

VARMEOVERGANG I SMÅ SOLVARMELAGRE

Søren Østergaard Jensen

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE
NOVEMBER 1984 MEDDELELSE 164

Medvirkende ved projektet:

Søren Østergaard Jensen, civilingeniør,
Simon Furbo, civilingeniør, lic. techn.,
Vibeke B. Nielsen, assistent,
Kenneth P. B. Sørensen, teknisk tegner.

Forord

Energiministeriets (tidligere Handelsministeriets) Energiforskningsprogram (EFP-80) vedrørende udvikling af mindre varmelagre er fortsat under Energiministeriets forskningsprogrammer i 1981-84 (EFP-81 - EFP-84) som en betydningsfuld del af forskningsprogrammet vedr. solenergi. Formålet med denne del af programmet er gennem forbedrede lagermuligheder for solenergi at forbedre mulighederne for økonomisk anvendelse af solenergi under danske forhold.

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

Projektet, der udføres i perioden 1978-84, har omfattet følgende delprojekter:

Varmelagring i:

- a) vand
- b) stenmagasiner
- c) bygningskonstruktioner
- d) smeltevarmelagre
- e) kemiske varmelagre.

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

Med denne rapport er arbejdet med "Termiske lagre" finansieret under EFP-82 og EFP-83 afsluttet.

Resume

I denne rapport undersøges, hvordan varmevekslerspiralen i varmelagre til solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning skal udformes. Der er opstillet en tommelfingerregel for længden af varmevekslerspiralen. Desuden er der foretaget undersøgelser vedrørende betydningen af volumenstrømmen i varmevekslerspiralen, varmevekslerspiralens rørdimension, en eventuel kalkbelægning på varmevekslerspiralen og den benyttede solfangervæskes betydning for solvarmeanlæggets ydelse.

I rapportens anden del er undersøgt forskellige avancerede lagerudformningers egnethed i forbindelse med solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning. De undersøgte lagre har: Ingen varmeledning i lageret, et stratifikationsbevarende tappesystem til brugsvand, et stratifikationsskabende varmetilførselssystem og et variabelt lagervolumen.

<u>Indholdsfortegnelse</u>		<u>Side</u>
1.	Indledning	8
2.	Konklusion	10
OPTIMERING AF VARMEVEKSLERSPIRALER		
3.	Optimering af varmevekslerspiraler	15
3.1.	Beregning af varmevekslerspiraler	16
3.1.1.	Følsomhedsanalyser	19
3.1.2.	Den simple beregningsmetode	23
3.2.	Beregning af solvarmeanlægs ydelse	27
3.3.	Volumenstrøm i solfangerkredsen	30
3.4.	Optimal udformning af varmevekslerspiraler	35
3.4.1.	Optimale rørdimensioner	35
3.4.2.	Optimale spirallængder	36
3.4.2.1.	Udformning af varmevekslerspiraler	38
3.4.2.2.	Spirallængder ved brug af sortmalede absorberere	41
3.4.2.3.	Sammenligning med tidligere tommelfingerregler	45
3.4.2.4.	Vand som solfangervæske	46
3.4.2.5.	Kalklag på varmevekslerspiraler	48
3.5.	Sammenfatning	51
AVANCEREDE LAGERTYPER		
4.	Avancerede lagertyper	55
4.1.	Beregningsprogram	56
4.2.	Mindskelse af varmeledning i beholderen	57
4.3.	Stratifikationsbevarende tappesystem	63
4.4.	Stratifikationsskabende varmetilførsels-system	66
4.5.	Variabelt volumen	70
4.6.	Sammenfatning	72
	Referencer	73
	Projektorganisation	75

Liste over udkomne rapporter

76

Abstract

80

FigurlisteSide

Fig. 1.	Principskitse af traditionelt lager	15
2.	Varmeoverføringsevnen beregnet med den gængse teori	16
3.	Varmevekslerspiral	17
4.	Varmeoverføringsevnen beregnet med den tilpassede teori	18
5.	Varmeoverføringsevnen afhængighed af rørdimensionen	20
6.	Varmeoverføringsevnen afhængighed af volumenstrømmen	21
7.	Varmeoverføringsevnen afhængighed af spirallængden	21
8.	Varmeoverføringsevnen afhængighed af temperaturdifferensen	22
9.	Varmeoverføringsevnen afhængighed af den overførte effekt	22
10.	Varmeoverføringsevnen afhængighed af væsken i varmevekslerspiralen	23
11.	Varmeoverføringsevnen afhængighed af lagertemperaturen og temperaturdifferencen	24
12.	Varmeoverføringsevnen beregnet ved hjælp af den simple metode	26
13.	Varmevekslerspiralers varmeoverføringsevne afhængigt af flowet	31
14.	Nettoydelser for solvarmeanlæg afhængig af volumenstrømmen	32
15.	Totalydelser for solvarmeanlæg afhængig af volumenstrømmen	33
16.	Nettoydelser for fire solvarmeanlæg afhængig af spirallængden	36
17.	Totalydelser for fire solvarmeanlæg afhængig af spirallængden	37
18.	Skitse af beholder med lille flange	39
19.	Fotografi af komprimeret varmevekslerspiral	39
20.	Placering af rør i rørbundt	40
21.	Nettoydelser for solvarmeanlæg med sortmalede absorbere	42

22.	Totalydelser for solvarmeanlæg med sortmalede absorbere	43
23.	Nettoydelser for solvarmeanlæg med sortmalede absorbere og to lagerstørrelser	44
24.	Totalydelser for solvarmeanlæg med sortmalede absorbere og to lagerstørrelser	45
25.	Ydelser fra solvarmeanlæg med vand og propylen-glycol/vand som solfangervæske	47
26.	Nettoydelser for solvarmeanlæg med kalklag på spiralen	49
27.	Totalydelser for solvarmeanlæg med kalklag på spiralen	49
28.	Skitse af lager med ringe varmeledning	58
29.	Ydelser for solvarmeanlæg uden varmeledning i beholdermaterialet og vandet	59
30.	Ydelser for solvarmeanlæg uden varmeledning i beholdermaterialet	60
31.	Ydelser for solvarmeanlæg uden varmeledning i vandet	61
32.	Skitse af beholder med stratifikationsbevarende tappesystem	64
33.	Ydelser for solvarmeanlæg med stratifikationsbevarende tappesystem	65
34.	Skitse af lager med stratifikationsskabende varmetilførselssystem	66
35.	Ydelser for solvarmeanlæg med stratifikationsskabende varmetilførselssystem	67
36.	Skitse af lager med variabelt volumen	70

TabellisteSide

Tabel 1.	Referencetilstand for følsomhedsanalyser over varmeoverføringsevnen for en varmevekslerspiral	19
2.	Varmeoverføringsevnenes afhængighed af rørmaterialet	20
3.	De undersøgte solvarmeanlæg	27
4.	Data for referenceanlæggene	28
5.	Varmevekslerspiralernes rørdimensioner afhængig af solvarmeanlæggets størrelse	35
6.	Tidligere regler for dimensionering af varmevekslerspiraler.	46

1. Indledning

Hvordan skal små vandlagre i solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning udformes, så de bedst muligt opfylder de krav, en sådan anvendelse stiller?

I denne rapport fokuseres på, hvordan lagrene skal udformes set ud fra et varmetransportmæssigt synspunkt. Varmetransporten, der undersøges her, kan deles op i tre grupper: Varmetilførslen (fra solfangeren), varmestrømningen internt i lagrene (f.eks. varmeledning i beholdervæggen) og tapping af varme (i form af varmt brugsvand). I denne rapport undersøges ikke den varmetransport, der sker via varmetabet fra lagrene, dette er undersøgt fyldestgørende andre steder (f.eks. i ref. [1] og [2]).

Rapporten er delt op i to dele. Første del beskæftiger sig udelukkende med varmetilførslen til lagrene. De lagre, der undersøges, er den i dag mest anvendte og bedst egnede type med en varmevekslerspiral i bunden af lagrene (ref.[3]). Der opstilles en tommelfingerregel for, hvor lang varmevekslerspiralen i lagrene skal være. Samtidigt undersøges det, hvilken indflydelse volumenstrømmen, rørdimensionen, kalklag på spiralen og anvendelse af en anden solfangervæske har på solvarmeanlæggenes ydelser.

I rapportens anden del undersøges mere avancerede udformninger af lagrene. Der undersøges således forskellige måder at tilføre varme til lagrene på, tappe varme fra lagrene og hindre varmeledning internt i lagrene.

Dette arbejde er foretaget for at undersøge muligheden for gennem en forbedring af lagrene at forbedre solvarmeanlægs økonomi. Med mere effektive lagre bliver der mulighed for enten at få et større udbytte fra solvarmeanlæggene eller få samme ydelse som i dag, men med mindre anlæg. Dette kan være medvirkende til at forbedre økonomien. For selv om det i dag kan betale sig med solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning, er

det nødvendigt med en yderligere forbedring af økonomien, før der kommer skred i udbredelsen af denne type energianlæg.

2. Konklusion

I traditionelle lagre i solvarmeanlæg (med selektive absorbere) til brugsvandsopvarmning skal varmevekslerspirallængden være omtrent 2 m pr. m^2 solfang, når en 50% propylenglycol/vand-blanding benyttes som solfangervæske. Da der ifølge ref. [3] for optimale anlæg er et fast forhold mellem det daglige varmtvandsforbrug, lagerstørrelsen og solfangerarealet, svarer ovenstående til 2 m spiral for hver 50 l lager.

Tommelfingerreglen på 2 m spiral pr. 50 l lager gælder såvel for anlæg med sortmalede absorbere som for anlæg med selektive absorbere.

Solfangervæskens volumenstrøm, spiralens rørdimension og et eventuelt kalklag på spiralen har meget lille indflydelse på solvarmeanlæggenes ydelse, specielt når ovenstående tommelfingerregel overholdes. Ligeledes har den anvendte solfangervæske også ringe indflydelse på solvarmeanlæggets ydelse. Spirallængden kan dog reduceres med 30%, hvis vand benyttes som solfangervæske i stedet for en 50% propylenglycol/vand-blanding. Da volumenstrømmen kun har ringe indflydelse på anlæggenes ydelse, kan denne nedsættes fra det i dag normale 1 l/min. til 0,5 l/min. pr. m^2 solfanger.

Ved hjælp af avancerede lagerudformninger er det kun muligt at forbedre solvarmeanlæggenes ydelse lidt. Det er derfor ikke umiddelbart en god ide (på denne baggrund) at udvikle disse lagre til solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning, specielt da de ofte vil blive dyrere end de traditionelle lagre. Lagre hvor varmetilførslen skaber temperaturlagdeling, vil måske i stedet være effektive i solvarmeanlæg til kombineret rum- og brugsvandsopvarmning.

Vi ved i dag, hvordan den traditionelle lagerudformning optimeres. Sådanne lagre er efterhånden ved at komme på markedet. Desværre er markedet for lagre til solvarmeanlæg ikke ret stort. Prisen for lagrene er derfor stadig for høj, samtidigt

dimensioneres lagrene til at kunne indgå i flere forskellige solvarmeanlæg. Det vil f.eks. ofte ikke være muligt at opnå præcist den størrelse lager, der er mest optimal. Et større marked vil betyde bedre mulighed for yderligere produktudvikling og billiggørelse af solvarmelagre. Det vil igen kunne øge markedet. Denne gode cirkel kan sættes igang - f.eks. ved forbedrede støtteordninger.

OPTIMERING AF VARMEVEKSLERSPIRALER

3. Optimering af varmevekslerspiraler

Der har ikke før eksisteret et præcist dimensioneringsgrundlag for varmevekslerspiraler i lagre til solvarmeanlæg. Det skyldes, at der ikke har været et detaljeret kendskab til, hvordan varmevekslerspiralerne termisk opfører sig. Men med den i ref. [4] foreslåede simple, men fuldstændige beskrivende metode, er der åbnet mulighed for en nærmere undersøgelse af, hvordan varmevekslerne i solvarmeanlæg skal udformes.

I dette kapitel undersøges det, hvordan varmeveksleren i et traditionelt lager i solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning (se fig. 1) skal se ud.

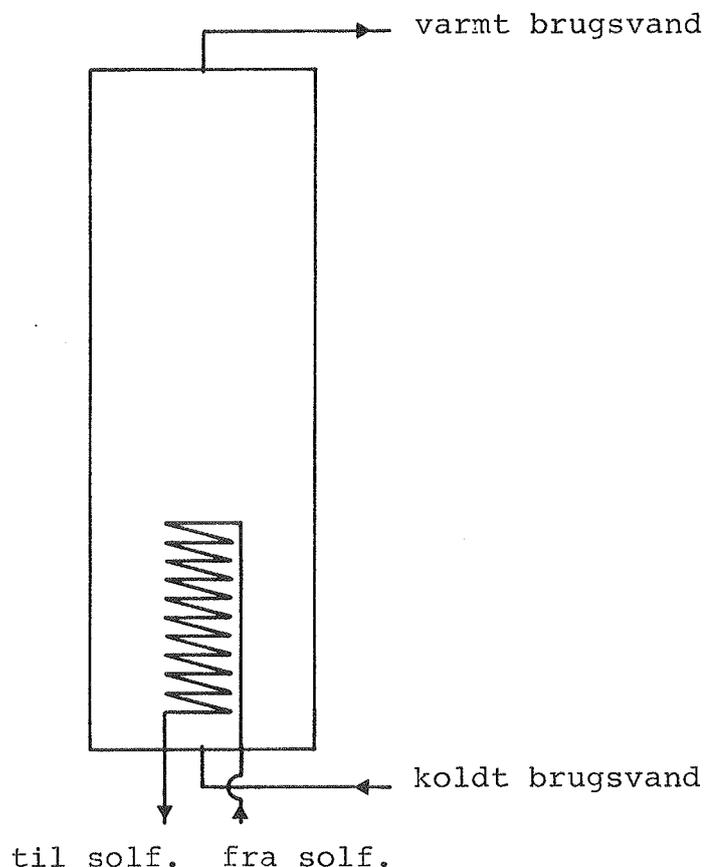


Fig. 1. Principskitse af en i dag anvendt lagertank i solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning.

3.1. Beregning af varmevekslerspiralen

Ref. [4] angiver en simpel metode til beregning af varmeoverføringsevnen for neddykkede varmevekslerspiraler i vand i små velisolerede beholdere. Metoden er udviklet på baggrund af forsøg med varmevekslerspiraler. Dette arbejde er foretaget, fordi der var dårlig overensstemmelse mellem forsøgsresultater og resultater beregnet ved hjælp af den gængse teori for varmeovergang fra rør. Dette viser fig. 2, hvor varmeovergangen er målt og beregnet for spiralen på fig. 3, med en gennemsnitlig volumenstrøm og effektoverførsel på henholdsvis 7 l/min og 1200 W.

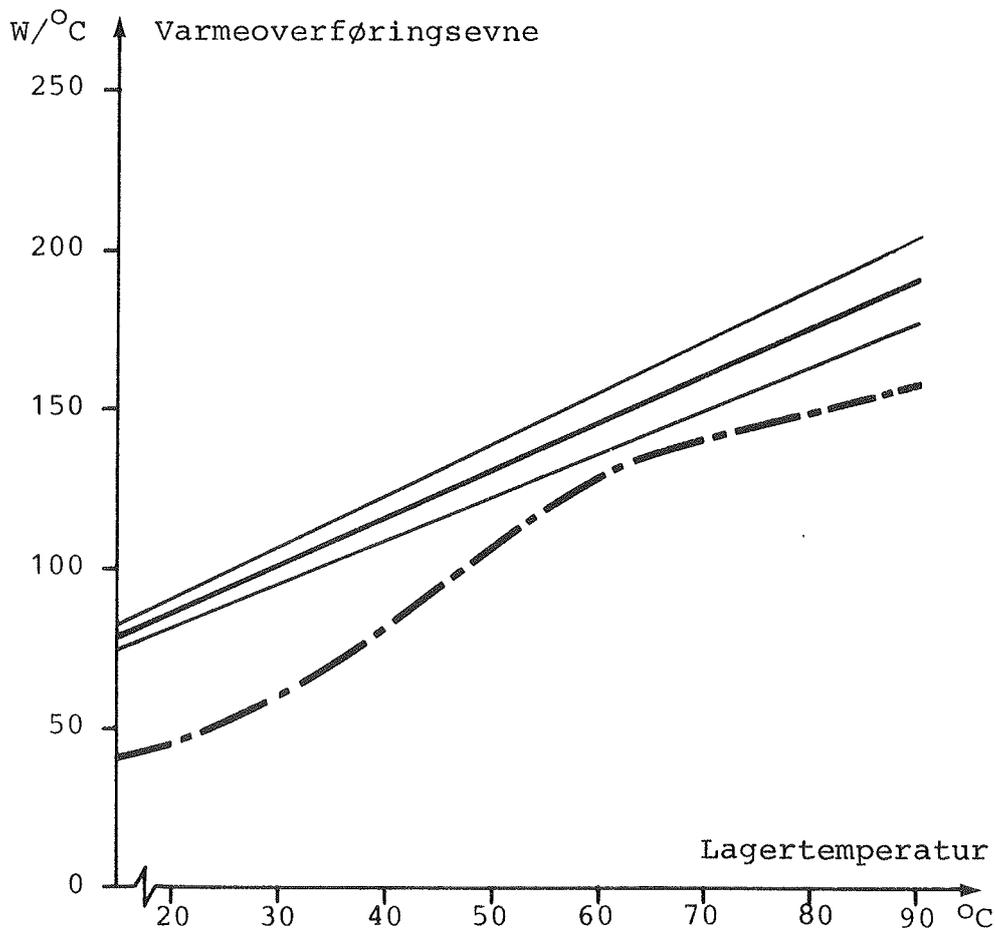


Fig. 2. Varmeoverføringsevnen målt og beregnet for spiralen på fig. 3 med en volumenstrøm på 7 l/min. og en effektoverførsel på 1200 W (ref. [4])

- målt,
- måleusikkerhed,
- - - - - beregnet med den gængse teori.

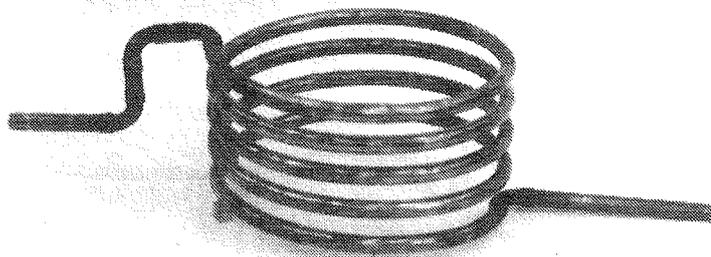


Fig. 3. Spiralen beregningerne i fig. 2, 4, 11 og 12 er foretaget for. Spiralen er 5 m lang, rørene er 16/18 mm kobberør, væsken er 50 vægtprocent propylenglycol/vand og spiralsnoningerne har en diameter på 300 mm (ref. [4]).

Ved hjælp af forsøg med varmevekslerspiraler, er den gængse teori blevet modificeret således, at teorien inden for måleusikkerheden giver samme resultat som forsøgene - dette er vist på fig. 4.

Udtrykt ved Nusselts tal angiver den tilpassede teori den indvendige og udvendige varmeovergang som:

INDVENDIG VARMEOVERGANG

$$\text{Nu} = 0,016 \text{Pr}_m^{0,34} \text{Re}_d^{0,82} \left(\frac{\text{Pr}_m}{\text{Pr}_w}\right)^{0,25}$$

UDVENDIG VARMEOVERGANG

$$\text{Nu} = \left(0,6 + \frac{0,387 \text{Gr}_d^{0,192}}{(1+(0,559/\text{Pr}_f)^{9/16})^{8/27}}\right)^2$$

hvor indeks m betyder, at Pr skal findes ved medietemperaturen (middeltemperaturen af væsken inde i spiralen), d er

den karakteristiske længde = den indvendige diameter af røret, w betyder at Pr findes ved den indvendige rørvægstemperatur og f at Pr findes ved filmtemperaturen = middeltemperaturen ved den udvendige rørvæg og vandet i lagertanken,

Pr er Prandtls tal,

Re er Reynolds tal og

Gr er Grashofs tal.

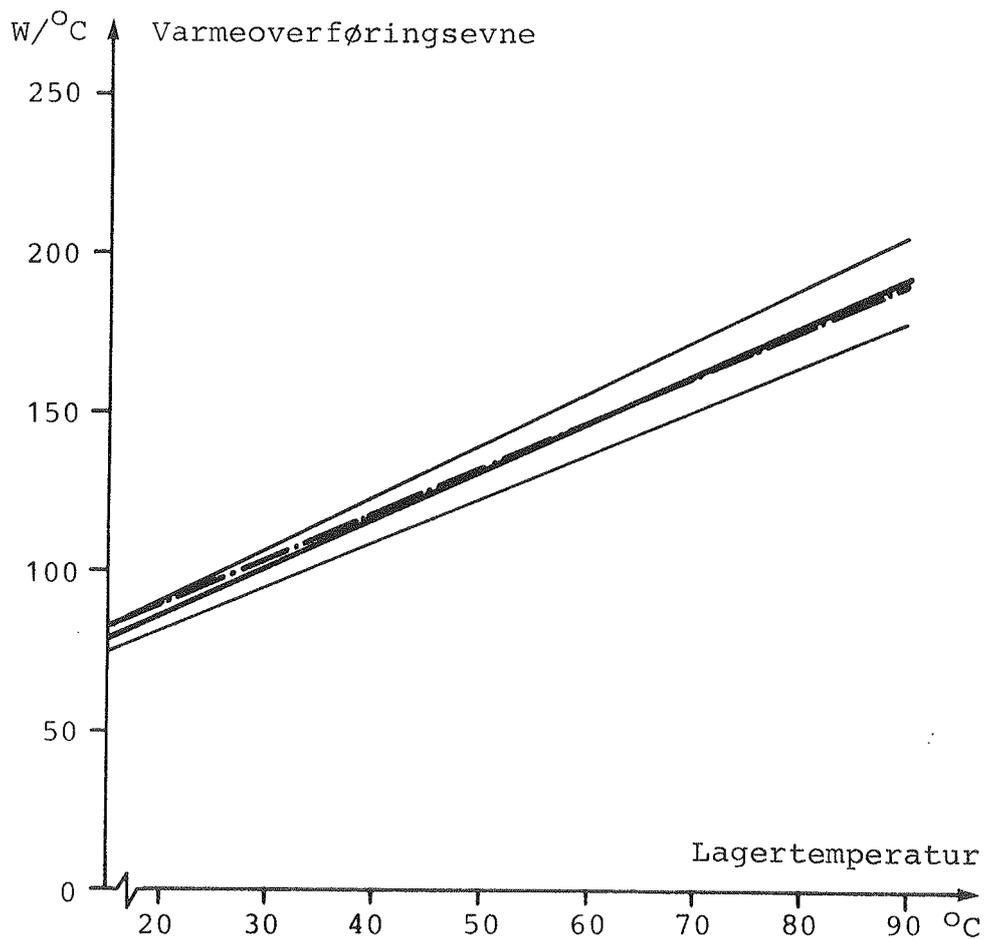


Fig. 4. Varmeoverføringsevnen målt og beregnet for spiralen på fig. 3 med en volumenstrøm på 7 l/min. og en effektoverførsel på 1200 W (ref. [4])

- målt,
- - - måleusikkerhed,
- · · beregnet med den tilpassede teori.

3.1.1. Følsomhedsanalyser

På de følgende figurer vises resultaterne fra følsomhedsanalyser foretaget med den tilpassede teori. I tabel 1 er angivet den referencetilstand, hvorfra følsomhedsanalyserne blev foretaget. Parametrene, der blev varieret var:

rørdimensionen,
spiralmaterialet,
volumenstrømmen,
længden af spiralen,
kraften der driver varmeovergangen - udtrykt enten som temperaturdifferencen (ΔT) mellem indløbet til spiralen og lageret, eller som den overførte effekt \dot{Q} og væsken i spiralen.

rørdimension	16/18 mm.
materiale	kobber
længde af spiral	10 m
væske i spiralen	50 vægtprocent propylenglycol/vand
lagertemperatur	40 °C
temperaturdifferencen ΔT	10 °C ($\sim 1800W$)
volumenstrømmen i spiral	6 l/min.

Tabel 1. Referencetilstand for følsomhedsanalyser over varmeoverføringssevnen for en varmevekslerspiral.

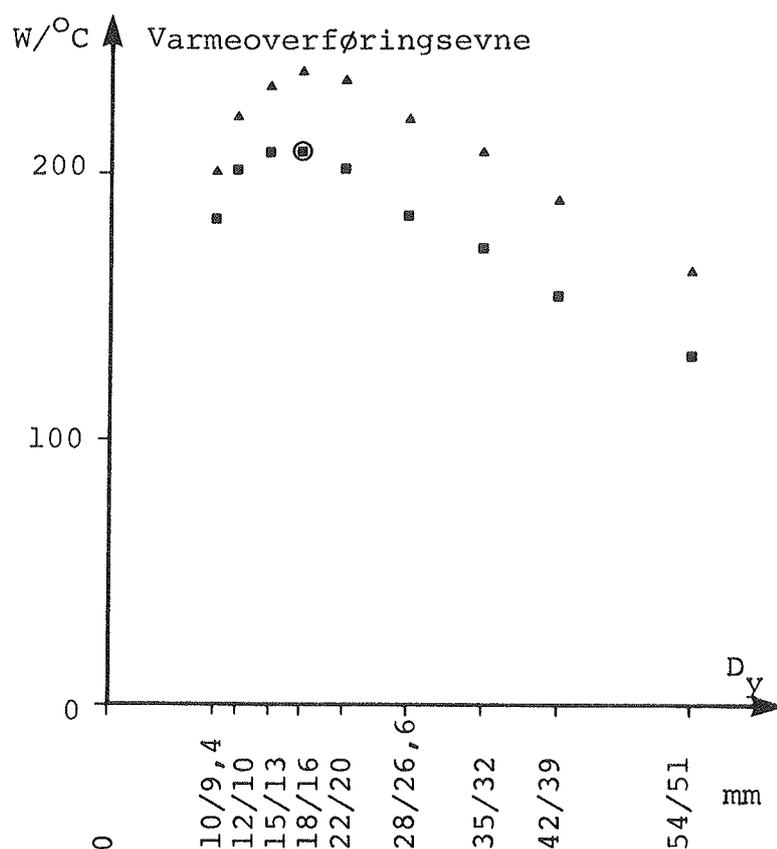


Fig. 5. Varmeoverføringsevnenes afhængighed af rørdimensionen (ref. [4]).

- ▲ ved en volumenstrøm på 8 l/min,
- ved en volumenstrøm på 6 l/min.

	Rørmateriale		
	kobber	stål	PVC
k [W/°Cm]	384	50	0,35
H [W/°C]	208	207	100

Tabel 2. Varmeoverføringsevnenes afhængighed af forskellige rørmaterialer (ref. [4]).

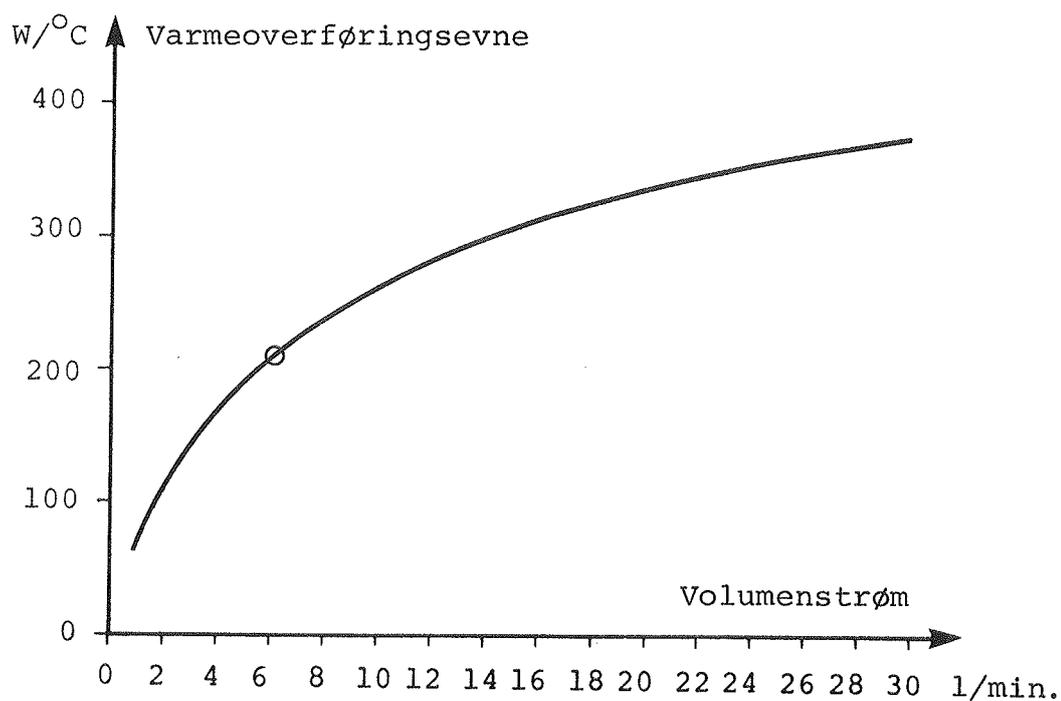


Fig. 6. Varmeoverføringsevne's afhængighed af volumenstrømmen (ref. [4]).

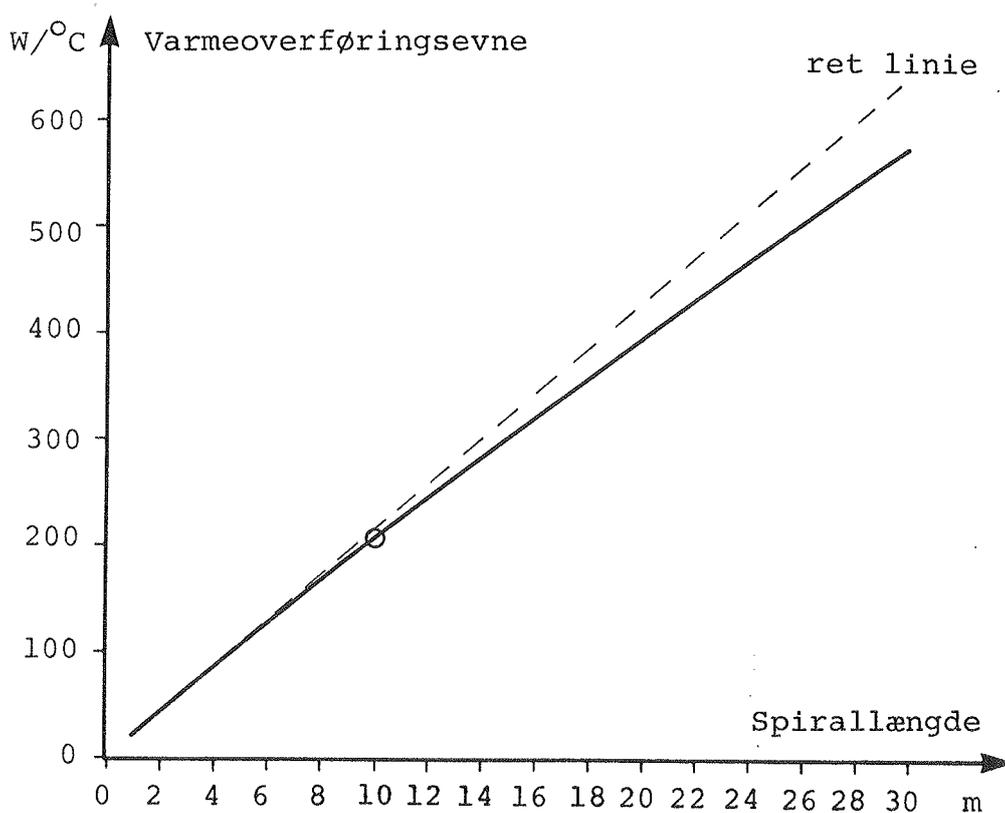


Fig. 7. Varmeoverføringsevne's afhængighed af spirallængden (ref. [4]).

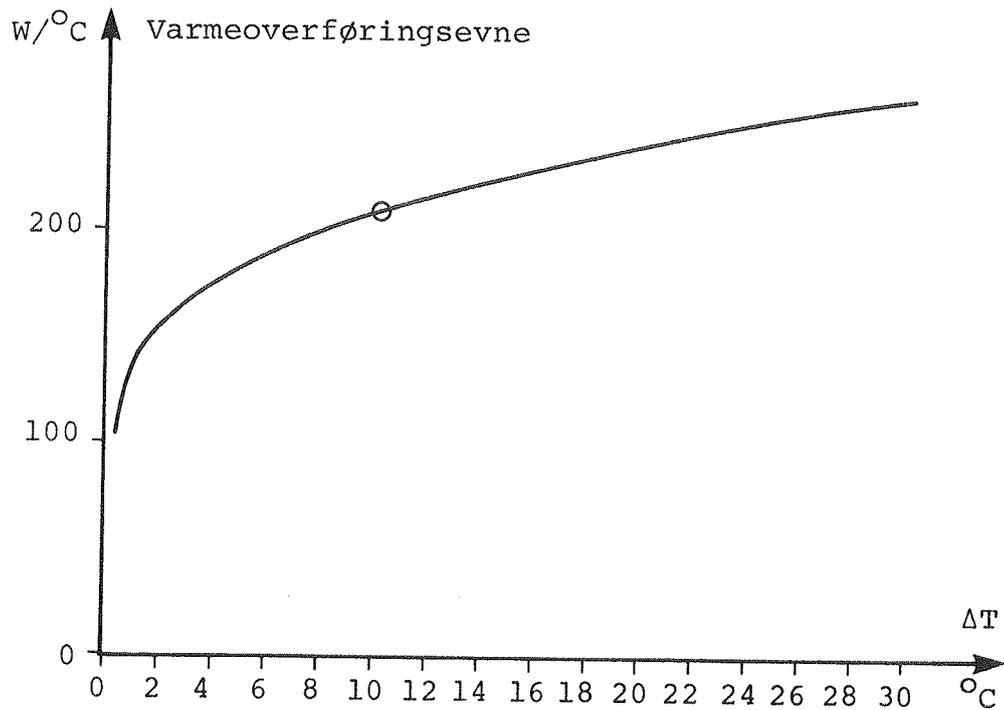


Fig. 8. Varmeoverføringsevnenes afhængighed af temperaturdifferensen (ΔT) mellem indløb og lager (ref. [4]).

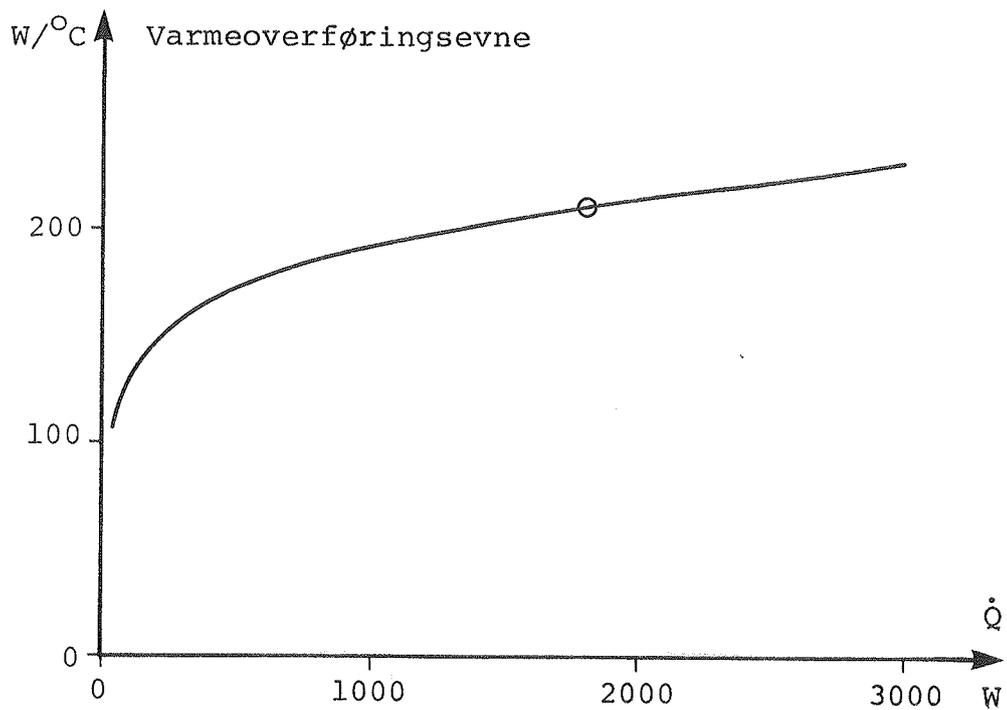


Fig. 9. Varmeoverføringsevnenes afhængighed af den overførte effekt \dot{Q} (ref. [4]).

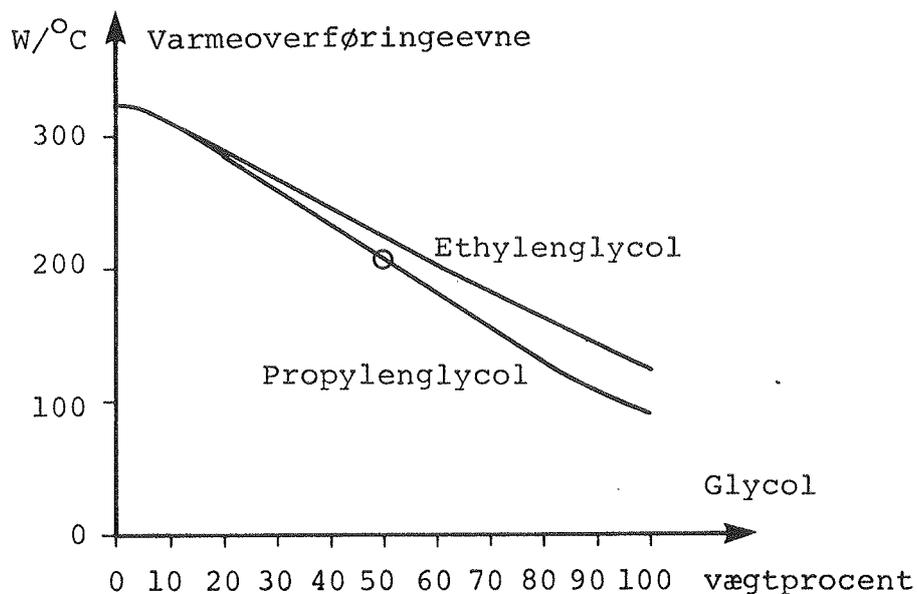


Fig. 10. Varmeoverføringssevnenes afhængighed af væsken i varmevekslerspiralen.

Med undtagelse af forskellige rørmaterialer af metal betyder de her varierende parametre meget for spiralens varmeoverføringssevne. Senere i dette kapitel bliver det undersøgt, hvad disse parametre betyder for et solvarmeanlægs ydelse.

3.1.2. Den simple beregningsmetode

Det kræver lang beregningstid at beregne varmeoverføringssevnen for en varmevekslerspiral - både med den gængse og med den tilpassede teori.

Det skyldes, at resultatet ikke fås direkte, men fremkommer ved hjælp af en iteration. Derfor var et af målene med arbejdet bag ref. [4] at udvikle en simpel metode til beregning af varmeoverføringssevnen for varmevekslerspiraler.

Til dette formål blev der taget fat i varmeoverføringsevnen afhængighed af temperaturdifferencen mellem indløbet til spiralen og lageret - ΔT (se fig. 8). På fig. 11 er denne afhængighed tegnet op for spiralen på fig. 3 for forskellige lagertemperaturer og ΔT 'er.

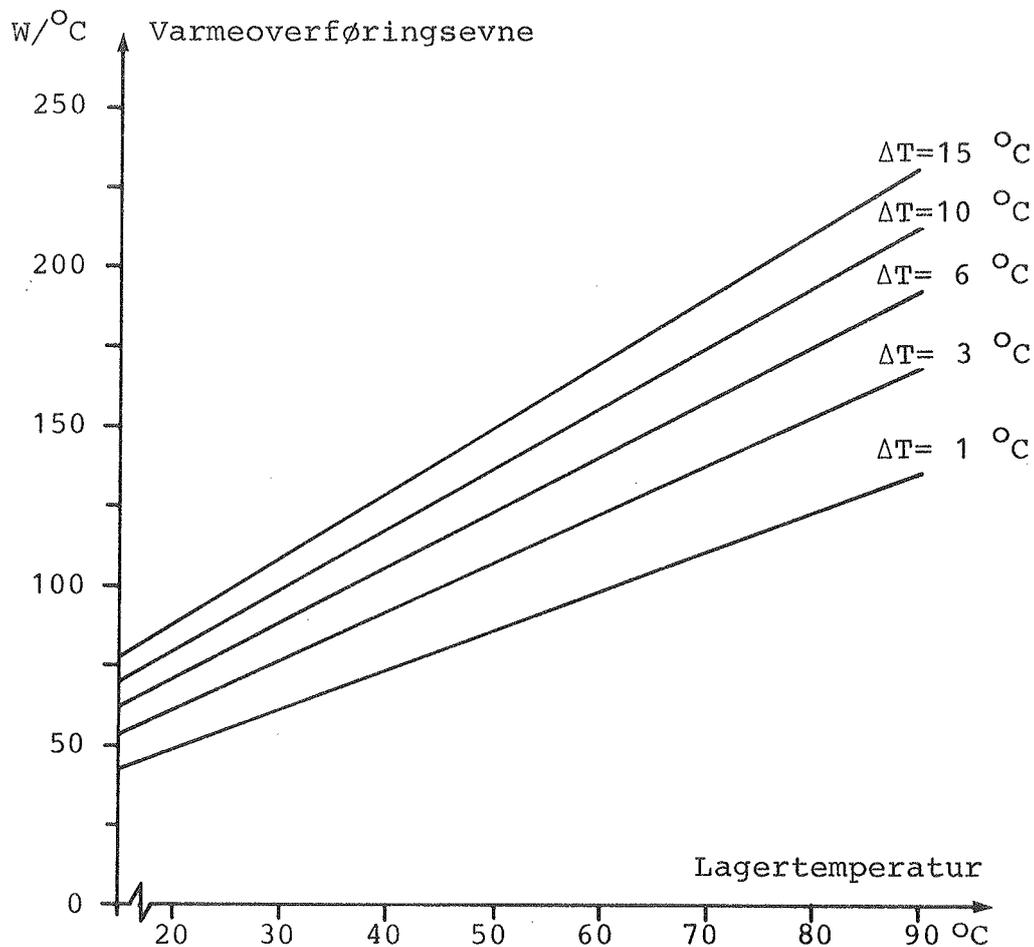


Fig. 11. Varmeoverføringsevnen for spiralen på fig. 3 afhængig af lagertemperaturen og temperaturdifferencen ΔT (ref. [4]).

En nærmere undersøgelse (ref. [4]) viser, at disse linier kan frembringes ved følgende simple udtryk:

$$\begin{aligned} H &= a(\Delta T) + b(\Delta T) \cdot T_1 && [W/^\circ C] \\ a(\Delta T) &= c + d \cdot \ln(\Delta T) && [W/^\circ C] \\ b(\Delta T) &= e + f \cdot \ln(\Delta T) && [W/^\circ C^2] \end{aligned}$$

hvor H er varmeoverføringsevnen,
 ΔT er temperaturdifferencen mellem indløbet til
varmevekslerspiralen og lageret [$^{\circ}\text{C}$],
 T_1 er lagertemperaturen [$^{\circ}\text{C}$].

Der er opbygget en edb-model, der ud fra den tilpassede teori og kendskabet til varmevekslerspiralen, volumenstrømmen og solfangervæsken direkte giver konstanterne c , d , e og f . Resultaterne fra kørsler med denne model indgår i de følgende beregninger i denne rapport.

Ud fra det simple udtryk kan varmeovergangen direkte findes. Dette udtryk giver samtidigt en fuldstændig beskrivelse af de varmeoverføringsmæssige forhold for varmevekslerspiralen. På fig. 12 er optegnet resultatet af en beregning af varmeoverføringsevnen for varmeveksleren på fig. 3, ved en volumenstrøm på 7 l/min. og en effektoverførsel på 1200 W.

Som det ses er der en god overensstemmelse mellem målte og beregnede værdier.

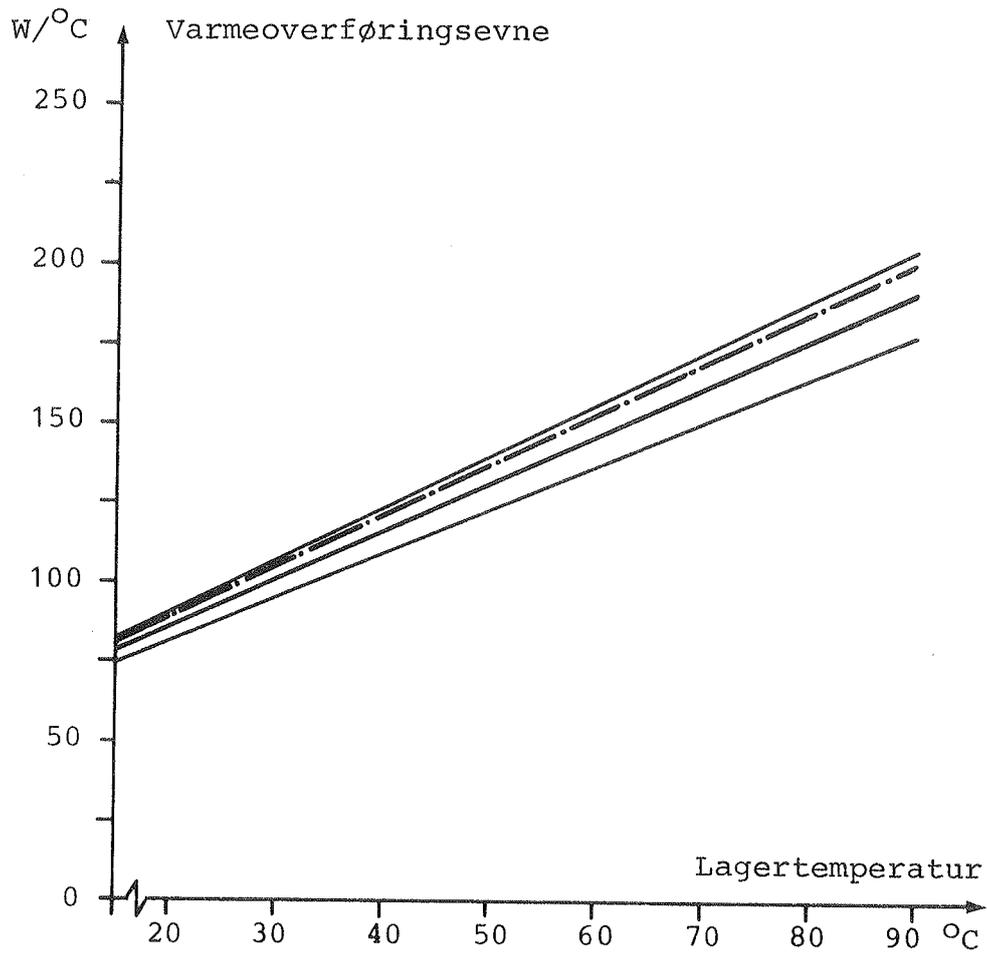


Fig. 12. Varmeoverføringsevnen målt og beregnet for spiralen på fig. 3 med en volumenstrøm på 7 l/min. og en effektoverførsel på 1200 W (ref. [4]),
— målt,
— måleusikkerhed,
- - - beregnet med den simple metode.

3.2. Beregning af solvarmeanlægs ydelse

Til undersøgelse af, hvad varmevekslerspiralen betyder for solvarmeanlægs ydelse, er anvendt et avanceret program, hvor det simple ligningssystem, som er beskrevet i foregående afsnit, benyttes.

Dette edb-program (ref. [5]) tager i højere grad end andre programmer højde for alle de termiske strømme, der sker i og omkring et lager.

De solvarmeanlæg, der i denne rapport undersøges, er alle dimensioneret efter tommelfingerreglerne i ref. [3], der siger:

Lagervolumenet er det gennemsnitlige daglige varmtvandsforbrug ved 45 °C + 50 l.

Solfangerarealet er 1 m² (med selektiv absorber) for hver 50 l lagertank.

Anlæg dimensioneret efter denne tommelfingerregel er i dag økonomisk og ydelsesmæssigt optimale.

I dette kapitel undersøges 4 størrelser anlæg:

dagligt forbrug ved 45 °C l	solfangerareal m ²	lagerstørrelse l
100	3	150
200	5	250
300	7	350
450	10	500

Tabel 3. De fire solvarmeanlæg, der undersøges.

I tabel 4 er yderligere angivet data for anlæggene.

<u>Solfanger</u> maksimaleffektivitet varmetabskoefficient varmekapacitet solfangerhældning orientering	0,90 5,0 W/°Cm 10,0 kJ/°Cm ² 45 ° sydvendt
<u>Solfangervæske</u> 50% (vægtprocent) propylenglycol/vand volumenstrøm	1,0 l/min.m ² solfanger
<u>Styresystem</u> startdifferens stopdifferens	5 °C 0,5 °C
<u>Varmtvandsforbrug</u> koldtvandstemperatur varmtvandstemperatur	10 °C 45 °C
<u>Solfangerkreds</u> rør isoleringstykkelse isoleringsevne rørlængde ude rørlængde inde	3/4" stålrør 30 mm 0,045 W/°Cm 4 + solfanger- arealet m 6 m
<u>Cirkulationspumpe</u> pumpeeffekt	50 W
<u>Varmelager</u> materiale højde/diameter forhold isoleringstykkelse isoleringsevne omgivelsestemperatur placering af varmevekslerspiral	stål 3 50 mm 0,045 W/°Cm 20 °C nederste sjettedel af lageret

Tabel 4. Data for referenceanlæggene.

Der anvendes kun to af edb-programmets udgangsdata: Netto- og totalydelsen. Nettoydelsen er den mængde energi, der tappes fra lageret i løbet af et år. Totalydelsen er den energimængde et oliefyr skulle bruge for at levere samme mængde energi som nettoydelsen. D.v.s. nettoydelsen korrigeres for fyrets virkningsgrad og det tomgangstab, der spares, fordi oliefyret kan slukkes en del af sommermånederne. I beregningerne af totalydelsen anvendes et moderne oliefyr med en virkningsgrad på 85% og et tomgangstab på 350 W.

Antallet af dage, hvor oliefyret kan slukkes, beregnes efter følgende empirisk fundne formel fra (ref. [6]):

$$N = \begin{cases} 150 & , \text{ for } \epsilon_s > 0,95 \\ \frac{150}{0,2} (\epsilon_s - 0,75) & , \text{ for } 0,75 < \epsilon_s < 0,95 \\ 0 & , \text{ for } \epsilon_s < 0,75 \end{cases}$$

hvor N er antallet af dage, hvor oliefyret kan slukkes,
 ϵ_s er dækningsgraden i sommermånederne maj-september.

Totalydelsen kan herefter findes af:

$$Q_{\text{år}}^{\text{tot}} = \frac{Q_{\text{år}}^{\text{n}}}{\eta_k} + \frac{N \cdot 24 \cdot T}{\eta_k}$$

hvor $Q_{\text{år}}^{\text{n}}$ er solvarmeanlæggets årlige nettoudbytte [kWh],
 η_k er kedlens fyringsnyttevirkning,
 N er antallet af dage, hvor oliefyret kan slukkes,
 T er kedlens tomgangstab [kW].

3.3. Volumenstrøm i solfangerkredsen

Sædvanligvis foreskrives det, at der i solvarmeanlæg køres med en volumenstrøm på 1 l/min pr. m² solfangerareal.

I dette afsnit undersøges det nærmere, hvor stort flowet i solfangerkredsen bør være for at sikre en tilstrækkelig varmeoverføring fra varmevekslerspiralen i beholderen. Undersøgelserne i ref. [4] (se fig. 6) viser nemlig, at varmeovergangen ofte er meget afhængig af volumenstrømmen. Det er derfor vigtigt, før tommelfingerreglerne udledes, at undersøge, om denne store afhængighed smitter af på solvarmeanlæggenes ydelse.

På fig. 13 er optegnet varmeoverføringsevnen for 6 forskellige spirallængder afhængig af volumenstrømmen. Det bør bemærkes, at spiraludformningen under drift påvirker størrelsen af ΔT . De viste forhold for varmeoverføringsevnen er derfor ikke repræsentative for spiralens betydning for varmeoverføringsevnen under drift.

Figuren viser ligesom fig. 6 at varmeoverføringen er meget afhængig af volumenstrømmen. På fig. 14 og 15 er optegnet netto- og totaludbyttet (med varmevekslerspiralerne fra fig. 13) for et solvarmeanlæg på 5 m².

I udregningerne, der ligger til grund for figurerne, er der kun taget hensyn til volumenstrømmens indflydelse på varmeovergangen i varmevekslerspiralen. Ændringer i volumenstrømmen vil selvfølgelig også influere på varmeoverføringsevnen i solfangeren, men da det her drejer sig om en undersøgelse af varmevekslerspiralen, ses der bort fra dette. En medtagelse af ovenstående ville desuden sløre billedet i "varmeveksleranalysen".

I ref. [7] er to solfangere undersøgt med hensyn til volumenstrømmens indflydelse på effektiviteten. For de to undersøgte solfangere er betydningen ikke stor. Undersøgelsen

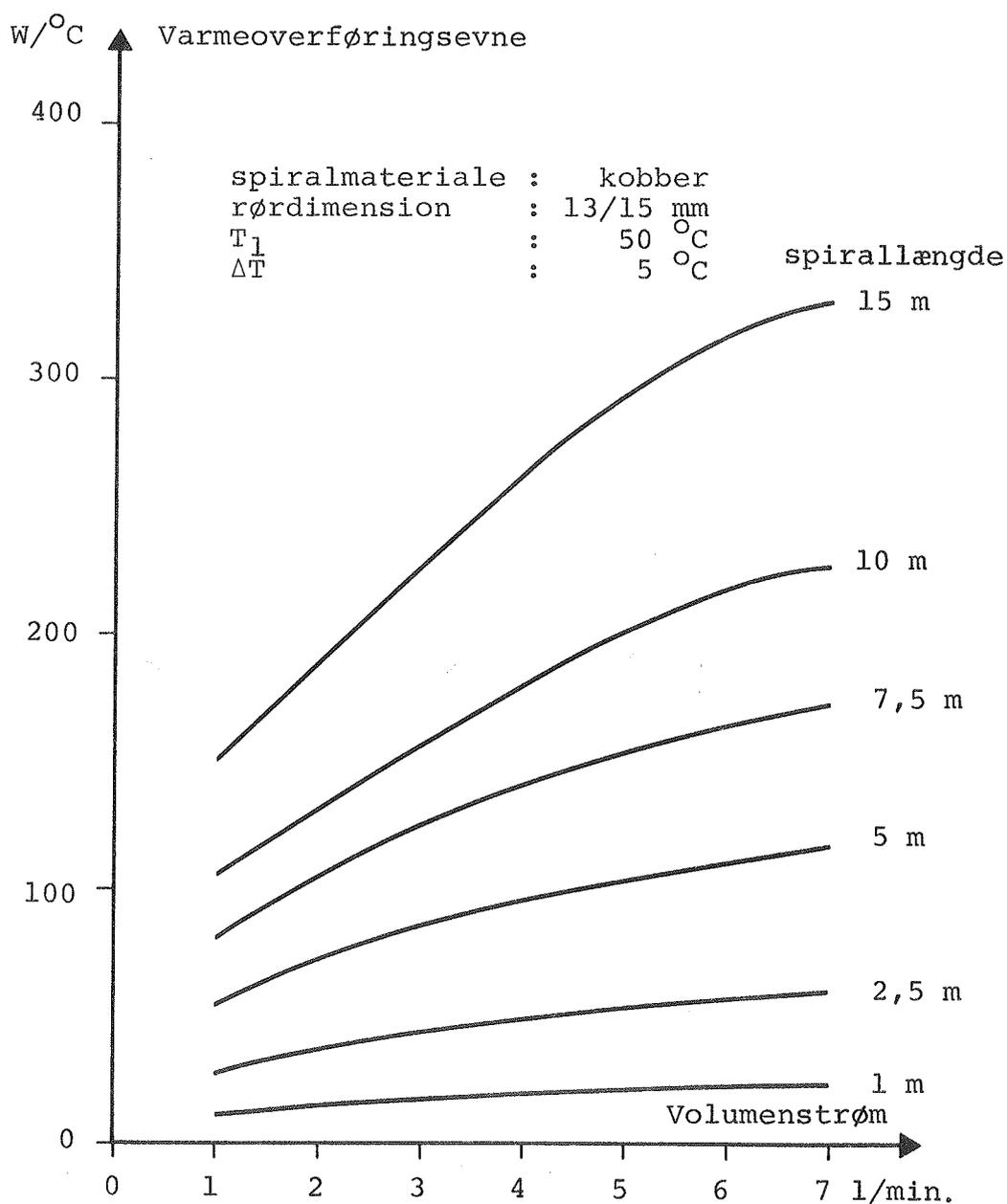


Fig. 13. Varmeoverføringsevnen ved fast temperaturniveau og temperaturdifferens for 6 varmevekslerspiraler afhængigt af flowet.

viser dog, at jo mindre det væskebestrøgne areal er, jo større betydning har volumenstrømmen. D.v.s. betydningen er størst for små rør med brede finner, mens betydningen for en dobbeltpladeabsorber og en roll-bond absorber er væsentlig mindre - ofte ikke mærkbar.

Hvis en nedsættelse af volumenstrømmen i solfangerkredsen mindsker anlæggets effektivitet, er det muligt at koble solfangerne sammen i serie og derved bibeholde samme volumenstrøm over solfangerne. Det øgede temperaturniveau i solfangerne, dette resulterer i, vil være mindre mærkbart på anlæggets ydelse, end en mindsket volumenstrøm.

Fig. 14 og 15 viser, at solvarmeanlæggenes ydelser kun er meget lidt afhængig af volumenstrømmen i varmevekslerspiralen. Kun ved meget små spirallængder og små flow er der en tydelig afhængighed.

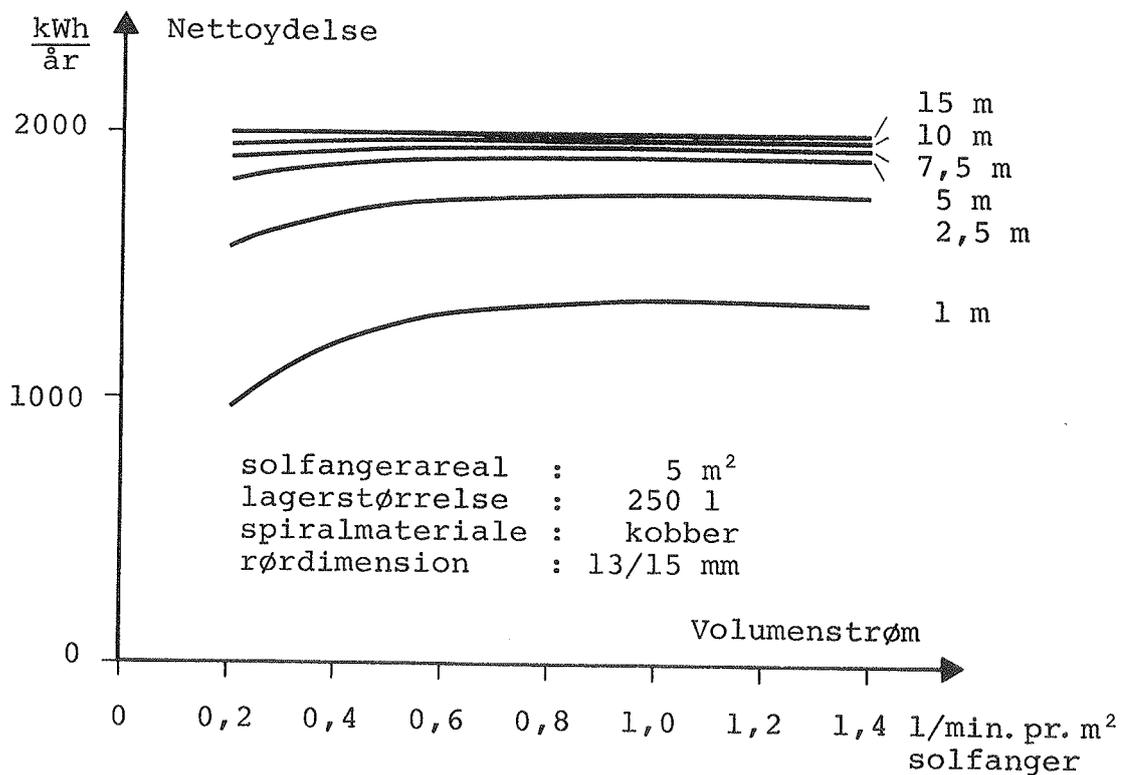


Fig. 14. Nettoydelser for solvarmeanlæg med forskellige spirallængder og flow.

Hvis flowet dimensioneres efter 1 l/min. pr. m² solfangerareal, giver det ifølge figurerne den maksimale ydelse. Men som figurerne også viser, kan flowet være betydeligt lavere, hvis tommelfingerreglen for spirallængden fra næste afsnit over-

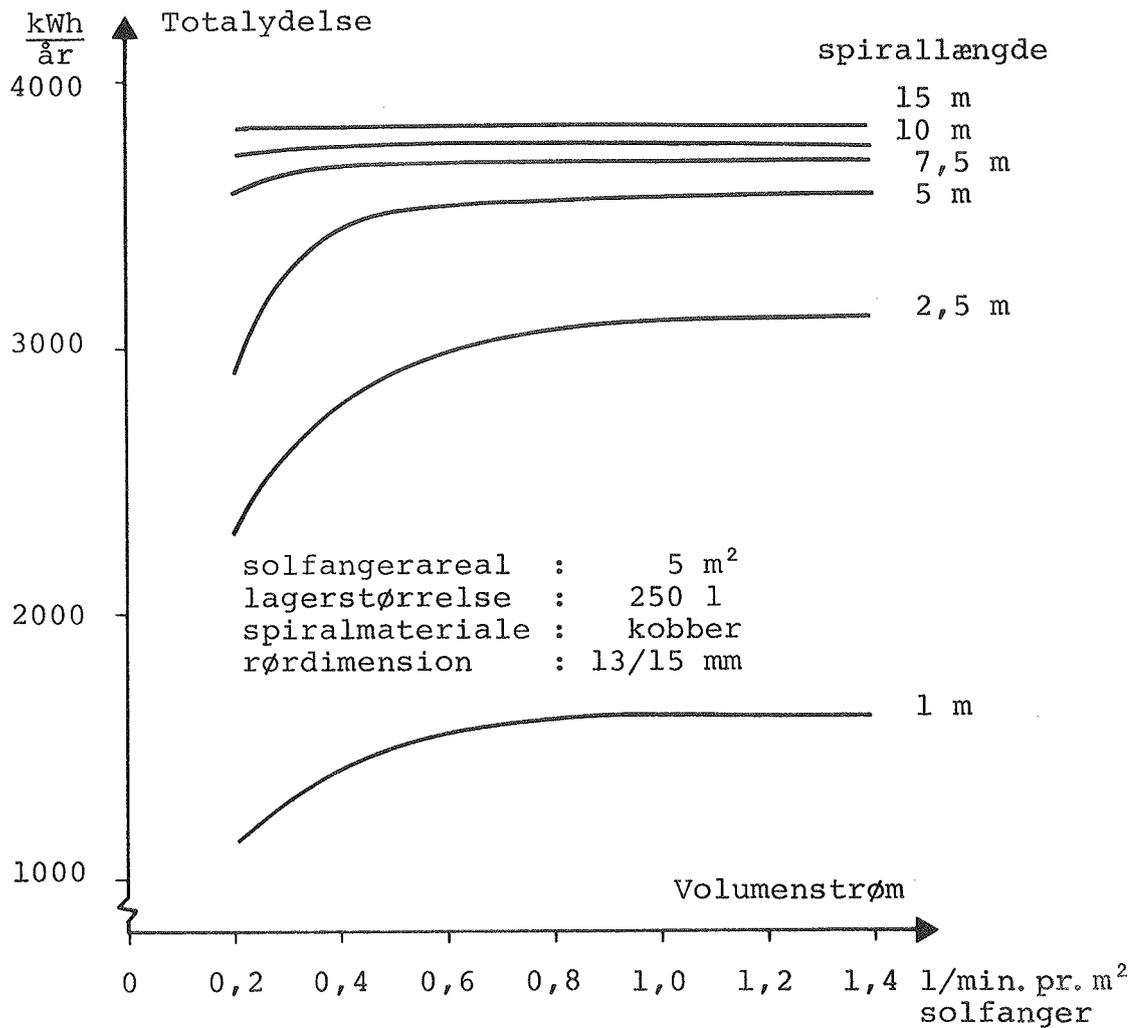


Fig. 15. Totalydelser for solvarmeanlæg med forskellige spirallængder og flow.

holdes. F.eks. vil en volumenstrøm på 0,2 l/min. pr. m² sol-fanger ikke reducere ydelsen mærkbart. Figurerne antyder svagt, at flowet helst ikke må blive alt for meget større end 1 l/min. pr. m² sol-fanger. Mellem 5 og 7 l/min. pr. m² sol-fangerareal falder udbyttet en smule. Det skyldes den måde, solvarmeanlægget styres på. Pumpen stoppes, når temperatur-differencen mellem til- og fraløb i varmevekslerspiralen bliver under 0,5 °C. Ved for store flow bliver temperaturstigningen over solfangeren lille. På den måde stoppes pumpen

ofte for tidligt, hvorfor udbyttet falder. For stort flow kan også bevirke, at der opstår strømningskorrosion i varmevekslerspiralen. Det er således rimeligt at benytte en volumenstrøm på 0,5 l/min. pr. m² solfanger frem for den i dag anvendte standard på 1 l/min. pr. m² solfanger. Da en yderligere sænkning af flowet influerer mest på solfangerens effektivitet, bør en sådan sænkning ikke foretages før, flowets indflydelse for de i dag eksisterende solfanger- og absorbertyper er nøjere undersøgt.

3.4. Optimal udformning af varmevekslerspiraler

3.4.1. Optimale rørdimensioner

I solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning kan man nøjes med de mindste cirkulationspumper, der i dag findes på markedet. Disse pumper kan klare et trykfald på ca. 2 mVS. Ud fra en undersøgelse af trykfaldet over solfanger og rørforbindelser, vurderes det, at trykfaldet over varmevekslerspiralen højst må være 1 mVS. På baggrund af dette og en volumenstrøm på mellem 0,5 og 1 l/min. pr. m² absorber kan følgende tabel opstilles for hvilke rørdimensioner, der kan bruges i de fire anlægsstørrelser. Trykfaldet er beregnet for spirallængderne pr. m² solfangerareal, som tommelfingerreglerne fra næste afsnit foreskriver.

anlæg m ²	rørdimension mm kobberrør				
	3	10/8,4	12/10	15/13	-
5	-	12/10	15/13	18/16	-
7	-	-	15/13	18/16	22/20
10	-	-	15/13	18/16	22/20

Tabel 5. Anvendelig rørdimension til varmevekslerspiral i de fire solvarmeanlæg.

Kørsler med programmet, der simulerer solvarmeanlæggenes årlige ydelser, viser, at rørdimensionen ingen indflydelse har på ydelserne. Ved små spirallængder er der maksimalt en forskel i ydelserne for de forskellige rørdimensioner på 2-3%. For spirallængder, der følger tommelfingerreglen for spirallængden, er forskellene mindre end 0,2%. Forskellene kan derfor lige så godt skyldes usikkerheden i udregningen som en reel forskel i ydelserne.

Rørdimensionen i varmevekslerspiraler til solvarmeanlæg skal derfor ikke vælges ud fra et varmeovergangsmæssigt synspunkt, men ud fra det tilladte tryktab over spiralen.

Tabel 2 (s. 20) viser desuden, at rørmaterialet i spiralerne heller ikke har betydning for solvarmeanlæggenes ydelse, når metaller bruges som rørmateriale.

3.4.2. Optimale spirallængder

Fig. 16 og 17 viser ydelserne for de fire anlægsstørrelser som funktion af spirallængden. Som volumenstrøm er benyttet 1 l/min. pr. m² solfanger, selv om det forrige afsnit viste, at en volumenstrøm på 0,5 l/min. pr. m² solfanger er fuldtud lige så god - og derfor må foretrækkes. Forrige afsnit viste dog også, at resultaterne i afsnittet her også kan bruges ved andre volumenstrømme - således også ved 0,5 l/min. pr. m² solfanger.

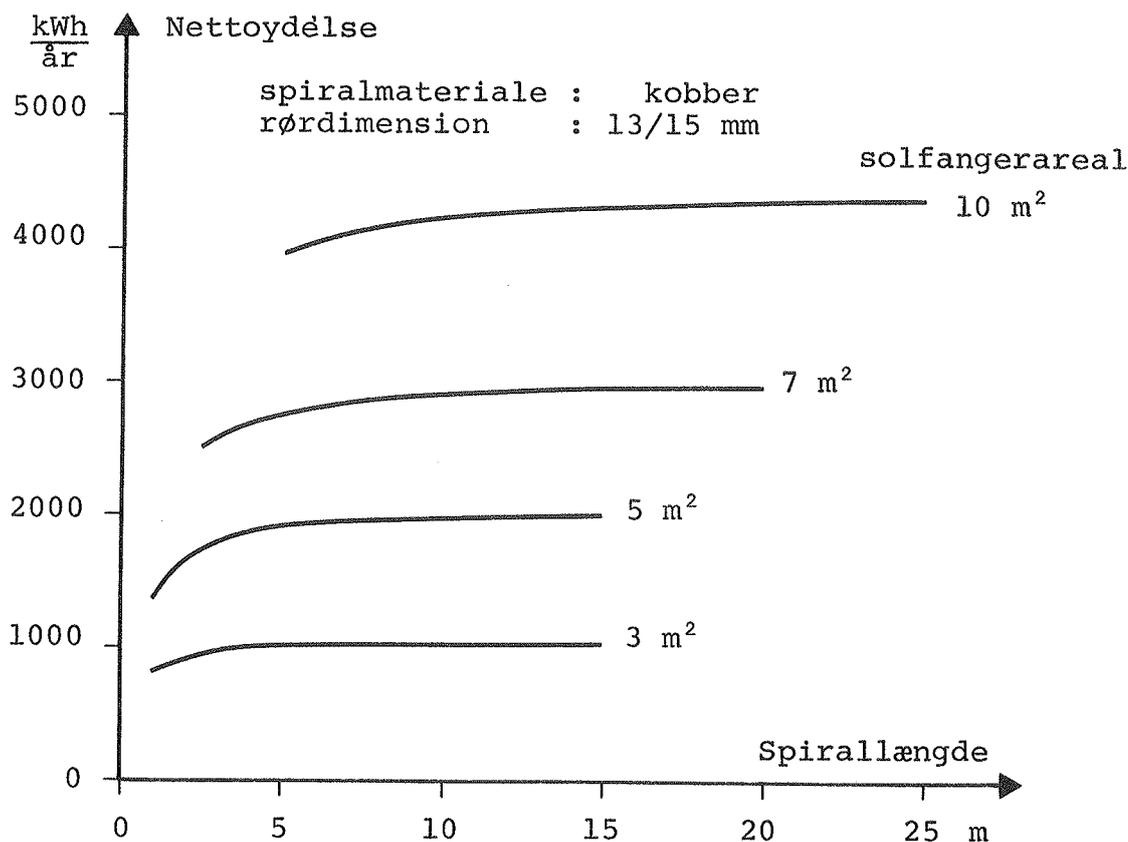


Fig. 16. Nettoyedelse for fire solvarmeanlæg som funktion af spirallængden.

Som det ses af figurerne, er der ikke et egentligt ydelsesmæssigt optimum. Kurverne for 3 og 5 m² solfangerareal har et knæk omkring 1 m spiral pr. m² solfangerareal. Herefter stiger ydelserne stadig lidt, men jævnt for alle kurverne. Ud fra kurverne kan der således kun siges, at spirallerne helst skal være længere end 1 m pr. m² solfangerareal.

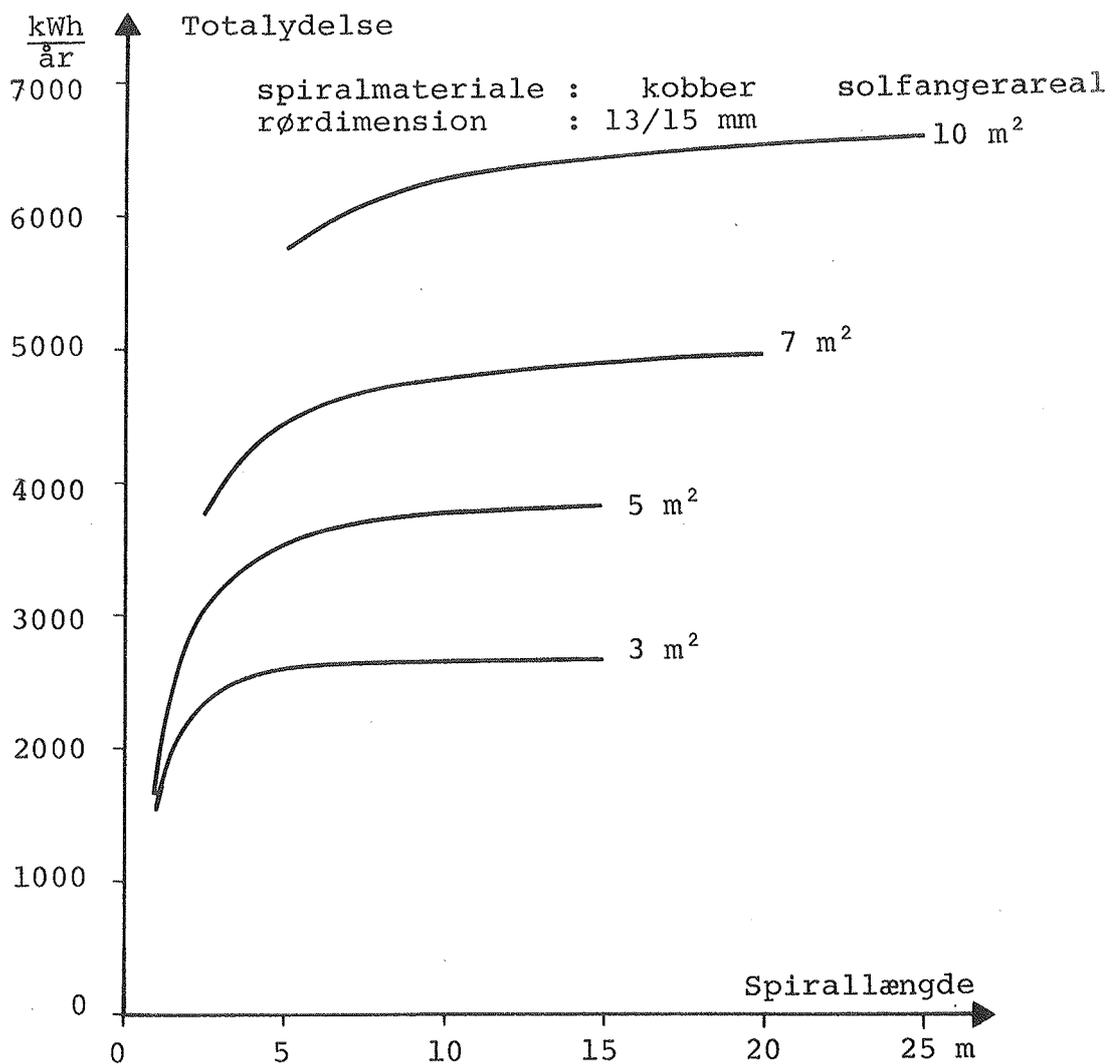


Fig. 17. Totalydelse for fire solvarmeanlæg som funktion af spirallængden.

Man kan da se på prisen for en ekstra meter spiral. Fabrikationsmæssigt betyder det ikke meget, om der er en meter

spiral fra eller til. Prisen på kobberlørene er derfor afgørende. Men denne stigning i prisen er mindre end stigningen i udbyttet pr. ekstra meter spiral.

3.4.2.1. Udformning af varmevekslerspiraler

Ref. [3] og [4] viser, at varmevekslerspiralen skal placeres i bunden af beholderne. Det skyldes, at temperaturniveauet her er lavt på grund af, at det kolde brugsvand ledes ind her. Solfangeren kommer da til at arbejde mere effektivt, da effektiviteten af en solfanger falder med stigende temperaturniveau.

Når varmevekslerspiralen skal placeres i bunden af beholderen, kan der ikke være et vilkårligt antal meter rør placeret her. I dag produceres de fleste beholdere med en flange, der er mindre end beholderens diameter - se fig. 18, d.v.s. det er svært at få placeret en stor varmevekslerspiral i bunden af tanken. De små flanger laves for at minimere prisen, idet store flanger er dyre at lave på tryktanke. Beholderne ville blive mere end dobbelt så dyre, hvis flangen skulle være lige så stor som beholderdiameteren. De nødvendige antal meter spiral skal altså kunne monteres gennem en mindre diameter end selve beholderens diameter.

Fig. 19 viser et billede af, hvordan det er muligt at placere en varmevekslerspiral i et lille volumen. Ifølge ref. [4] kan denne varmevekslerspiral trykkes mere sammen (de enkelte lag ligge tættere over hinanden), uden at varmeovergangen ændres nævneværdigt.

Der findes ingen beregningsmetode for varmeoverføringsevnen for rørbundter (spiralen fig. 19 er et rørbundt), der er udsat for naturlig konvektion, således som en varmevekslerspiral er det i en varmtvandsbeholder.

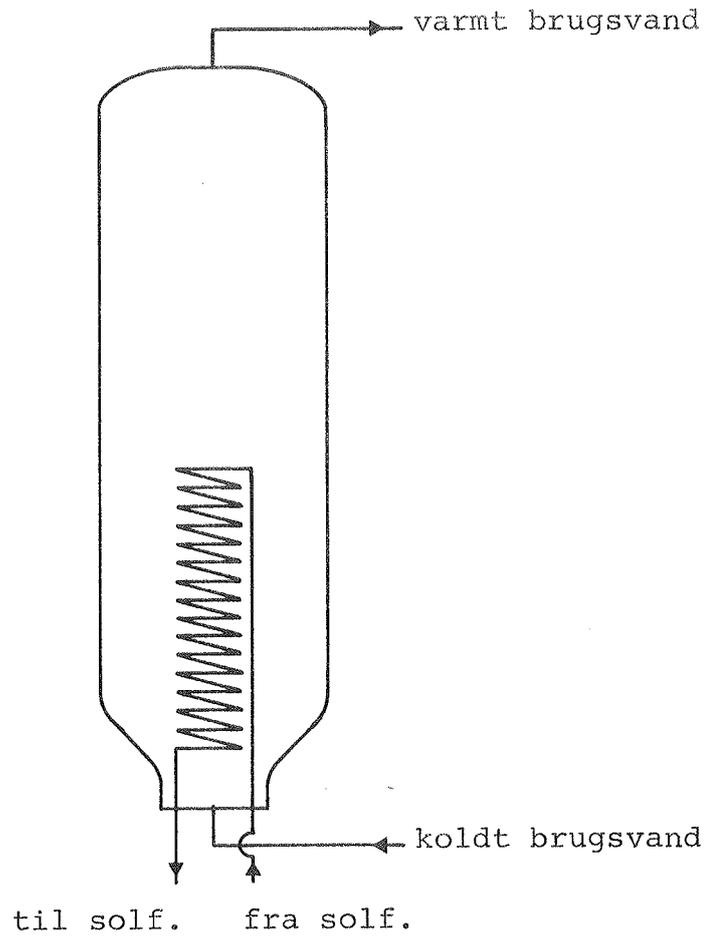


Fig. 18. Principskitse af beholder med lille flange, der er mest almindelig i dag.

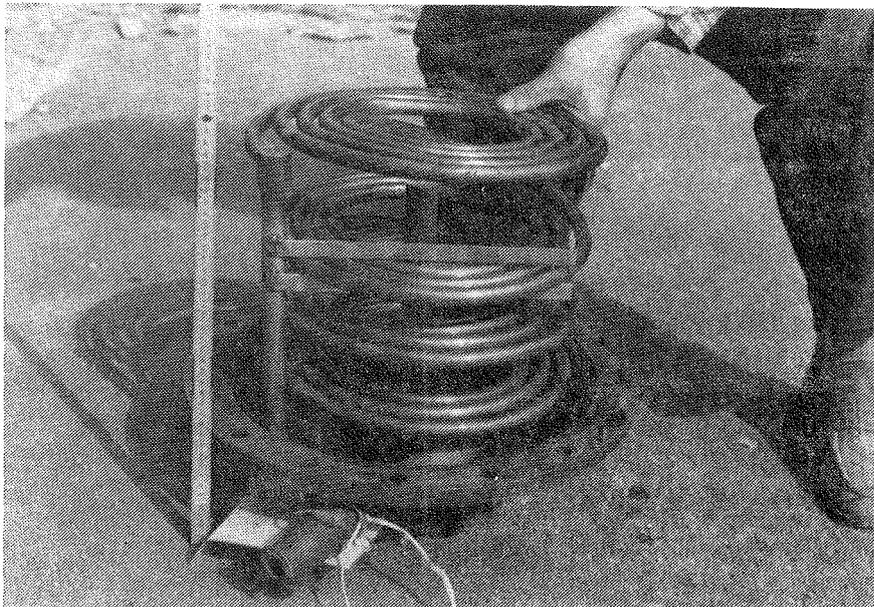


Fig. 19. Billedet illustrerer, hvordan det er muligt at komprimere en varmevekslerspiral.

Men ud fra den litteratur, der findes om varmeovergang fra varmevekslerspiraler og fra rørbundter udsat for tvungen konvektion, er det muligt at skyde sig ind på, hvordan en varmevekslerspiral som fig. 19 skal udformes.

Spiralen fra fig. 19 er principielt sammensat af de to typer rørbundter fig. 20 viser.

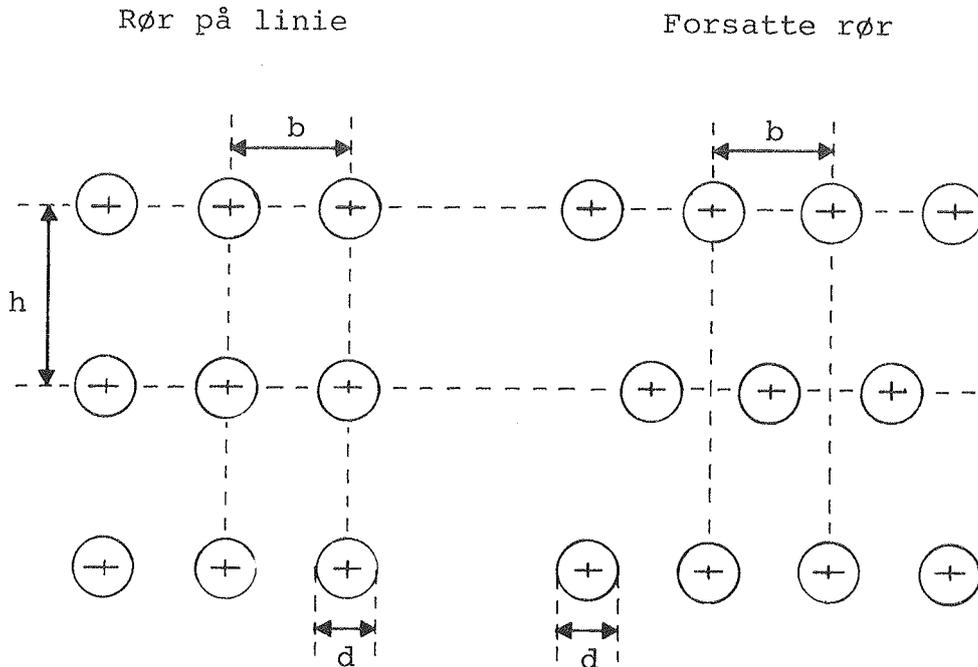


Fig. 20. To muligheder for placering af rør i et rørbundt.

Ud fra ref. [4] og [8] må intervallerne for b og h være følgende:

$$b = 2-3 \text{ gange rørdiameteren}$$

$$h = 3-7 \quad " \quad "$$

Værdierne afhænger selvfølgelig af placeringsmulighederne og spirallængden, samt at spiralen skal placeres i den nederste del af tanken.

Ved hjælp af ovenstående værdier for b og h, samt oplysninger om flangediametre i de i dag anvendte beholdere, er det muligt at beregne, hvor mange meter spiral der kan placeres i den nederste 1/6 af beholderen. 1/6 er valgt, fordi ydelsesberegningerne for anlæggene er foretaget med den forudsætning, at varmeveksleren kun ligger i denne del af beholderne.

Disse beregninger viste, at 2 m spiral pr. m² solfanger med selektiv absorber er et passende tal.

Når sommerdækningsgraden overstiger en vis grænse afhængig af forbrugernes krav, er det muligt at slukke fyret i hele sommerperioden, maj-september. Teoretisk regnes der med en sommerdækningsgrad på 95% (se s. 29), før fyret kan slukkes helt i denne periode (ref. [6]). Indtil grænsen, hvor fyret helt slukkes i sommerperioden, kan totalydelsen både forøges gennem øget nettoydelse og sparet tomgangstab. Efter grænsen øges totalydelsen kun som følge af øgning i nettoydelsen. Derfor skal solvarmeanlæg optimeres efter grænsen, hvor fyret kan slukkes hele sommeren. Dette opfylder en spirallængde på 2 m pr. m² solfanger.

3.4.2.2. Spirallængder ved brug af sortmalede absorbere

Sortmalede absorbere nyttiggør en mindre del af solstrålingen end absorbere med selektiv belægning. Det er derfor nærliggende at antage, at disse absorbere kræver en mindre varmeveksler pr. m² solfanger, idet de skal have overført en mindre effekt.

På den anden side arbejder disse absorbere bedst ved et lavere temperaturniveau (på grund af større varmetab) end nødvendigt for selektive absorbere. Det kunne derfor modsat tænkes, at det var nødvendigt med en forøget varmeovergang for at bringe temperaturniveauet ned.

Fig. 21 og 22 viser anlæg med forskellige solfangerarealer med sortmalede absorbere (med en maksimaleffektivitet og varmetabskoefficient på henholdsvis 0,8 og 7,1 W/°Cm²) i et anlæg med et dagligt forbrug på 200 l og en tank på 250 l. Anlægget med et selektivt absorberareal på 5 m² er også indtegnet.

Som det ses af figurerne, kræver anlæggene med sortmalede absorbere ikke en forøgelse af varmevekslerspiralens totale længde. Kurvernes krumning er næsten identisk med kurven for anlægget med selektiv absorber.

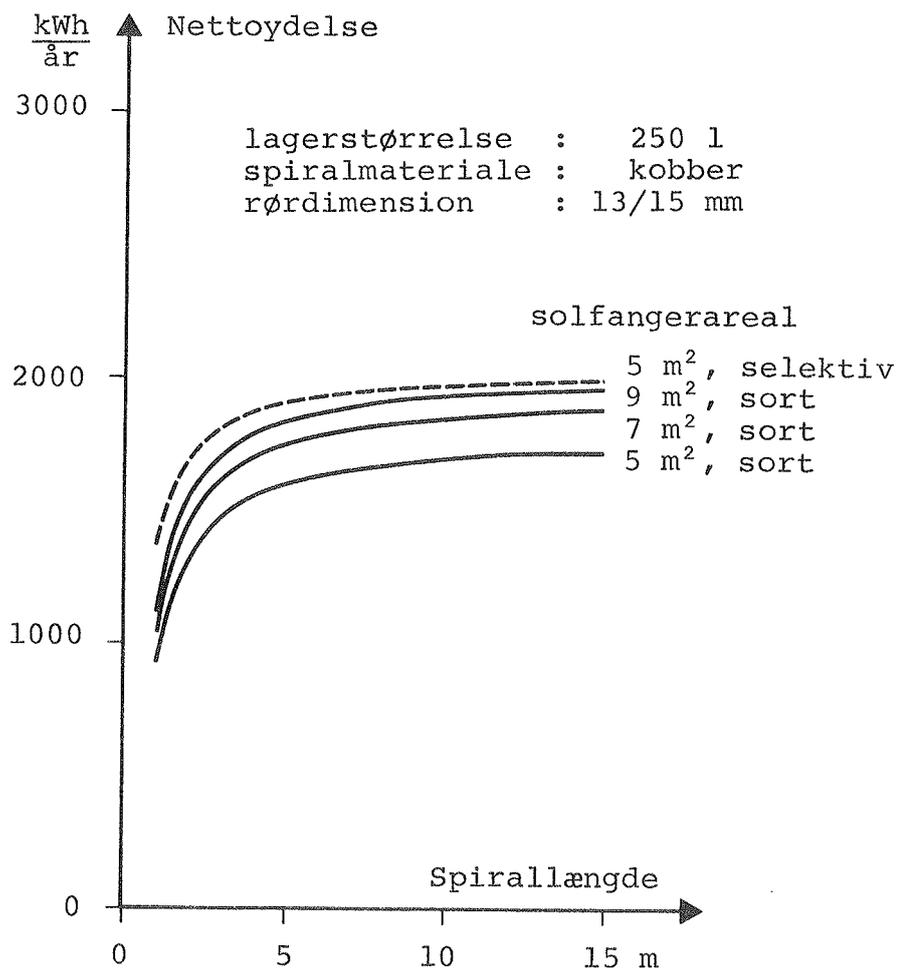


Fig. 21. Nettoyedelse for solvarmeanlæg med sortmalede absorbere som funktion af spirallængden

————— sortmalede absorbere,
- - - - - selektive absorber.

Figurerne viser også, at der kræves et meget stort solfangereareal, for at få udbyttet fra anlæg med sortmalede absorbere op i nærheden af anlægget med selektiv absorber. Det skyldes, at sortmalede absorbere med samme overfladetemperatur har et større varmetab end absorbere med selektiv overflade. Derfor bør beholderne i anlæg med sortmalede absorbere være større end i anlæg med selektive absorbere, for at bringe solfangernes temperaturniveau ned. Fig. 23 og 24 viser derfor ydelserne for anlæg med 7 m² sortmalede absorbere med et lager på henholdsvis 250 og 350 l, hvor spirallængden er beregnet efter tommelfingerreglerne fra sidste afsnit - henholdsvis 10 og 14 m.

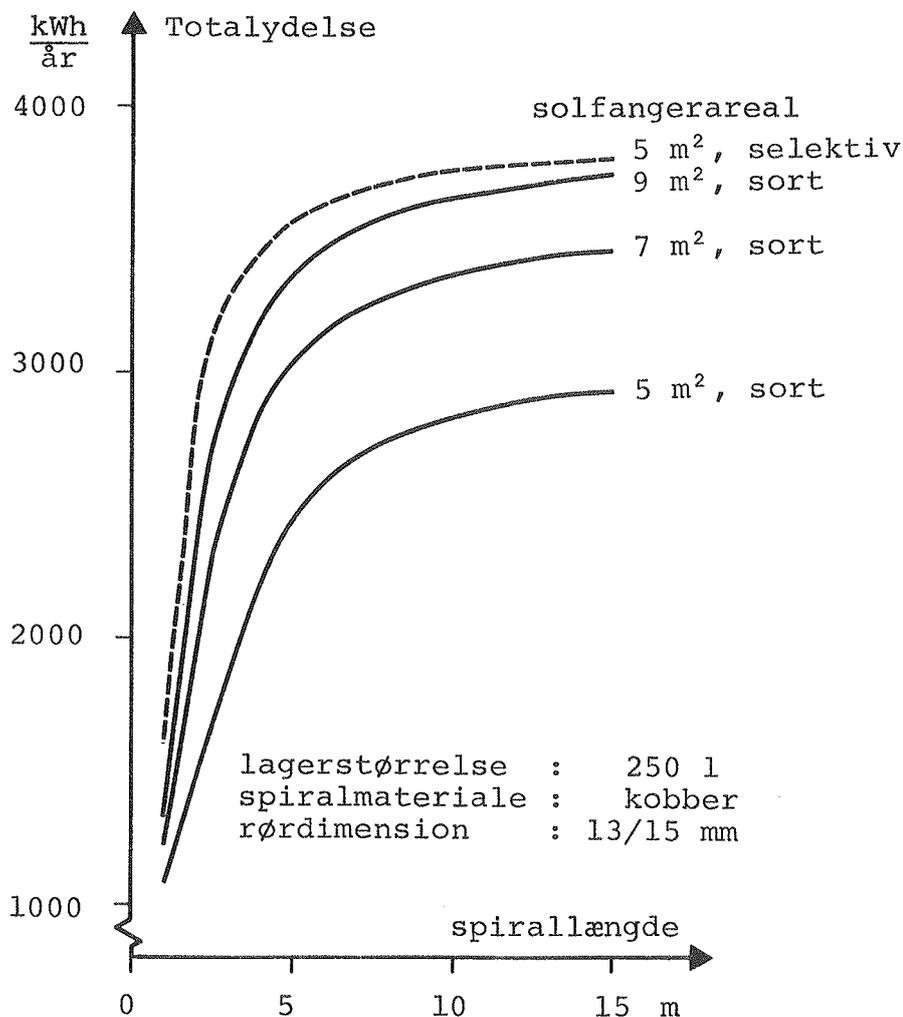


Fig. 22. Totalydelser for solvarmeanlæg med sortmalede absorbere som funktion af spirallængden
————— sortmalede absorbere,
- - - - - selektive absorbere

Det forøger ydelsen væsentligt at gå op i lagerstørrelse. Krumningerne på kurverne på figurerne 21-24 er næsten ens. Det betyder, at lagrene (varmevekslerspiralerne) kan dimensioneres til solvarmeanlæg med selektive absorbere. Lagrene kan da også anvendes i anlæg med sortmalede absorbere, blot skal der vælges et større volumen pr. m^2 solfanger for at bringe temperaturniveauet ned.

Lagrenes varmevekslerspiral kan altså dimensioneres efter tommelfingerreglen, der gælder for solvarmeanlæg med selektive absorbere, uanset om der benyttes solfangere med selektive eller sortmalede absorbere.

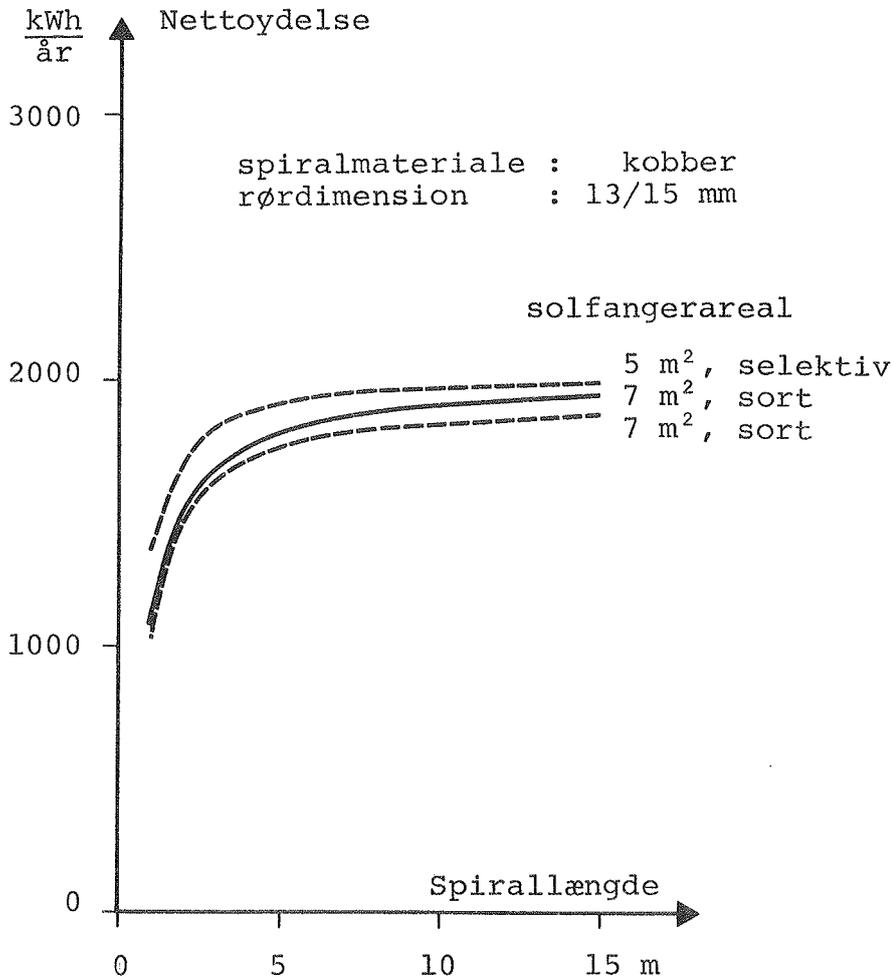


Fig. 23. Nettoydelser for solvarmeanlæg med sortmalede absorbere og et lager på henholdsvis 250 og 350 l
————— lager på 350 l,
- - - - - lager på 250 l.

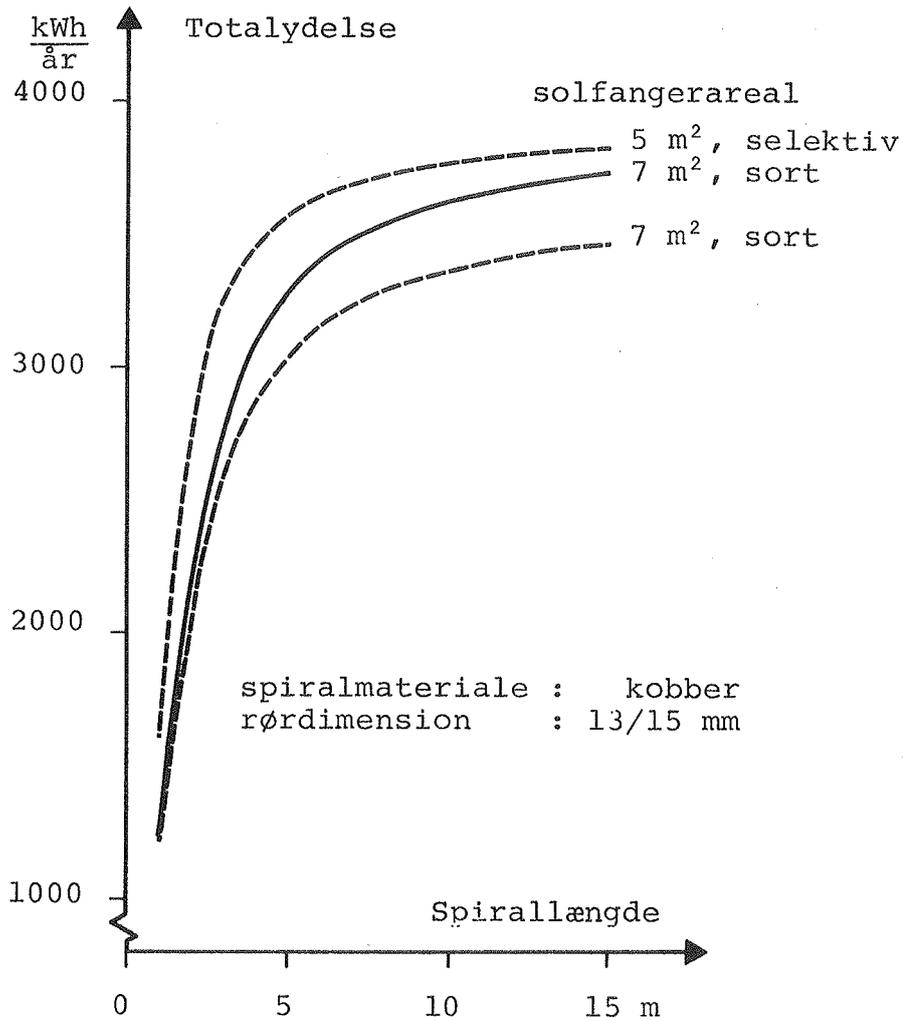


Fig. 24. Totalydelser for solvarmeanlæg med sortmalede absorberere og et lager på henholdsvis 250 og 350 l

————— lager på 350 l,

----- lager på 250 l.

3.4.2.3 Sammenligning med tidligere tommelfingerregler

I ref. [8] er angivet nogle regler for, hvordan varmeveksler-spiralen i solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning skal dimensioneres afhængigt af rørdimensionen, væsketype og absorbertype. Disse regler er listet i tabel 6.

	Diameter					
	Ø 10/8		Ø 20/17		Ø 30/26	
Vand	4	2,4	2,2	1,6	1,6	1,1
Ethylenglycol	4,6	3,2	2,6	1,8	1,8	1,3
Propylenglycol	5,2	3,6	2,8	2,0	2,0	1,4
Olie	8,9	6,3	4,6	3,2	3,1	2,2
	ét lag glas	to ell. se- lek- tiv	ét lag glas	to ell. se- lek- tiv	ét lag glas	to ell. se- lek- tiv

Tabel 6. Tidligere benyttede regler for dimensionering af varmevekslerspiraler fra ref. [9]. Enheden for tallene er en meter rør pr. m² solfanger.

Tallene stemmer kun for et tilfælde overens med den her fundne tommelfingerregel. Dette er ikke forbavsende, idet det først med ref. [4] er skabt mulighed for en grundig og korrekt analyse på dette område. Tallene i ref. [9] er beregnet ud fra nogle skønnede og ønskede værdier for varmeovergangen.

3.4.2.4. Vand som solfangervæske

Fig. 10 viser, at der er meget lidt forskel på varmeovergangen, når der benyttes henholdsvis propylenglycol og ethylenglycol som frostvæske i solfangerkredsen. Derimod er varmeovergangen væsentlig bedre ved brug af vand som solfangervæske. Fig. 25 viser ydelserne for et solvarmeanlæg på 5 m² (selektiv absorber) med henholdsvis vand og 50% propylenglycol-vand som solfangervæske.

Vand er mere tyndtflydende end en propylenglycol/vandblanding. Med samme pumpeeffekt vil volumenstrømmen derfor øges, men dette betyder ikke meget for årsydelsen som fig. 14 og 15 viser. I fig. 25 er ikke medtaget, at solfangerens

effektivitet også øges ved brug af vand som solfangervæske. Dette er gjort, fordi det er virkningen på varmevekslerspirallen, der skal undersøges. Desuden viser ref. [7], at øgningen i solfangerens effektivitet er lille.

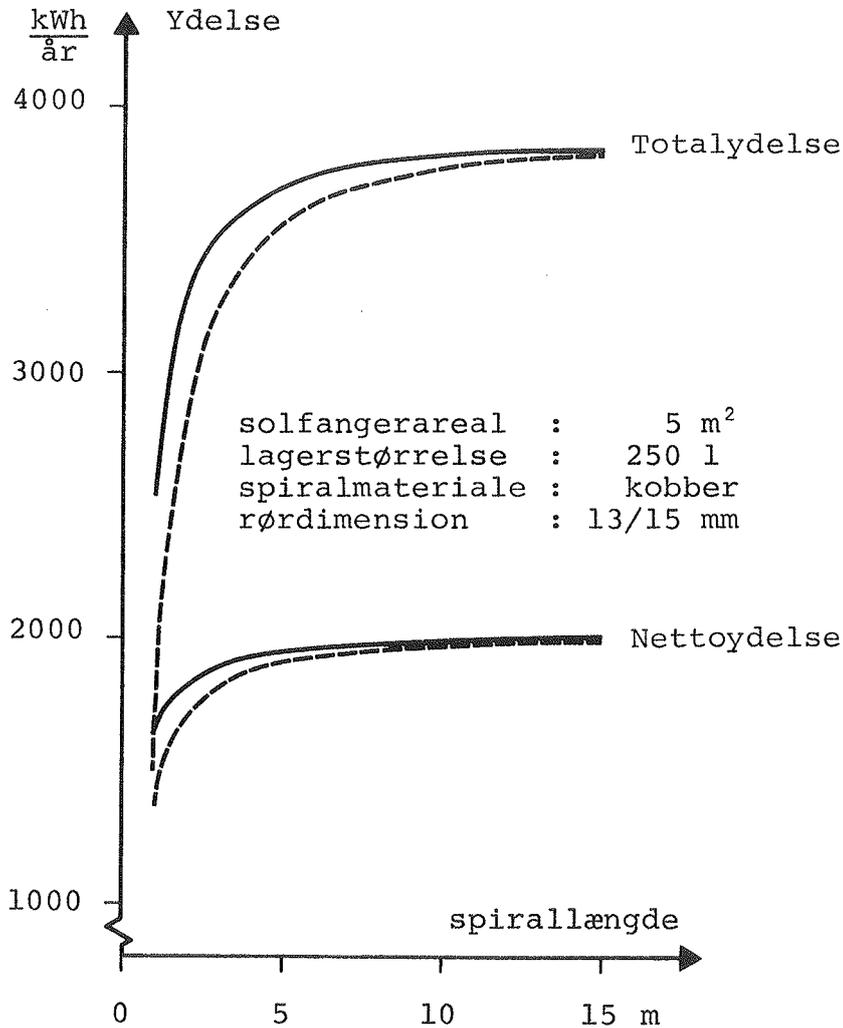


Fig. 25. Ydelser for solvarmeanlæg på 5 m² med henholdsvis vand og 50% propylenglycol/vand som solfangervæske.
----- 50% propylenglycol/vand,
———— vand.

Figuren viser, at ydelsen på anlægget kun stiger lidt ved brug af vand i stedet for propylenglycol/vand, når spirallængden er dimensioneret efter tommelfingerreglen. Men figuren viser samtidigt, at spirallængden kan mindskes med ca. 30% uden et

fald i ydelserne, hvis vand benyttes som solfangervæske (der medregnes stadigvæk ikke forbedring i solfangernes effektivitet). Dette stemmer bedre overens med reglerne i tabel 6.

Hvis vand bruges som solfangervæske i anlæg i Danmark, er det nødvendigt, at solfangeren tømmes for vand, når pumpen ikke kører. Ellers vil solfangerne blive frostsprængte om vinteren. Et sådant drain-back system vil desuden spare kapacitetstab i solfangeren.

3.4.2.4. Kalklag på varmevekslerspiralen

I solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning er varmevekslerspiralerne omgivet af brugsvandet. I Danmark findes der på grund af den kalkholdige undergrund meget kalk i brugsvandet. Denne kalk udfældes, specielt når vandets temperatur når over 60 °C. Kalken bliver fortrinsvis udfældet på det varmeste sted - d.v.s. på varmevekslerspiralen. Hvad betyder det for solvarmeanlæggenes ydelse, at der kommer et kalklag? Kalk har jo en væsentlig dårligere varmeledningsevne end kobber. Fig. 26 og 27 viser den teoretisk beregnede procentvise forringelse af ydelserne for to anlæg med 5 m² solfanger og med henholdsvis en 5 og 10 m lang spiral, som funktion af kalklagets tykkelse.

I beregningerne antages det, at kalklagets varmeledningsevne varierer lineært mellem 0 og 100 °C, således at den er 3.7 W/m°C ved 0 °C og 2.8 W/m°C ved 100 °C. Varmeledningsevnen vil i praksis svinge lidt afhængig af kalksammensætningen i vandet. Det antages desuden, at kalklaget ikke skaber forbindelse mellem de enkelte rør i spiralen.

Selv om et kalklag på 10 mm betyder en forringelse i varmeovergangen på ca. 25% for spiralen på 10 m, resulterer det kun i en mindskelse i totalydelsen på 1%. Dette må skyldes, at det kun er meget få timer, hvor solstrålingen er så intens, at der er brug for varmevekslerspiralens fulde kapacitet.

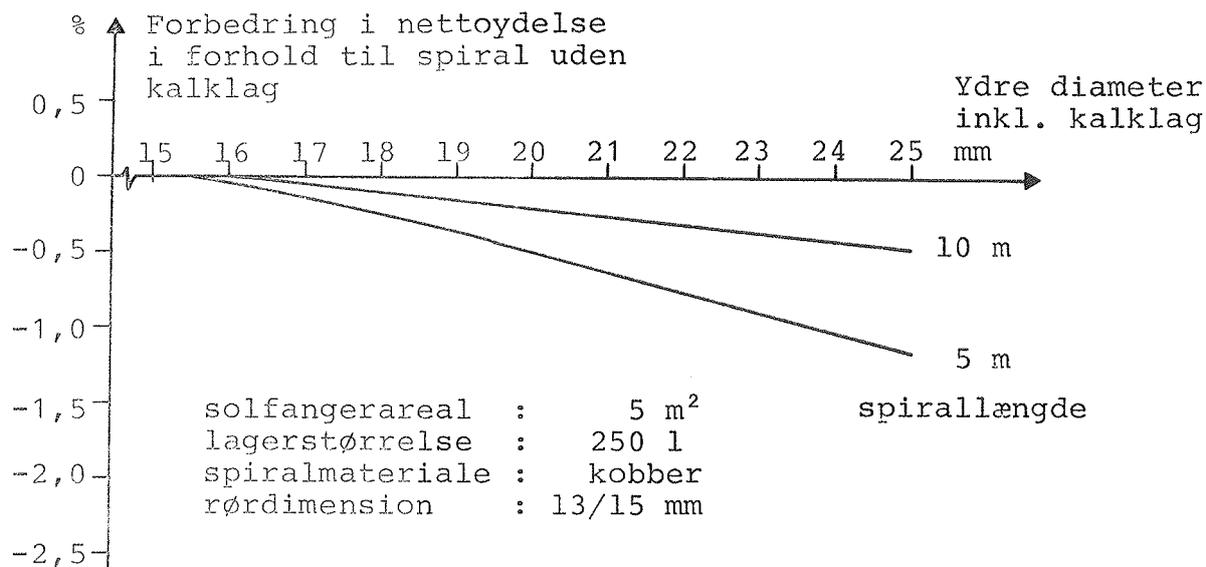


Fig. 26. Kalklags indflydelse på nettoydelse for to 5 m² solvarmeanlæg med henholdsvis 5 og 10 m spiral.

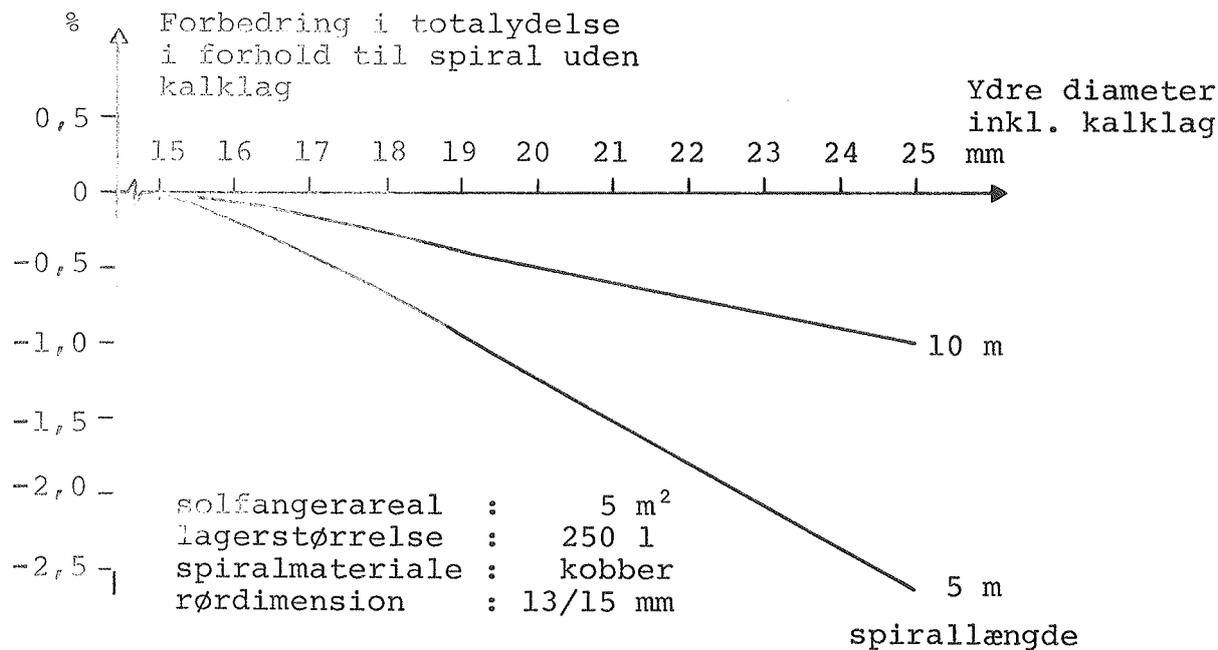


Fig. 27. Kalklags indflydelse på totalydelse for to 5 m² solvarmeanlæg med henholdsvis 5 og 10 m spiral.

I størstedelen af tiden er varmeveksleren stor nok. Figurerne viser da også, at med mindre varmevekslerspiraler øges kalklagets indflydelse. Men hvis varmevekslerspiralen er dimensioneret efter tommelfingerreglen, betyder kalklaget meget lidt.

En pudsig ting er, at ved meget små kalklag ($< 0,25$ mm) stiger varmeovergangen lidt. Det skyldes, at det varmeoverførende areal stiger hurtigere end varmemodstanden i kalklaget.

Kurverne i fig. 26 og 27 er beregnet ved hjælp af teorien i ref. [4] og programmet fra ref. [5]. I øjeblikket udføres en forsøgsrække på Laboratoriet for Varmeisolering, der netop omhandler kalkaflejringer på varmevekslerspiraler i brugsvandstanke. Resultatet af disse forsøg vil endeligt kunne fastlægge indflydelsen af kalklag på varmevekslerspiraler.

3.5. Sammenfatning

Varmevekslerspiraler i lagertanke til solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning bør være:

2 m pr m^2 solfangerareal med selektive absorbere eller
2 m pr 50 l lagertank.

Tommelfingerreglen udtrykt ved 2 m pr. 50 l lagertank gælder også for solvarmeanlæg, hvor absorberne er sortmalede.

Når varmevekslerspiralerne er dimensioneret efter ovenstående tommelfingerregel, har volumenstrømmen i solfangerkredsen, rørdimensionen, væsketyper (vand eller glycoler) og kalkbelægninger meget ringe indflydelse på solvarmeanlæggenes ydelser.

Da volumenstrømmen i solfangerkredsen kun har ringe indflydelse på anlæggenes ydelse, bør volumenstrømmen nedsættes fra det i dag normale 1 l/min. til 0,5 l/min. pr. m^2 solfanger.

Den rigtige udformning af varmevekslerspiralen i solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning er en så kompakt spiral, at den kan anbringes i den nederste del af beholderen, f.eks. den nederste sjettedel. Den vandrette afstand mellem rørenes centrer skal være 2-3 rørdiametre, mens den lodrette afstand mellem centrerne skal være 3-7 rørdiametre.

AVANCEREDE LAGERTYPER

4. Avancerede lagertyper

Under afsnit 3.4.2 blev det nævnt, at det sparede tomgangstab i sommermånederne har meget stor indflydelse på solvarmeanlægs økonomi. Dette viser fig. 25 f.eks. meget tydeligt. Hvis nettoydelsen (kompenseret for fyrets virkningsgrad) fratrækkes totalydelsen, viser det, at det sparede tomgangstab i de fem sommer måneder udgør 75% af nettoydelsen.

Solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning bør derfor udformes således, at det er muligt at slukke fyret i sommermånederne.

Formålet med dette afsnit er at undersøge avancerede lagerudformninger. Fælles for de her undersøgte lagre er, at de i videst mulige omfang skal sørge for, at der er brugsvand til stede ved den ønskede temperatur. Dette kan f.eks. ske ved kun at opvarme en lille del af lageret i perioden med ringe solstråling, således at denne del opnår den ønskede tappetemperatur - f.eks. 45°C. I det traditionelle lager opvarmes hele lageret, d.v.s. brugsvandstemperaturen når ikke op på den ønskede tappetemperatur - eftervarmning er derfor påkrævet. Det er tidligere vist (ref. [2]), at en forøgelse af temperaturlagdelingen i lagre kan øge udbyttet fra solvarmeanlæg betydeligt.

Ideen med de avancerede lagre er således, at de skal muliggøre, at fyret kan slukkes en større del af sommermånedernes dage end med traditionelle lagre.

4.1. Beregningsprogram

I undersøgelsen af de avancerede lagre benyttes samme program til simulering af solvarmeanlæg som under kapitel 3. Programmet er dog i visse tilfælde undergået en kraftig modifikation.

Som varmevekslerspiral benyttes en 15 m lang kobberspiral med en rørdimension på 15/13 mm. Denne spiral er større end tomfingereglen fra foregående afsnit foreskriver. På den måde bliver varmevekslerspiralen ikke afgørende for lagrenes ydelser, og det er lettere at se effekten af de arrangementer, der undersøges.

4.2. Mindskelse af varmeledning i beholderen

En øget temperaturlagdeling - stratifikation - i et lager vil øge udbyttet fra et solvarmeanlæg (ref. [2]). Dette kan gøres på flere måder, som de følgende afsnit vil vise. Her vil det blive undersøgt, hvad det betyder for solvarmeanlæggs ydelse, hvis varmeledningen ned gennem beholderen bliver mindsket.

Når der tappes vand fra lageret tilføres det kolde brugsvand i bunden af lageret, mens det varme brugsvand tappes fra toppen. På denne måde opstår der en temperaturlagdeling i lageret. Hvis lageret herefter ikke bliver rørt, vil temperaturlagdelingen efterhånden forsvinde, fordi varme fra det øverste lag bliver transporteret ned til det nederste lag ved hjælp af varmeledning i vand og beholdermateriale.

Hvis denne varmeledning bliver mindsket vil det være muligt at opretholde den høje temperatur i toppen af lageret over et længere tidsrum.

Fig. 28 viser hvordan det f.eks. er muligt at mindske varmeledningen i en beholder ved at mindske det varmeoverførende areal. Varmen overført fra varmeveksleren kan dog stadig trænge opad ved naturlig konvektion. Der eksisterer i dag tanke med denne adskillelse, dog ikke på det danske marked, men f.eks. i USA. Adskillelsen benyttes her til at dele beholderen i to dele: En øverste del, hvor suppleringsvarme tilføres og en nederste del, hvor solvarmeanlæggets varmeveksler er tilsluttet. Man kunne også tænke sig adskillelsen udført med et isolerende materiale.

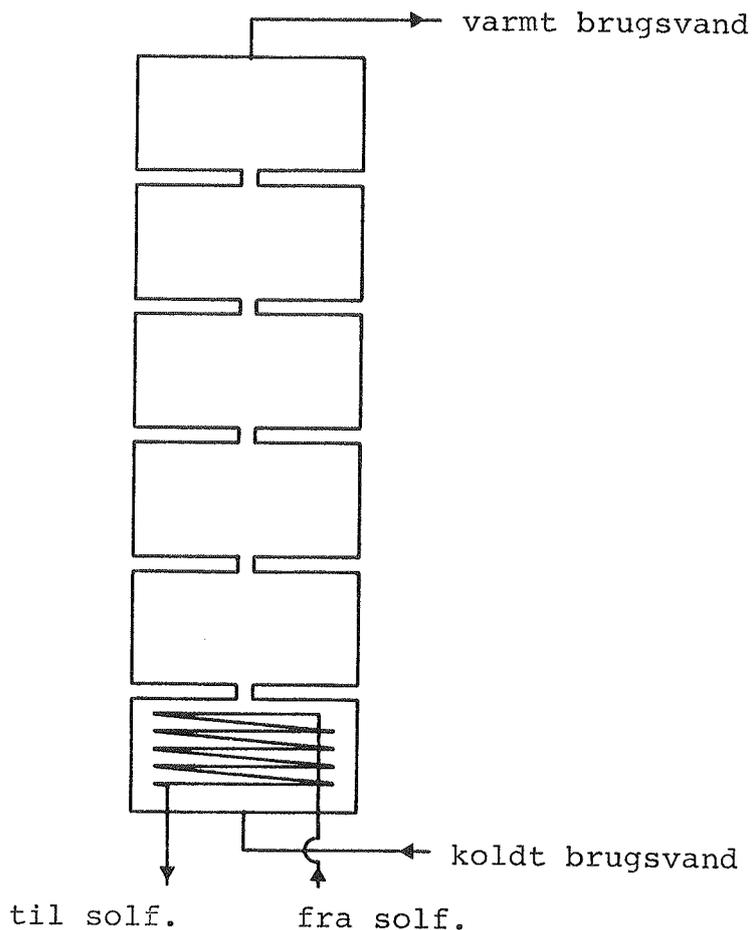


Fig. 28. Principskitse af beholder med ringe varmeledning i beholder og vand.

På fig. 29 er vist situationen fra fig. 28, hvor det antages, at varmeledningen gennem beholder og vandet er elimineret. D.v.s. hvad der maksimalt kan opnås ved at mindske varmeledningen.

På fig. 30 og 31 er vist, hvad det betyder, hvis alene varmeledningen i henholdsvis beholdermaterialet og vandet blev elimineret.

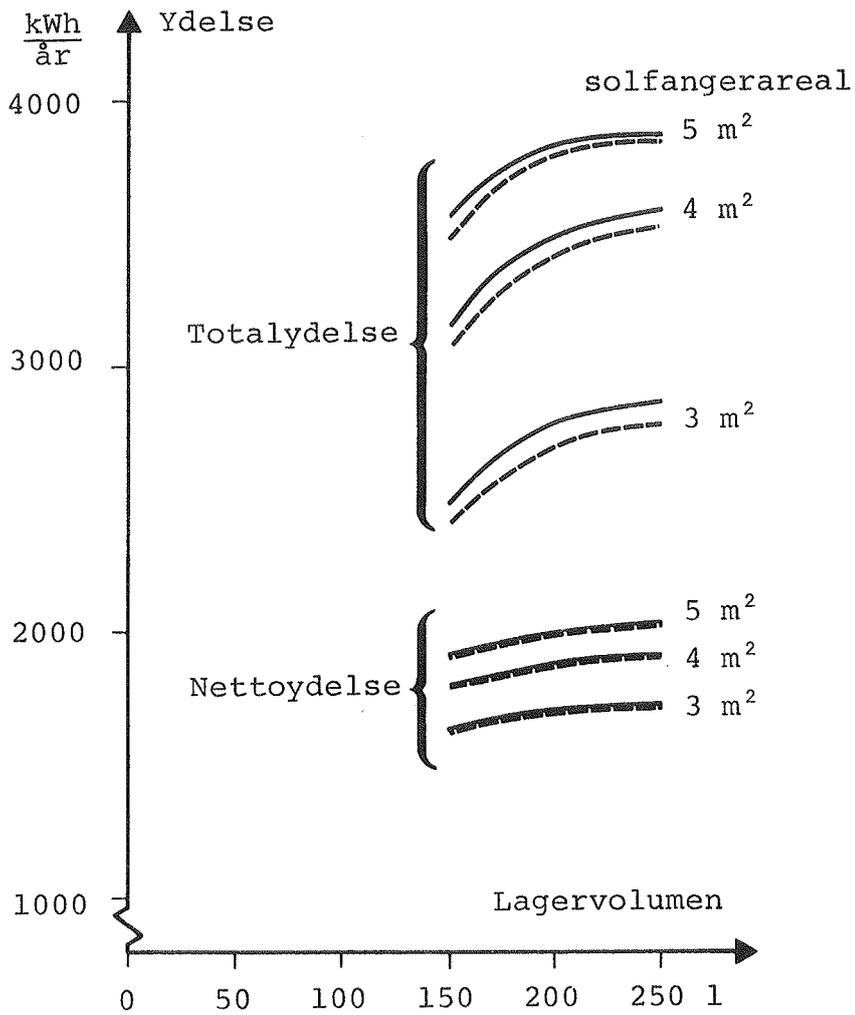


Fig. 29. Arlige ydelser for solvarmeanlæg med et lager uden varmeledning i både beholdermateriale og vand
————— lager uden varmeledning,
- - - - - "almindeligt" lager.

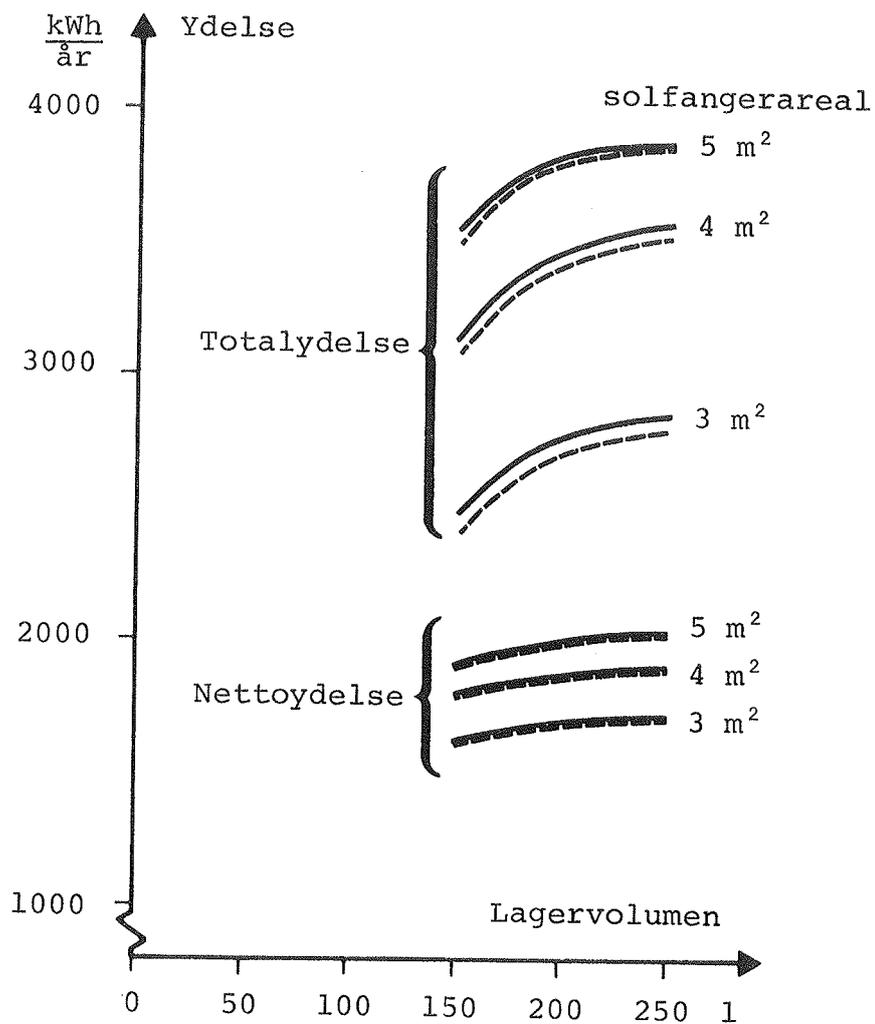


Fig. 30. Arlige ydelser for et solvarmeanlæg med et lager uden varmeledning i beholdermaterialet
————— lager uden varmeledning i beholdermaterialet,
----- "almindeligt" lager.

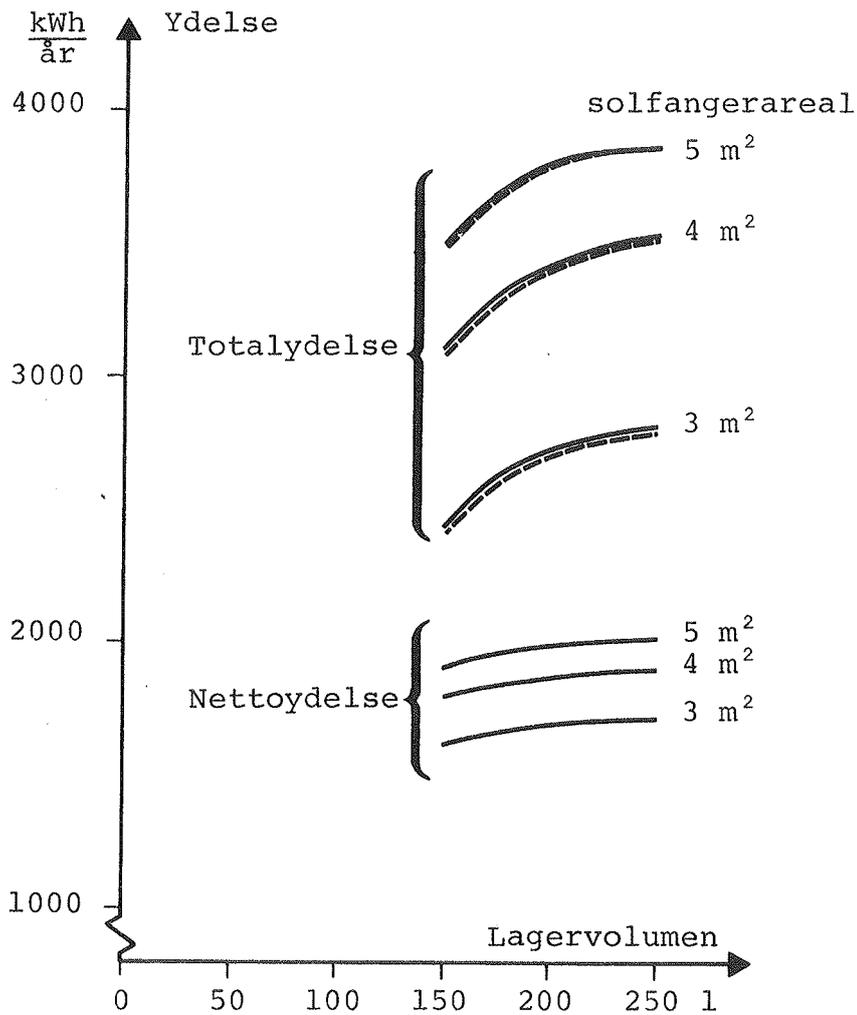


Fig. 31. Årlige ydelser for et solvarmeanlæg med et lager uden varmeledning i vandet
————— lager uden varmeledning i vandet,
----- "almindeligt" lager.

Som det ses af fig. 29 stiger ydelserne ikke meget ved referencetilstanden (5 m² solfanger og 250 l lager) ved brug af et avanceret lager - en stigning på 0,8 og 0,5 % for henholdsvis netto- og totalydelsen. Fig. 30 og 31 viser, at det største bidrag fremkommer ved at eliminere varmeledningen i beholdermaterialet. Dette giver en stigning i totalydelsen på 0,4 %, medens elimination af varmeledningen i vandet kun bidrager med 0,1 %.

I stedet for et øget udbytte, kunne det måske være økonomisk bedre med et mindre anlæg at få samme ydelse som det traditionelle. Men som det ses kan solfangerarealet kun formindskes ubetydeligt, mens lageret kan mindskes med 25-30 l.

Der er altså ikke umiddelbart meget at hente ved at mindske varmeledningen. Men hvis varmeledningen kunne mindskes samtidigt med, at der blev brugt et billigere beholdermateriale, så blev der slået to fluer med et smæk. Man kunne f.eks. forestille sig beholderen lavet af et plastmateriale (evt. glasfiberarmeret), der har en varmeledningsevne på under 1 W/m°C mod ståls 50-60 W/m°C. Da plastmaterialer ikke har samme styrke som stål, vil dette kræve, at at lageret enten bliver trykløst, eller bliver armeret med glasfiber eller metal.

De tre figurer viser samstemmende, at fordelene ved de avancerede lagre øges lidt, hvis anlægget bliver underdimensioneret.

4.3. Stratifikationsbevarende tappesystem

I solvarmeanlæg kan lagertemperaturen i sommermånederne let komme op på 80-90°C. Dette er en for høj brugstemperatur, det vil f.eks. give skoldninger at bade i vand ved denne temperatur. Derfor blandes koldt vand i for at få den ønskede temperatur. På den måde bliver der tappet en mindre mængde vand fra lageret end den mængde, der reelt er brug for - resten udgøres af koldt vand.

Vi ved, at en solfanger arbejder mest effektivt ved lave temperaturer, derfor er koldt vandsindtaget til lageret da også placeret i bunden af lageret. Men når der kun tappes en lille mængde vand fra lageret, på grund af et for højt temperaturniveau, vil der også kun blive påfyldt en mindre mængde koldt vand. Hvis vi i stedet for at tappe vandet i toppen af lageret kunne tappe vand det sted i lageret, hvor den ønskede temperatur var, ville den tappede vandmængde (fra lageret) blive større. Temperaturniveauet omkring varmevekslerspiralen ville da blive lavere og effektiviteten af solfangeren større. Denne tappeanordning vil kunne laves forholdsvis simpelt. Hvis lagerets tappestuds (se fig. 32) blev forsynet med en fleksibel slange, hvor den frie ende havde præcis samme massefylde som vand ved den ønskede tappetemperatur (f.eks. 45 °C), vil tapningen altid foregå ved denne temperatur eller fra bunden af tanken, når hele tanken er varmere end 45 °C, eller fra toppen, når dennes temperatur er under 45 °C.

Anvendelsen af et sådant system vanskeliggøres dog af, at en eventuel kalkbelægning på flyderen i den frie ende af slangen vil ændre dennes massefylde. Tapningen vil da foregå ved en anden temperatur end tilsigtet.

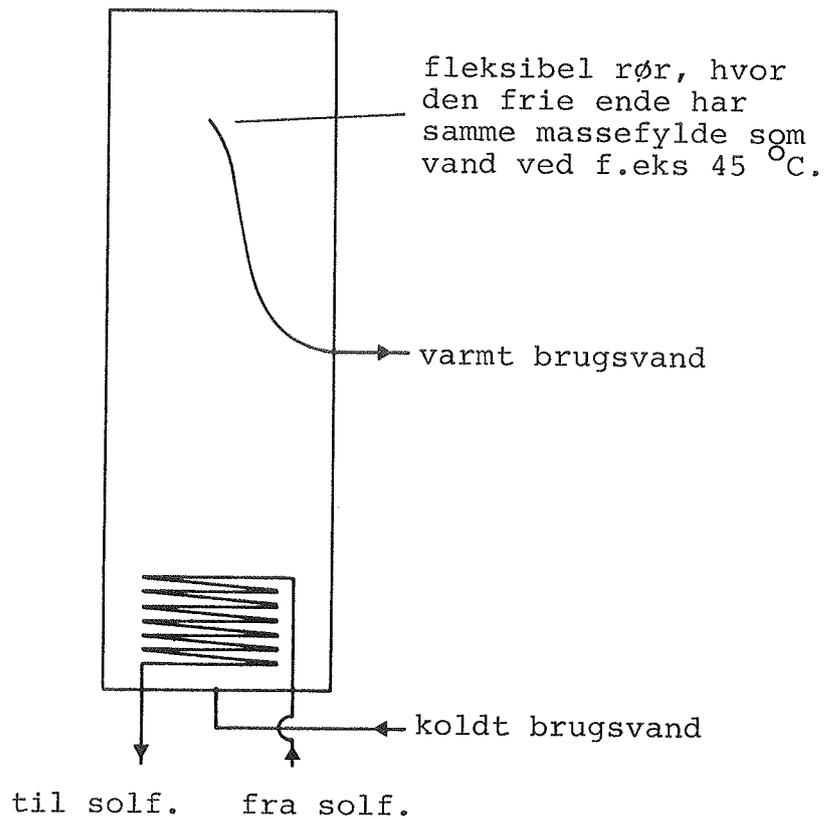


Fig. 32. Principskitse af beholder med et stratifikationsbevarende tappesystem.

Fig. 33 viser edb-kørsler, hvor et sådant tappesystem er simuleret. Som det ses øger dette system ikke solvarmeanlæggets ydelse væsentlig. Netto- og totaludbyttet bliver henholdsvis 0,4 og 0,2 % højere. Ligesom i sidste afsnit kan lageret kun mindskes med ca. 25 l.

Som forventet stiger solfangereffektiviteten lidt fra 41,8 til 42,6%. Men temperaturniveauet i toppen af tanken stiger også, således er maksimumtemperaturen ca. 2 °C højere. Varmetabet fra lageret stiger derfor, og spiser på den måde meget af udbyttetigningen.

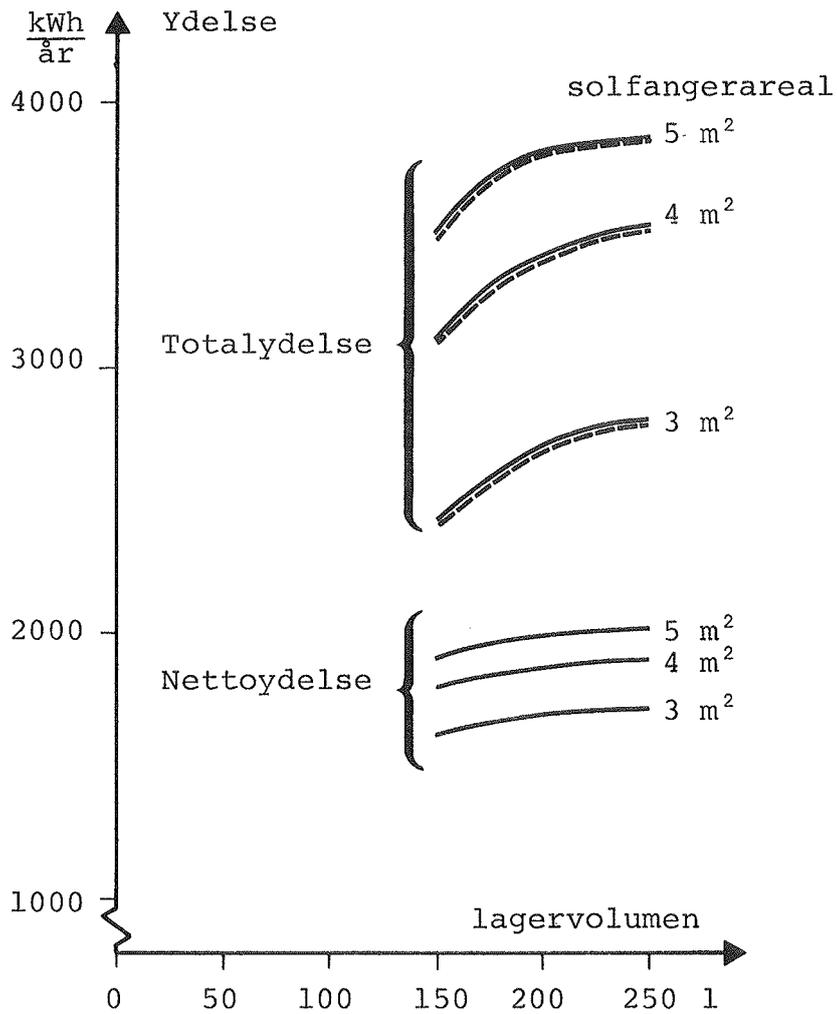


Fig. 33. Årlige ydelser for et solvarmeanlæg med stratifikationsbevarende tappesystem
————— lager med stratificeret tappesystem,
- - - - - "almindeligt" lager.

4.4. Stratifikationskabende varmetilførselssystem

Når der kun er få solskinstimer, kan solfangerne ikke nå at bringe lagertemperaturen op på et anvendeligt temperaturniveau. Hvis varmen blev indlagt lagvis, kunne det give et mindre vandvolumen en anvendelig temperatur. På fig. 34 er vist et sådant lager. Der er placeret en varmevekslerspiral i hvert lag. Den undersøgte strategi er her, at lag 6 opvarmes først til 45 °C, herefter opvarmes lag 5 til 45 °C, derefter lag 4, o.s.v.. Når lag 1 har nået 45 °C, køres lageret som et traditionelt lager. D.v.s. varmetilførsel i bunden af lageret, så alle lag får samme temperatur (> 45 °C). En anden og mere kompliceret strategi vil muligvis give et bedre resultat, men der har ikke været tid til en sådan undersøgelse. Jo mere kompliceret styresystemet bliver, jo større risiko bliver der for driftfejl. Andre lager- og varmetilførselssystemer, vil måske også kunne øge udbyttet mere end her angivet.

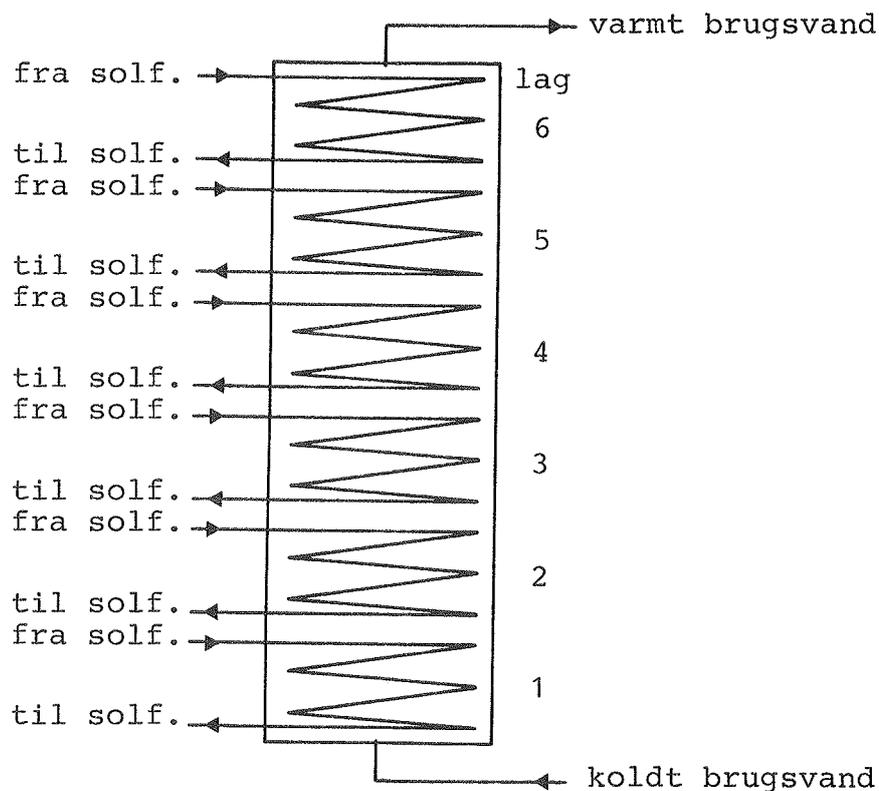


Fig. 34. Principskitse af et lager med stratifikationskabende varmetilførselssystem.

Ud over lageret på fig. 34 er undersøgt fire andre lagre: Et lager uden varmeveksler i lag 6, et lager uden varmeveksler i lag 5 og 6, et lager uden varmeveksler i lag 4, 5 og 6 og et lager uden varmeveksler i lag 3, 4, 5 og 6. Fig. 34 viser resultatet af disse undersøgelser. Som det ses er det kun lageret med varmevekslerspiral både i lag 1 og 2, der er bedre end det traditionelle lag. Resten af lagrene er dårligere - dårligere jo større antallet af lag med varmevekslere er.

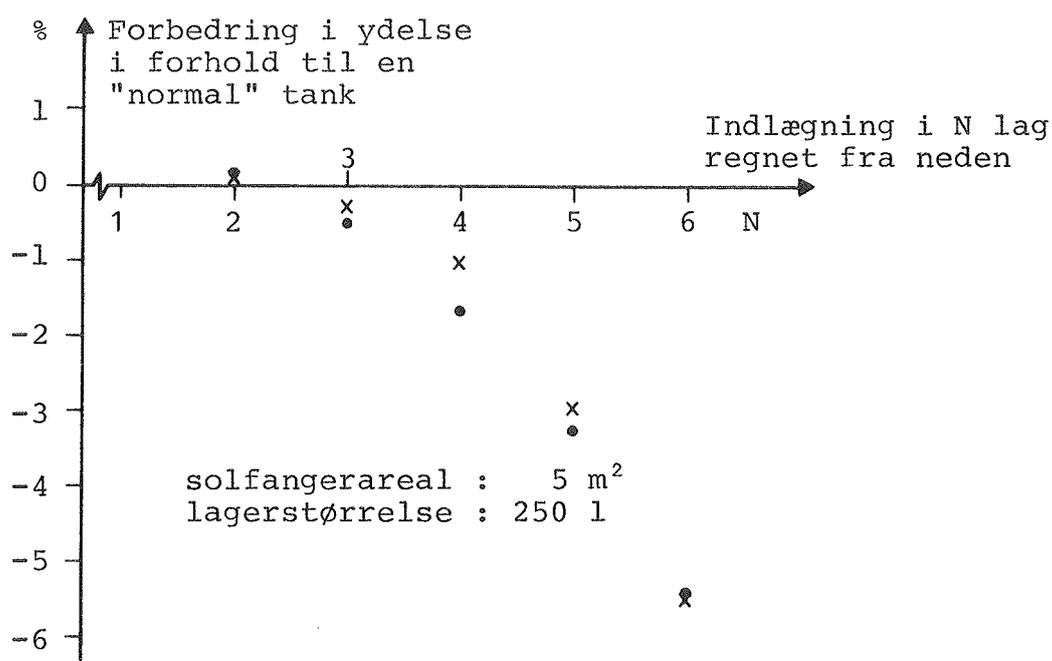


Fig. 35. Forbedring i årlige ydelser for et solvarmeanlæg med lagre, der har stratifikationsskabende varmetilførselssystem
● nettoydelser,
x totalydelse

Lagrene med stratifikationsskabende varmetilførselssystem er dårligere end det traditionelle lager, fordi laget med varmevekslerspiralen - og dermed solfangeren - gennemsnitlig arbejder ved et højere temperaturniveau i de avancerede lagre. Solfangereffektiviteten falder således fra 41,8 til 36,7% for lageret med 6 varmevekslerspiraler. Desuden bevirker strategi-

en, at hvis lag 6 er 40 °C går solstråling, der kunne udnyttes ved f.eks. 20 °C, tabt. Lagrene er dårligere både i vinter- og sommerhalvåret.

En pudsigt ting er, at de avancerede lagre har et lavere varmetab end det traditionelle. Det lyder umiddelbart mærkeligt, idet de stratificerede lagre ofte er varmere i den øverste del af lageret. Faldet i varmetabet for lageret med 6 spiraler er på 37%. Dette fald skyldes, at i de perioder, hvor solstrålingen er lille, bliver kun de øverste lag varmet op. Disse lag bliver dagligt tappet, - d.v.s. om natten vil lageret være fyldt op med koldt vand. I det traditionelle lager varmes hele volumen op, men her tappes ikke hele den opvarmede mængde vand, idet lageret ifølge tommelfingerreglerne er 50 l større end det daglige forbrug. Det årlige gennemsnitlige temperaturniveau for lageret med 6 varmevekslerspiraler er derfor lavere. Når vandet i beholderen bliver opvarmet udvider det sig. Vand bliver derfor skubbet ud gennem sikkerhedsventilen eller gennem vandrørene, hvis kontraventilen ikke virker. Vandet kommer under alle omstændigheder fra det nederste lag. Da vandet i det traditionelle lager bliver opvarmet fra neden, vil det udstødte vand være varmt. I det avancerede lager vil dette vand være koldt indtil varmen bliver tilført i det nederste lag. Dette lager har derfor indbygget en slags buffer. Denne besparelse drejer sig på årsbasis kun om 10 kWh, med en 50%`s besparelse i dette tab.

Det kan nu også forklares, hvorfor lageret med varmevekslere i de to nederste lag er bedre end det traditionelle lager. Det skyldes, at det for det meste arbejder på samme temperaturniveau som det traditionelle lager. Samtidigt har det fordelene med mindre varmetab og buffereffekten. Fordelen ved dette lager vil dog næppe kunne forrente den ekstra investering, et sådant lager vil kræve.

Denne slags lagre er altså ikke velegnede i solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning. Det skyldes dels at lagrene er optimeret så snært, at fordelene med at dele lageret op i en varm og

kold del ikke kan udnyttes (lageret er kun lidt større end det daglige tappevolumen), dels at den anvendte styring er uheldig. Lageret kan derimod anvendes i solvarmeanlæg til rumopvarmning. Disse anlæg er ofte designet sådan, at de kører sammen med et almindeligt centralvarmeanlæg på en sådan måde, at de kun giver et bidrag, når lagertemperaturen er over centralvarmeanlæggets returtemperatur. I perioder med lille solindstråling, kan hele lagertanken ikke bringes op på et anvendeligt temperaturniveau (lageret er da overdimensioneret). Et mindre lagervolumen kan dog sagtens bringes op på et anvendeligt temperaturniveau. De avancerede lagre vil derfor måske være attraktive i solvarmeanlæg til kombineret rum- og brugsvandsopvarmning. Ref. [10] angiver således, at et lager med stratificeret varmetil- og fraførsel vil kunne øge ydelsen fra et kombineret rum- og brugsvandsanlæg med 20%. Hvor det kombinerede rum- og brugsvandsanlæg har sin egen særskilte radiator, vil det stratifikationsskabende varmetilførselssystem have samme indflydelse som ved rene brugsvandsanlæg - altså dårligere.

4.5. Variabelt volumen

Dette lager fungerer i princippet (se fig. 36) som lageret med stratificeret varmetilførsel i 6 lag. Forskellen er blot, at varmetransport mellem de enkelte lag udelukkende foregår under tapning, da lageret består af 6 små lagre.

Varmen bliver altså tilført efter samme strategi som i foregående afsnit. Først varmes det øverste lager op til 45 °C, så det næste, o.s.v. Når alle lagre er 45 °C, varmes de derefter lige meget op.

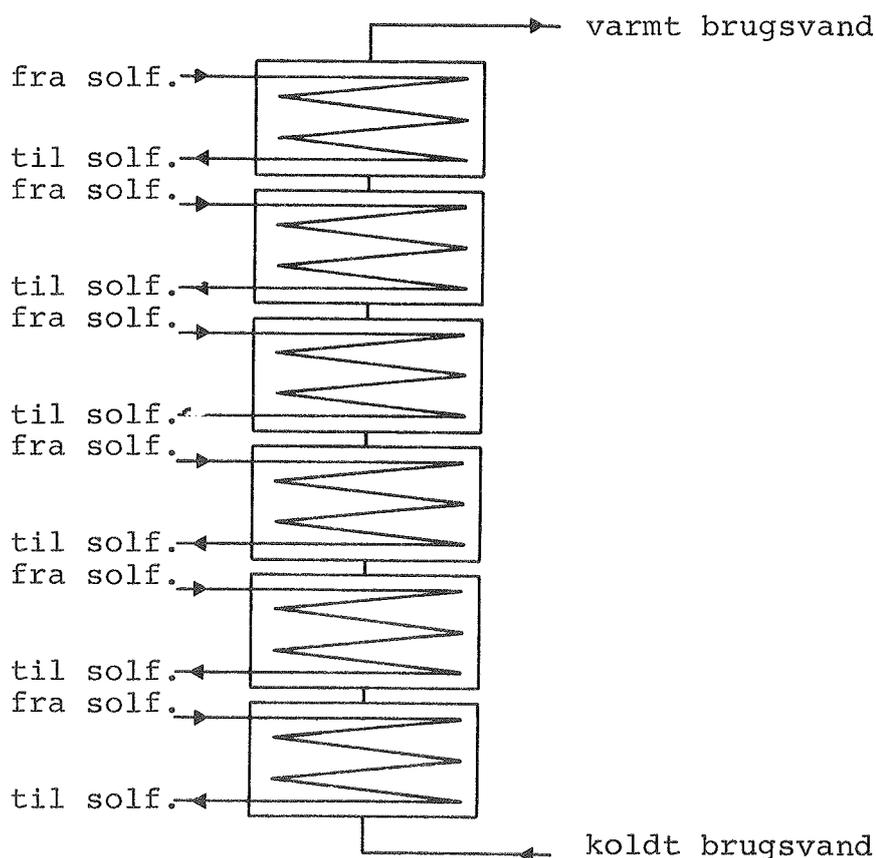


Fig. 36. Principskitse af lager med variabelt volumen.

Ligesom under 4.2 "Mindskelse af varmeledning i beholderen" vil dette give anledning til en mindre forbedring i forhold til lageret med udelukkende stratifikationskabende varmetilførselssystem - 0,1 og 1% for henholdsvis netto- og total-

ydelse. Men i forhold til det traditionelle lager er det 5 og 4% dårligere for henholdsvis netto- og totalydelse.

4.6. Sammenfatning

Avancerede lagre giver kun ringe forbedring i ydelsen eller ligefrem en forringelse for solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning. Dog vil en reduktion af varmeledningen i beholderne i forbindelse med brug af et billigere beholdermateriale være et lille plus for økonomien i disse anlæg. Den stratificerede tapning vil sandsynligvis være billig at lave. Man kunne tænke sig denne løsning anvendt, hvor der var brug for f.eks. to tappetemperaturer - f.eks. bad og opvask. Det ville da være muligt at få vand ved de ønskede temperaturer. Anlæg med stratificeret varmeindlægning er ikke velegnet i solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning, i stedet vil disse lagre anvendt i kombinerede rum- og brugsvandsanlæg måske give så store besparelser, at de økonomisk kan konkurrere med "almindelige" lagre.

De avancerede lagre har svært ved at konkurrere med det traditionelle lager, fordi denne lagertype i dag er optimeret til solvarmeanlæg i en sådan grad, at det opfylder de fleste krav til sådanne lagre. Disse optimerede lagre er ved at komme på markedet, men der er stadig muligheder for forbedringer og yderligere billiggørelse. Det vil derfor være ønskeligt, hvis der blev ydet ressourcer på en sådan produktudvikling, idet solvarmeanlægs rentabilitet herved kunne bedres mærkbart.

Det er lidt skuffende, at de avancerede lagre ikke giver større forøgelse i ydelsen eller formindskelse i anlægsstørrelserne. Men på den anden side er det godt, at det er det simple, der er bedst egnet. Jo simplere et system er, jo færre driftsforstyrrelser og fejlmuligheder. Brugeren af systemet har samtidigt en chance for at sætte sig ind i og forstå systemet.

Referencer

- [1] Prøvning af varmelagerunits til solvarmeanlæg. Simon Furbo. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH. Energiministeriets varmelagerprojekt - rapport nr. 5. April 1980.
- [2] Prøvemetoder for mindre varmelagre og erfaringer fra prøvningerne. Simon Furbo og Jan-Erik Larsen. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH. Energiministeriets varmelagerprojekt - rapport nr. 12. November 1982.
- [3] Lagertyper og lagerstørrelser i solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning. Søren Østergaard Jensen og Simon Furbo. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH. Energiministeriets varmelagerprojekt - rapport nr. 16. Marts 1984.
- [4] Varmeovergang for varmevekslerspiraler neddykket i vand. Søren Østergaard Jensen. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH. Rapport nr. 84-10. Maj 1984.
- [5] Varmelagring til solvarmeanlæg. Simon Furbo. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH. Meddelelse nr. 162. September 1984.
- [6] Solindfald og solvarmeanlæg - målt og beregnet. Henrik Lawaetz. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH. Meddelelse nr. 106. Oktober 1980.
- [7] Solfangeres effektivitet - målt og beregnet. S. Svendsen. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH. Meddelelse nr. 109. Maj 1981.
- [8] Formler til varmetransmission. Udvalgt af H. Saustrup Kristensen. Polyteknisk Forlag. 1978.
- [9] Solvarme - vejledning i projektering og udførelse af anlæg. Varmeteknik, Teknologisk Institut. April 1980.

- [10] Thermal stratification in heat storages. W.B. Veltkamp. Indlæg i "Thermal Storage of Solar Energy" - samling af papers fra "An International TNO-symposium held in Amsterdam, 5-6 november 1980". Redaktør C. den Ouden. 1981.

PROJEKTORGANISATION

Styregruppe

Energiministeriet har fra september 1981 udpeget følgende styregruppe for solvarmeprogrammet:

- V. Korsgaard, professor, Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, (formand)
- L. Ingersholm, kontorchef, Boligselskabernes Landsforening
- P. Alling, direktør, Dansk Solvarme K/S
- E. Christophersen, afdelingsleder, Statens Byggeforskningsinstitut
- P. Dirks, afdelingsingeniør, Dansk Kedelforening
- K. Hallgreen, ingeniør, Danfoss A/S
- P. Dorph-Petersen, Energiministeriet
- E. Jerking, Byggestyrelsen, Energikontoret
- N.I. Meyer, professor, Fys.Lab. III, DTH
- J.S.R. Nielsen, civilingeniør, Birch og Krogboe
- H. Larsen, civilingeniør, Risø
- E. Petersen, lektor, Kem.Lab. I, H.C. Ørsteds Instituttet
- P. Steensen, civilingeniør, Teknologisk Institut
- P.J. Snare, civilingeniør, Energistyrelsen.

Projektmedarbejdere:

- N.B. Andersen, civilingeniør
- O. Balslev-Olesen, civilingeniør
- O. Dyrnum, civilingeniør
- S. Furbo, civilingeniør, lic.techn., projektleder
- K. Kielsgaard Hansen, akademiingeniør, lic.techn.
- S. Østergaard Jensen, civilingeniør
- S.E. Mikkelsen, civilingeniør
- L. Olsen, civilingeniør, stud.lic.techn.
- P. Vejsig Pedersen, civilingeniør
- V. Ussing, civilingeniør

Liste over udkomne rapporter

Energiministeriets varmelagerprojekt:

- Nr. 1. Litteraturundersøgelser og vurdering af kemiske varmelagre. Peter L. Christensen, august 1979.
- Nr. 2. Sæsonlagring af varme i store vandbassiner. Udført af Dipco Engineering ApS, november 1979.
- Nr. 3. Beregning af energiforbrug i bygninger (EFB-1). En metode til brug for bordregnemaskiner. Anker Nielsen, februar 1980.
- Nr. 4. Beregning af energiforbrug i bygninger (EFB-1). Brugervejledning for TI-59. Anker Nielsen, februar 1980.
- Nr. 5. Prøvning af varmelagerunits til solvarmeanlæg. Simon Furbo, april 1980.
- Nr. 6. Beregning af ruminddelte bygningers energiforbrug. Anker Nielsen, oktober 1980.
- Nr. 7. Vinduets betydning for enfamiliehusenes energiforbrug. Anker Nielsen, november 1980.
- Nr. 8. Heat Storage with an incongruently melting salt hydrate as storage medium based on the extra water principle. Simon Furbo, december 1980.
- Nr. 9. Enfamiliehus med glasbeklædte uderum. Anker Nielsen, marts 1981.
- Nr. 10. Kemiske varmelagre. Teori og praksis. Peter L. Christensen, december 1981.

- Nr. 11. Varmtvandsforbrug i boliger. Niels Mejlhede Jensen, februar 1982.
- Nr. 12. Prøvemethoder for mindre varmelagre og erfaringer fra prøvningerne. Simon Furbo og Jan-Erik Larsen, november 1982.
- Nr. 13. Solopvarmning gennem vinduer. Niels Mejlhede Jensen, november 1982.
- Nr. 14. Økonomisk solbidrag til opvarmning af brugsvand. Sven Pedersen, Simon Furbo, Preben Nordgaard Hansen og Vagn Ussing, december 1982.
- Nr. 15. Birkerød solhus. Beregninger og målinger. Niels Mejlhede Jensen, december 1983.
- Nr. 16. Lagertyper og lagerstørrelser i solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning. Søren Østergaard Jensen og Simon Furbo, marts 1984.
- Nr. 17. Prøvning af kemisk varmepumpeanlæg. Otto Dyrnum, april 1984.

Energiministeriets solvarmeprogram:

1. Kombineret solvarme-varmepumpeanlæg. Beregning af et anlæg til en mindre bebyggelse.
2. Solvarme-fjernvarmeanlæg. Beregning af et centralt anlæg med og uden varmelager.
3. Solvarmeanlæg i Gentofte. Målinger på anlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand. Årsrapport.
4. Beregningsprogram til solvarmeanlæg. For TI-59 programmer-bar lommeregnermaskine.

5. Solvarmeanlæg i Herfølge. Brugsvand, 1/2 års målinger.
6. Solvarmeanlæg i Greve. Målinger på anlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand. Årsrapport.
7. Solfangeres langtidsholdbarhed. Erfaringer med solfangere udsat for det naturlige vejrlig under kontrollerede, realistiske, ens driftsforhold i 3 år på prøvestand.
8. Solvarmesystemprøvestand. Resultater fra det første projekt på prøvestanden.
9. Solvarmeanlæg på Juelsminde campingplads. Brugsvand, 3 års målinger.
10. Energiministeriets solvarmeprogram. Statusrapport, august 1980.
11. Energiministeriets solvarmeprogram. Projektforslag - langtidsplanlægning, oktober 1980.
12. To solvarmeanlæg til varmt brugsvand. En beskrivelse og vurdering efter 4 måneders drift af anlæggene.
14. Solvarmeanlæg i Blovstrød. 2 1/2 års målinger på 10 m² brugsvandsanlæg.
15. Solvarmeanlæg til rumopvarmning. En udredning baseret på 2 års målinger på anlæg i Greve og Gentofte.
16. Solvarmeanlæg til varmt brugsvand. En udredning baseret på 1 års målinger på 2 anlæg.
17. Solvarmeanlæg i Herfølge. Varmtvandsanlæg i tæt-lav byggeri.

18. Korrosion i solfangerabsorbere. En undersøgelse af korrosionsforholdene i solfangeres væskekanaler.
19. Fokuserende solfanger med klimaskærm. Forundersøgelse.
20. Solfangeres driftssikkerhed og holdbarhed.
21. Solvarme - fjernvarmeanlæg. Teknisk-økonomisk analyse af systemkombinationer.
22. Solfangerabsorberes overfladebestandighed.
23. Solvarmeanlæg i Rødovre.
24. Solvarmeanlæg til varmt brugsvand i Gl.Holte. En vurdering efter et års målinger.
26. Solvarmeanlæg med stort udbytte - systemanalyse.
27. Kombineret solvarme-varmepumpeanlæg i Næstved.
28. Et solvarmeanlæg til rumopvarmning.

Abstract

Investigations concerning the suitability of different designs of the heat exchanger spiral in a hot water tank for solar heating systems for domestic hot water supply have been carried out. Rules of thumb have been established concerning the length of the heat exchanger spirals. In addition investigations concerning the influence of the volume flow rate in the heat exchanger spiral, the dimension of the tube in the heat exchanger spiral, a possible cover of lime on the heat exchanger spiral and the influence of the used solar collector fluid on the performance of a solar heating system have been carried out.

The suitability of different advanced heat storages in solar heating systems for domestic hot water supply has been investigated. The investigated heat storages had: No thermal conductivity in the storage, a stratification preserving water draw-off system, a stratification creating heat supply system and a variable storage volume.