

Større low flow solvarmeanlæg

Lagerudformning og cirkulationsledningens indflydelse
på temperaturlagdeling i beholderen

Peter Fagerlund Carlsson

Laboratoriet for Varmeisolering
Danmarks Tekniske Højskole
Meddelelse nr. 252
April 1993

Forord

Denne meddelelse belyser hvordan man med fordel udformer et større low flow solvarmeanlæg.

Ved low flow solvarmeanlæg er det specielt varme-lageret der har interesse. For at opnå den bedst mulige temperaturlagdeling i lageret og dermed den største ydelse, skal de forskellige faktorer der kan ødelægge lagdelingen elimineres eller formindskes mest muligt.

I 1987 blev der opført et 44 m² stort low flow solvarmeanlæg på Søfartsskolen i Sønderborg. I dette anlæg blev temperaturlagdelingen i lageret væsentligt forringet af cirkulationsledningsflowet gennem lageret.

Der er derfor i dette projekt arbejdet på at bestemme den bedst mulige udformning af indløbsstudsene til cirkulationsledningen. Problemet med cirkulationsledningen er et alment problem for alle typer solvarmeanlæg, da en dårlig temperaturlagdeling i lageret i alle tilfælde vil forringe solvarmeanlæggets ydelse.

Denne meddelelse afslutter sammen med rapporten: "Beregning af ydelsen for Aids low flow solvarmeanlæg. Sammenligning mellem målinger og beregninger", rapport nr. 92-1 fra Laboratoriet for Varmeisolering, projektet: "Store solvarmeanlæg med små volumenstrømme", J.nr. 51181/91-0035.

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

Peter Fagerlund Carlsson, civ.ing.

Simon Furbo, civ.ing. Ph.D.

Kurt Rasmussen, maskinarbejder.

Hamid Jalali, teknisk assistent.

Christina Dipo Zimmermann, assistent

Resumé

Temperaturlagdelingen i solvarmelageret har stor indflydelse på solvarmeanlægs ydelse. I et low flow solvarmeanlæg er det specielt vigtigt med en stor temperaturlagdeling og faktorer, der ødelægger lagdelingen skal derfor elimineres eller formindskes mest muligt.

Ved større solvarmeanlæg er der ofte tilsluttet en cirkulationsledning til lageret. Cirkulationsflowet gennem lageret har vist sig at være én af de faktorer, der kan ødelægge temperaturlagdelingen.

Det er derfor vigtigt at få belyst hvordan cirkulationsledningen tilsluttes lageret så temperaturlagdelingen opretholdes i størst muligt omfang. Ikke kun cirkulationsflowet, men også tappeflowet, samt flowet forårsaget af kedelopvarmning og solopvarmning kan ødelægge temperaturlagdelingen. For low flow solvarmeanlæg har flowet forårsaget af solopvarmningen dog normalt ingen betydning på grund af det relative lille flow i solfangerkredsen. Temperaturforholdene i solfangerkredsen kan dog forårsage opblanding i den nederste del af lageret, hvis indløbstemperaturen fra solvarmen har en lavere temperatur end beholdertemperaturen i det givne indløbsniveau.

Der er udført indendørs forsøg med et 2000 l stort varmelager bestående af en opretstående forrådsbeholder, hvor kedelopvarmning og solopvarmning foregår gennem pladevarmevekslere.

Flowet i cirkulationsledningen blev varieret mellem 0 og 5000 l/h og der blev anvendt fire forskellige typer indløbsudformninger:

- direkte indløb
- bøjning
- T-stykke
- perforeret rør

Måleresultaterne viste, at det direkte indløb og det perforerede rør havde omtrent samme indvirkning på temperaturlagdelingen i lageret. T-stykket viste sig at have en gunstig indflydelse på temperaturlagdelingen, hvorimod bøjningen viste sig uegnet, sandsynligvis fordi den satte hele beholdervolumenet i rotation. For 2" direkte indløb blev der ikke målt nævneværdig opblanding for flow under ca. 2000 l/h.

Forsøgene viste desuden at det er muligt at få en meget gunstig temperaturlagdeling i lageret under kombineret kedelopvarmning og solopvarmning - til fordel for low flow solvarmeanlæggets ydelse.

Målingerne blev benyttet til at opstille og validere en detaljeret matematisk model, som simulerer de termiske forhold for varmelageret. Modellen er baseret på EMGP3 programpakken. Der er udarbejdet en række figurer som viser forskellen mellem målte og beregnede lagertemperaturer. Sammenligningen viser at modellen undervurderer temperaturlagdelingen i lageret på grund af numerisk diffusion i den beregningsmæssige lagermodel.

EDB-modellen er efterfølgende anvendt til beregning af årsydelsen for low flow solvarmeanlæg. Beregningerne viser blandt andet, at det optimale flow i solfangerkredsen er ca. 0,20 l/(min m²) . Større flow vil ødelægge den fordelagtige temperaturlagdeling i lageret med lavere ydelse til følge.

Der er udarbejdet en række figurer, som gør det muligt at bestemme den årlige ydelse af forskellige store low flow solvarmeanlæg.

Indholdsfortegnelse

Resumé

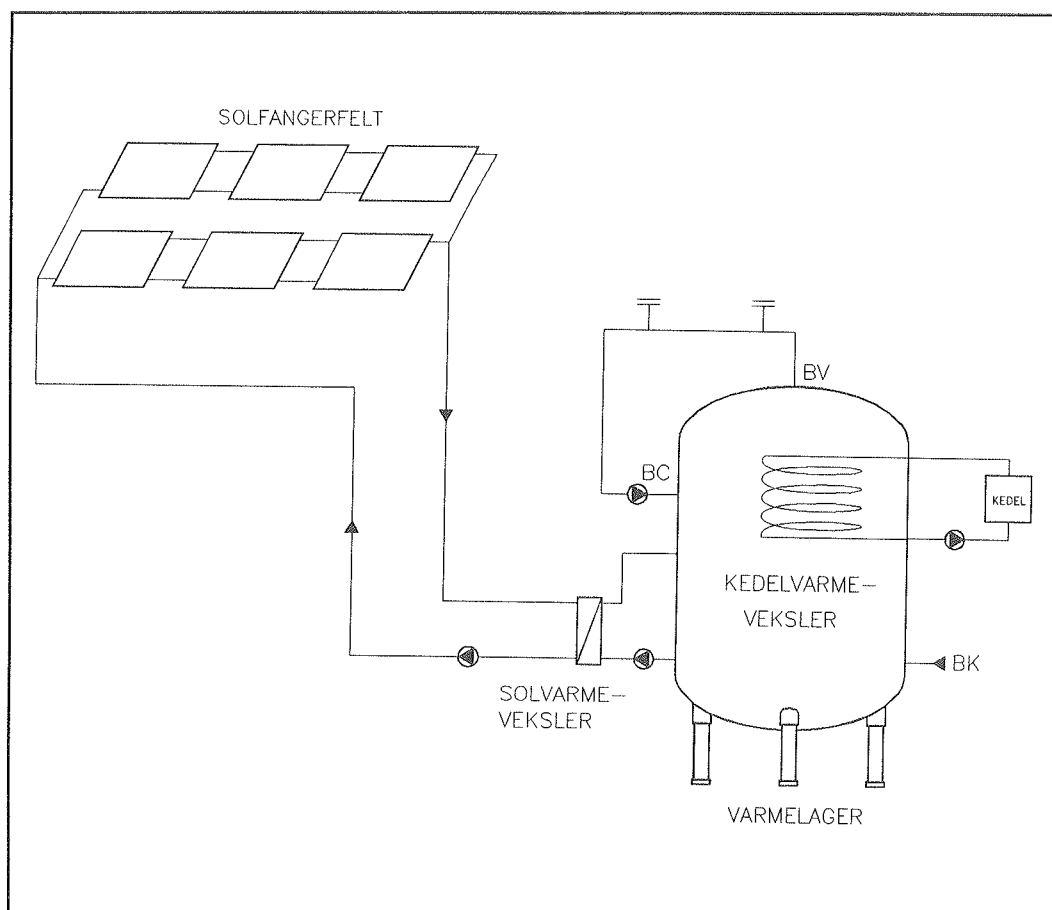
Indledning og introduktion	1
Temperaturlagdeling i varmelager	2
Cirkulationsledning	2
Opbygning af større low flow solvarmeanlæg	3
Principopbygning	3
Lager	5
Varmevekslere	6
Væskestrømme gennem lageret	6
Opblanding	7
Referenceanlæg	8
Referenceanlæg	8
Varmtvandsforbrug	9
Cirkulationstab	10
Forsøgsopstilling og måleudstyr	11
Udformning af forsøgsopstilling	12
Lager	14
Solvarmekredsen	16
Kedelkredsen	16
Tappekredsen	17
Cirkulationskreds	17
Måleudstyr	17
Måleresultater	19
Varmetab fra beholderen	20
Tapning fra beholderen	20
Kedelopvarmning	22
Cirkulationsledning	26
Solvarme	40
Kedelopvarmning, tapning og cirkulation	43
Afsluttende forsøg	45
EDB-beregninger med EMGP3	47
Sammenligning mellem målinger og beregninger	47
Årskørsler	51
Sammenfatning og konklusion	62
Summary	63
Referencer	64

Indledning og introduktion

Det er projektets formål at etablere værktøjer til at optimere større low flow solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning. Ved større solvarmeanlæg forstås anlæg fra ca. 20 m² solfanger og opefter.

Denne størrelse anlæg vil f.eks. kunne anvendes til lejlighedskomplekser, skoler og plejehjem.

Et solvarmeanlæg består af et solfangerfelt og et varmelager. Solfangerfeltet er normalt placeret på husets tag, og varmelageret i husets kedelrum.



Figur 1. Eksempel på opbygning af større low flow solvarmeanlæg.

I et low flow solvarmeanlæg cirkulerer solfangervæsken meget langsomt igennem solfangeren. Normalt ligger væskestrømmen på ca. 0,15 - 0,20 l/min pr. m² solfanger. Ved en sådan langsom strømning, vil der ske en stor temperaturstigning igennem solfangeren. I et almindeligt solvarmeanlæg vil væskestrømmen være ca. 5 gange større.

Den opvarmede solfangervæske cirkulerer gennem et rørsystem med en varmeveksler, hvor varmen overføres til brugsvand. På denne måde afgives solvarme til den nederste del af lageret som vist på figur 1. Den øverste del af lageret opvarmes af kedlen, gennem kedelveksleren. Koldt brugsvand (BK) tilføres i bunden, varmt brugsvand (BV) tappes fra toppen af lageret.

En del af det varme brugsvand anvendes til at opvarme hele det varme brugsvandssystem, og returnerer til lageret gennem cirkulationsledningen (BC). Normalt vil energiforbruget til dækning af cirkulationstab være af samme størrelsesorden som varmtvandsforbruget, specielt i ældre bebyggelser er cirkulationstab af en betragtelig størrelse.

Temperaturlagdeling i varmelager

Da vand udvider sig, og får lavere densitet, ved stigende temperaturer, er det muligt at opbygge en stor temperaturlagdeling i lageret. En anden vigtig egenskab ved vand er dets relativt lave varmeledningsevne, som er en vigtig faktor for at opretholde temperaturlagdelingen.

Solvarmeanlæggets varmelager er af stor betydning for solvarmeanlæggets ydelse, derfor er et veldimensioneret lager med størst mulig temperaturlagdeling klart at foretrække. Temperaturlagdelingen i lageret er vigtig fordi solvarmen yder mere jo koldere vand den opvarmer. Den øverste del af lageret som opvarmes af kedlen holdes ca. 55°C varmt, så der altid kan tappes varmt vand fra beholderen. Det vil derfor være uheldigt hvis denne varme breder sig nedad og dermed ødelægger temperaturlagdelingen i lageret.

Cirkulationsledning

Cirkulationsledningen har normalt et stort varmetab, hvilket medfører at flowet i cirkulationsledningen bliver stort fordi returvandstemperaturen fra cirkulationsledningen ikke må være under ca. 50°C.

Ved store flow i cirkulationsledningen er det et generelt problem at der sker en opblanding i lageret. En teori og mulig forklaring på denne opblanding er at væskestrålen der løber ind i lageret rammer modsatte beholdervæg, hvorefter en del af vandet tvinges nedad - og dermed skaber opblanding i lageret.

Det er ikke kun cirkulationsledningen der kan forårsage opblanding i lageret, koldt vandstilførslen og andre indløb kan have samme uheldige indflydelse.

En mulig løsning på f.eks. cirkulationsledningens uheldige indflydelse kan f.eks. være at påsætte forskellige diffusere på indløbsstudsene, så der ikke sker en opblanding. En diffuser kan f.eks. være et rør med mange huller, så væskehastigheden fra cirkulationsledningen ind

i beholderen nedsættes mest muligt.

Ved hjælp af laboratorieforsøg med et 2000 l varmelager, og med edb-beregninger skal det klarlægges, hvordan et low flow solvarmeanlæg med fordel kan udformes, og hvordan temperaturlagdelingen i lageret bevares på den mest hensigtsmæssige måde og ikke ødelægges af f.eks. flowet i cirkulationsledningen.

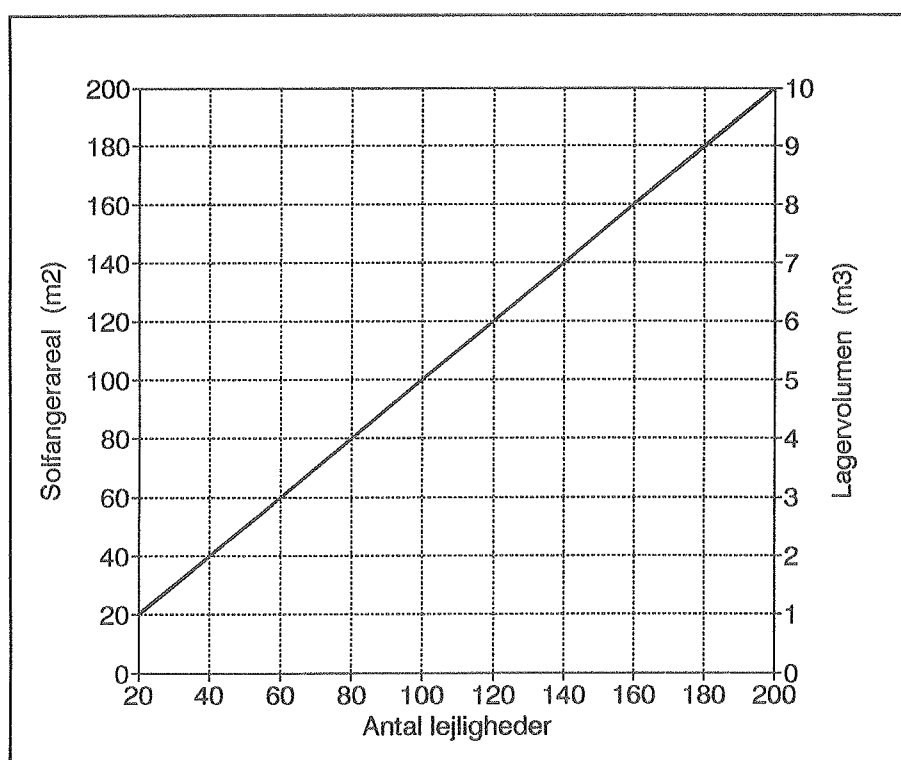
For et almindeligt solvarmeanlæg er en fordelagtig temperaturlagdeling naturligvis også af stor betydning. Derfor vil de forbedringer der foreslås i denne rapport, også med fordel kunne anvendes på almindelige solvarmeanlæg.

Opbygning af større low flow solvarmeanlæg

Principopbygning

Et solvarmeanlæg består af et solfangerfelt og et varmelager.

På figur 2 er angivet nogle vejledende størrelser for solfangerareal og lagervolumen afhængig af antal lejligheder i bebyggelsen.

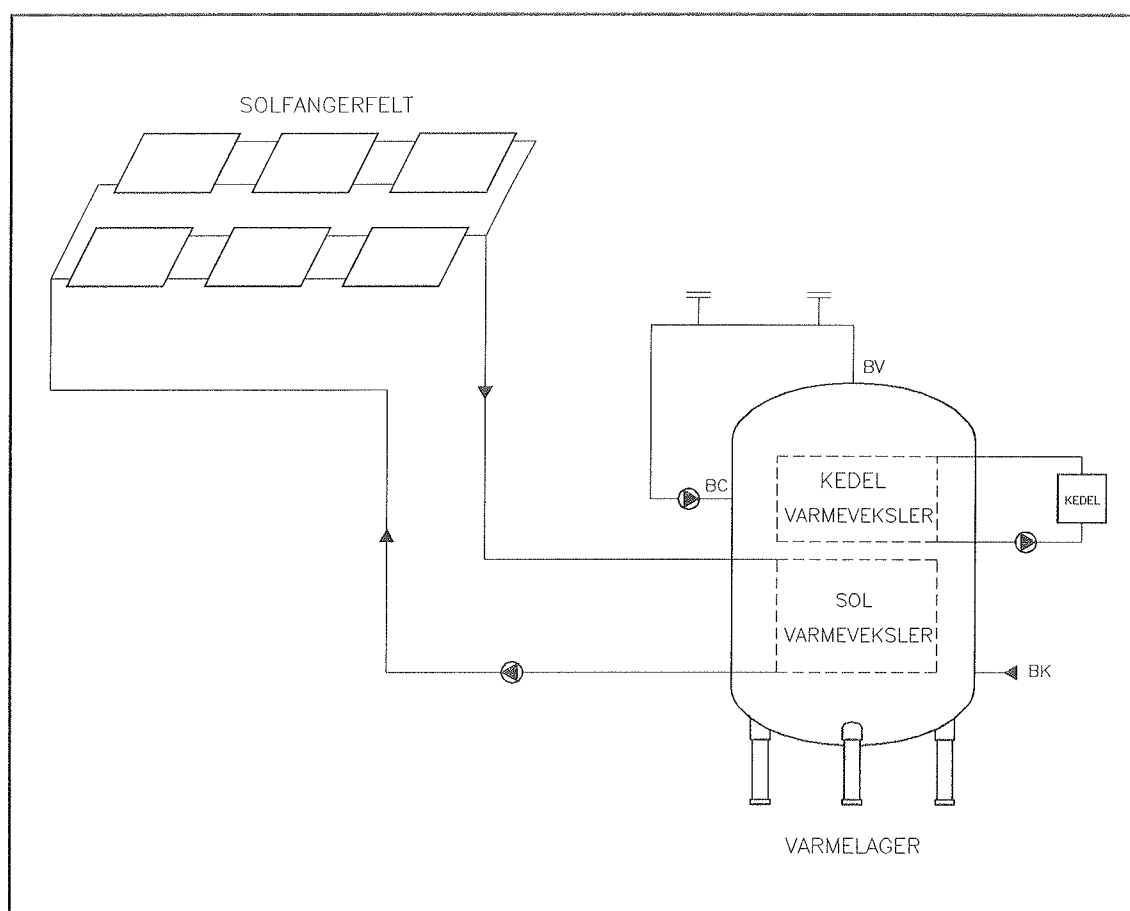


Figur 2. Vejledende solfangerareal og lagerstørrelse for større solvarmeanlæg.

Solfangerareal på ca. $1 \text{ m}^2/\text{lejlighed}$ og et totalt lagervolumen på ca. $50 \text{ l}/\text{lejlighed}$ er overslagsmæssige størrelser.

Et solvarmeanlæg op til ca. 200 m^2 giver mulighed for at anvende et varmelager bestående af en standardbeholder, der normalt udføres i op til 10 m^3 . Ved større anlæg er man nødsaget til at opsætte flere beholdere.

En principopbygning af et større low flow solvarmeanlæg er vist på figur 3.



Figur 3. Principopbygning af større low flow solvarmeanlæg.

Med en væskestrøm på ca. $0,15 - 0,20 \text{ l}/(\text{min m}^2)$ cirkulerer solfangervæsken gennem solfangerne med et så lille flow at det ikke er ualmindeligt at solfangervæsken opvarmes ca. $20 - 40 \text{ K}$ gennem solfangerne. Den opvarmede væske cirkuleres med en pumpe til lageret, hvor det afgiver sin varme gennem solvarmeveksleren til varmelageret.

Herefter cirkuleres den afkølede solfangervæske tilbage til solfangeren. Solfangervæsken er tilsat frostvæske så der ikke sker frostsprængninger i solfangeren.

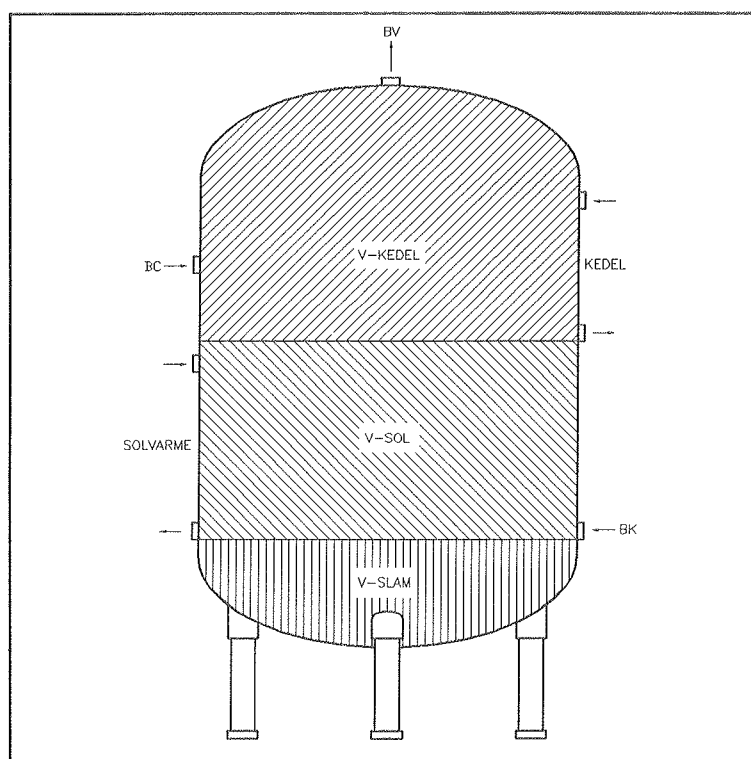
Den øverste del af varmelageret opvarmes til ca. 55°C af bebyggelsens kedel gennem kedelvarmeveksleren. Der kan derfor altid tappes varmt vand fra beholderen selvom solen ikke skinner.

Koldt brugsvand (BK) der normalt har en temperatur på ca. 10°C føres ind i bunden af lageret, når der tappes varmt vand (BV) fra toppen af lageret.

På de fleste større anlæg tilsluttes en cirkulationsledning til lageret, så hele det varme brugsvandssystem er opvarmet. Cirkulationsledningen har normalt et stort varmetab, men den forhindrer et stort vandspild når der forbruges varmt brugsvand i de fjerneste lejligheder. Returvandet fra cirkulationsledningen (BC) føres ind i den øverste del af varmelageret.

Lager

Et eksempel på en beholderudformning og forskellige dellagervolumener er vist på figur 4.



Figur 4. Beholderudformning for større solvarmeanlæg.

Den øverste del af beholderen som opvarmes af kedlen - eller en anden supplerende energikilde kaldes V-kedel. Størrelsen af dette volumen dimensioneres efter \5\.

Nedenunder ligger solvarmevolumenet V-sol som kun opvarmes af solvarmen. Størrelsen af dette volumen afhænger naturligvis af solfangerarealet, og bestemmes ud fra \6\ eller ved brug af et detaljeret edb-program f.eks. EMGP3. Nederst i beholderen er V-slam som er slamvolumenet, dette volumen bliver ikke opvarmet og her samles alle større urenheder i beholderen.

Varmevekslere

I solvarmeanlægget er der en solvarmeveksler og en kedelvarmeveksler, som normalt vil være én af følgende 3 typer:

1. pladevarmeveksler
2. spiralvarmeveksler
3. kappevarmeveksler

Ved små low flow solvarmeanlæg til parcelhuse anvendes typisk en kappevarmeveksler, fordi den ved små anlæg giver en god varmeoverføringsevne, og en fordelagtig temperaturlagdeling i beholderen til en konkurrencedygtig pris.

Ved større anlæg anvendes næsten aldrig kappebeholdere, fordi forholdet mellem det varmeoverførende areal og beholdervolumenet bliver meget lille for store beholdere. Desuden giver en kappe problemer når der skal placeres studse og mandehul i beholderen.

Spiralvarmevekslere er meget anvendt og giver en relativ god varmeoverføringsevne. Ved større anlæg kan det knibe med pladsen inde i beholderen til alle spiralerne. Pladevarmeveksleren er den type varmeveksler der giver den største varmeoverføringsevne i forhold til varmevekslerens volumen. Pladevarmeveksleren placeres udenfor beholderen. Specielt til store anlæg vil pladevarmeveksleren være fordelagtig på grund af sin kompakte opbygning.

Væskestrømme gennem lageret

Der findes normalt fire væskestrømme gennem lageret der har interesse for temperaturlagdelingen.

1. solopvarmning
2. kedelopvarmning (supplerende varme)
3. tapning
4. cirkulation

Vejledende størrelser for flow er angivet i figur 5, og beregnet ud fra \2\. Flowet i solfangerkredsen er beregnet ud fra $0,2 \text{ l}/(\text{min m}^2)$ med beregningsmæssigt 1 m^2 solfanger pr. lejlighed.

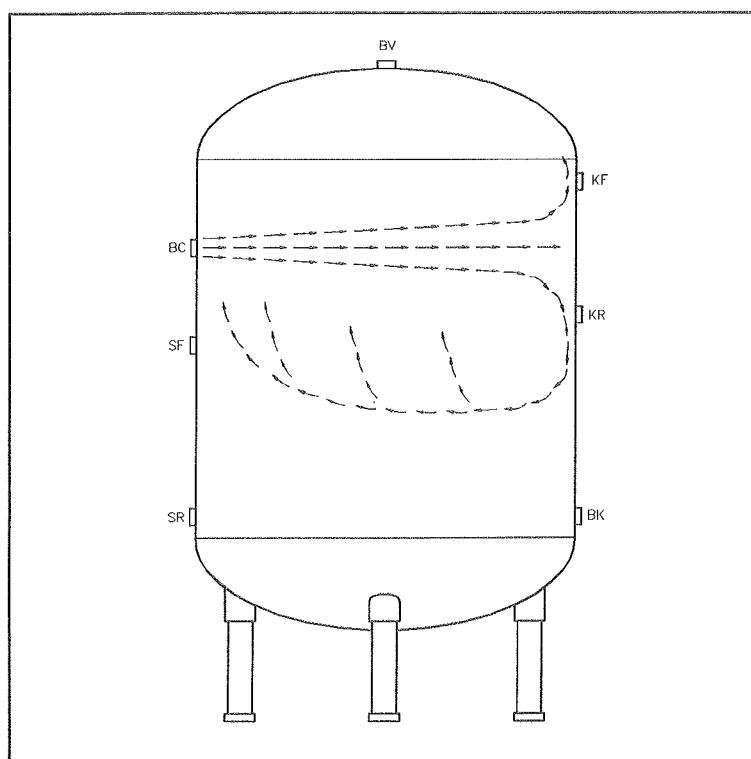
Lejligheder	Sol-opvarmning (l/h)	Kedel-opvarmning (l/h)	Tapning (l/h)	Cirkulation (l/h)
25	300	800	1000	900
100	1200	2300	3000	3500

Figur 5. Vejledende flow gennem beholderen afhængig af antal lejligheder.

Som det ses af figur 5 afhænger flowet af antal lejligheder i bebyggelsen. Jo flere lejligheder, jo større flow. Flowet i solvarmekredsen er en del mindre end de tre andre.

Opblanding

En opblanding mellem solvarmedelen og kedeldelen af lageret er uheldig. En opblanding kan blandt andet stamme fra cirkulationsledningen. En teori og muligt forløb af væskestrømmene i beholderen er vist på figur 6.



Figur 6. Skitse af væskestrøm i varmelager forårsaget af stort flow i cirkulationsledning.

Når flowet i cirkulationsledningen kommer over en vis størrelse vil strømmingen besidde så meget kinetisk energi, at væskestrømmingen ikke når at stoppe før den når den modsatte beholdervæg. Når dette sker, vil en del af væsken blive tvunget nedad, og dermed blive opblandet med koldt vand nedenunder - som vist på figur 6.

Størrelsen af denne opblanding kan blandt andet afhænge af følgende størrelser:

1. flowet i cirkulationsledningen
2. væskehastigheden ved indløb i beholderen
3. udformning af cirkulationsindløbet
4. udformning af beholder f.eks. diameter
5. temperaturforhold i lager og cirkulationsledning

Referenceanlæg

Når et solvarmeanlæg skal projekteres kan man få hjælp i normer og vejledninger.

Hvis ikke andet er nævnt er \2\, \5\ og \6\ anvendt som vejledning og dimensioneringsgrundlag i denne rapport.

I laboratorieforsøgene med et større varmelager, og med edb-beregningerne har det været et ønske at have et referenceanlæg, som alle målinger og beregninger kan sammenlignes med.

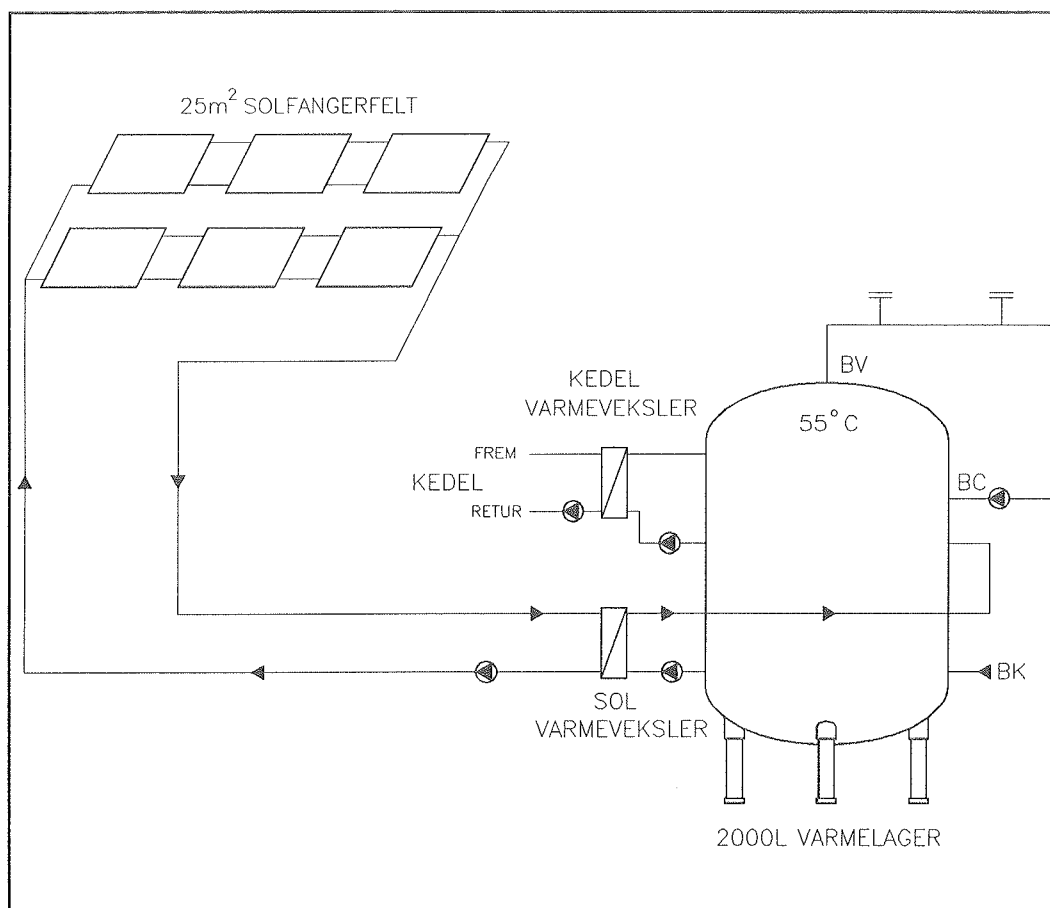
Referenceanlæg

Referenceanlægget er et low flow solvarmeanlæg til en bebyggelse på 25 lejligheder. Det 25 m² store solfangerfelt er placeret på en sydvendt 45° hældende tagflade uden skygger. Flowet i solfangerkredsen er 0,2 l/(min m²).

Der er i beregningerne anvendt en middelgod solfanger med en starteffektivitet på 0,78 og en varmetabskoefficient på 5,0 W/(K m²), se \8\.

Beholderen har et samlet volumen på 2000 l, og der er tilsluttet en cirkulationsledning til lageret. Alle indløb til beholderen sker gennem 2" studse. Varmeudvekslingen for både kedel og solvarme sker gennem pladevarmevekslere.

Solvarmevolumenet svarer til 32 l pr. kvm.



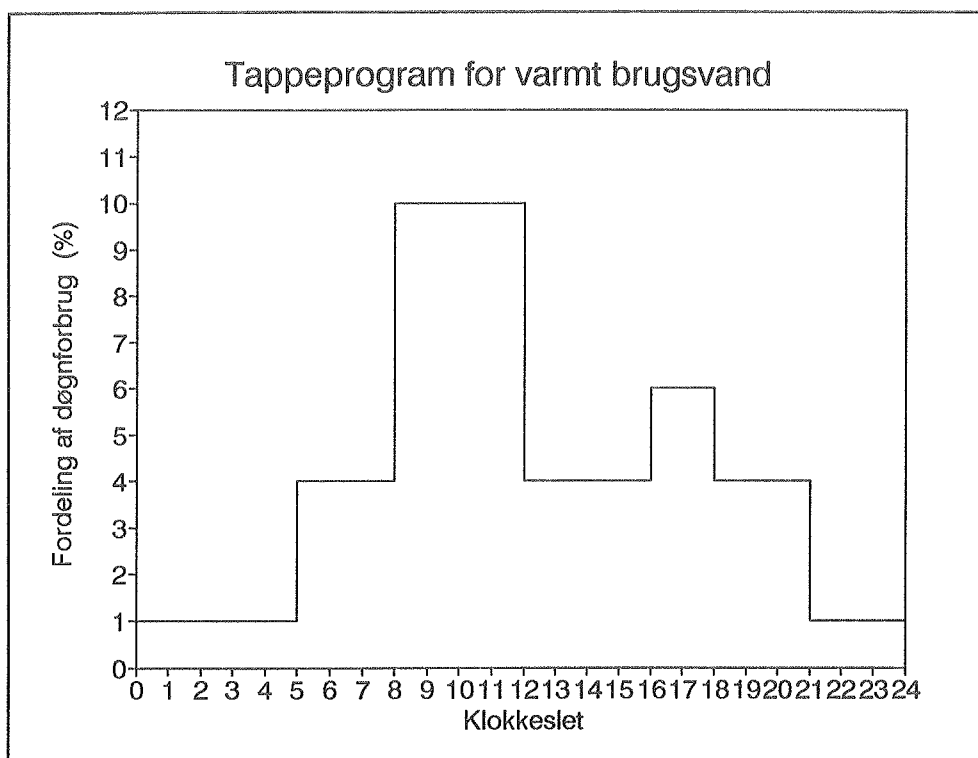
Figur 7. Principskitse af referenceanlæg.

Varmtvandsforbrug

Det årlige varmtvandsforbrug i en bebyggelse afhænger blandt andet af antal lejligheder i bebyggelsen, antal beboere pr. lejlighed, og om der er måler eller ej.

Varmtvandsforbruget igennem døgnet varierer meget - fra næsten intet forbrug om natten - til spidsbelastning om morgenen.

En typisk variation i timeforbruget over døgnet er vist på figur 8. Variationen er beregnet ud fra \2\.

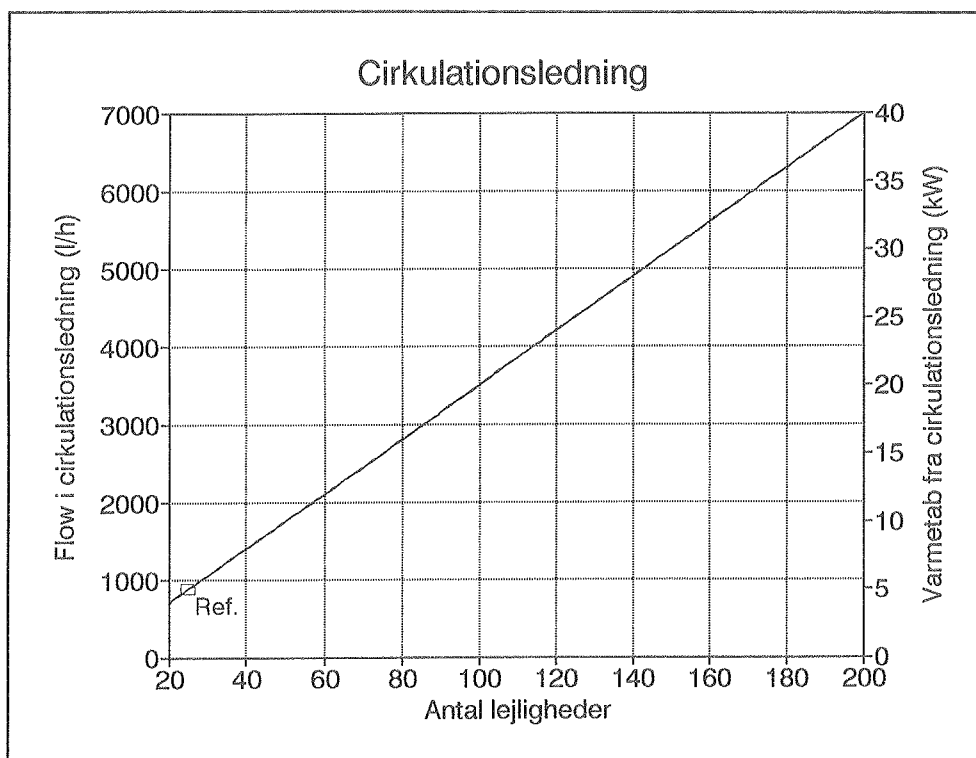


Figur 8. Typisk varmtvandsforbrug over døgnet.

I referenceanlægget er det totale daglige varmtvandsforbrug sat til 100 l/lejlighed, opvarmet fra 10-55°C.

Cirkulationstab

Cirkulationstabet er konstant over døgnet, og afhænger af isoleringsstandarderne af varmtvandsrørene, rørenes længde og temperaturforskellen mellem rørene og omgivelsestemperaturen. Som reference er valgt et varmetab på 0,2 kW/lejlighed. Det varme vand bliver afkølet ved en omgivelsestemperatur på 20°C.



Figur 9. Cirkulationstab og flow i cirkulationsledning.

For referenceanlægget på 25 lejligheder giver det et varmetab på 5 kW, og et flow på 860 l/h

En nærmere beskrivelse af lagerudformningen findes i afsnittet om forsøgsopstilling og måleudstyr.

Forsøgsopstilling og måleudstyr

På laboratoriets forsøgsareal er der opbygget en indendørs forsøgsopstilling med en 2000 l varmtvandsbeholder som varmelager. For at kunne følge varmelagerets virkemåde, er der anvendt et avanceret målesystem der kører på en PC'er.

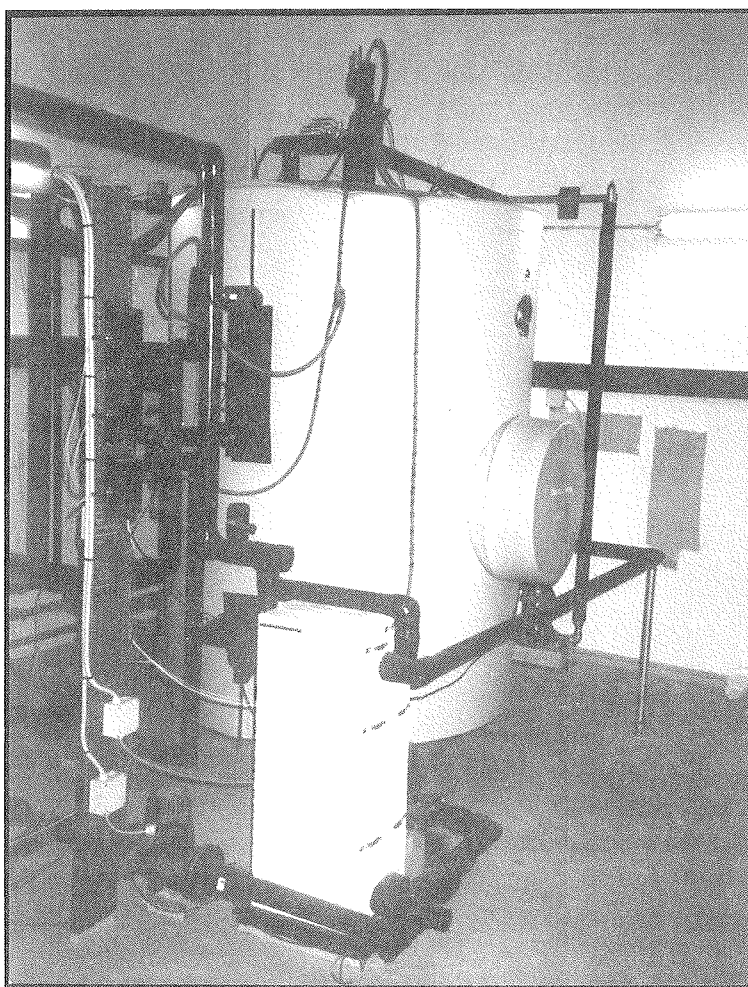
Varmelageret opvarmes med varme fra en stor beholder der er opvarmet til ca. 70 °C. Varme fra denne beholder anvendes til både kedelopvarmning og til at simulere en solvarmetilførsel til varmelageret.

Udformning af forsøgsopstilling

Det er tilstræbt at forsøgsopstillingen skal kunne efterligne de driftssituationer et rigtigt varmelager udsættes for. Varmelageret kan opvarmes af både kedel- og solvarme, hvor varmevekslere og beholder er dimensioneret til referenceanlægget, der består af et solvarmeanlæg til en bebyggelse på 25 lejligheder.

Der kan desuden tappes vand fra lageret, og en cirkulationsledning er tilsluttet hvor flow og varmetab nemt lader sig ændre efter ønske.

Figur 10 viser den indendørs forsøgsopstilling. I forgrunden ses solvarmeveksleren, og i baggrunden er den 2000 l store varmtvandsbeholder.

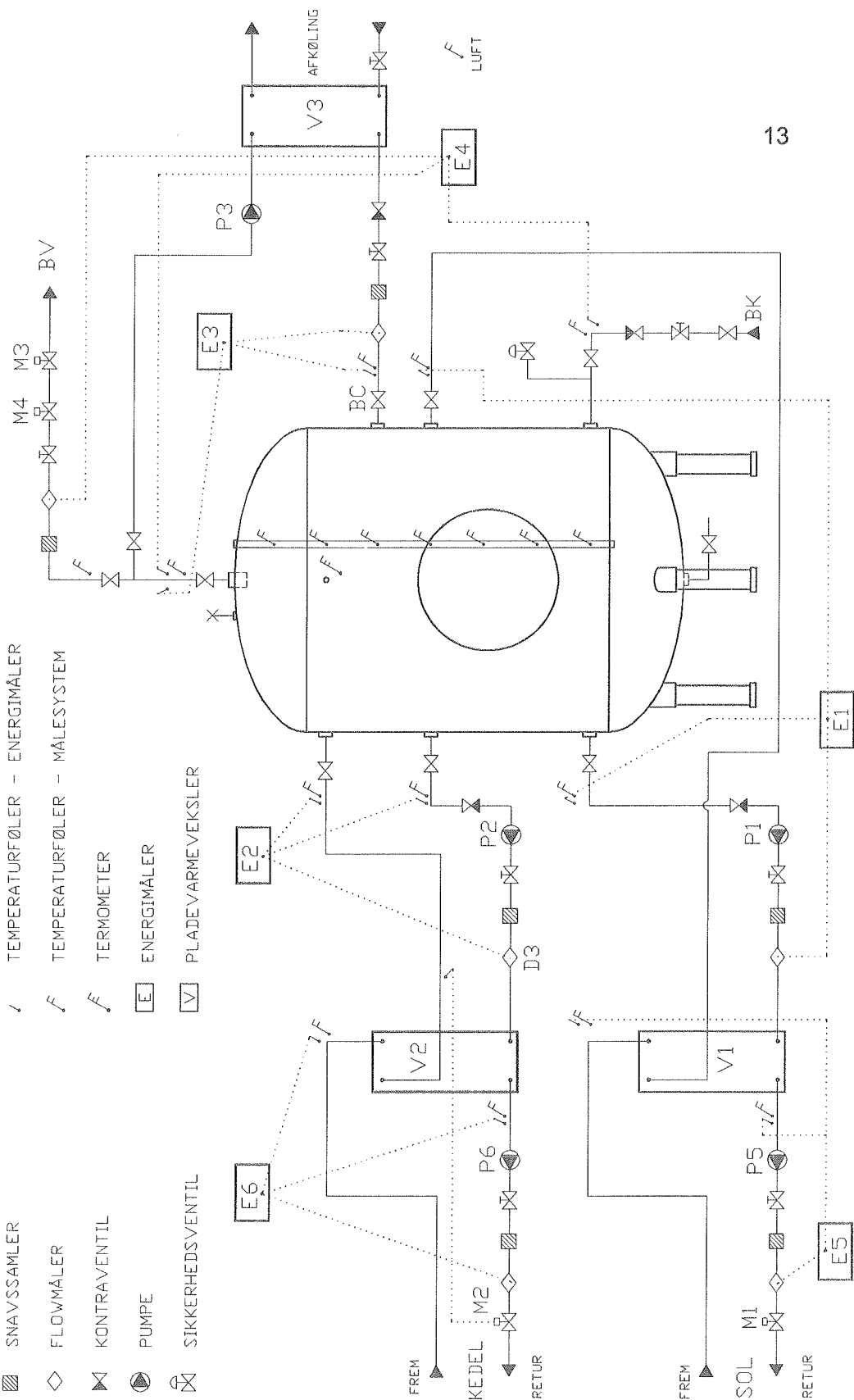


Figur 10. Forsøgsopstilling.

Figur 11 viser en principskitse af forsøgsopstillingen.

SIGNATURFORKLARING

✕	AFSPÆRINGSVENTIL	↑	UDLØFTNING
✕	REGULERINGSVENTIL	⊠	MOTORVENTIL / MAGNETVENTIL
▨	SNAVSSAMLER	/	TEMPERATURFØLER – ENERGIMÅLER
◇	FLOWMÅLER	F	TEMPERATURFØLER – MÅLESYSTEM
▶	KONTRAVENTIL	F	TERMOMETER
⊙	PUMPE	[E]	ENERGIMÅLER
⊗	SIKKERHEDSVENTIL	[V]	PLADEVARMEVEKSLER

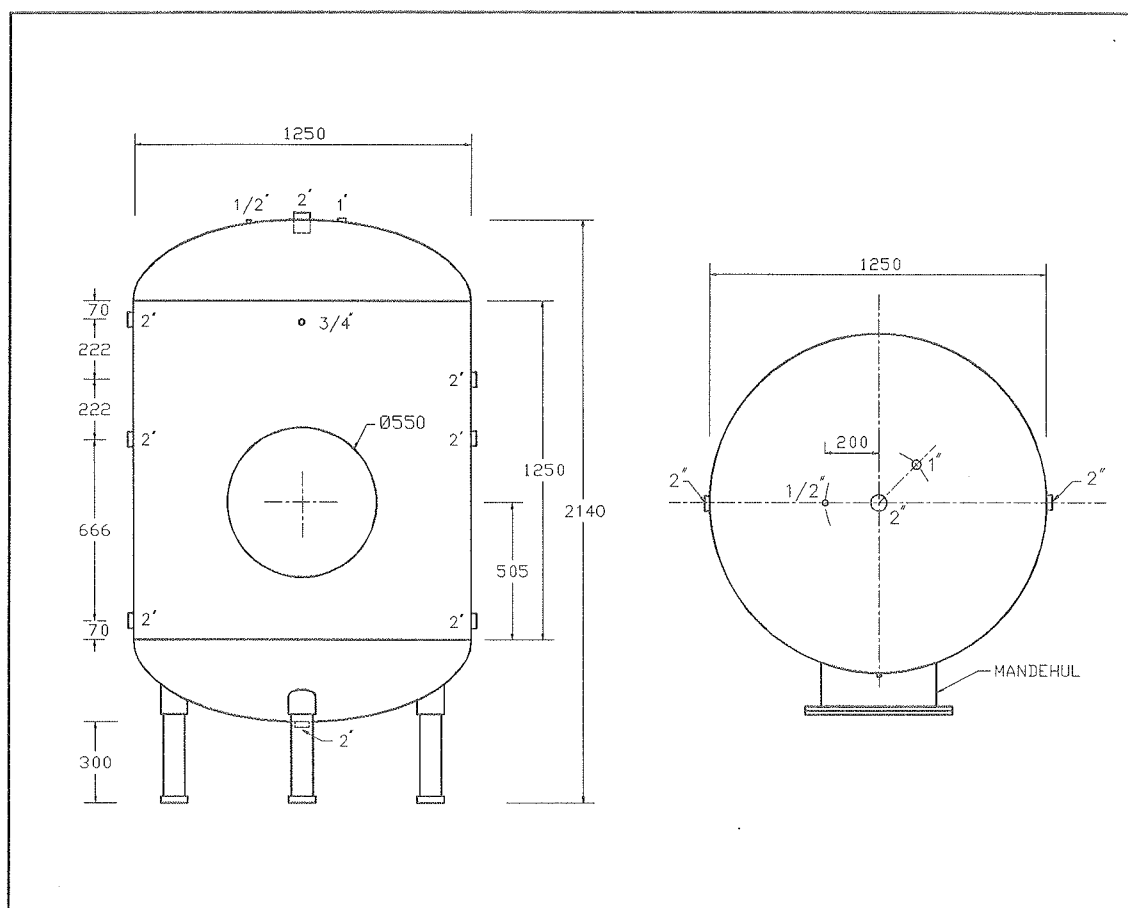


Figur 11. Principskitse af forsøgsopstilling.

Lager

Varmtvandsbeholderen er en 2000 l opretstående forrådsbeholder af fabrikat Kähler & Breum. Ved en nøjagtig måling viste det sig at beholderen rummer 1970 liter. Beholderen er isoleret med en 8 cm tyk isoleringskappe der leveres som standard af beholderfabrikanten.

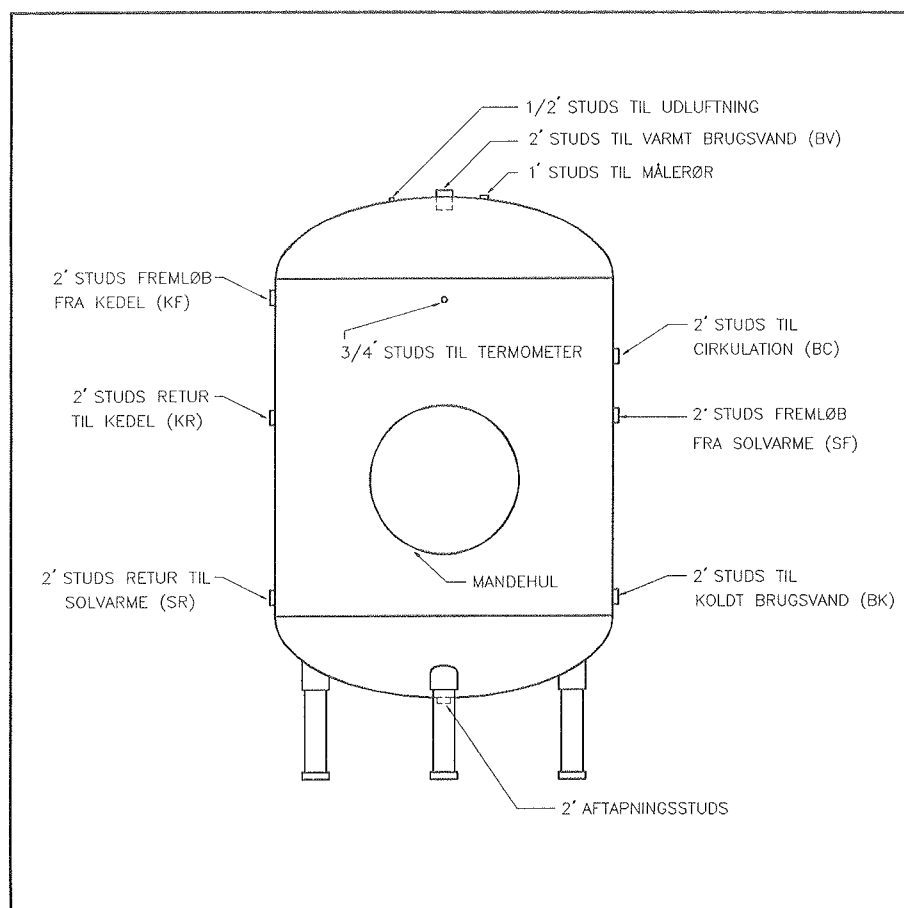
Figur 12 viser beholderen og de vigtigste dimensioner.



Figur 12. Beholderdimensioner.

Beholderens diameter er 1,25 m og den totale højde incl. ben er 2,16 m. Der er påmonteret et mandehul i beholderen således at en indvendig inspektion er mulig.

Størrelsen af beholderstudse og hvad de anvendes til ses på figur 13. Generelt er alle studse hvorigennem der skal strømme vand, udformet som 2" studse. Disse studse har et gennemgående gevind således at der mellem forsøgene nemt kan påmonteres diffusere inde i beholderen uden svejsning. Et 2" rør har en indvendig diameter på 53 mm.

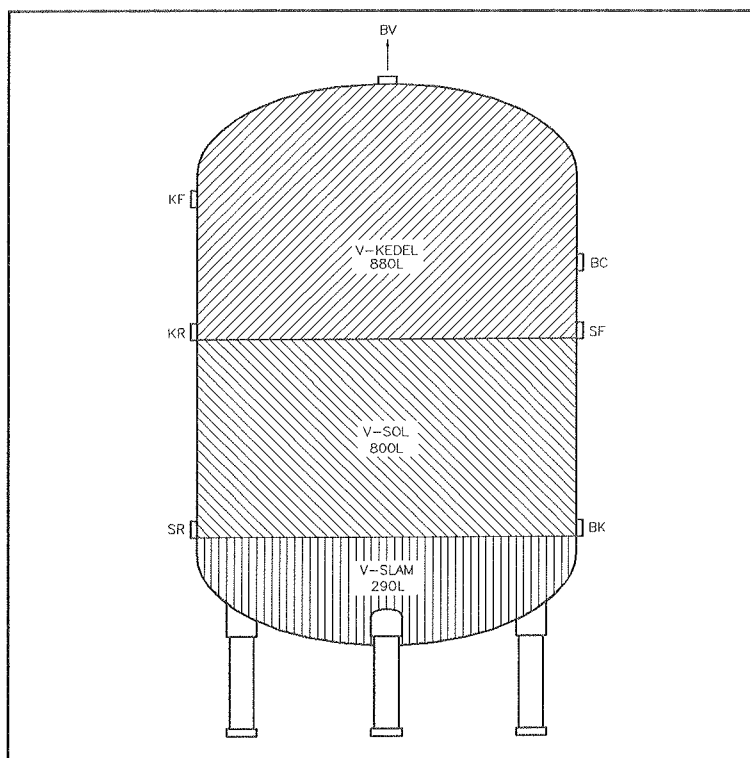


Figur 13. Størrelse og anvendelse af beholderstuds.

På beholderens top er der placeret 3 studs med hvert sit formål. 2" studsen anvendes til at tappe varmt brugsvand igennem. Studsen er ført ca. 5 cm ned i beholderen, hvorved evt. luft i beholderens top ikke bliver ført ud i rørsystemet. 1/2" studsen er anvendt til en automatisk luftudlader. 1" studsen er der placeret et målerør således at temperaturen inde i beholderen kan måles. Dette målerør er beskrevet detaljeret senere i dette afsnit.

Frem (KF) og retur (KR) fra kedlen er placeret på beholderens venstre side. Midt imellem disse to studs, men på modsatte side af beholderen er cirkulationsledningsstudsens placeret (BC). Frem (SF) og retur (SR) fra solfangerkredsen er placeret på hver sin side af beholderen. Koldt brugsvand føres ind gennem en 2" studs nederst i beholderen (BK). I beholderens bund er der placeret en 2" studs som anvendes til aftapningsformål, hvis beholderen skal tømmes eller udslammes. Sidste studs i beholderen er placeret i den øverste halvdel af beholderen, og anvendes til et termometer.

Den givne beholderudformning giver en beholdervolumenfordeling som vist på figur 14.



Figur 14. Volumenfordeling.

Summen af V-kedel og V-sol benævnes det effektive beholdervolumen, fordi det er det volumen som anvendes til varmelagring. Dette volumen er i alt 1680 liter.

Solvarmekredsen

Solvarmekredsen er udformet efter ladekredsprincippet, se figur 11, hvor varmevekslingen foregår gennem pladevarmeveksleren V1. Varmeveksleren har en hedeplade på 1,0 m². Motorventilen M1 er af type STAEFA M3P10GX og styres enten manuelt eller med målesystemet. Ved at ændre åbningsgraden og dermed flowet i solfangerkredsens primære kreds ændres varmeafgivelsen til solfangerkredsens sekundære kreds. Pumperne P1 og P5 styres manuelt.

Kedelkredsen

Den øverste del af beholderen opvarmes af kedelkredsen gennem varmeveksleren V2. Denne varmeveksler har en hedeplade på 0,8 m² og dimensioneret til en effektoverførsel på 40 kW. Dette svarer til en opvarmning af ca. 800 l vand i timen fra 10°C til 55°C.

Flowet i den sekundære kedelkreds er konstant, og motorventil M2 styrer efter en udløbs-temperatur fra kedelvarmeveksleren på ca. 55°C, se figur 11. Motorventilen M2 er af type STAEFA M3P15G og styres af en regulator type STAEFA RDK9.

Tappekredsen

Koldt brugsvand (BK) føres under tapning ind i bunden af beholderen. Ved indløbet til beholderen er der placeret en 6 bar sikkerhedsventil.

Motorventil M3 og magnetventil M4 åbnes ved tapning fra beholderne, begge disse ventiler styres af målesystemet. Motorventil M3 er af typen Danfoss AMV 423 ventilmotor og VR2 ventil. Derved åbnes der langsomt for vandet under tapningerne, hvilket er en fordel ved volumenmåling fordi store flow ændringer giver usikkerhed på volumenmålingen.

Cirkulationskredsen

Væsken i cirkulationskredsen cirkuleres af en kraftig pumpe P3. Denne pumpe gør det muligt at cirkulere med flow helt op til 5 m³/h. Vandet ledes igennem en pladevarmeveksler V3 hvor der, hvis det ønskes, sker en afkøling af cirkulationsvandet. Som kølemedie anvendes koldt brugsvand, se figur 11.

Måleudstyr

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

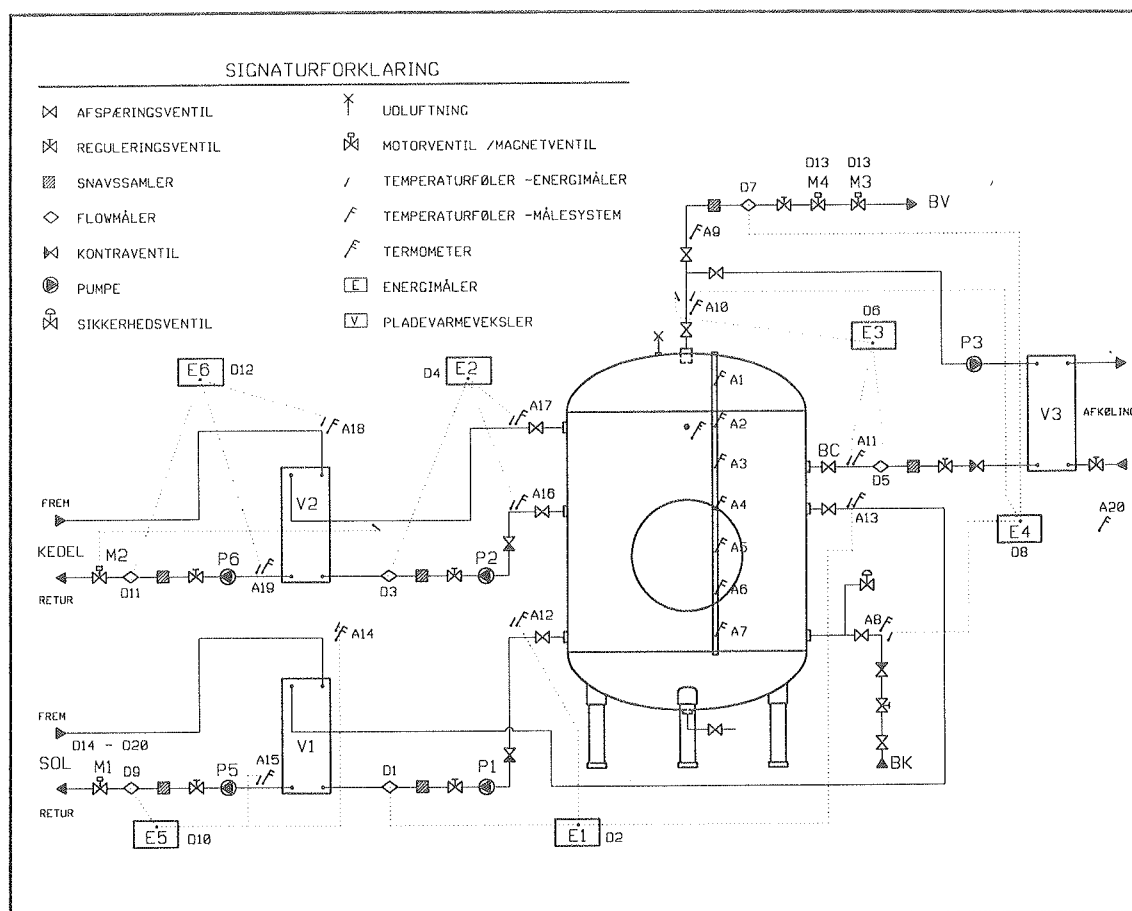
Der er til lejligheden udviklet et EDB-program i programmeringssproget Basic.

Et omfattende programmeringsarbejde har givet et meget fleksibelt EDB-program der foruden at måle, også styrer motor- og magnetventiler, M1, M3 og M4.

Samtlige flow måles med en kombineret flow og energimåler af typen Grundfos EM25. De er på figur 11 nummeret fra E1 til E6. Digitale signaler fra disse energimålere føres til PC'eren der omsætter signalerne til flow i de forskellige kredse.

Det har været et ønske at opnå en meget præcis energimåling af varmestrømme - til og fra beholderen. Derfor bliver temperaturdifferencer mellem ind og udløb målt med termosøjler med 5 følerelementer.

Samtlige temperaturmålinger måles med kobber-konstantan termoelementer, type T T. Disse målepunkter er på figur 15 angivet med A1 til A20. Digitale måle eller styrepunkter er på figur 15 angivet med D1 til D20.



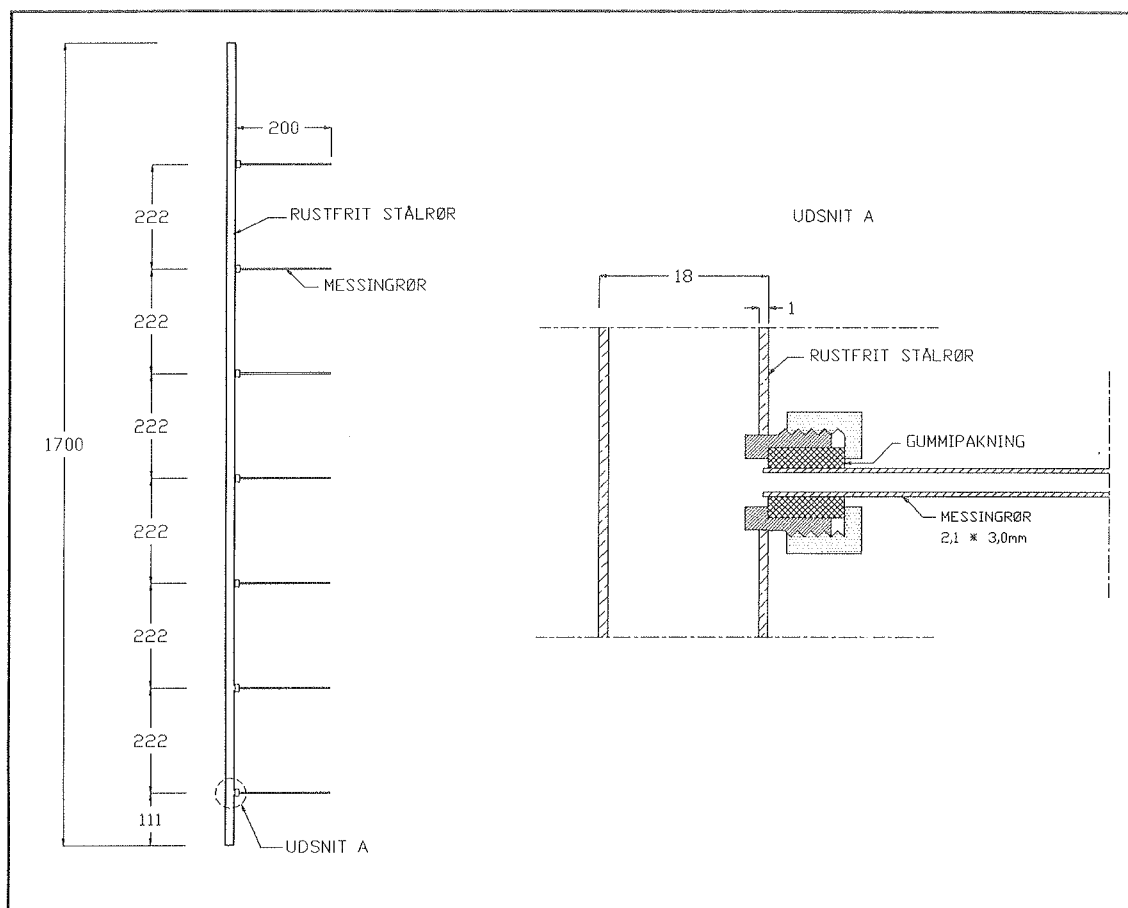
Figur 15. Målepunktplaceringer i forsøgsopstilling.

Det er vigtigt at få temperaturforholdene inde i beholderen målt meget præcist. Der er i alt målt 7 steder, nummeret fra A1 til A7 på figur 15. I de efterfølgende måleresultater er A1 ikke vist. A2 til A7 nummeres i det efterfølgende 1 til 6.

Følgende to forhold er blandt de vigtigste når et målerør skal udformes:

- måle temperaturen præcist i et bestemt niveau.
- kunne holde til et vandtryk på 6 bar.

Udfra disse to forhold blev målerøret udformet som vist på figur 16.



Figur 16. Målerør til måling af beholdertemperaturer.

Måleresultater

Der er udført forsøg med det 2000 l store varmelager for at få belyst hvordan lageret opfører sig under forskellige driftssituationer. Der er specielt udført mange forsøg der viser cirkulationsledningens indflydelse på temperaturlagdelingen i lageret.

Måleresultaterne stammer fra over 50 forsøg af en samlet varighed på over 1000 timer. Der er udført målinger hvert 20. sekund som er midlet til værdier enten over 2 eller 5 minutter.

Måleresultaterne i det følgende viser blandt andet følgende:

- beholderens varmetab
- tapning fra beholderen

- kedelopvarmning
- cirkulationsledningens indflydelse på temperaturlagdelingen i beholderen
- solvarmeopvarmning

For at belyse cirkulationsledningens indflydelse på temperaturlagdelingen er der udført forsøg med 5 forskellige indløbsudformninger.

1. 2" direkte indløb (reference)
2. 2" bøjning
3. 2" T-stykke
4. 2" perforeret rør
5. 5/4" direkte indløb

Udformningen af studserne er beskrevet detaljeret senere i dette afsnit.

Varmetab fra beholderen

Beholderen er isoleret med 80 mm blødt skum, med et ydre dæklag af vaskbart PVC. Isoleringen har en varmeledningsevne på $0,036 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ved en temperatur på 20°C .

Isoleringen tåler en konstant beholdertemperatur på 95°C , men er i stand til at tåle kortvarige stigninger op til 110°C .

Varmetabet fra beholderen blev målt ved at holde beholderen opvarmet til 65°C , og måle varmetabet til omgivelserne der havde en temperatur på ca. 20°C . Varmetabskoefficienten blev målt til $11,2 \text{ W/K}$.

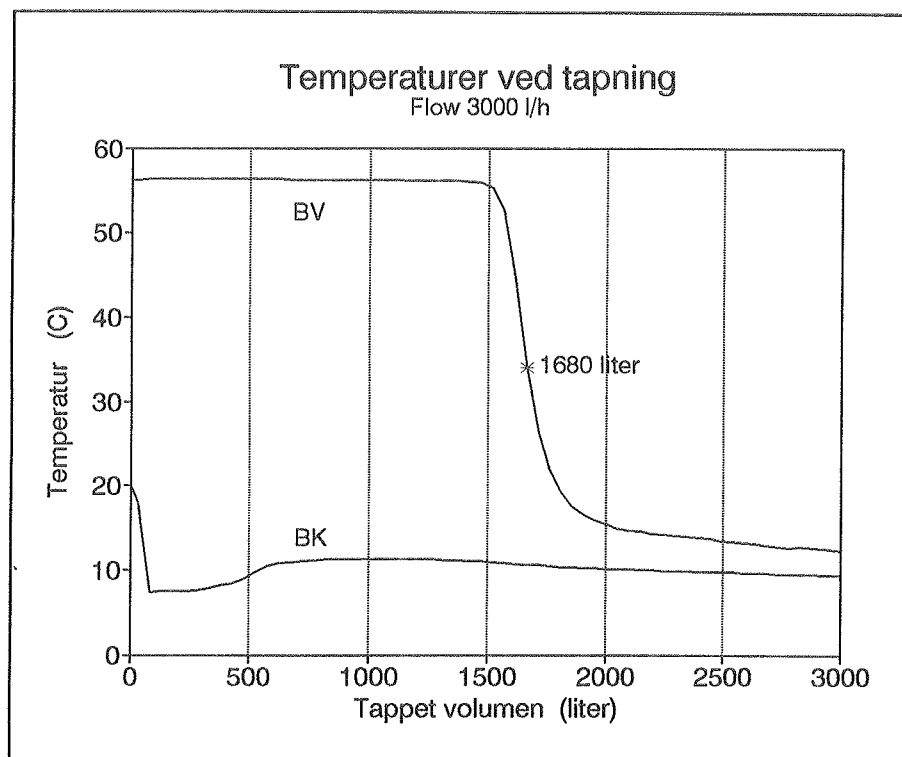
Ved en beholdertemperatur på 55°C og en omgivelsestemperatur på 20°C bliver varmetabet ca. 400 W .

Tapning fra beholderen

Der er udført tappeforsøg med forskellige tappehastigheder, hvorved det er muligt at se om der sker opblanding mellem det kolde vand der tilføres i bunden og det varme vand i beholderen.

Forsøgene er udført ved at opvarme beholderens effektive volumen til ca. 56°C . Beholderens effektive volumen er summen af V-kedel og V-sol, og andrager 1680 l . Under tapningen måles temperaturen af det tappede vand. Der er ikke under tapningerne tilført energi til beholderen.

Der er udført forsøg med en koldt vandstilførsel på 2" og direkte indløb, det vil sige uden at ændre væskestrålen på vej ind i beholderen. Flowet under tapningerne har været 600 l/h og 3000 l/h . På figur 17 er vist tappeforsøget med 3000 l/h .

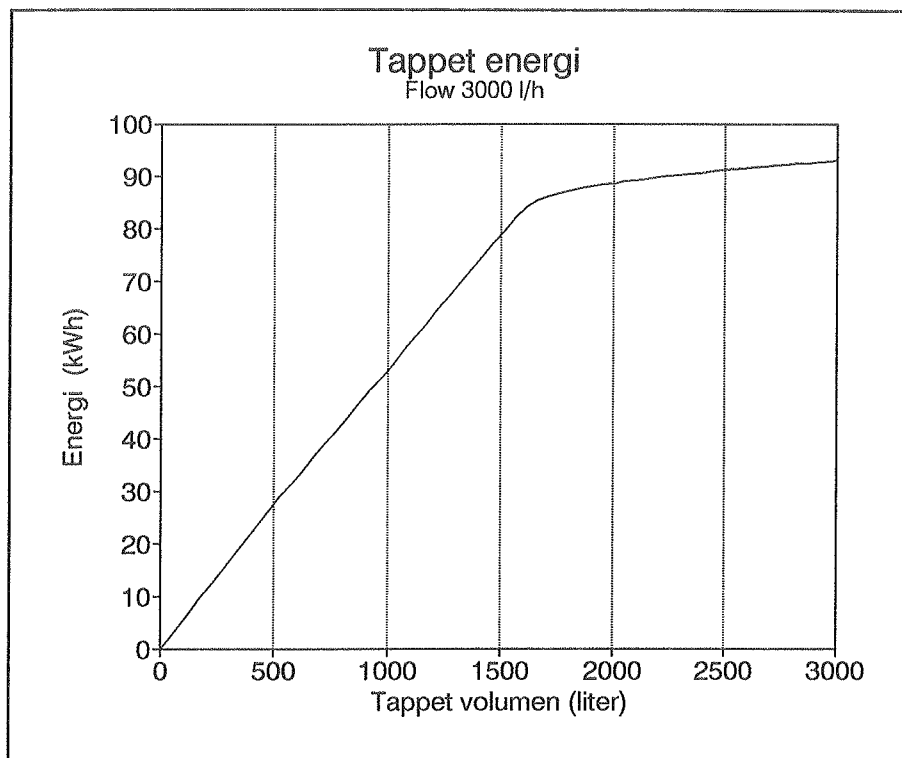


Figur 17. Tapning fra beholder.

Temperaturen af det kolde vand (BK) er ca. 10 °C, dog lidt varmere i begyndelsen på grund af stillestående vand i indendørs rør. Temperaturen af det varme brugsvand (BV) holder sig næsten konstant indtil ca. 1500 l hvorefter det falder drastisk. Det betyder at ca. 90 % af beholderens effektive volumen kan tappes med konstant temperatur. Dette viser at opblandingen under tapningen kun foregår i et meget begrænset omfang.

Disse målinger underbygges af tappeforsøget med et flow på kun 600 l/h. Her er temperaturforholdene praktisk taget identiske med figur 17.

Den opsummerede energimængde der tappes fra lageret er vist på figur 18.



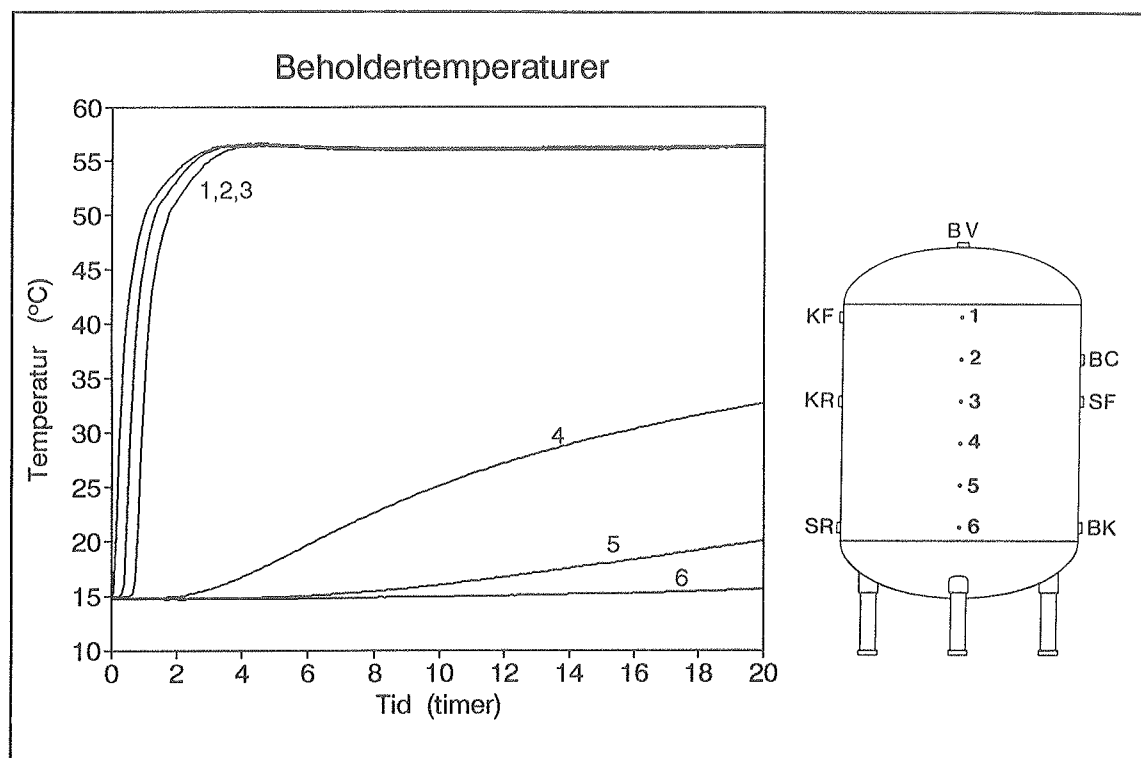
Figur 18. Tappet energi fra lageret

Ved 1500 l er der tappet ca. 80 kWh med en middeleffekt på ca. 160 kW. Ved 3000 l er der tappet en energimængde på i alt ca. 93 kWh.

Kedelopvarmning

Det skal undersøges om kedelopvarmningen giver en tilfredsstillende temperaturlagdeling i beholderen og om større flow i kedelkredsen giver anledning til opblanding i beholderen.

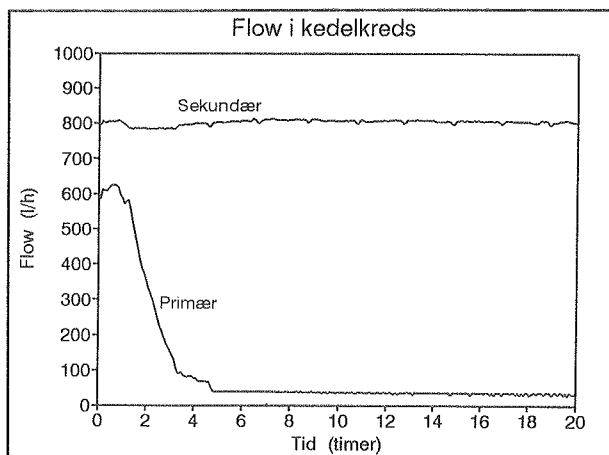
Kedelopvarmning sker med ca. 800 l/h og en opvarmning af vandet til ca. 55 °C. Under denne opvarmning er temperaturforløbet i beholderen som vist på figur 19.



Figur 19. Beholdertemperaturer under kedelopvarmning.

Forsøgets varighed er 20 timer og hele lageret har en begyndelsestemperatur på ca. 15°C. I de første fire timer sker der en kraftig temperaturstigning i toppen af lageret. Derefter er temperatur 1, 2 og 3 konstant på ca. 56 °C. Temperaturmåling 4, 5 og 6 stiger kun lidt hvilket giver en meget god temperaturlagdeling i lageret. Stigningen skyldes hovedsagelig varmeledning i vandet og stålbeholdervæggen.

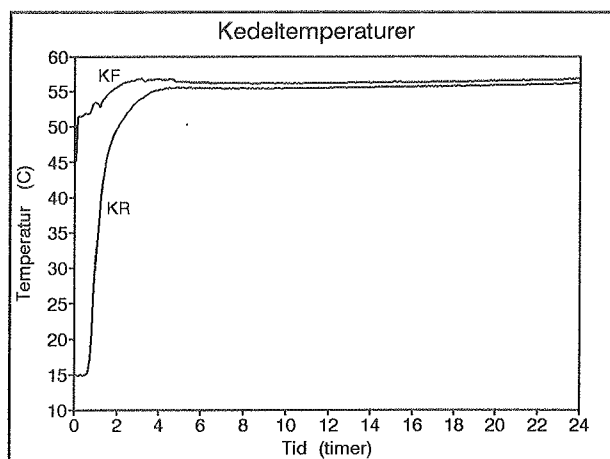
Temperaturforhold, flow og effektilførsel under kedelopvarmningen er vist på figur 20 .



Flowet i den sekundære kedelkreds er ca. 800 l/h.

Flowet i den primære kedelkreds varierer for at holde en indløbstemperatur på ca. 55 °C til beholderen.

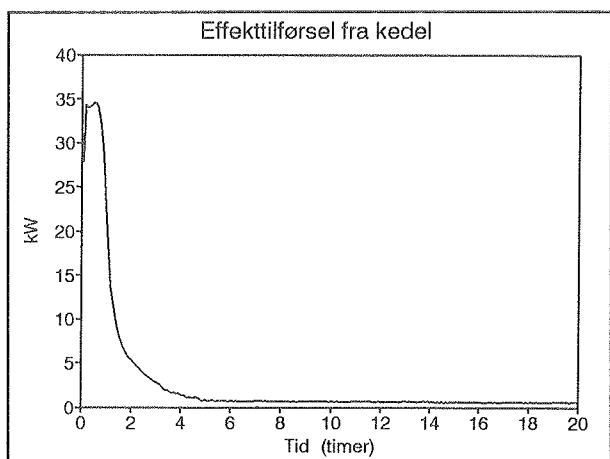
a. Flow i kedelkreds.



Indløbstemperaturen til beholderen (KF) skulle være ca. 55 °C men er lidt lavere i begyndelsen når opvarmningen er stor.

Udløbstemperaturen fra beholderen (KR) følger næsten beholdertemperaturen 3 på figur 19.

b. Temperaturer ind og ud af beholderen.



Effekttilførslen til beholderen fra kedlen er ca. 34 kW i begyndelsen hvorefter den aftager.

I slutningen af forsøget dækker effekttilførslen fra kedlen kun varmetab fra beholderen, og varme der ved varmeledning føres længere ned i beholderen.

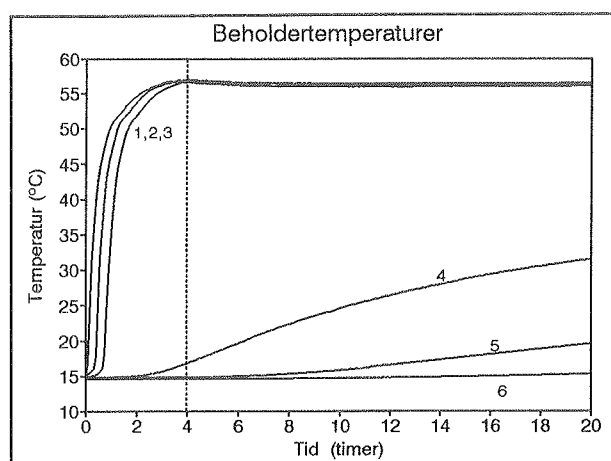
20 c. Effekttilførsel.

Figur 20. Flow, temperaturforhold og effekttilførsel under kedelopvarmning.

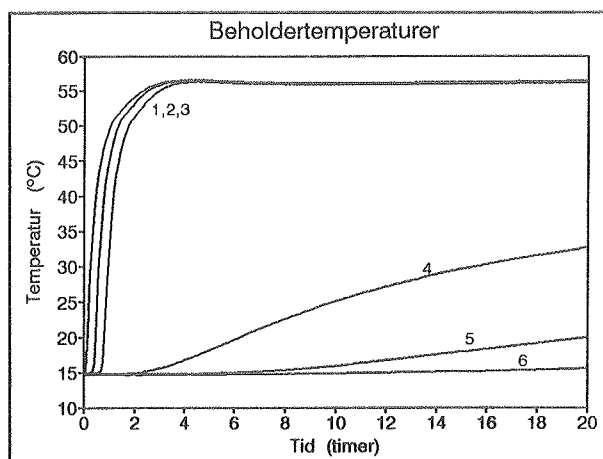
Der er udført kedelopvarmning med forskellige flow i den sekundære kedelkreds:

1. ca. 400 l/h
2. ca. 800 l/h (reference)
3. ca. 1600 l/h
4. ca. 2400 l/h

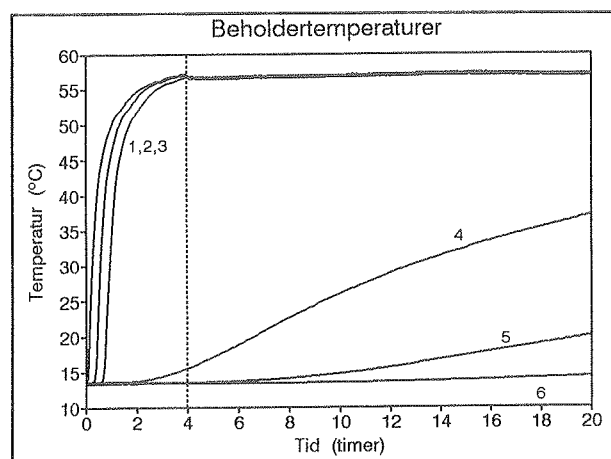
Temperaturforhold i beholderen ved de forskellige flow er vist på figur 21. Studsudformningen er i alle tilfælde 2" direkte indløb. Ligeledes er de fire første timer opvarmet med 800 l/h, hvorefter flowet er ændret, til det givne flow. Herved opnås en ensartet begyndelsessituation efter 4 timer.



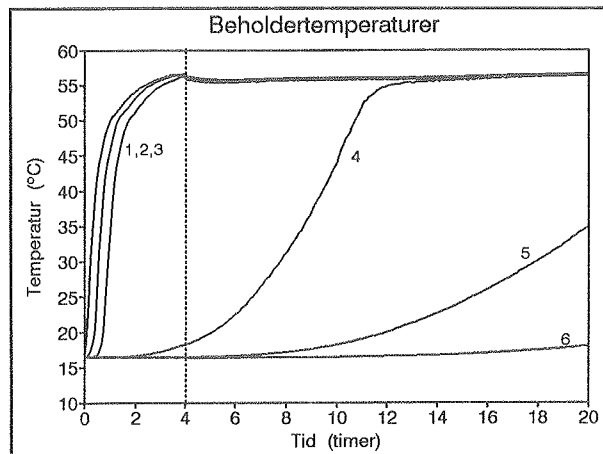
a. flow ca. 400 l/h



b. flow ca. 800 l/h (ref.)



c. flow ca. 1600 l/h



d. flow ca. 2400 l/h

Figur 21. Temperaturlagdeling i beholder under kedelopvarmning

Figur 21 viser at ved flow under 1600 l/h sker der næsten en ensartet temperaturudvikling i lageret. Her tænkes specielt på temperaturerne 4, 5 og 6 som viser opblandings størrelse. Ved 2400 l/h stiger specielt temperatur 4 meget, og opnår efter ca. 12 timer samme temperatur som toppen af lageret. For flow over ca. 1600 sker der derved en opblanding i lageret som dog må karakteriseres som moderat ved 2400 l/h, men som utvivlsomt bliver større ved større flow. Et kedelflow på 2400 l/h svarer til en bebyggelse på ca. 100 lejligheder. Det har dog ikke været muligt at måle ved større flow end 2400 l/h i kedelkredsen på grund af pumpens kapacitet.

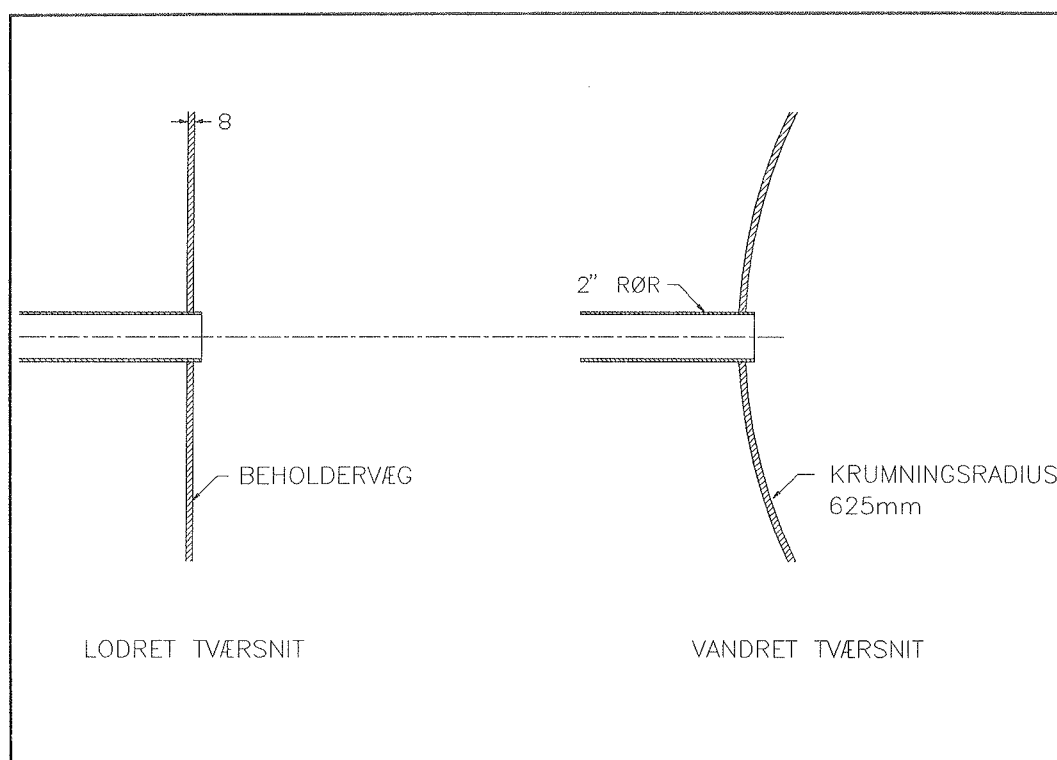
Cirkulationsledning

Cirkulationsledningens indflydelse på temperaturlagdelingen er forsøgt belyst ved tre parametervariationer.

1. flow i cirkulationsledningen
2. udformning af cirkulationsindløb til beholderen
3. varmetab fra cirkulationsledningen

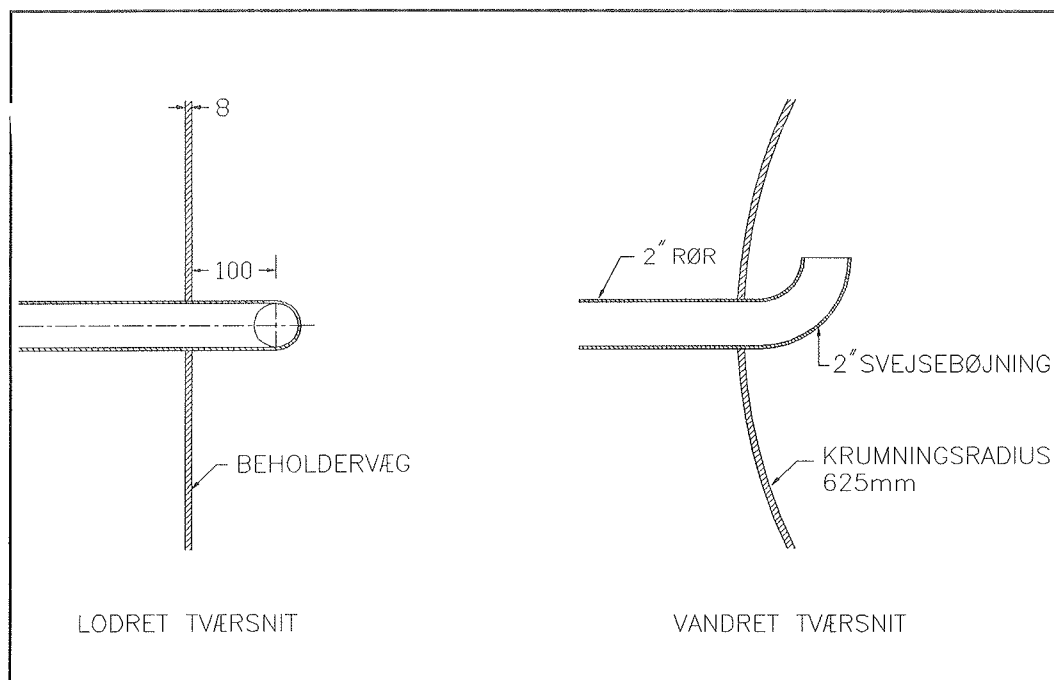
Flow i cirkulationsledningen er varieret mellem 0 og 5000 l/h. Der er anvendt fem forskellige cirkulationsindløb og varmetabet fra cirkulationsledningen er varieret mellem 0 og 10 kW.

Udformningen og dimensioner af cirkulationsindløb er vist på figur 22, 23, 24, 25 og 26.



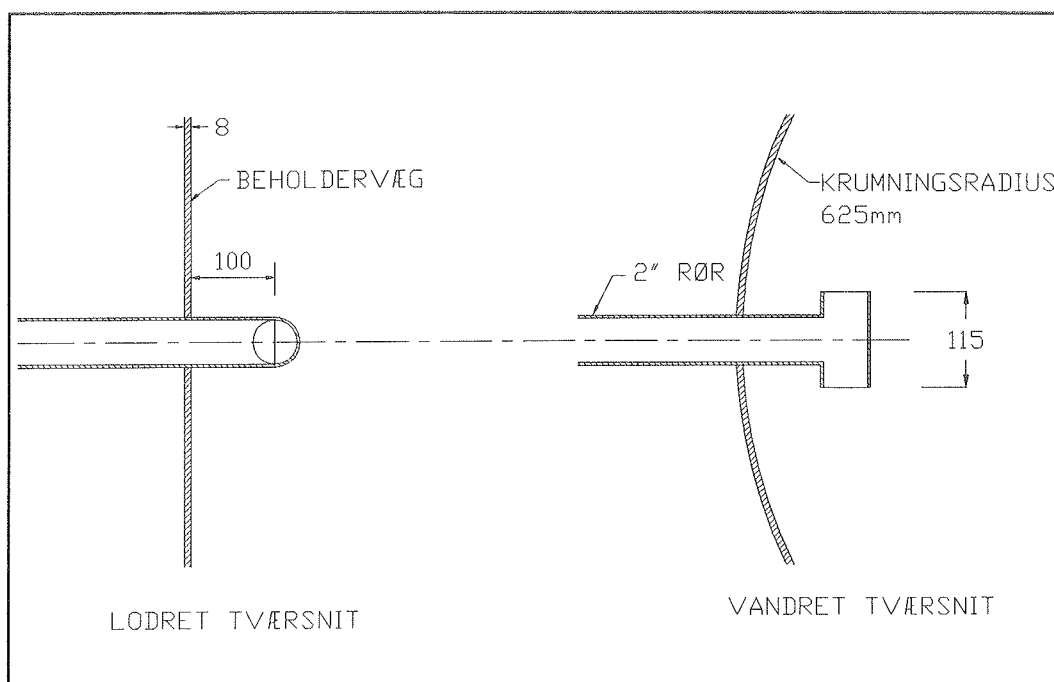
Figur 22. 2" direkte indløb.

Ved direkte indløb føres vandet direkte ind i beholderen. Denne løsning er den mest enkle - og billigste. Et 2" rør har en indvendig diameter på 53 mm.



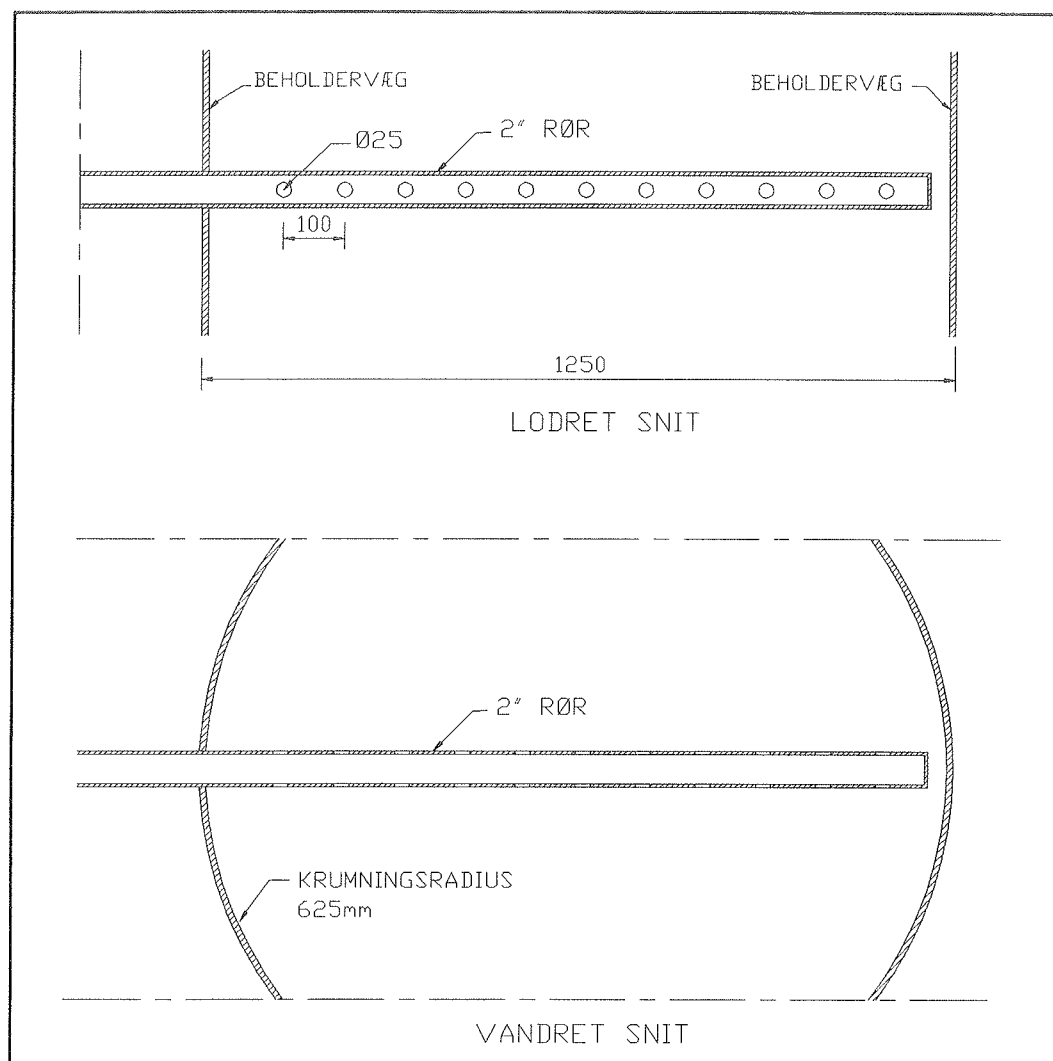
Figur 23. 2" bøjning.

Ved bøjningen ledes cirkulationsvandet vandret ind i beholderen langs beholdervæggen. Denne løsning er ofte brugt og betragtes som velegnet blandt en del beholderfabrikanter.



Figur 24. 2" T-stykke.

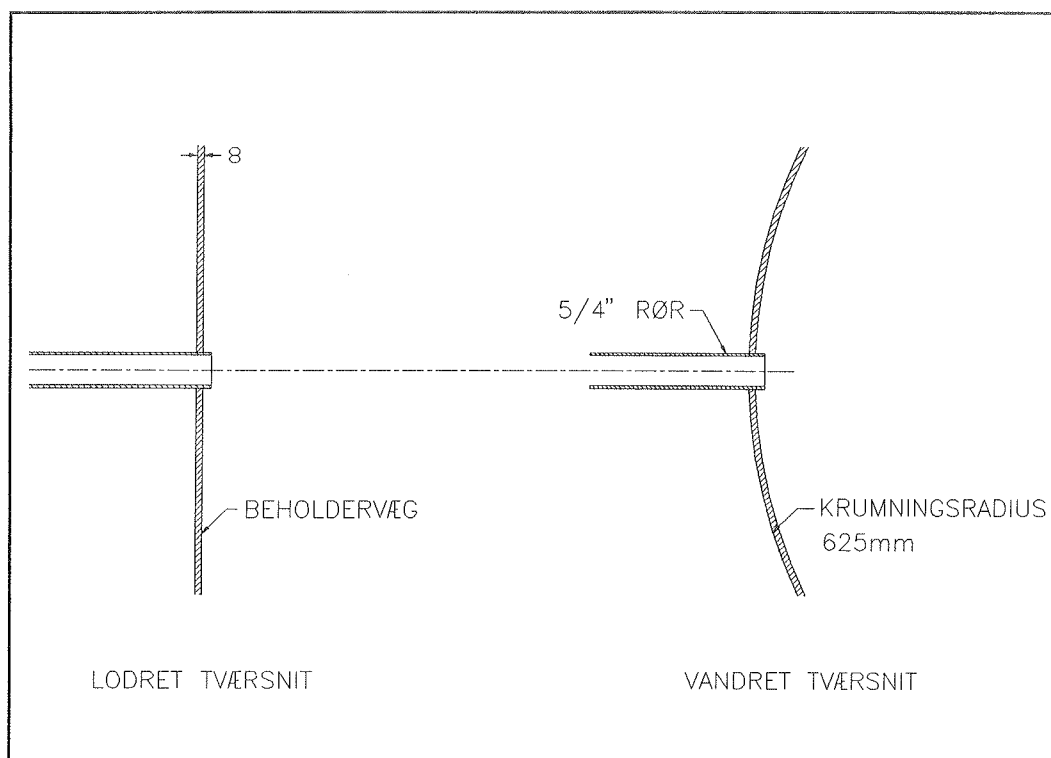
Ved T-stykket ledes cirkulationsvandet vandret ud langs beholdervæggen, men kun med den halve hastighed i forhold til direkte indløb og bøjningen.



Figur 25. 2" perforeret rør.

Det perforerede rør har fået boret 22 huller med et samlet tværsnitsareal der er 5 gange større end tværsnitsarealet på et 2" rør. Ved denne udformning ledes vandet vandret ud i beholderen, og det er et håb at væskehastigheden fra cirkulationsledningen bliver så lille at det er muligt at undgå opblanding, selv ved store flow.

Den sidste undersøgte studsudformning er et 5/4" direkte indløb, med en indvendig diameter på 36 mm. Den har et tværsnitsareal på kun 46 % af et 2" rør.

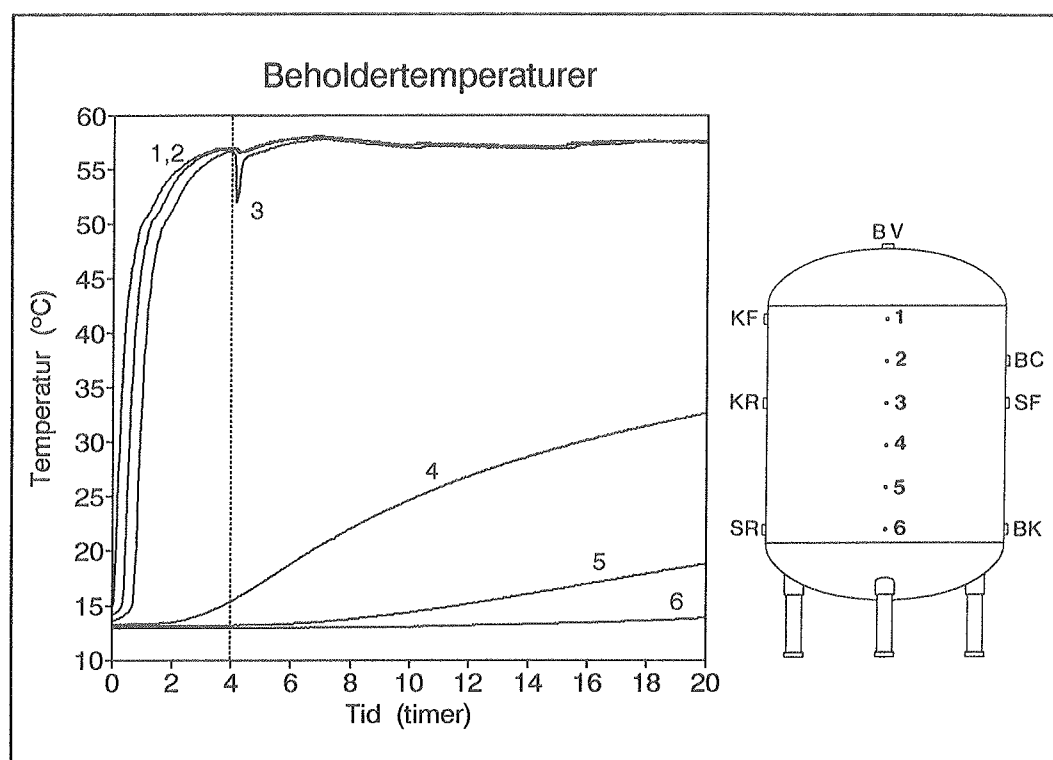


Figur 26. 5/4" direkte indløb.

Hvis ikke andet er nævnt vil kedelopvarmningen opvarme beholderen med et flow på ca. 800 l/h i hele forsøgsperioden der strækker sig over 20 timer. Cirkulationsledningen startes først efter fire timer hvor lagerets øverste del er opvarmet til ca. 55 °C. Alle studse har 2" direkte indløb. Indløbsstudsene til kedelopvarmning har samme indløbsudformning som cirkulationsindløbet.

Ved et flow på ca. 900 l/h i cirkulationsledningen er der udført tre forsøg med forskellige varmetab fra cirkulationsledningen. Disse forsøg er vist på figur 27, 28 og 29.

Figur 27 viser temperaturlagdelingen i lageret, hvor der ikke er varmetab fra cirkulationsledningen. Det vil sige at varmt vand tages fra toppen af beholderen og føres vandret ind i midten af det kedelopvarmede volumen uden temperaturændring.

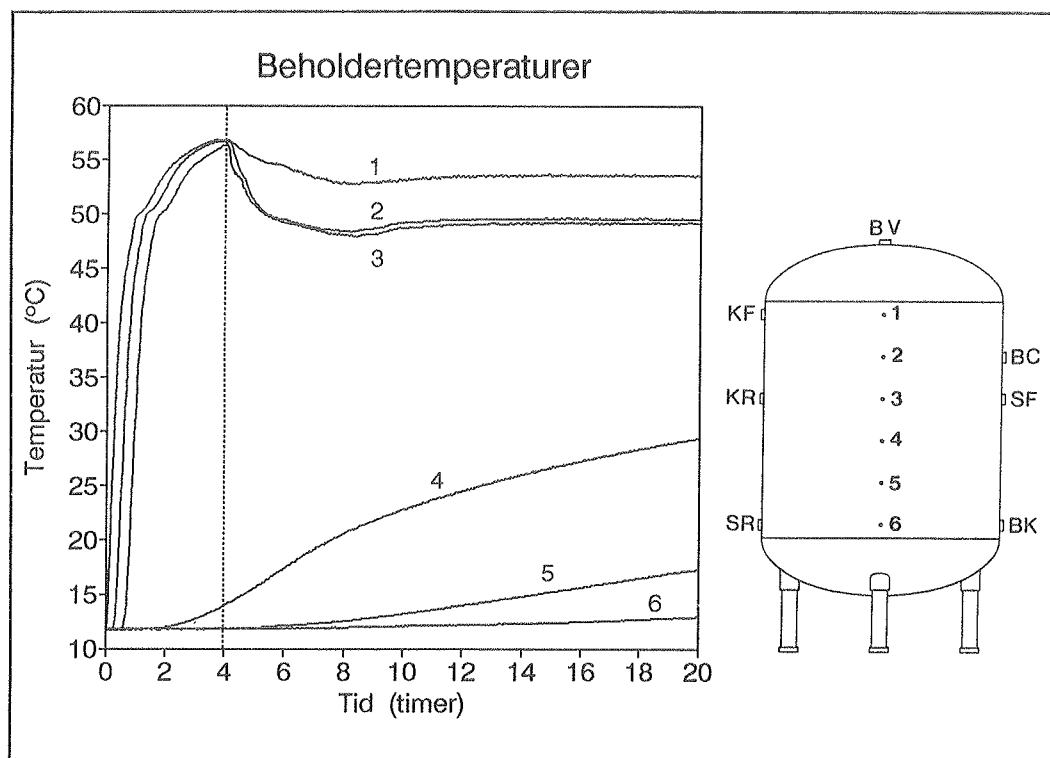


Figur 27. Cirkulation med ca. 900 l/h uden varmetab.

Temperaturforløbet i beholderen ligner meget temperaturforløbet uden cirkulation, se figur 19. Efter fire timer hvor cirkulationsledningen startes falder temperaturen i lag 3 kortvarigt med ca. 5 K.

Dette temperaturfald skyldes at ca. 20 °C varmt vand fra cirkulationsledningen ledes ind i beholderen indtil cirkulationsledningens volumen er udskiftet med varmt vand. Som det ses har temperaturfaldet ingen indflydelse på temperaturlagdelingen nedenunder. Det kan konkluderes, at temperaturlagdelingen ikke influeres nævneværdigt af et cirkulationsflow på 900 l/h uden afkøling.

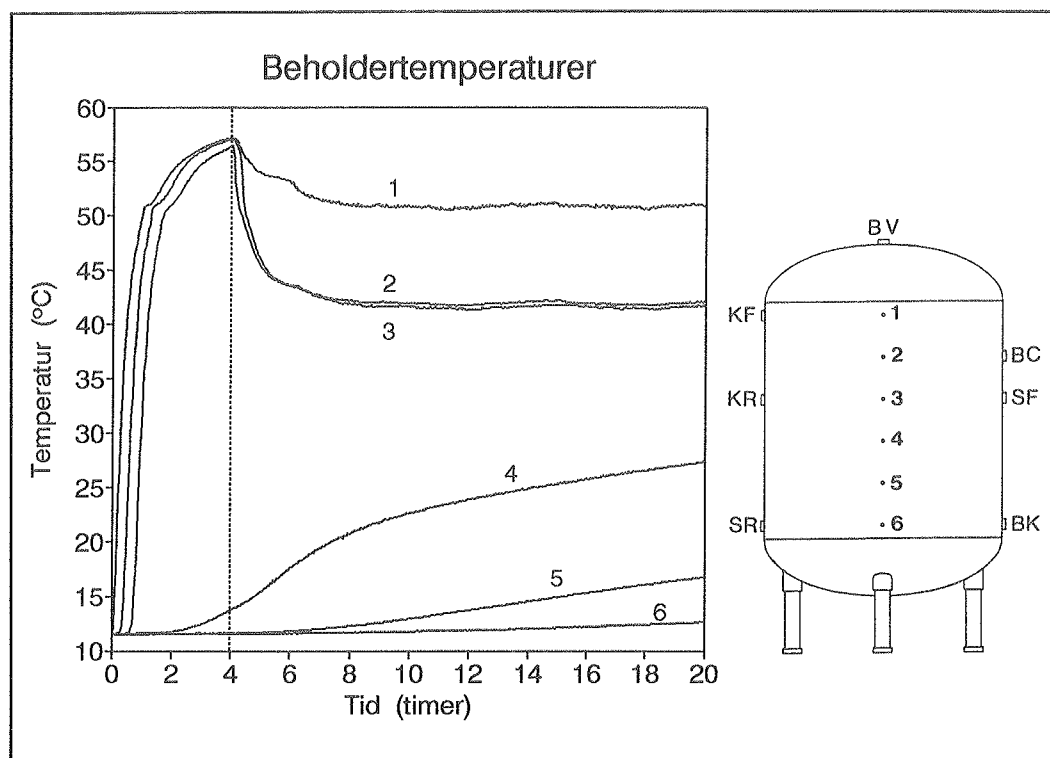
Nu ændres varmetabet fra cirkulationsledningen til ca. 5 kW, hvilket svarer til en afkøling på ca. 5 K.



Figur 28. Cirkulation ca. 900 l/h med ca. 5 kW varmetab.

Efter fire timer forårsager cirkulationsledningen et temperaturfald i den øverste del af beholderen. Målepunkt 2 ligger på samme niveau som cirkulationsledningsindløbet hvilket medfører en ca. 5 K lavere temperatur end temperatur 1. Temperatur 4, 5 og 6 influeres stadig ikke nævneværdigt af cirkulationsledningsflowet.

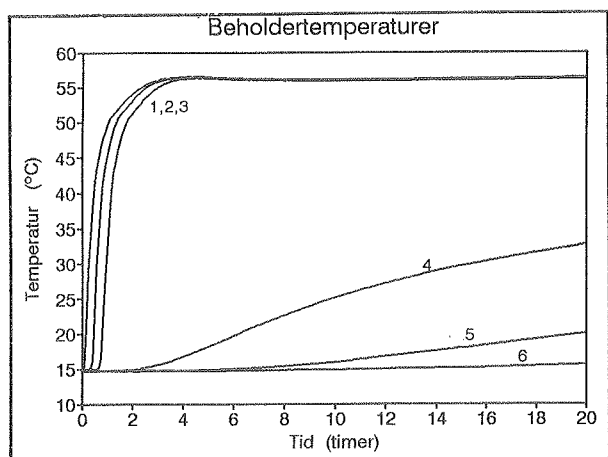
Igen ændres varmetabet fra cirkulationsledningen og nu til ca. 10 kW.



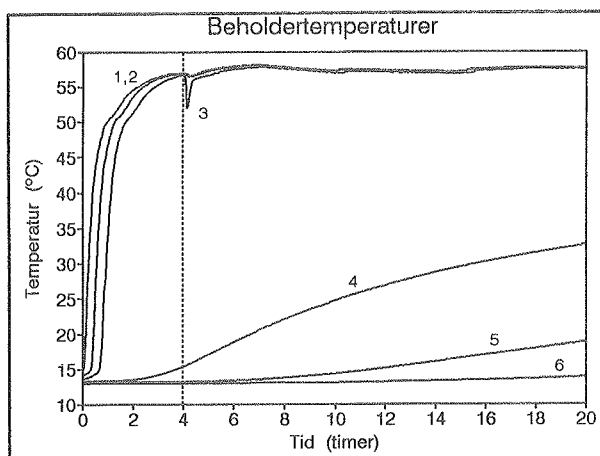
Figur 29. Cirkulation ca. 900 l/h med ca. 10 kW varmetab.

Endnu engang påvirker cirkulationsledningen kun temperaturerne i den øverste del af lagret.

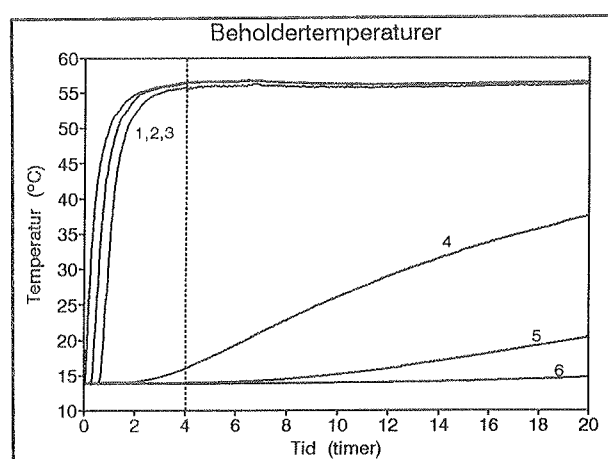
For at give et klart overblik over cirkulationsledningens indflydelse på temperaturlagdelingen vises samtlige cirkulationsforsøg med 2" direkte indløb uden afkøling. Disse flow afhængige temperaturforhold er anvendt som reference overfor temperaturforhold forårsaget af andre cirkulationsindløb. Temperaturforløbene vises på figur 30.



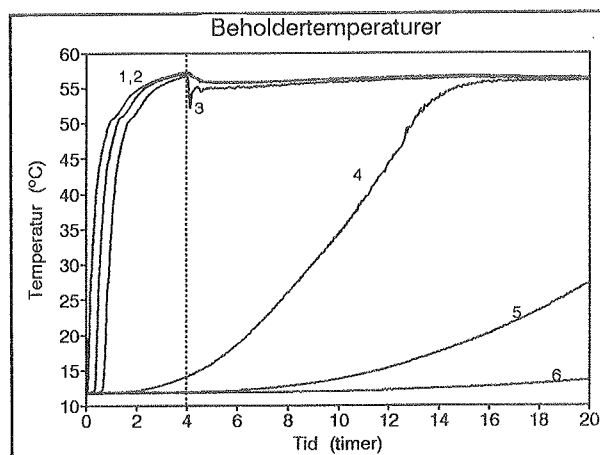
a. cirkulation 0 l/h



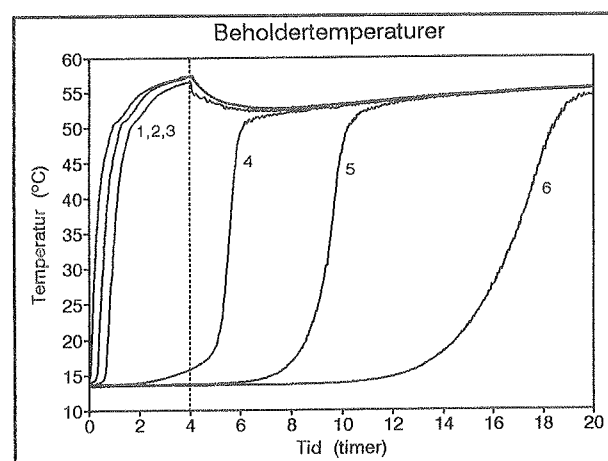
b. cirkulation ca. 900 l/h



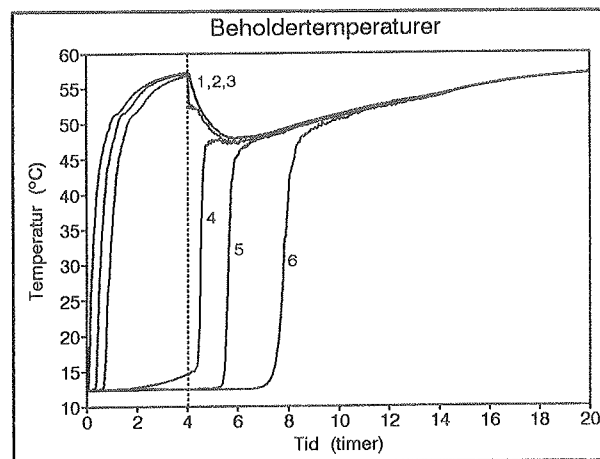
c. cirkulation ca. 1800 l/h



d. cirkulation ca. 2400 l/h



e. cirkulation ca. 3600 l/h



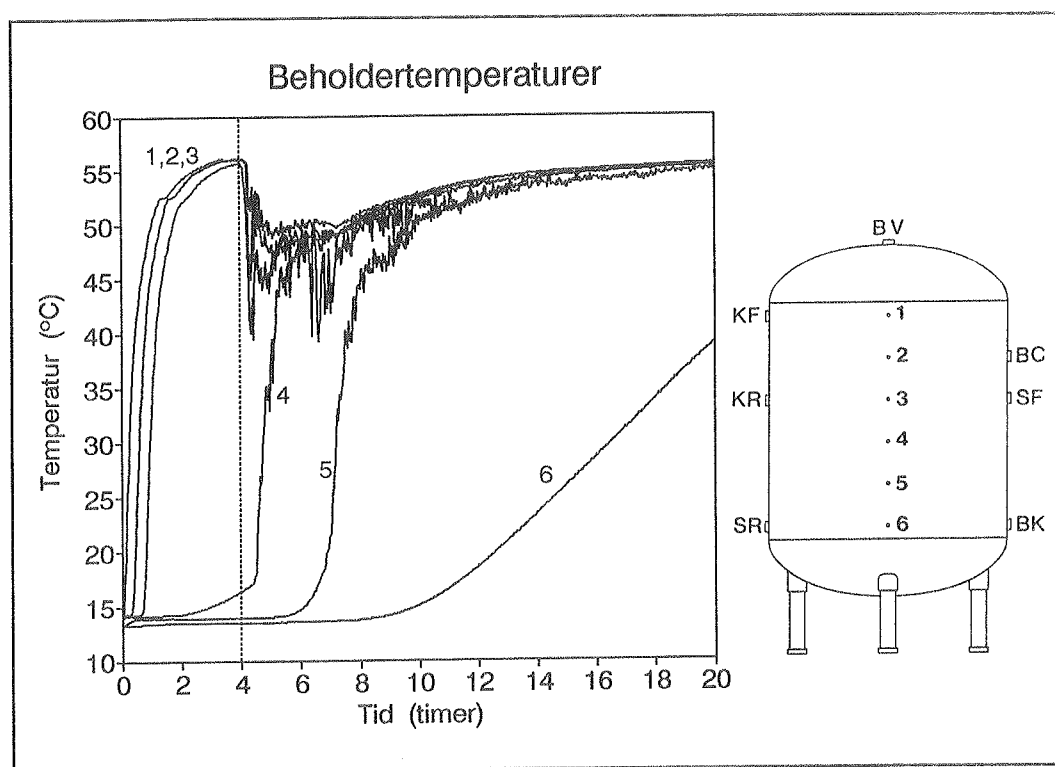
f. cirkulation ca. 5000 l/h

Figur 30. Cirkulation gennem 2" direkte indløb.

Figur 30 viser at cirkulationsflowet gennem beholderen forårsager en opblanding i lageret ved flow større end ca. 1800 l/h. Det er tankevækkende at temperaturforløbet i lageret ved et cirkulationsflow på ca. 2400 l/h (se figur 30 d) kun adskiller sig meget lidt fra en kedelopvarmning på ca. 2400 l/h (se figur 21 d).

Figur 30 f viser en meget kraftig opblanding i lageret. Efter 4 timers cirkulationsdrift med ca. 5000 l/h er lageret totalt opblandet. Karakteristisk ved temperaturforløbet for 4, 5 og 6 er en meget brat temperaturstigning. Dette tyder på, at det kedelopvarmede vand arbejder sig hurtigt nedad.

Der er herefter påsat en bøjning på cirkulationsindløbet, se figur 23. Forsøg er udført med cirkulationsflow på ca. 900 l/h, 2400 l/h og 3600 l/h. Ved et flow på ca. 900 l/h sker der ikke nogen nævneværdig opblanding. Derimod sker der noget meget iøjenfaldende ved ca. 2400 l/h som vist på figur 31.



Figur 31. Cirkulation ca. 2400 l/h gennem 2" bøjning.

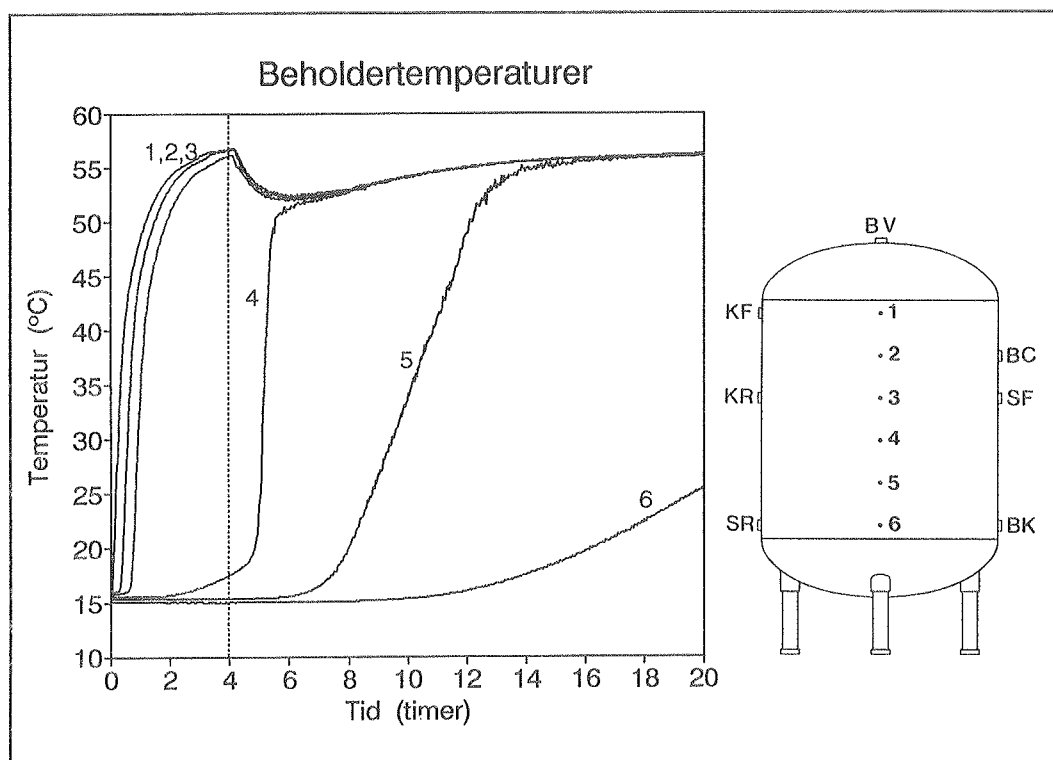
Bøjningen forårsager en meget uheldig opblanding i lageret hvor temperaturen i et givet niveau varierer meget, nogle gange op til ± 5 K indenfor ganske få minutter.

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

Der er udført forsøg, hvor bøjningen er vendt så strømmingen foregår mod uret med samme resultat.

Det er vanskeligt at give en bestemt forklaring på hvorfor bøjningen forårsager denne uheldige opblanding, men en sandsynlig teori er at væskestrømmen sætter hele beholdervolumenet i rotation.

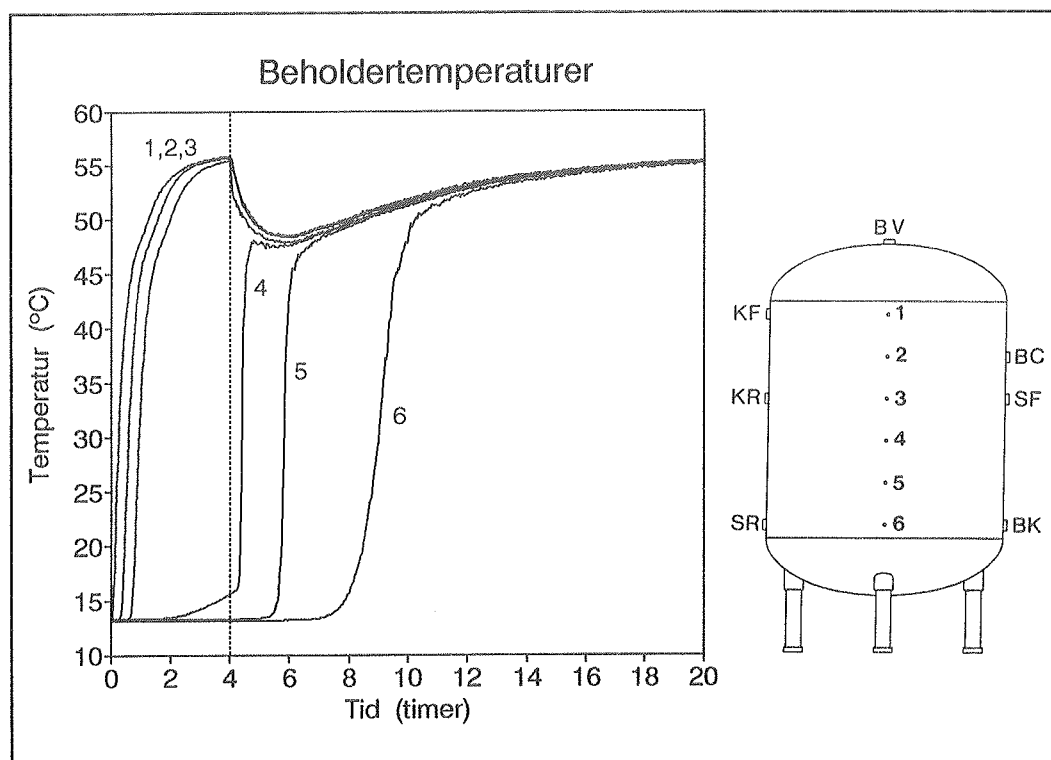
T-stykket har den fordel at det ikke vil forårsage en rotation i beholderen. Desuden vil indstrømningshastigheden kun være halvt så stor, som ved direkte indløb og bøjningen. For T-stykket er der også udført forsøg ved forskellige flow i cirkulationsledningen. På figur 32 ses temperaturlagdelingen ved et flow på ca. 5000 l/h i cirkulationsledningen.



Figur 32. Cirkulation ca. 5000 l/h gennem 2" T-stykke.

Der sker en opblanding i lageret, men den er meget mindre end ved f.eks. direkte indløb. T-stykket har dermed en positiv indvirkning på temperaturlagdelingen.

Det perforerede rør, se figur 25, er udformet således at middelindstrømningshastigheden er 5 gange mindre end ved direkte indløb. I dette forsøg havde kedelopvarmningen 2" direkte indløb. Forsøgene viser at det anvendte perforerede rør ikke nedsatte opblandingen nævneværdigt i forhold til det direkte indløb. Som eksempel er vist et cirkulationsflow på ca. 5000 l/h.

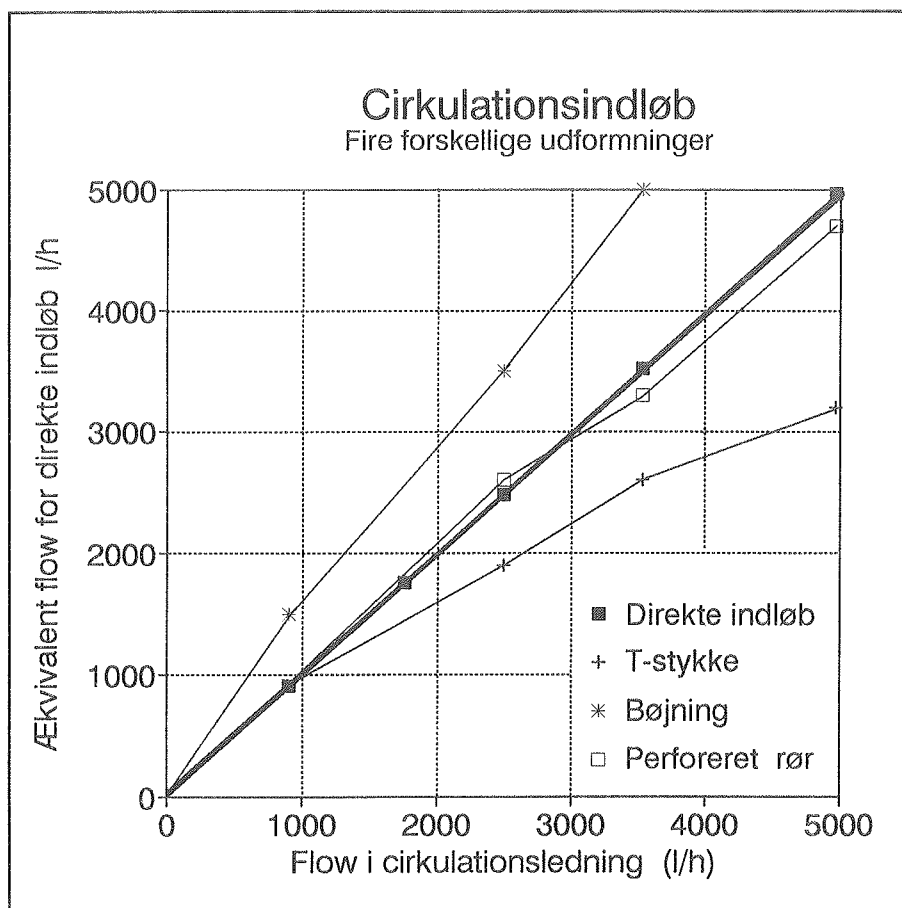


Figur 33. Cirkulation ca. 5000 l/h gennem perforeret rør.

En mulig forklaring kan være en uensartet væskestrøm gennem hullerne. Ved et efterfølgende forsøg viste det sig, at der løb langt mere vand ud gennem hullerne i enden af røret end i starten af røret.

Ved at sammenligne temperaturforholdene i lageret ved forskellige flow og indløbsudformninger er det muligt at danne sig et indtryk af, hvilke indløbsudformninger der nedsætter opblandingen mest muligt.

Figur 34 viser denne sammenligning med 2" direkte indløb som reference.



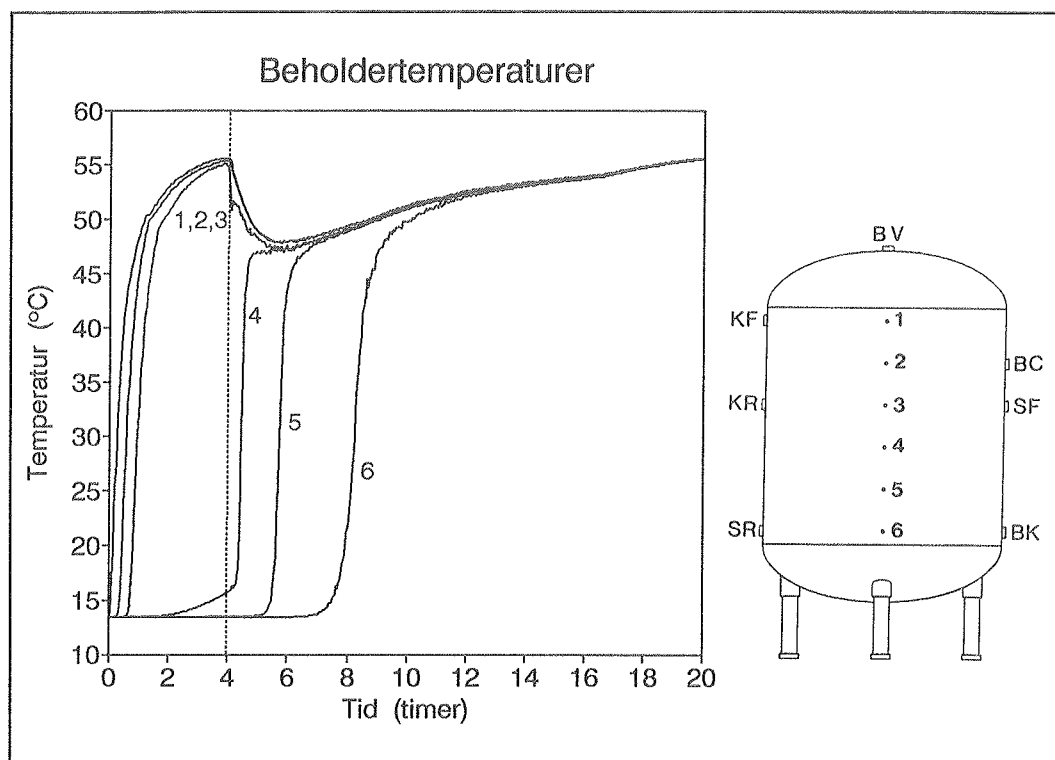
Figur 34. Sammenligning af indløbsudformning for cirkulationsstuds.

X-aksen angiver flowet i cirkulationsledningen, og Y-aksen angiver ækvivalent flow for det direkte indløb. Ved ækvivalent flow forstås det flow i cirkulationsledningen med direkte indløb der giver den samme opblanding som den valgte cirkulationsudformning.

Et eksempel: Ved et flow på 4000 l/h i cirkulationsledningen og anvendelse af et T-stykke vil opblandingen i lageret være af samme størrelse som med et flow på ca. 2800 l/h ved anvendelse af et direkte indløb. Det skal her gøres klart at figur 34 kun gælder for den anvendte 2000 l forrådsbeholder og anvendelse af den givne indløbsudformning. Desuden er forsøgene udført uden afkøling af cirkulationsvandet.

Figur 34 viser at T-stykket opretholder temperaturlagdelingen bedre end det direkte indløb. Dette er dog kun tilfældet for cirkulationsflow over ca. 900 l/h. Det perforerede rør viser overraskende næsten samme opblanding som det direkte indløb. Bøjningen viste sig at være det dårligste af de fire cirkulationsindløb.

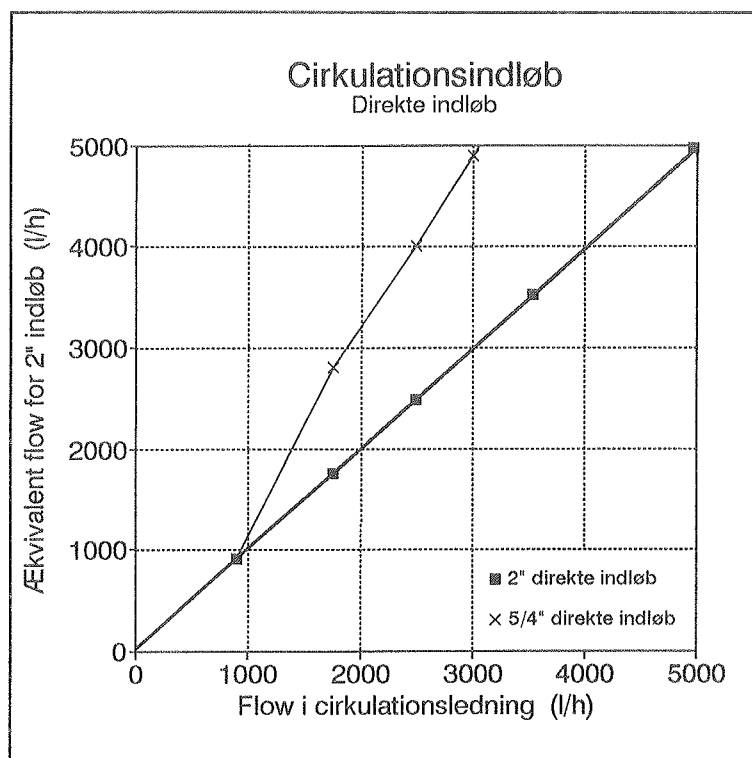
Afslutningsvis er der som cirkulationsindløb anvendt et 5/4" direkte indløb. Et eksempel på temperaturlagdelingen i lageret er vist på figur 35, hvor cirkulationsflowet er ca. 3000 l/h.



Figur 35. Cirkulation ca. 3000 l/h gennem 5/4" direkte indløb.

Temperaturlagdelingen i lageret ødelægges af cirkulationsflowet. Temperaturlagdelingen i lageret har mange lighedspunkter med 2" direkte indløb og et cirkulationsflow på ca. 5000 l/h, se figur 30 f.

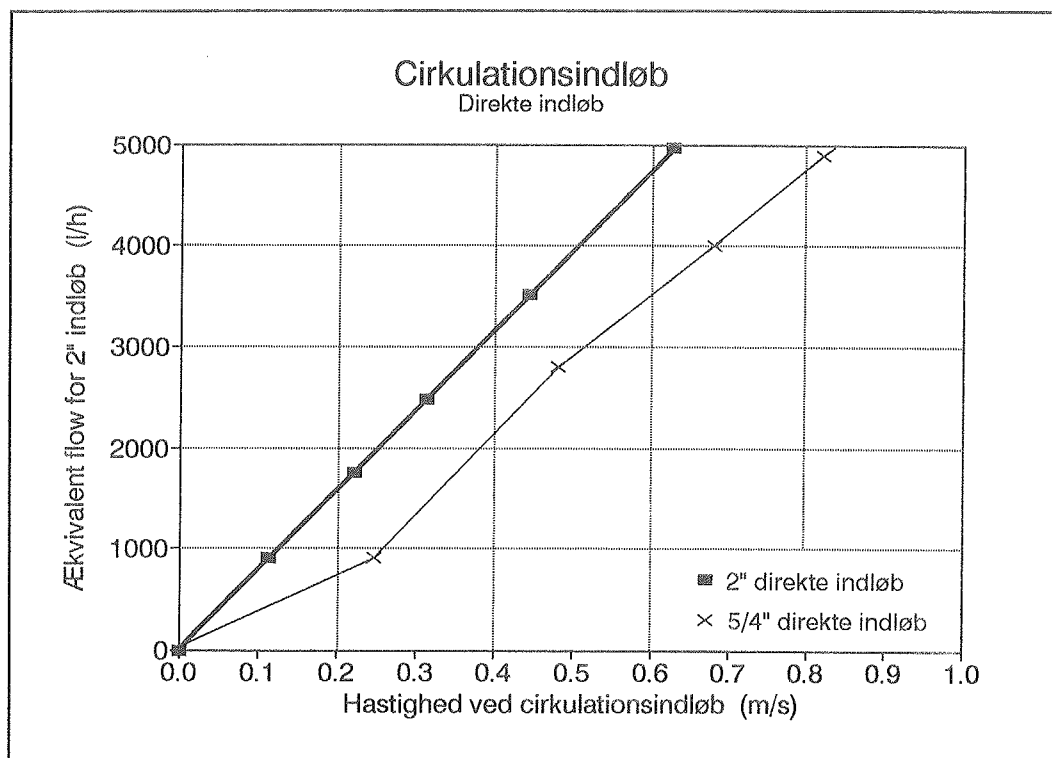
En sammenligning af de to direkte indløb ses på figur 36.



Figur 36. Direkte indløb for cirkulationsledning.

Figur 36 viser at ved flow under ca. 900 l/h er temperaturlagdelingen i beholderen ens for begge indløbsstørrelser. For større flow end ca. 900 l/h opretholder en 2" indløbsstuds temperaturlagdelingen meget bedre end en 5/4" indløbsstuds.

Når indløbshastigheden sammenlignes viser figur 36 og 37 at opblandingen både afhænger af indløbshastigheden af cirkulationsvandet og af volumenstrømmen i cirkulationsledningen.

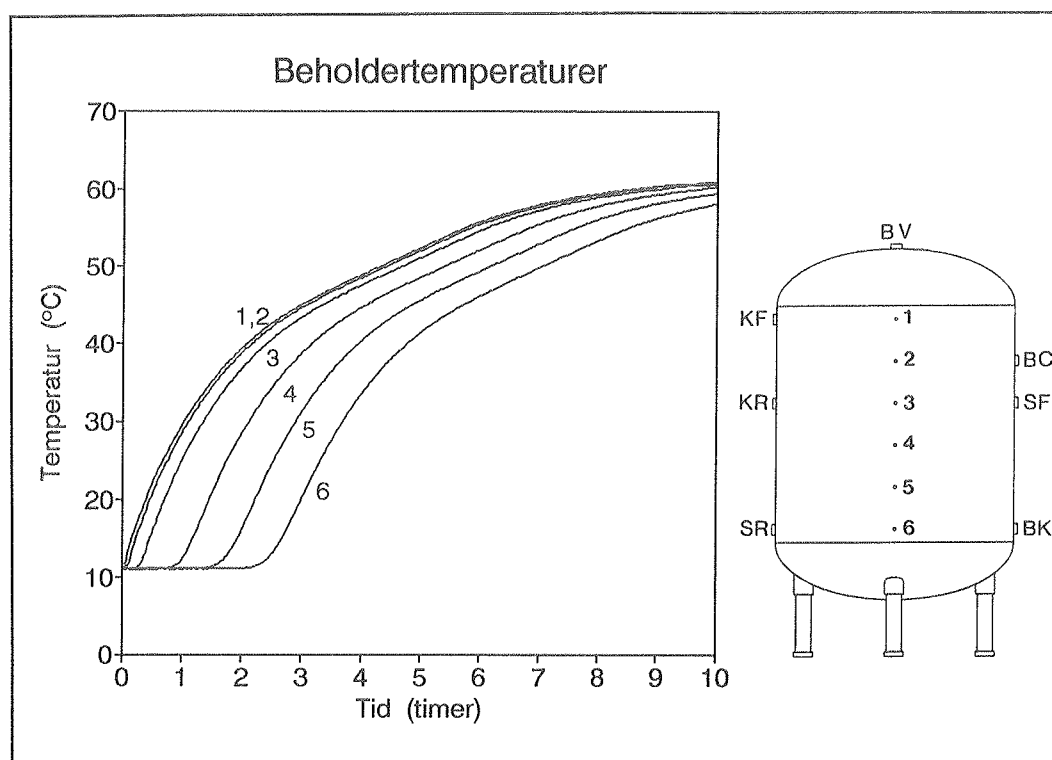


Figur 37. 2" og 5/4" direkte indløb.

Det er bemærkelsesværdigt at de to kurver tilnærmelsesvis er parallelforskudt - for flow større end ca. 900 l/h. Ved en indløbstemperatur på f.eks. 0,4 m/s for 2" direkte indløb er flowet i cirkulationsledningen ca. 3200 l/h. For 5/4" direkte indløb med en indløbshastighed på 0,4 m/s vil cirkulationsflowet give samme opblandingsforhold som 2" direkte indløb ved et flow på ca. 2200 l/h.

Solvarme

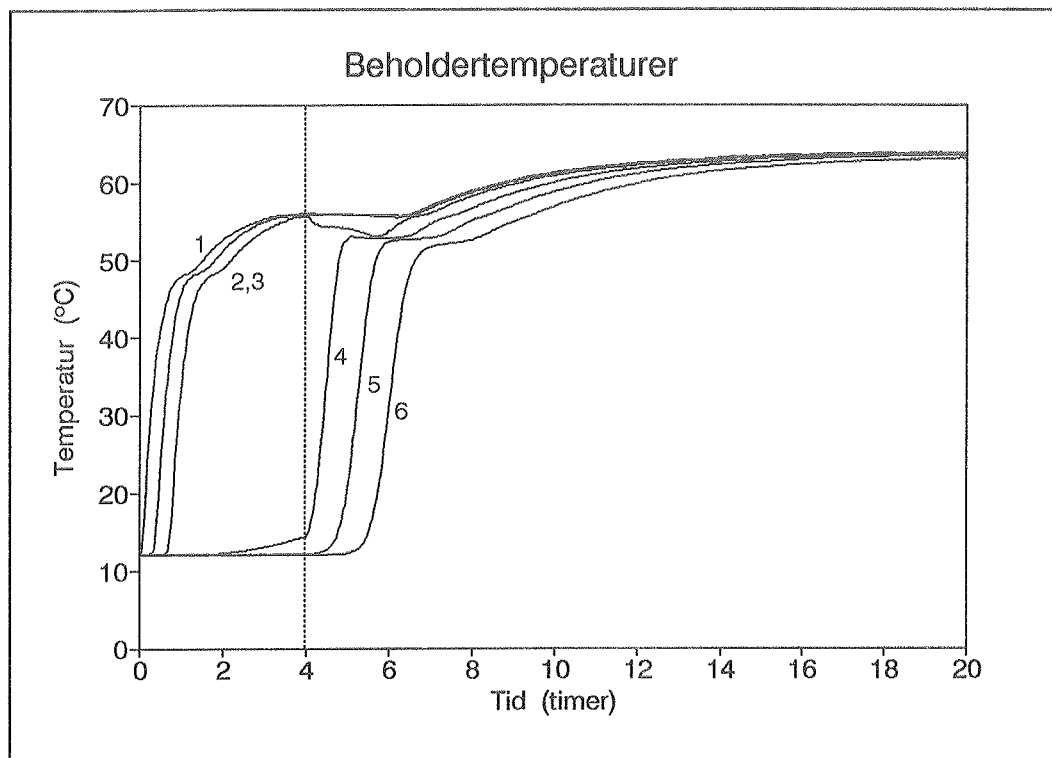
Der er udført forsøg hvor solfangerkredsen er i drift. Figur 38 viser et opvarmningsforløb hvor solfangerkredsen opvarmer beholderen alene. Forsøgets varighed er 10 timer.



Figur 38. Solopvarmning af beholder

Figur 38 viser temperaturlagdelingen i lageret når den sekundære solvarmekreds cirkulerer med et flow på ca. 360 l/h og med en indløbstemperatur på ca. 60 °C. Over indløbsstudsene (1, 2 og 3) sker der ikke nogen nævneværdig temperaturlagdeling, hvorimod 4, 5 og 6 viser en stor temperaturlagdeling. Temperaturen 6 forbliver konstant de første ca. 2,5 timer.

Kedelopvarmning kombineret med solopvarmning ses på figur 39.

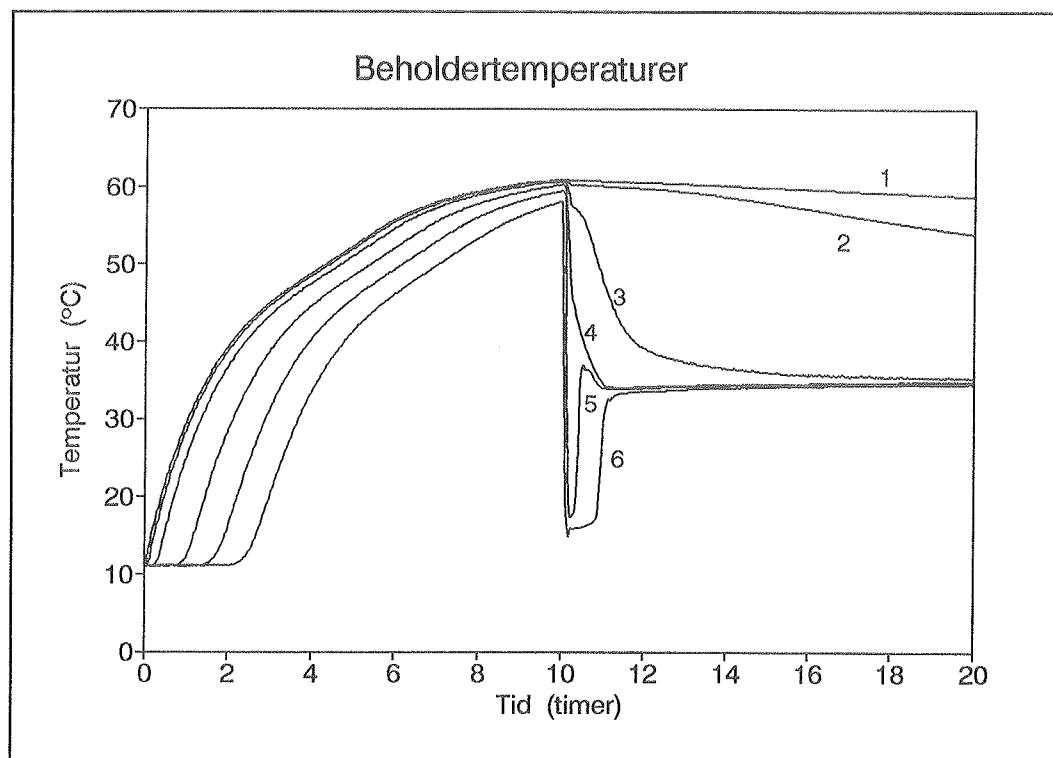


Figur 39. Kedelopvarmning og solopvarmning.

De første fire timer er der kun kedelopvarmning, efter fire timer stoppes kedelkredsen og solvarmekredsen startes hvorefter der cirkuleres med et flow på ca. 360 l/h.

Indløbstemperaturen til beholderen fra den sekundære solvarmekreds er ca. 52 °C mellem 4 og 6 timer, og ca. 62 °C efter 6 timer. Igen ses en meget fordelagtig temperaturlagdeling i lageret. Efter 4 timer falder temperatur 3 ca. 3 K, den afkøles af solvarmekredsen fordi udløb til kedelveksler og indløb fra solvarmen er placeret i samme niveau. Dette viser at det ville være bedre hvis indløbsstuds fra solvarmekredsen var flyttet lidt ned under kedelstuds-en, f.eks. så overkanten af indløbsstuds fra solvarmen havde samme niveau som underkanten af udløbsstuds til kedelen.

En fortsættelse af forsøget fra figur 38 ses på figur 40. Efter 10 timer tappes der 500 l vand med et flow på ca. 3000 l/h. Solopvarmningen fra den primære kreds stoppes, men den sekundære kreds fortsætter med at cirkulere med et flow på ca. 360 l/h.

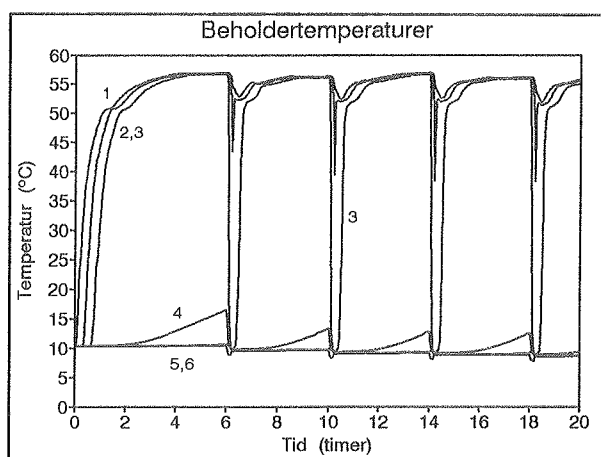


Figur 40. Solopvarmning og tapning.

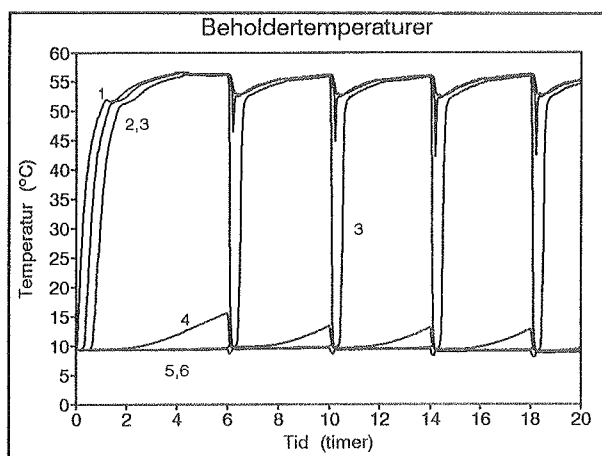
Efter tapningen sker der en opblanding i lageret fordi koldt vand fra bunden af beholderen føres ind i varmere vand højere oppe. Temperatur 3 ville sandsynligvis ikke falde så hurtigt hvis indløbsplaceringen af solvarmevæsken havde været flyttet lidt ned. Temperatur 1 og 2 berøres ikke nævneværdigt af den kraftige opblanding nederunder.

Kedelopvarmning, tapning og cirkulation

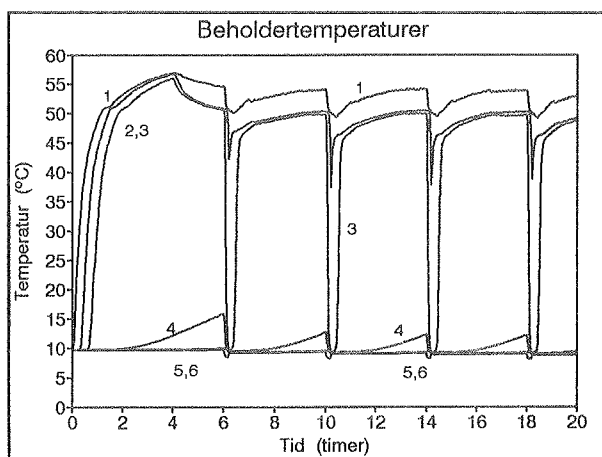
Der er udført tre forsøg der viser hvordan cirkulationsledningen påvirker temperaturlagdelingen i lageret når der er kedelopvarmning, tapning og cirkulation. Fælles for de tre forsøg er en kedelopvarmning med ca. 800 l/h og 4 tapninger på hver 500 l efter 6, 10, 14 og 18 timer. Flowet under tapningerne er ca. 3000 l/h og ca. 900 l/h i cirkulationsledningen.



a. ingen cirkulation.



b. cirkulation uden afkøling.



c. cirkulation med ca. 5 kW afkøling

Figur 41. Kedelopvarmning, tapning og cirkulation.

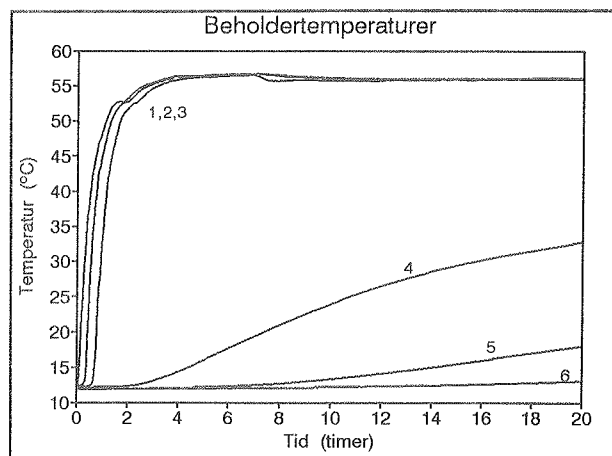
Figur 41 viser at cirkulationsledningen ikke har den mindste indflydelse på temperaturlagdelingen nederst i lageret (4, 5 og 6).

Afsluttende forsøg

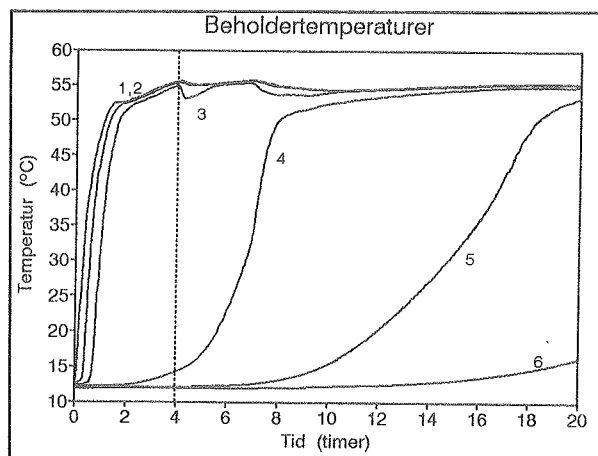
Der er udført kedelopvarmning hvor beholderstudsene i kedelkredsen er udformet som 2" bøjning, 2" T-stykke og 5/4" direkte indløb. For de tre indløbsudformninger er der udført forsøg ved en kedelopvarmning på ca. 800 l/h og ca. 2400 l/h. I de første 4 timer har flowet dog altid været ca. 800 l/h. Måleresultaterne er vist på figur 42.

Ved en kedelopvarmning på ca. 800 l/h er der ingen nævneværdig forskel på de 3 indløbsudformninger. Kedelopvarmning forårsager ingen opblanding i lageret.

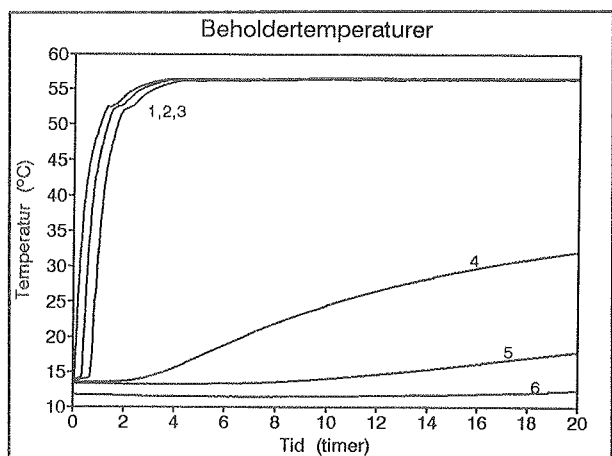
Ved en kedelopvarmning på ca. 2400 l/h viser T-stykket sig igen at være bedst til at forhindre opblanding.



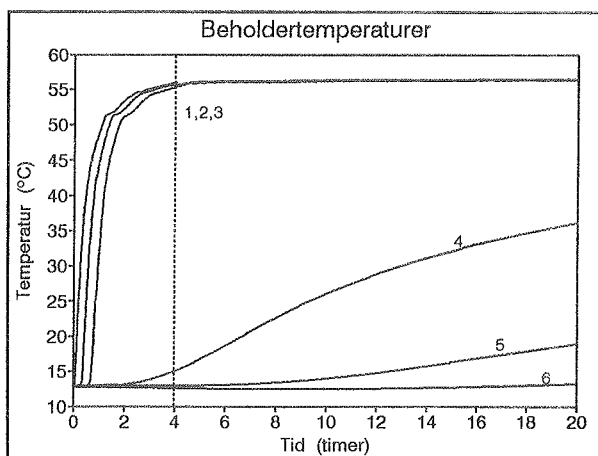
a. 2" bøjning ca. 800 l/h



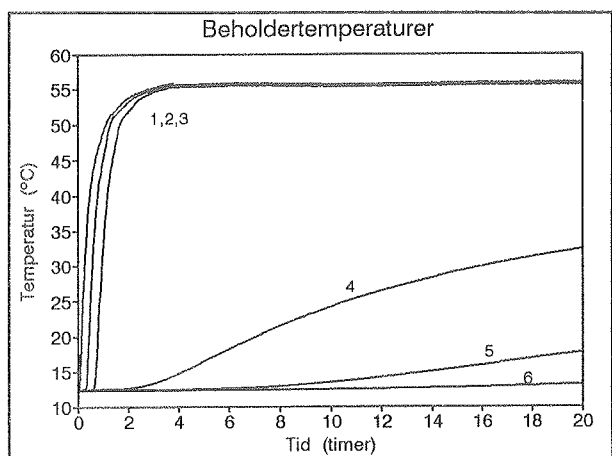
b. 2" bøjning ca. 2400 l/h



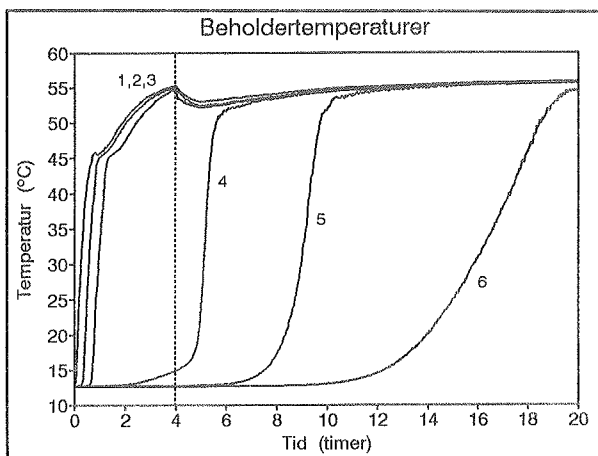
c. 2" T-stykke ca. 800 l/h



d. 2" T-stykke ca. 2400 l/h



e. 5/4" direkte indløb ca. 800 l/h



f. 5/4" direkte indløb ca. 2400 l/h

Figur 42. Kedelopvarmning med forskellige indløbsudformninger.

EDB-beregninger med EMGP3

EMGP3 er et detaljeret edb-program der kan regne på solvarmesystemer, se \1\.
Programmet er modulopbygget, hvilket gør det meget fleksibelt i systemopbygningen af et solvarmeanlæg.

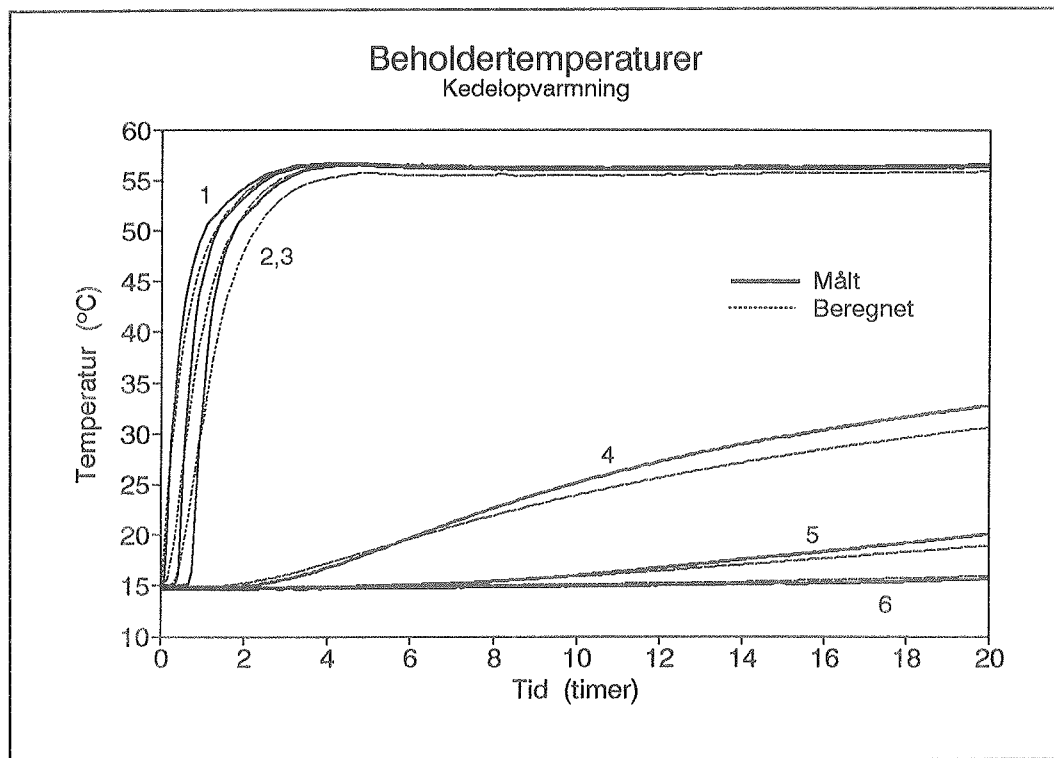
Sammenligning mellem målinger og beregninger

Måling af lagertemperaturerne under forskellige driftsbetingelser er anvendt som sammenligningsgrundlag med de lagertemperaturer som EMGP3 beregner. Sammenligningen består af fire forskellige driftsforhold med en varighed på 20 timer hver.

1. kedelopvarmning
2. kedelopvarmning og cirkulation
3. kedelopvarmning og tapning
4. kedelopvarmning og solvarme

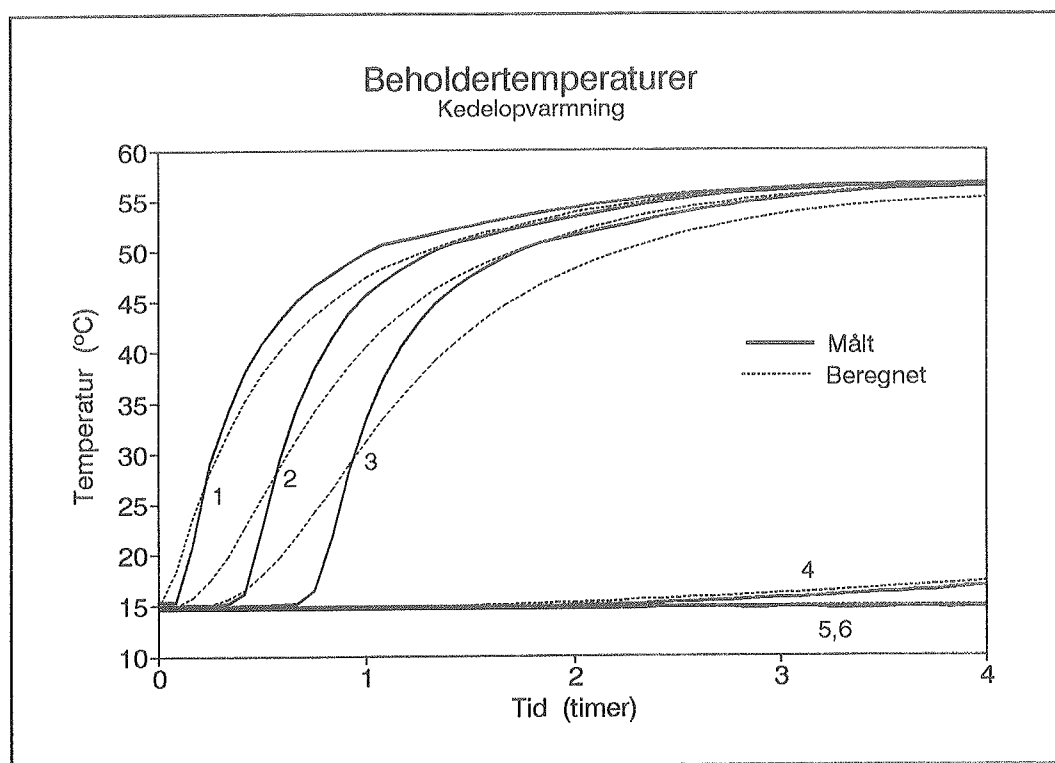
Beregningerne er udført ved at påtrykke beholderen en målt indløbstemperatur og et målt flow. Disse anlægsdata har et tidsstep på enten 2 eller 5 minutter.

Første sammenligning viser en kedelopvarmning med ca. 800 l/h.



Figur 43. Kedelopvarmning.

EMGP3 beregner temperatur 4, 5 og 6 rimeligt nøjagtigt, dog er varmeledningen ned gennem lageret lidt større i målingerne end i beregningerne. Temperatur 1, 2 og 3 stemmer ikke helt overens de første ca. 4 timer. Et nærbillede ses på figur 44.

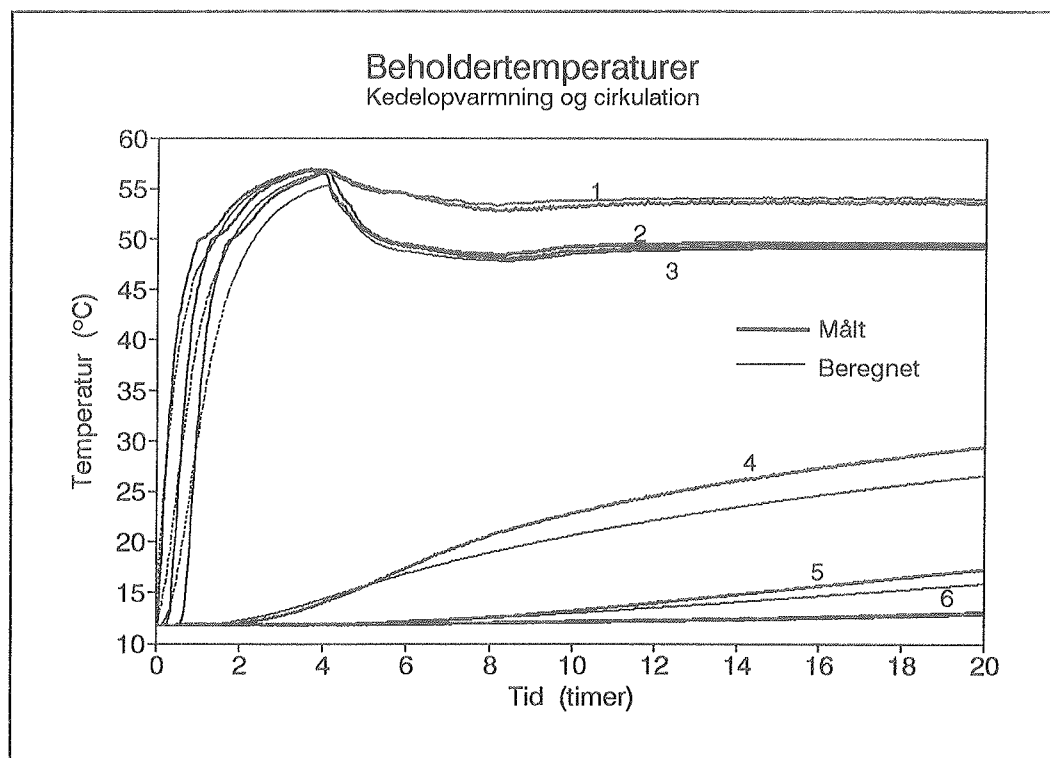


Figur 44. Kedelopvarmning de første 4 timer.

Figur 44 viser at beregningerne ikke giver så stor en temperaturgradient som målingerne. Denne afvigelse skyldes hovedsagelig numerisk diffusion i beregningerne, fordi beholderen beregningsmæssigt er inddelt i et begrænset antal lag, i dette tilfælde 13. Et større antal lag ville kunne nedsætte den numeriske diffusion, men den kan aldrig helt elimineres i EMGP3.

Den tilførte energimængde fra kedlen over de 20 timer er målt til 57,2 kWh, og beregnet til 57,4 kWh. En afvigelse på 0,4 %.

Den anden sammenligning viser kedelopvarmning på ca. 800 l/h og cirkulation efter 4 timer på ca. 900 l/h med ca. 5 kW afkøling. Sammenligningen ses på figur 45.



Figur 45. Kedelopvarmning og cirkulation.

Efter 4 timer er der en god overensstemmelse mellem måling og beregning for temperaturerne 1, 2 og 3. Afvigelse for temperaturerne 4, 5 og 6 er de samme som i første sammenligning med kedelopvarmningen.

Energitilførsel over 20 timer:

Kedel:	målt:	134 kWh
	beregnet:	137 kWh
	afvigelse:	2,0 %
Cirkulation :	målt:	- 79,9 kWh
	beregnet:	- 82,2 kWh
	afvigelse:	2,9 %

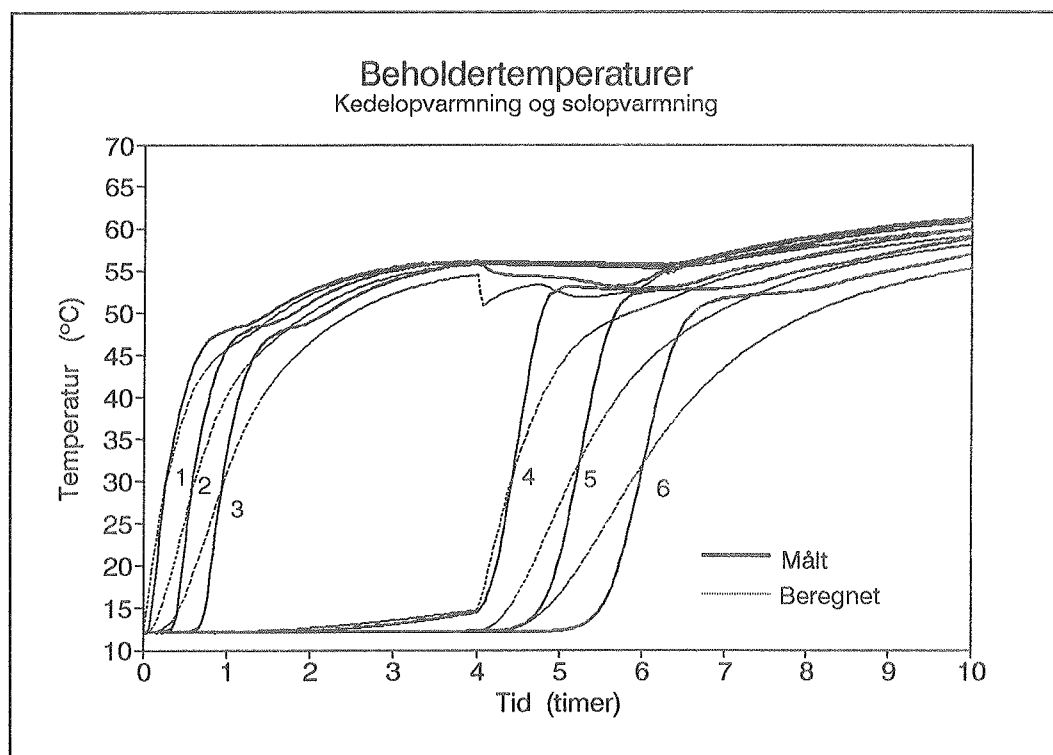
Tredie sammenligning består af kedelopvarmning og 4 tapninger af hver 500 l. Der vises ikke temperaturforløb, men det skal nævnes, at under tapningerne sker der også numerisk diffusion, hvilket medfører en mindre temperaturlagdeling i beregningerne end i målingerne.

Energitilførsel over 20 timer:

Kedel	målt:	167 kWh
	beregnet:	161 kWh
	afvigelse:	3,7 %

Tapning	målt:	-115 kWh
	beregnet:	-115 kWh
	afvigelse:	0,2 %

Fjerde sammenligning består af kedelopvarmning de første 4 timer og solopvarmning efter 4 timer. Kedelopvarmningen sker med ca. 800 l/h og solopvarmningen med ca. 360 l/h. De første 10 timer af forsøget er vist på figur 46.



Figur 46. Kedelopvarmning og solopvarmning.

Efter 4 timer når solvarmekredsen starter viser figur 46 klart at beregningerne ikke efterligner temperaturmålingerne 4, 5 og 6 særsikkert godt. Igen skyldes det meste af afvigelsen numerisk diffusion i beregningerne.

Energitilførsel over 20 timer:

Kedel	målt:	50,1 kWh
	beregnet:	48,7 kWh
	afvigelse:	2,8 %

Sol	målt:	69,5 kWh
	beregnet:	67,2 kWh
	afvigelse:	3,4 %

De fire sammenligninger viser at numerisk diffusion forårsager at beregningerne med EMGP3 undervurderer temperaturlagdelingen i lageret. Dette medfører blandt andet, at beregningerne vil undervurdere et low-flow solvarmeanlægs ydelse.

Energitilførslen til lageret over 20 timer i de fire sammenligninger beregner EMGP3 rimeligt præcist. Afvigelsen er maksimalt ± 4 %.

Årskørsler

Med vejrdato fra det danske referenceår er der udført beregninger med EMGP3 for at bestemme årsydelsen for større low flow solvarmeanlæg. Der er udført parametervariationer over følgende størrelser:

- flow i solfangerkreds
- dagligt varmtvandsforbrug
- cirkulationstabets størrelse
- solvarmevolumen
- solvarmevekslerens varmeoverføringsevne
- solfangerens maksimaleffektivitet
- solfangerens varmetabskoefficient

For hver parametervariation er der udført beregninger for et solvarmeanlæg med et solfangerareal på 25 m², 50 m², 100 m² og 200 m². Herved er det muligt at bestemme nettoydelsen ved forskellige dækningsgrader.

Solvarmeanlæggets nettoydelse defineres her som summen af varmtvandsforbruget, og netto cirkulationstab fratrasket energitilførslen fra kedlen. Ved netto cirkulationstab forstås cirkulationstabet fra ledningssystemet fratrasket ekstra cirkulationstab forårsaget af solvarmen.

Solvarmeanlæggets dækningsgrad defineres her som forholdet mellem solvarmeanlæggets nettoydelse og summen af energiforbruget til varmt brugsvand og netto cirkulationstab.

Beregningsforudsætningerne ved årsberegningerne er et solvarmeanlæg som i princippet ser ud som figur 7. Solfangerfeltet er placeret på en skyggefri sydvendt flade der hælder 45° fra vandret. Solfangerne har en starteffektivitet på 0,78 og en varmetabskoefficient på 5,0 W/m² · K.

Solfangerpumpen starter ved en temperaturdifferens på 6 K mellem solfanger og bunden af lageret, og stopper igen når differencen er 2 K.

Rørsystemet mellem solfangerfelt og lager består hver vej af i alt 40 m rør, hvoraf de 10 m er placeret udendørs. Rørene er isoleret så de opnår en isoleringsevne på $0,3 \text{ W/(K} \cdot \text{m)}$.

Kedelvarmeveksleren opvarmer den øverste del af beholderen til 55°C .

Der er tilsluttet en cirkulationsledning til lageret, hvor der sker en afkøling på 5 K.

For referenceanlægget med 25 m^2 solfangerareal er beregnet følgende ved et varmtvandsforbrug på 2500 l/døgn og et cirkulationstab på 5 kW.

Nettoydelse $490 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$.

Dækningsgrad 0,13

Varmebalancen for referenceanlæggets lager er som følger:

Tilført:

kedel 86 %
solvarme 14 %

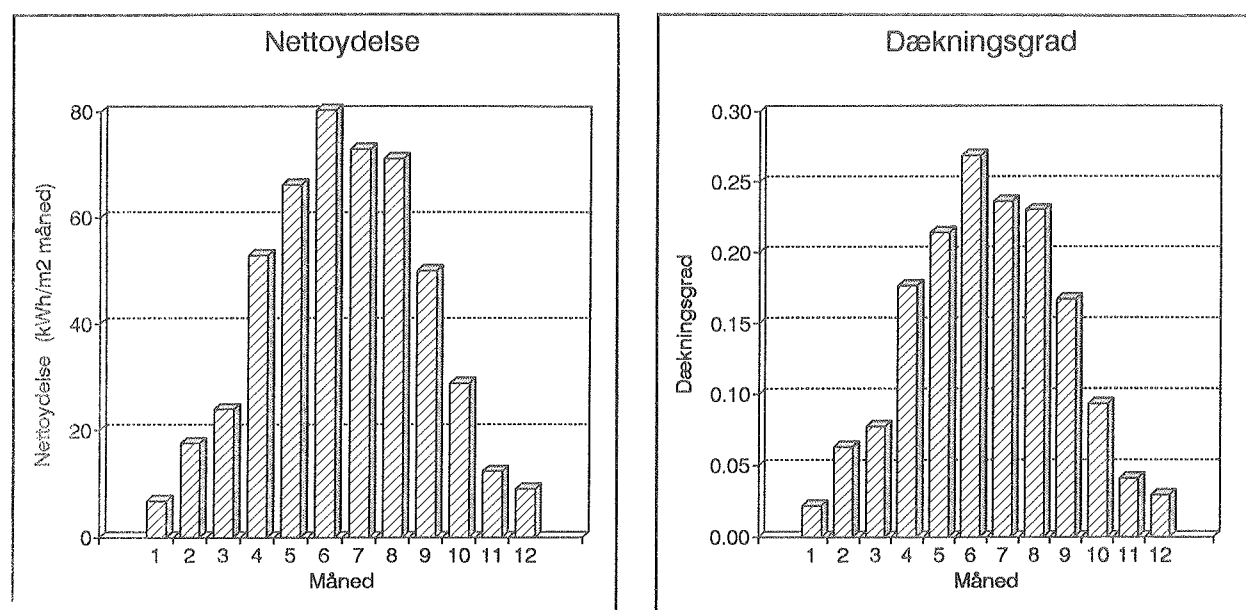
I alt: 92 MWh

Afgivet:

tappet 51 %
cirkulation 47 %
varmetab 2 %

I alt 92 MWh

Variationen af nettoydelsen og dækningsgrad over året for referenceanlægget er vist på figur 47.

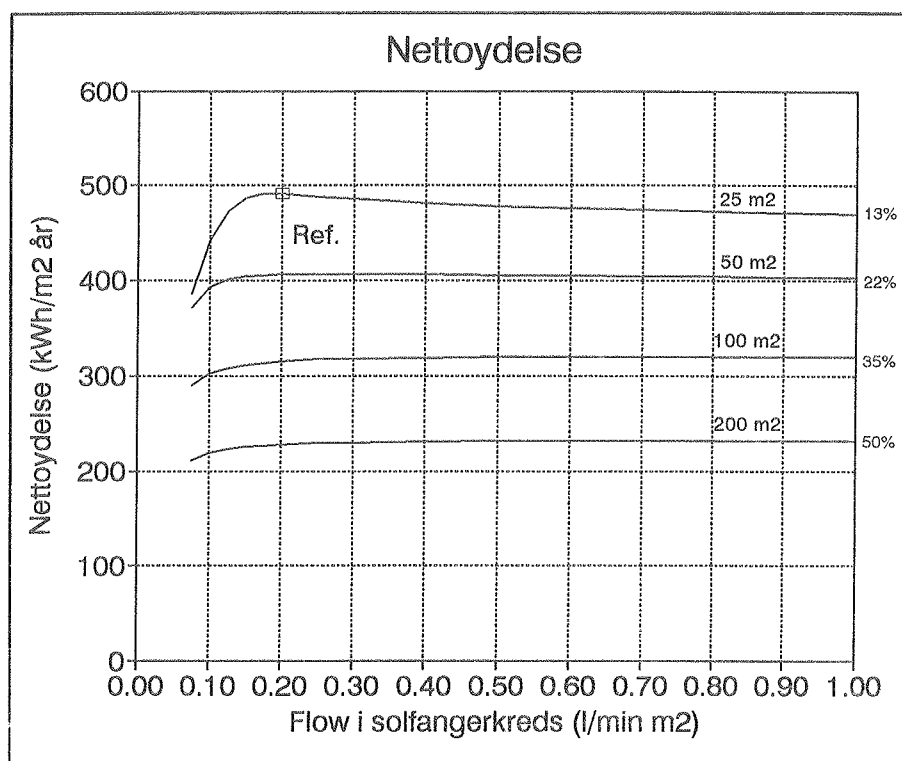


Figur 47. Nettoydelse og dækningsgrad for referenceanlægget.

Figur 47 viser at i sommermånederne er dækningsgraden op til 27 %.

Flowet i solfangerkredsen er ens på begge sider af varmeveksleren. Væsken i den primære solfangerkreds er tilsat 50 % propylenglykol.

Figur 48 viser hvorledes flowet i solfangerkredsen påvirker nettoydelsen for de fire anlægsstørrelser. Solvarmevekslerens varmeoverføringsevne er $50 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ og solvarmevolumenet er 32 l/m^2 . Kedelvolumenet og cirkulationstab på 5 kW er holdt konstant. Varmtvandsforbruget er 2500 l/døgn opvarmet fra 10-55°C.



Figur 48. Nettoyedelsens afhængighed af flowet i solfangerkredsen.

For anlægget på 25 m² ses at det optimale flow i solfangerkredsen er ca. 0,2 l/(min m²).

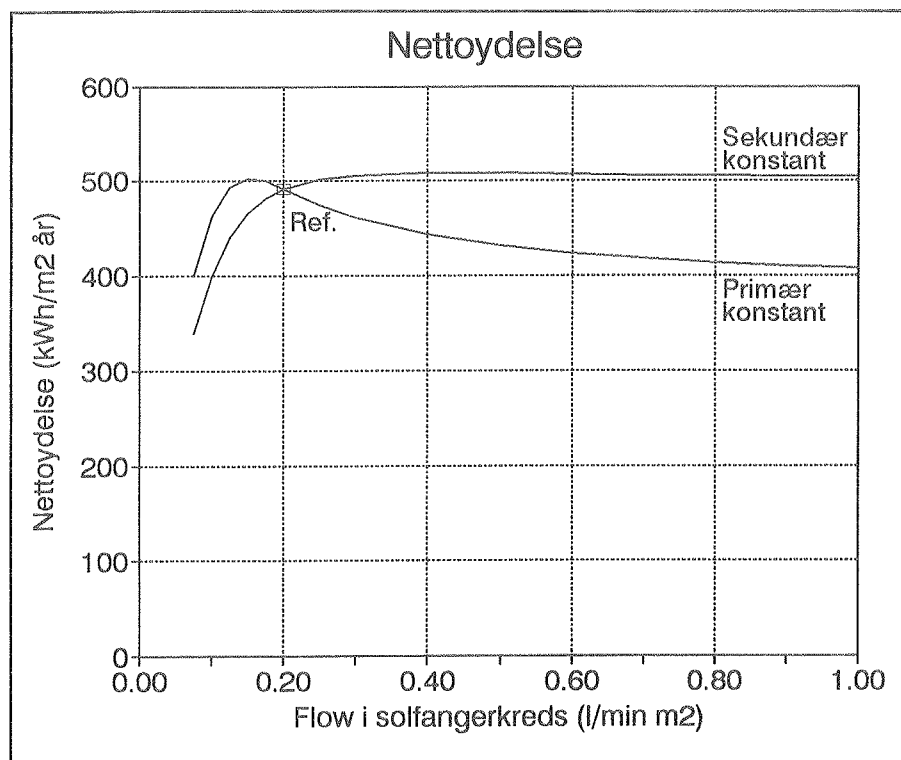
Ved flow mindre end ca. 0,2 l/(min m²) falder nettoyedelsen fordi den reducerede solfanger effektivitet ikke opvejer de temperaturmæssige fordele der opnås i lageret. Ved større flow end ca. 0,2 l/(min m²) skyldes faldet i nettoyedelsen en ødelæggelse af temperaturlagdelingen i lageret.

Ved større solfangerarealer er nettoyedelsen næsten uafhængig af flowet i solfangerkredsen. Tallene til højre for 1,00 l/(min m²) angiver dækningsgraden for anlægget.

For anlægget på 25 m² er der udført årsberegninger, hvor flowet i solfangerens primære og sekundære kreds ikke er ens.

På figur 49 angiver kurven med "primær konstant", at flowet i den primære kreds er 0,2 l/(min m²) og flowet i den sekundære kreds aflæses på X-aksen.

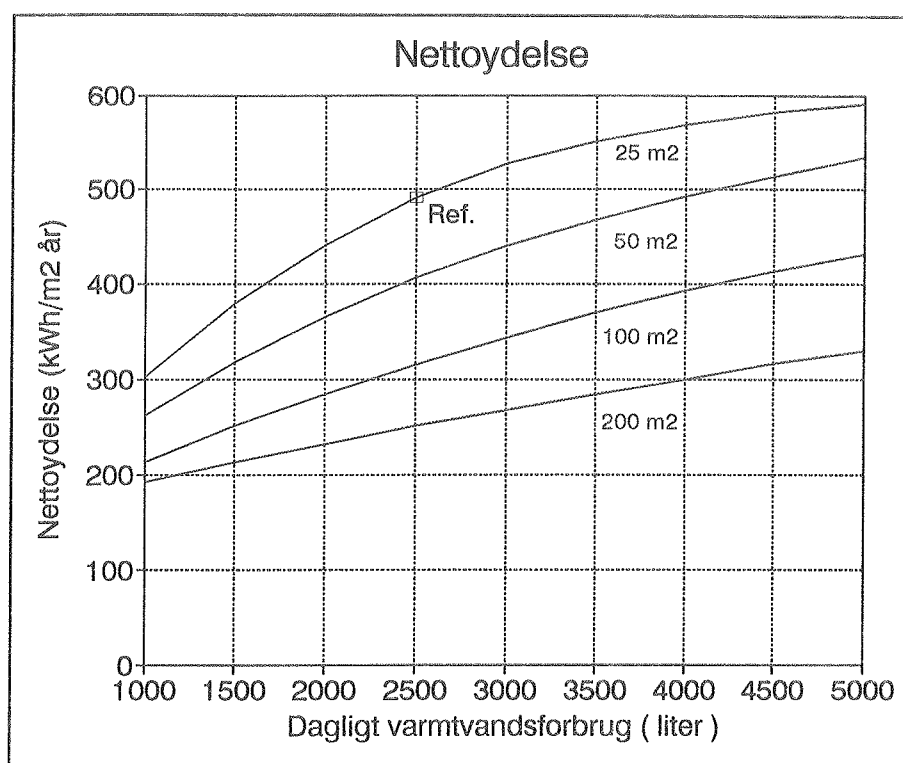
"Sekundær konstant" betyder 0,2 l/(min m²) i den sekundære kreds og det primære flow aflæses på X-aksen.



Figur 49. Nettoyedelsens afhængighed af flowet i solfangerkredsen.

Figuren viser under de givne beregningsforudsætninger at det er vigtigst at man holder det sekundære flow konstant på ca. 0,2 l/(min m²) hvorimod variationer i det primære flow ikke har så stor betydning på nettoyedelsen.

En af de vigtigste størrelser for et solvarmeanlæg er det daglige varmtvandsforbrug.

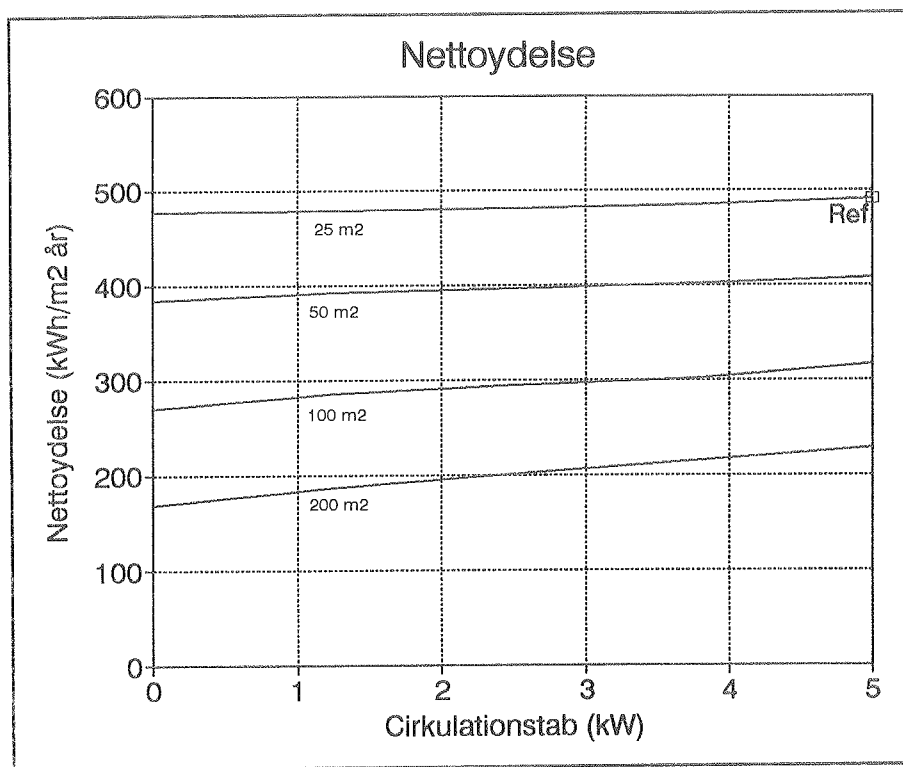


Figur 50. Nettoydelens afhængighed af det daglige varmtvandsforbrug.

Varmtvandsforbruget er angivet i liter pr. døgn opvarmet fra 10-55°C og tappet efter tappeprogrammet på figur 8.

Det er muligt at opnå nettoydelser op til ca. 600 kWh/(m² · år), hvis varmtvandsforbruget er 200 l/m² · døgn, (5000 l/døgn for anlægget på 25 m²).

Solvarmeanlægget vil dække en del af cirkulationstabet. Jo større cirkulationstabet er, des større er nettoydelsen, se figur 51.

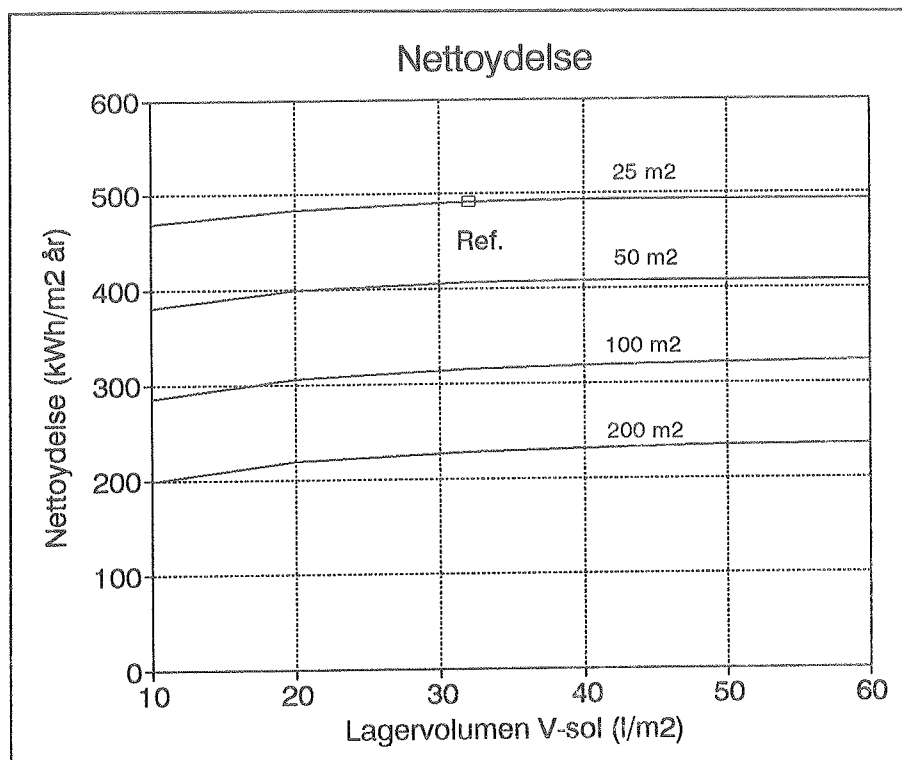


Figur 51. Nettoydelsens afhængighed af cirkulationstabet.

Uden cirkulationstab for anlægget med 25 m² solfanger bliver nettoydelsen ca. 480 kWh. Nettoydelsen for referenceanlægget er ca. 3 % større.

Større dækningsgrad forårsager større dækning af cirkulationstabet.

Figur 52 viser hvorledes størrelsen af solvarmevolumenet påvirker anlægsydelsen.

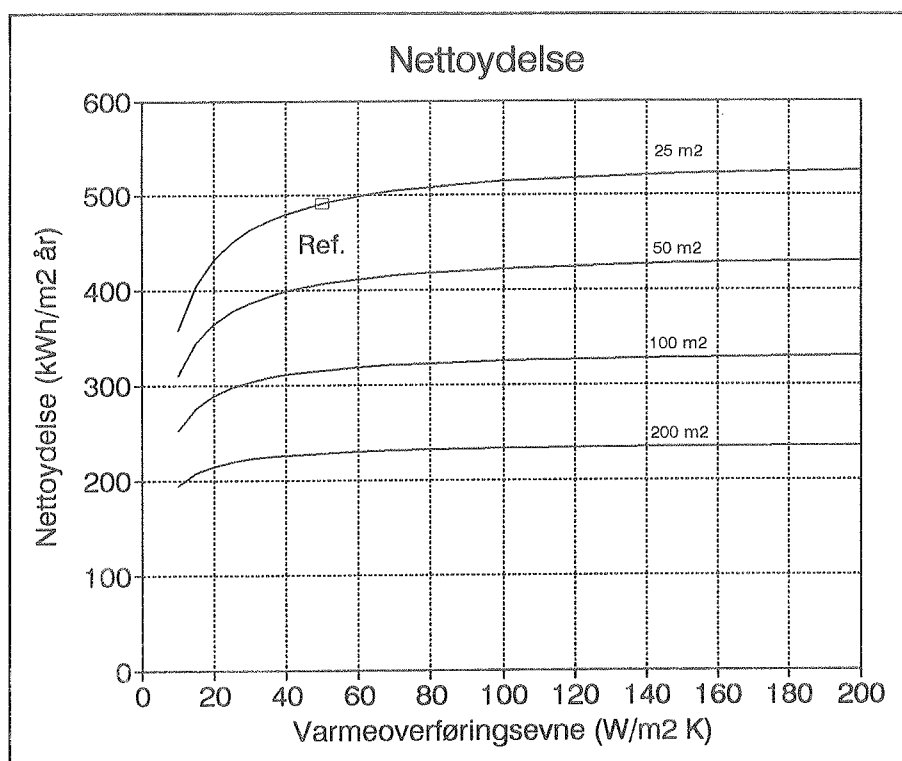


Figur 52. Nettoydelsens afhængighed af solvarmevolumenet.

Referenceanlæggets lagervolumen er 32 l/m². Over dette volumen stiger nettoydelseren kun lidt, mindre lagervolumen forårsager mindre nettoydelse.

Forskellen mellem kurverne er ca. 80 kWh/(m² · år).

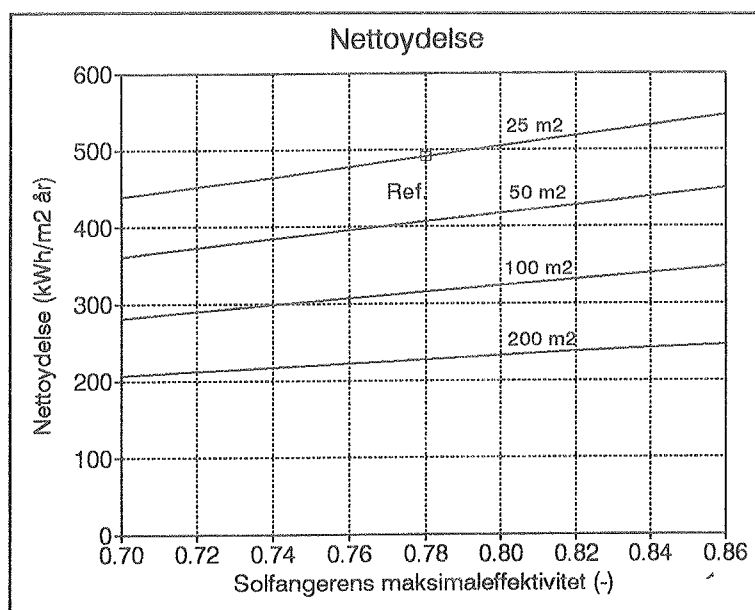
Figur 53 viser hvorledes størrelsen af solvarmevekslerens varmeoverføringssevne påvirker anlægsydelsen.



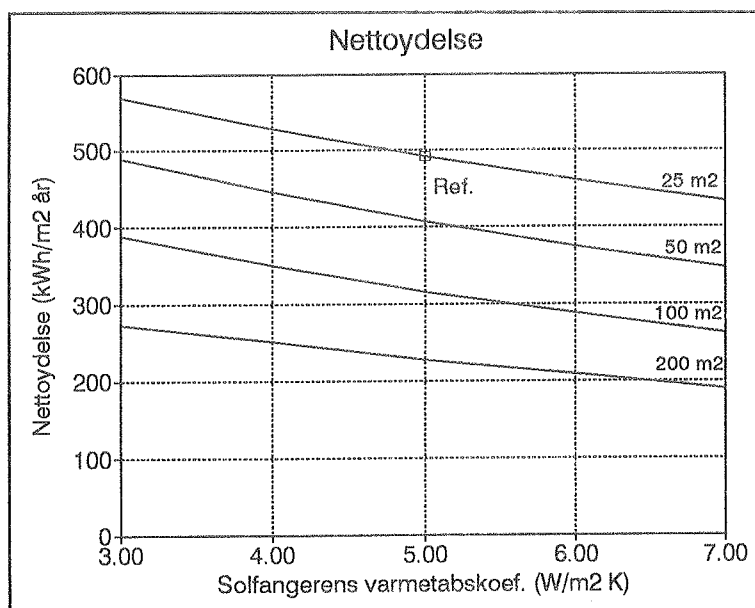
Figur 53. Nettoydelsens afhængighed af solvarmevekslerens varmeoverføringssevne.

For anlægget på 25 m² solfanger forårsager en fordobling af solvarmevekslerens varmeoverføringssevne til 100 W/(m² · K) en forøgelse af nettoydelser på ca. 5 %. Ved en halvering af varmeoverføringssevnen til 25 W/(m² · K) falder nettoydelser med ca. 10 %.

Solfangeren der anvendes i disse beregninger er en middel god solfanger med en start effektivitet på 0,78 og en varmetabskoefficient på $5,0 \text{ W/(K} \cdot \text{m}^2)$, se \8\.



Figur 54. Nettoydelsens afhængighed af solfangerens maksimaleffektivitet.



Figur 55. Nettoydelsens afhængighed af solfangerens varmetabskoefficient.

Der er udført supplerende beregninger for anlægget på 25 m² solfanger ved at ændre indløbsplaceringen af fremløb fra solvarmen (SF).

For low flow solvarmeanlæg er den optimale indløbsplacering ca. 20 cm under det kedelopvarmede volumen.

For almindelige solvarmeanlæg med et flow på 1,0 l/(min m²) skal indløbsplaceringen være ca. i midten af det solopvarmede volumen.

Målingerne viste at cirkulationsledningen ikke forårsager opblanding i lageret hvis flowet er under ca. 2000 l/h. Det er forsøgt at efterligne opblandingen i lageret forårsaget af et flow i cirkulationsledningen på 5000 l/h og 2" direkte indløb. Beregninger med EMGP3 viste, at referenceanlæggets nettoydelse faldt ca. 45 % på grund af opblanding fra cirkulationsledningen.

Sammenfatning og konklusion

Det er blevet belyst hvordan cirkulationsledningen tilsluttes lageret så temperaturlagdelingen opretholdes i størst muligt omfang. Det skal her nævnes, at ikke kun cirkulationsflowet, men også tapning, samt flowet forårsaget af kedelopvarmning og solopvarmning kan ødelægge temperaturlagdelingen. For low flow solvarmeanlæg har flowet forårsaget af solopvarmningen dog normalt ingen betydning på grund af det relative lille flow i solfangerkredsen. Temperaturforholdene i solfangerkredsen kan dog forårsage opblanding i den nederste del af lageret, hvis indløbstemperaturen fra solvarmen har en lavere temperatur end beholdertemperaturen i det givne indløbsniveau.

Der er udført indendørs forsøg med et 2000 l stort varmelager bestående af en opretstående forrådsbeholder, hvor kedelopvarmningen og solopvarmningen foregår gennem pladevarmevekslere.

Flowet i cirkulationsledningen blev varieret mellem 0 og 5000 l/h og der blev anvendt fire forskellige typer indløbsudformninger:

- direkte indløb
- bøjning
- T-stykke
- perforeret rør

Måleresultaterne viste, at det direkte indløb og det perforerede rør havde omtrent samme indvirkning på temperaturlagdelingen i lageret. T-stykket viste sig at have en gunstig indflydelse på temperaturlagdelingen, hvorimod bøjningen viste sig uegnet, sandsynligvis fordi den satte hele beholdervolumenet i rotation.

Forsøgene viste, at hvis cirkulationsindløbet til beholderen er udformet som et 2" direkte indløb vil der ikke ske opblanding i det 2000 l store lager hvis flowet i cirkulationsledningen er under ca. 2000 l/h. Derimod skete der fuldstændig opblanding i lageret efter 4 timers cirkulationsdrift ved et flow på 5000 l/h.

Der er desuden udført forsøg med et 5/4" direkte indløb for at belyse hvordan vandhastigheden ved cirkulationsindløbet påvirker temperaturlagdelingen. Målingerne viste, at ved flow på 3000 l/h forårsagede det 5/4" direkte indløb samme opblanding som ved 5000 l/h og 2" direkte indløb. Dette viser at både indløbshastigheden og flowet for direkte indløb har betydning for opblandings størrelse.

Der er udarbejdet en række figurer som viser forskellen mellem målte lagertemperaturer og temperaturer beregnet med edb-programmet EMGP3. Sammenligningen viser at EMGP3 undervurderer temperaturlagdelingen i lageret på grund af numerisk diffusion i den beregningsmæssige lagermodel.

EDB-programmet er efterfølgende anvendt til beregning af årsydelsen for solvarmeanlæg.

Summary

Temperature stratification in the solar heating storage tank substantially improves the performance of the solar heating system. In a low flow solar heating system it is especially important that the temperature stratification is high, and factors destroying the stratification should therefore be eliminated or reduced as much as possible.

In large solar heating systems, a circulation pipe is often connected to the storage tank. The circulation flow through the storage tank has proven to be one of the factors destroying the temperature stratification.

It is therefore important to show how the circulation pipe can be connected to the storage tank to maintain the temperature stratification as much as possible. It should be noted that not only the circulation flow, but also the tap flow as well as the flow caused by the boiler and by the solar collector can destroy the temperature stratification. As for low flow solar heating systems, the flow caused by solar heating is normally of no importance because of the relatively low flow in the solar collector loop. However, the temperature conditions in the solar collector loop might cause mixing in the lower part of the storage tank if the inlet temperature from the solar collector is lower than the temperature of the tank in the given inlet.

Indoor tests were carried out on a 2000 l heat storage tank consisting of a vertical storage tank in which boiler heating as well as solar heating take place through plate heat exchangers.

The flow in the circulation pipe was varied between 0 and 5000 l/h, and four different types of inlet designs were used:

- direct inlet
- bended
- T-shaped pipe
- perforated pipe

The measurement results showed that the direct inlet and the perforated pipe had about the same effect on the temperature stratification in the storage tank. The T-shaped pipe proved to have a favourable influence on the temperature stratification, whereas the bended pipe proved to be unsuitable, probably because it started a rotation of the entire volume of the tank. As for the 2" direct inlet, no significant mixing was measured for flows under approx. 2000 l/h.

Furthermore, the tests showed that it is possible to get quite a favourable temperature stratification in the storage tank by a combination of boiler and solar heating.

A series of figures were constructed, showing the difference between measured storage temperatures and temperatures calculated with the computer program EMGP3. The comparison shows that EMGP3 underestimates the temperature stratification in the storage tank due to numerical diffusion in the EMGP3 storage model.

In the following, the computer program is used for calculation of the yearly performance of low flow solar heating systems. A series of figures were constructed which make it possible to determine the yearly performance of different large low flow solar heating systems.

Referencer

- [1] Dutré, Willie L. 1991. Simulation of Thermal System. EMGP3. Kluwer Academic Publishers.
- [2] Ovesen, Kaj. 1990. Vandinstallationer. SBI-anvisning nr. 165. Statens Byggeforskningsinstitut.
- [3] Jensen, Søren Østergaard. 1987. Summary report of the Danish Validation Work within Opsys. Thermal Insulation Laboratory. Technical University of Denmark.
- [4] Esbensen, Rådgivende Ingeniører. 1991. Måling og evaluering af et 44 m² low flow solvarmeanlæg på Sønderborg Søfartsskole.
- [5] DS 439. Vandinstallationer, 2. udgave maj 1989. Teknisk Forlag København.
- [6] VVS-detajler, solvarmeinstallationer - varmt brugsvand - store anlæg. 1991. BPS-Publikation 94. BPS-Centret.
- [7] Duffie & Beckman. 1991. Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, Inc.
- [8] Kristiansen, Finn. Prøvning af solfangeres effektivitet og driftssikkerhed foretaget for Prøvestationen for Solenergi. Solfangerfabrikant: Batec. Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Varmeisolering. Februar 1993. Rapport nr. 93-06.