial Congress ISES, Hamburg 1987.
- [17] "The Influence on Stratification when charging Hot Water Storages through Heat Exchangers", R. Kübler, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, Proc. of the IEA workshop Short Term Water Heat Storage Systems, Utrecht, the Netherlands 1987.