

SOLVARMEANLÆG  
MED  
BYGNINGSINTEGREREDE VARMELAGRE

LARS OLSEN

DECEMBER 1984

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING  
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

MEDDEELSE NR. 168

Medvirkende ved projektet:

Lars Olsen, civilingeniør,

Kirsten Weishaupt, sekretær,

Kenneth Sørensen, teknisk tegner.

## INDHOLDSFORTEGNELSE

1.1	Indledning .....	1
1.2	Systemløsninger .....	3
1.2.1	Lagring i huldæk .....	3
1.2.2	Lagring i terrændæk .....	5
1.2.3	Lagring i vægge .....	9
1.2.4	Lagring i faseændringsmaterialer .....	11
1.2.5	Driftserfaringer .....	12
2.	Beregning af solvarmesystemer med bygningsintegrerede varmelagre .....	13
2.1	Beregningsmodel .....	13
2.1.1	Lagermodel .....	13
2.1.2	Bygningsmodel .....	17
2.1.3	Solfangermodel .....	17
2.1.4	Systemudformning .....	19
2.2	Beregningsresultater .....	21
2.2.1	Referencetilfælde .....	21
2.2.2	Solvarme direkte til rummet .....	23
2.2.3	Passiv varmeafgivelse fra lageret .....	27
2.2.4	Aktiv og passiv varmeafgivelse fra lageret .....	34
3.	Projektering af lageret .....	43
3.1	Stenmagasin .....	43
3.2	Kanaler i betonhuldæk .....	43
3.3	Komforthensyn .....	47
3.4	Systemudformning .....	49

4.	Konklusion .....	53
	Referenceliste .....	55
	Summary .....	59

## Appendix A

### Projektorganisation

### Liste over udkomne rapporter

## 1.1 INDLEDNING

Denne rapport afslutter forprojektet "Rumopvarmning - Anlæg med Varmelagre sammenbyggede med Bygninger". Projektet indgår i Energiministeriets Solvarme Forskningsprogram (EFP 83).

Formålet med projektet er at undersøge mulighederne for at anvende solvarmelagre som en integreret del af bygningskroppen.

Undersøgelserne er beskrevet generelt i indledningen og ved eksempler på udførte anlæg. I det efterfølgende afsnit er gennemgået forudsætninger og resultater af EDB-simuleringer af disse systemer. I afsnit 3 er der søgt angivet en række anvisninger ved projektering af disse systemer, efterfulgt af en konklusion i afsnit 4.

I mange bygninger er der en stor varmekapacitet f.eks. i form af tegl- eller betonvægge. Denne varmekapacitet udnyttes normalt ved, at der akkumuleres varme tilført ved solindfald gennem vinduer og brugsvarme afgivet af belysning, el-apparater og personer. Varmetransporten sker til og fra overfladen, der vender mod rummet.

Ved at tilføre varme inde i bygningselementerne fremfor at tilføre varmen til elementets overflade opnås flere fordele. Det er muligt at tilføre varme ved en temperatur, der ligger væsentligt over det normale indeklimatiske komfortområde. Selve lageret kan ligeledes have en relativ høj temperatur. Når varmen er afgivet, bliver den ledt ind i lagermaterialet. Varmeafgivelsen til rummet kan ske ved, at det varmetransporterende medium, f.eks. luft, cirkuleres gennem lageret, eller afgivelsen kan ske fra lagerets overflade. Er lageret kompakt, dvs. et lille overfladeareal i forhold til lagervoluminet, er det nødvendigt, at hovedparten af varmen afgives ved hjælp af et varmetransporterende medium. Er overfladearealet stort i forhold til lagervoluminet vil, selvom lageret er isoleret, en stor del af varmeafgivelsen ske fra lagerets overflader.

Varmeafgivelsen fra overfladen til rummet vil ske med en tidsforsinkelse i forhold til varmetilførslen og dermed solindfaldet. Dette er hensigtsmæssigt, hvis der er solindfald gennem vinduer, da størstedelen af varmeafgivelsen fra lageret derved kan ske om aftenen og om natten.

Et andet forhold ved sammenligning af solindfald på tagflader med solindfald gennem vinduer er, at skyggeforhold kan medføre, at solindfaldet gennem vinduerne bliver begrænset, mens solindfaldet på tagfladen kan være uskygget. Endvidere kan en optimal sydvendt vinduesorientering være umulig af planlægningsmæssige årsager.

Systemerne tager primært sigte på at udnytte den opsamlede solvarme til rumopvarmning, selvom der vil være visse muligheder for at kombinere systemerne med opvarmning og måske især forvarmning af varmt brugsvand. Grunden til at der ikke er taget hensyn til denne udnyttelse er, at de lagertyper, der skitseres i dette projekt, typisk kun er isoleret i begrænset omfang i forhold til traditionelle varmelagre, og derved er det ikke muligt at operere med høje temperaturer i lageret om sommeren. Men der er i rapporten skitseret, hvorledes rumopvarmningssystemet kan kombineres med brugsvandsopvarmning.

I projektet vil hovedvægten blive lagt på at anvende luft som det varmetransporterende medium. Væske som varmetransporterende medium kan benyttes, men det skønnes, at et vandlager eller eventuelt et faseændringslager er mere optimalt, når det varmetransporterende medium er vand.

Sammenlignes de skitserede solvarmesystemer med traditionelle væskebårne solvarmesystemer, vil der potentielt kunne opnås en reduktion af solfanger- og lagerprisen. Endvidere vil varmeafgivelsen ofte kunne ske uden anvendelse af mekanisk energi og traditionel styring.

## 1.2 Systemløsninger

For at konkretisere de i indledningen diskuterede forhold, vil der i det følgende blive givet en række eksempler på udførte systemløsninger samt forslag til nye løsninger.

### 1.2.1 Lagring i huldæk

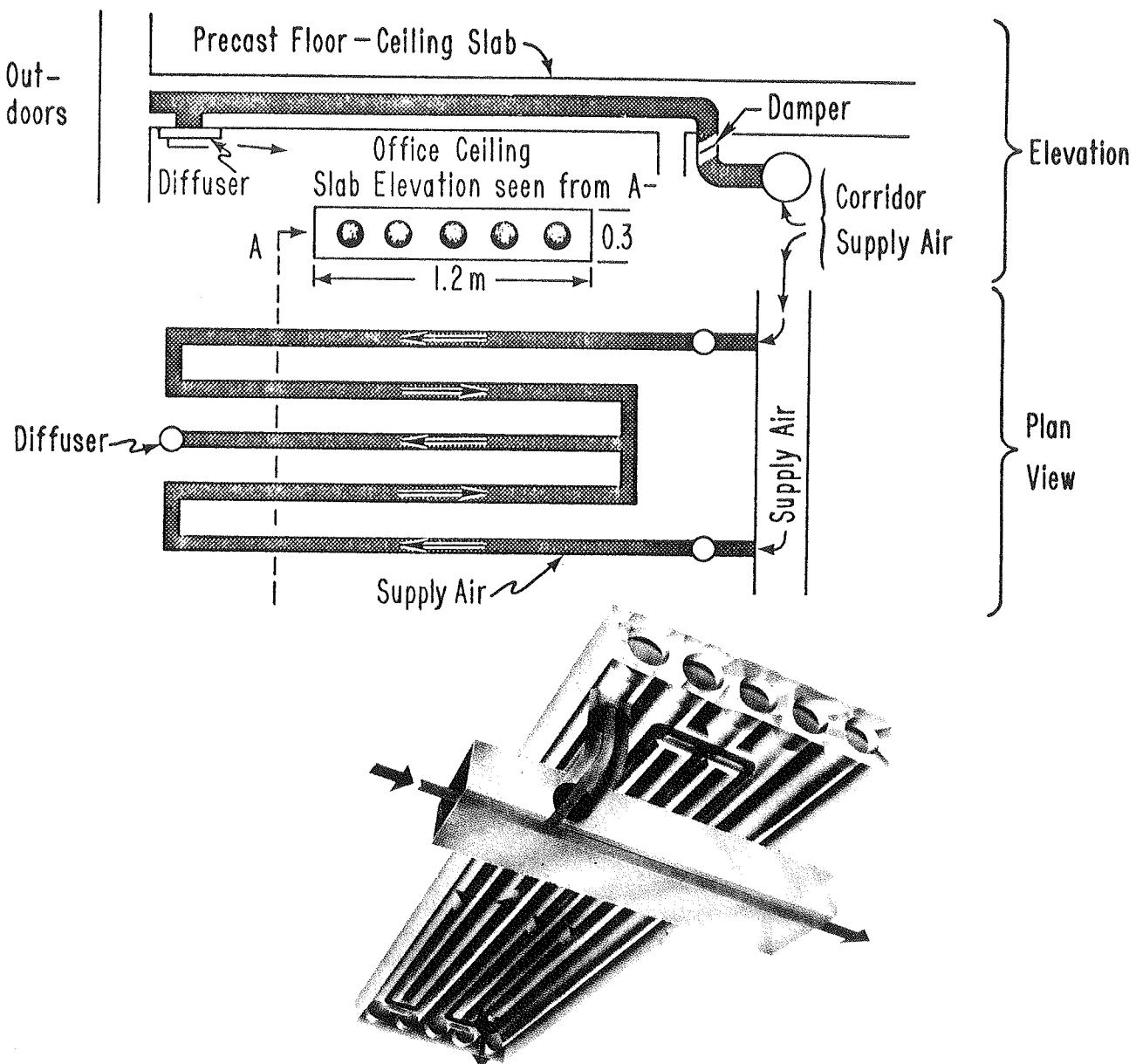
Varmen kan lagres i hule betonelementer. Denne løsning er anvendt i bl.a. Sverige, se figur 1.1 og [1].

Dette system er hovedsageligt anvendt i kontorbyggeri. Hvert dækelement er forbundet til en ventilationskanal i korridoren. Kanalerne i betonelementerne har en diameter på 185 mm. Størstedelen af tryktabet ligger over spjældet i korridoren. Støjen fra spjældet bliver dæmpet af betonelementerne, og det er derfor muligt at anvende relativt store lufthastigheder i fordelingskanalen. Tryktabet i selve betonkanalerne forøger ventilatoreffekten med 0,15 W/m<sup>2</sup>, hvilket udgør 5% af den samlede ventilatoreffekt. I kanalerne ventileres 14 m<sup>3</sup>/h pr. m<sup>2</sup> gulvareal.

De svenske systemer har varmelageret placeret i fremløbsluften. Akkumulering af overskudsvarme i rummet sker udelukkende ved varmeovergang til dækelementernes udvendige overflader, mens afgivelsen af overskudsvarme sker både fra den udvendige overflade og ved hjælp af den ventilerede luft.

Styring af systemet foregår efter et døgnskema for arbejdsdage. Om morgenens kl. 6 starter ventilationssystemet. Hvis betonelementerne er for varme, køles med udeluft, og er de for kolde, sker der en opvarmning af den tilførte ventilationsluft, således at huldækkets temperatur hæves. Om sommeren kan dækelementerne køles med udeluft hele natten.

Det ovenfor beskrevne system kan til kontorbyggeri overflødigøre et konventionelt køleanlæg. I Sverige var der i 1981 bygget 30 af disse anlæg [3].



Figur 1.1 Eksempel på anvendelse af kanalhuldæk til varmelager.  
Figuren viser kanaler til friskluft i dækket. Hvert  
10 m<sup>2</sup> kontormodul er 2 dækelementer bredt (2,4 m) og  
4,2 m langt. [1], [2].

Til boliger med normalt mindre brugsvarmetilskud pr. gulvarealenhed er det også muligt at anvende et tilsvarende system til lagring af solvarme. For at øge varmelagringen vil det være en fordel at tilføre solvarmen til den luft, der passerer i kanalerne i huldækket. Derved kan temperaturen af lageret øges væsentligt over rumlufttemperaturen, og der opnås en tidsforsinkelse af varmeafgivelsen fra lageret.

Et passivt solvarmesystem med lagring i huludæk er udviklet af Barra og Costantini. Systemet fungerer ved selvirkulation som vist på figur 1.2. [4]. Dette system er designet til Syditalien, hvor køling er et problem.

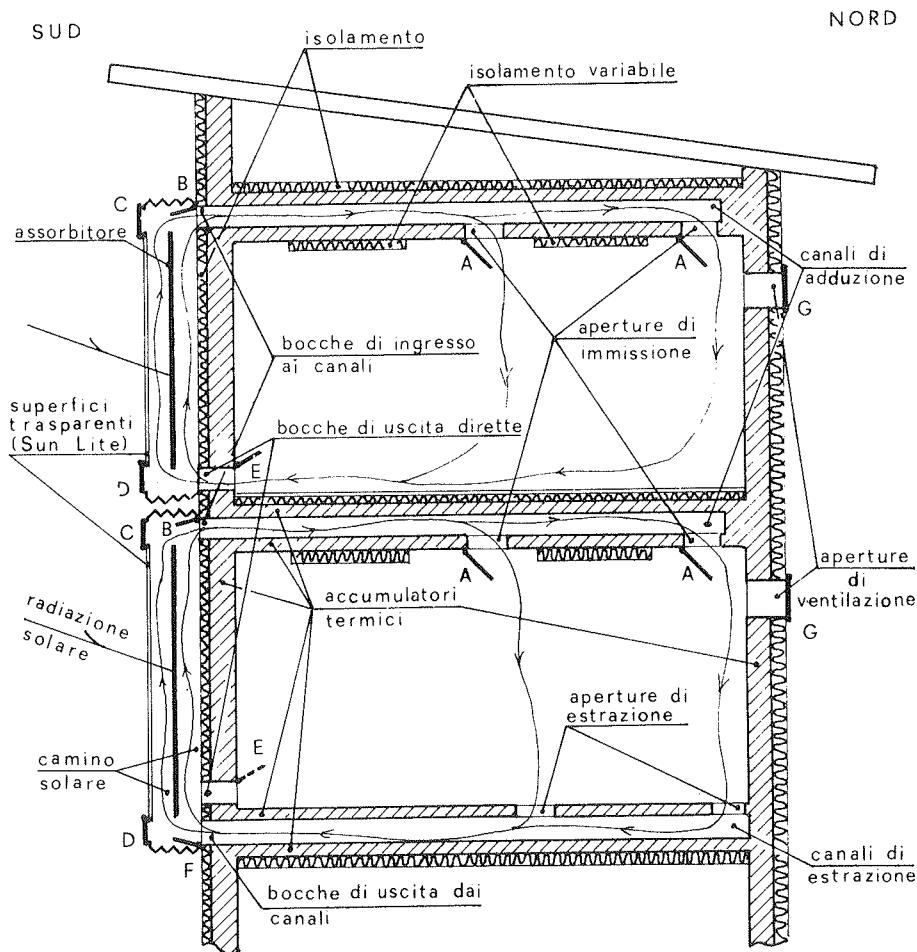
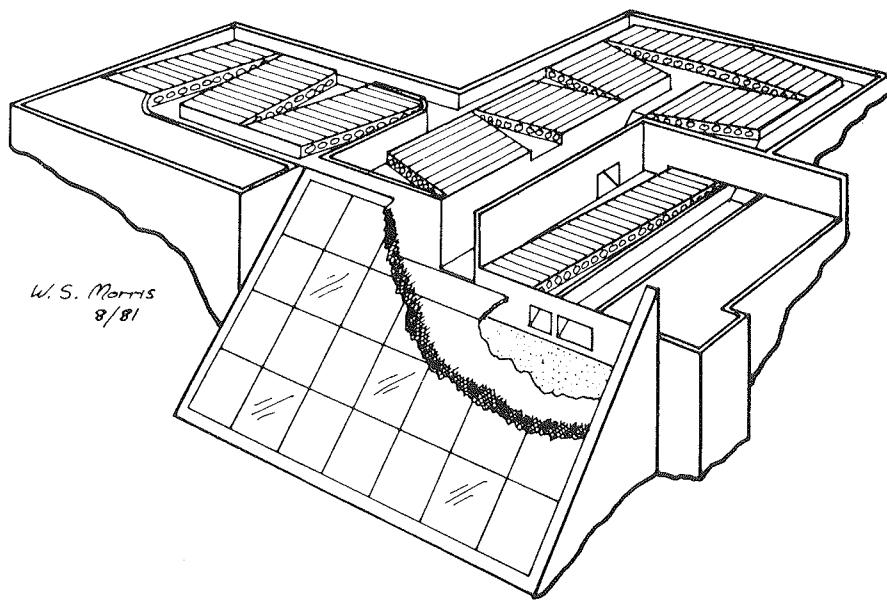


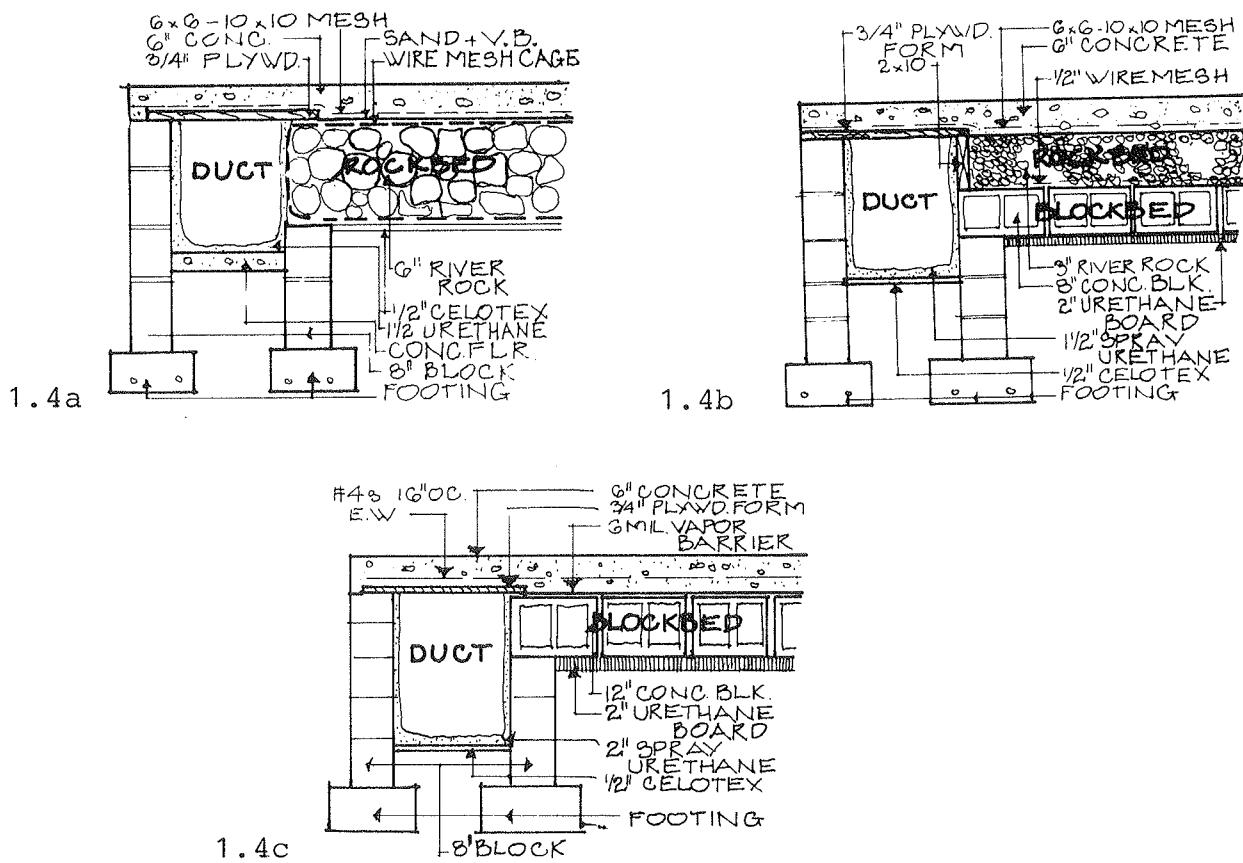
Fig. 1.2 Barra-Costantini systemet [4].

#### 1.2.2 Lagring i terrændæk

En anden mulighed er at opbygge et terrændæk, hvori der indgår et stenlag eller kanaler, så ventilationsluften kan ventileres gennem stenlaget. I udlandet, specielt i USA, kendes forskellige systemer af denne type. Figur 1.3 og 1.4. [5] og [6].



Figur 1.3 Eksempel på terrændæk der anvendes til varmelagring ved hjælp af kanaler i terrændæk, af Scott Morris [5].

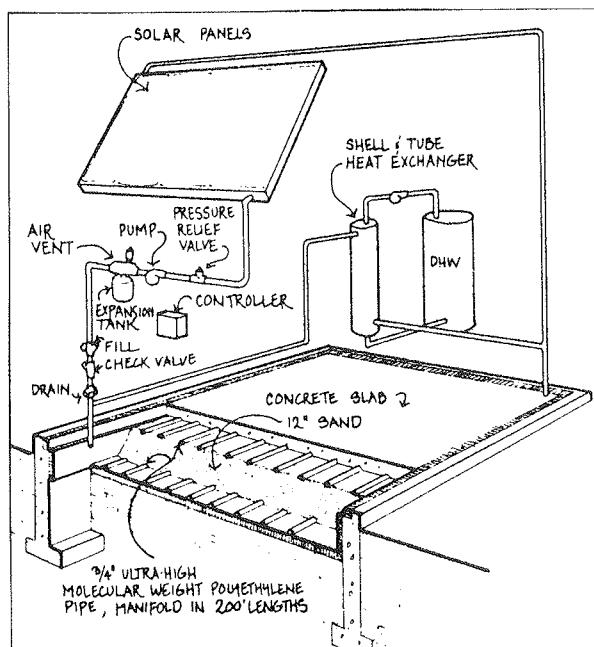


Figur 1.4 Tre eksempler på anvendelse af terrændæk til varmelager, af Agnew, W.C. [6]. Lagermateriale ud over 15 cm beton:  
1.4a: 15 cm tykt stenlag  
1.4b: 8 cm stenlag, 20 cm beton hulblokke  
1.4c: 30 cm hulblokke

I de viste systemer transporteres luften ved naturlig konvektion, hvilket kræver at lageret er placeret højere end solfangeren. Dette vil ofte være et problem i Danmark. Ifølge ref. [6] er det meget mere arbejdsbesparende (og dermed billigere) at anvende et system med kanaler (fig. 1.4c) fremfor et stenlager (fig. 1.4a). Et stenlager placeret i terrændækket har en god varmeovergang mellem sten og luft, men tryktabene er store sammenlignet med varmetransport i kanaler.

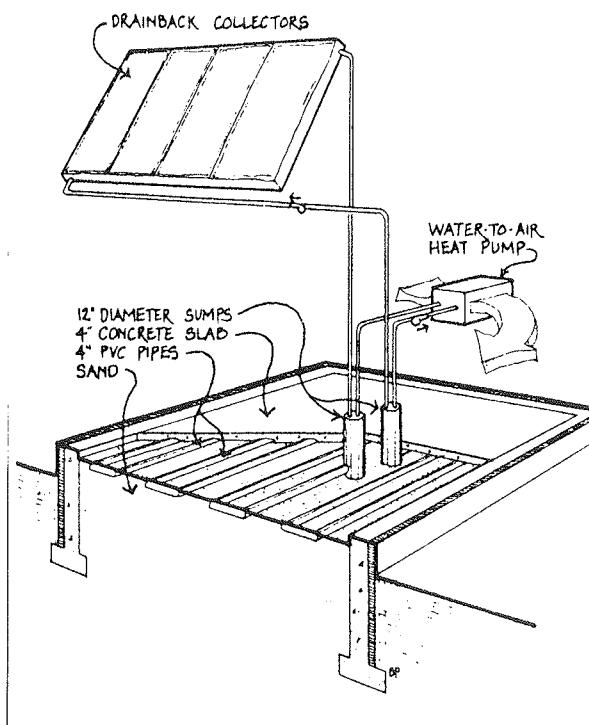
Anvendelse af væske til opvarmning af et tungt gulv er set i en række tilfælde. Her vises to eksempler på denne type system [7].

Et eksempel er vist på figur 1.5. Systemet har  $21 \text{ m}^2$  solfangerareal, der afgiver varmen til  $60 \text{ m}$   $3/4"$  polyethylen-slanger i et  $172 \text{ m}^2$  stort terrændæk. Ifølge producenten er systemets pris (1983) 7000\$. I systemet er der koblet et lager til varmt brugsvand, mens terrændækket, der består af 30 cm sand og et betonlag, udgør varmelageret til rumopvarming.



Figur 1.5 Kombineret rum- og brugsvandssolvarmesystem. [7].

Figur 1.6 viser et drainback solfangersystem med et  $20\text{ m}^2$  solfangerareal. Som lager benyttes terrændækket, der kun er isoleret langs randfundamenterne. I lageret er placeret 120 m almindelig 100 mm PVC rør. Disse rør fungerer samtidig som reservoir for solfangervæskken. For at opvarme rummet yderligere i forhold til hvad det opvarmede gulv kan give, er der mulighed for at anvende terrændækket som varmekilde i forbindelse med en varmepumpe. Systemet er bygget i USA i staten Virginia. Merprisen for det viste system i forhold til et traditionelt varmeanlæg er angivet til 2000 \$.

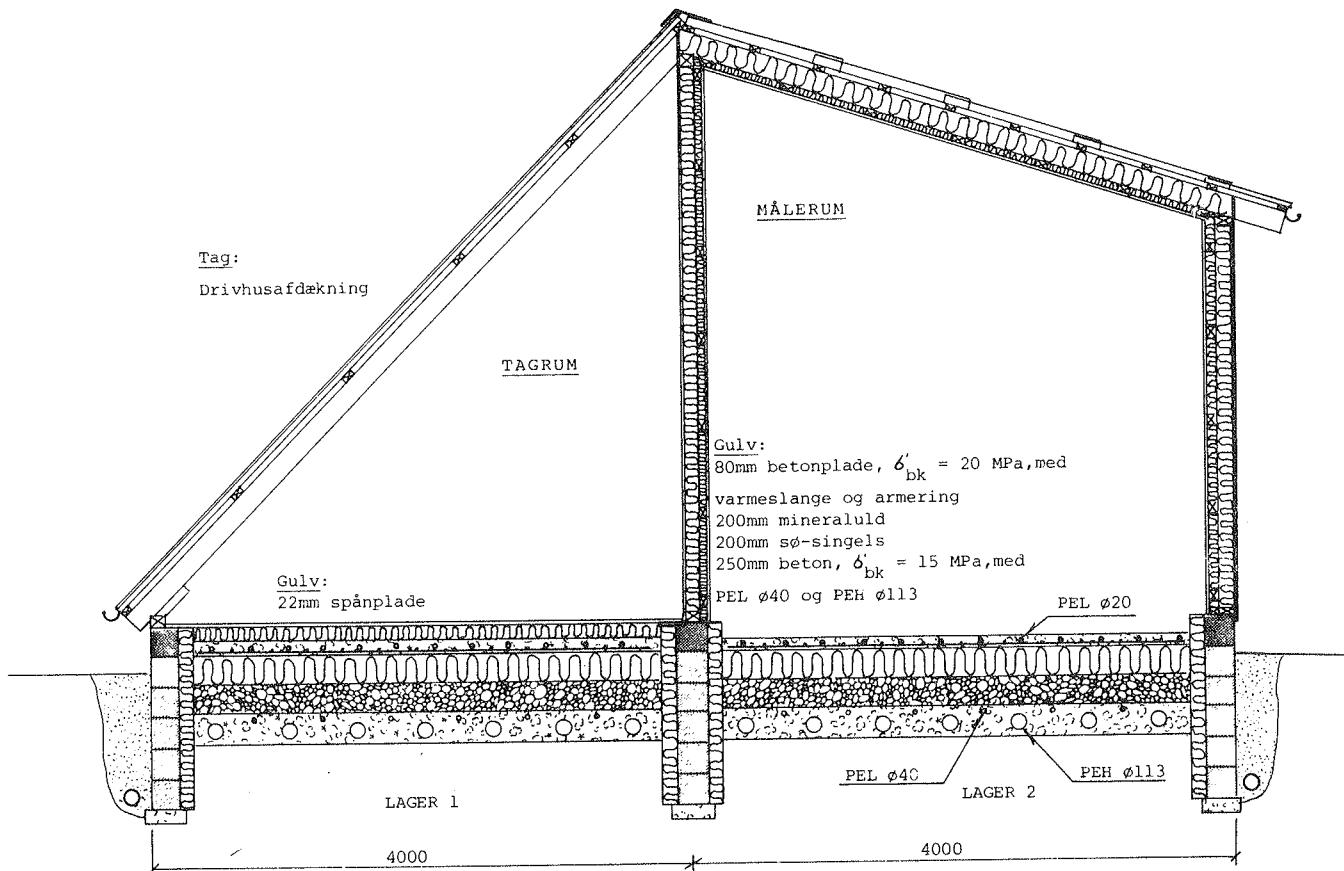


Figur 1.6 Drainback solfangersystem med lager i gulv. [7].

Systemet vil sandsynligvis ikke kunne fungere tilfredsstilende under danske forhold, da der ikke er isoleret tilstrækkeligt mod jorden, og da gulvet let vil kunne blive kølet af varmepumpen til et for lavt temperaturniveau.

Under danske forhold er der lavet forsøg med et tilsvarende system [8]. Ved hjælp af en tagrumssolfanger (figur 1.7) transporteres varmen til et lager, der kun er isoleret mod

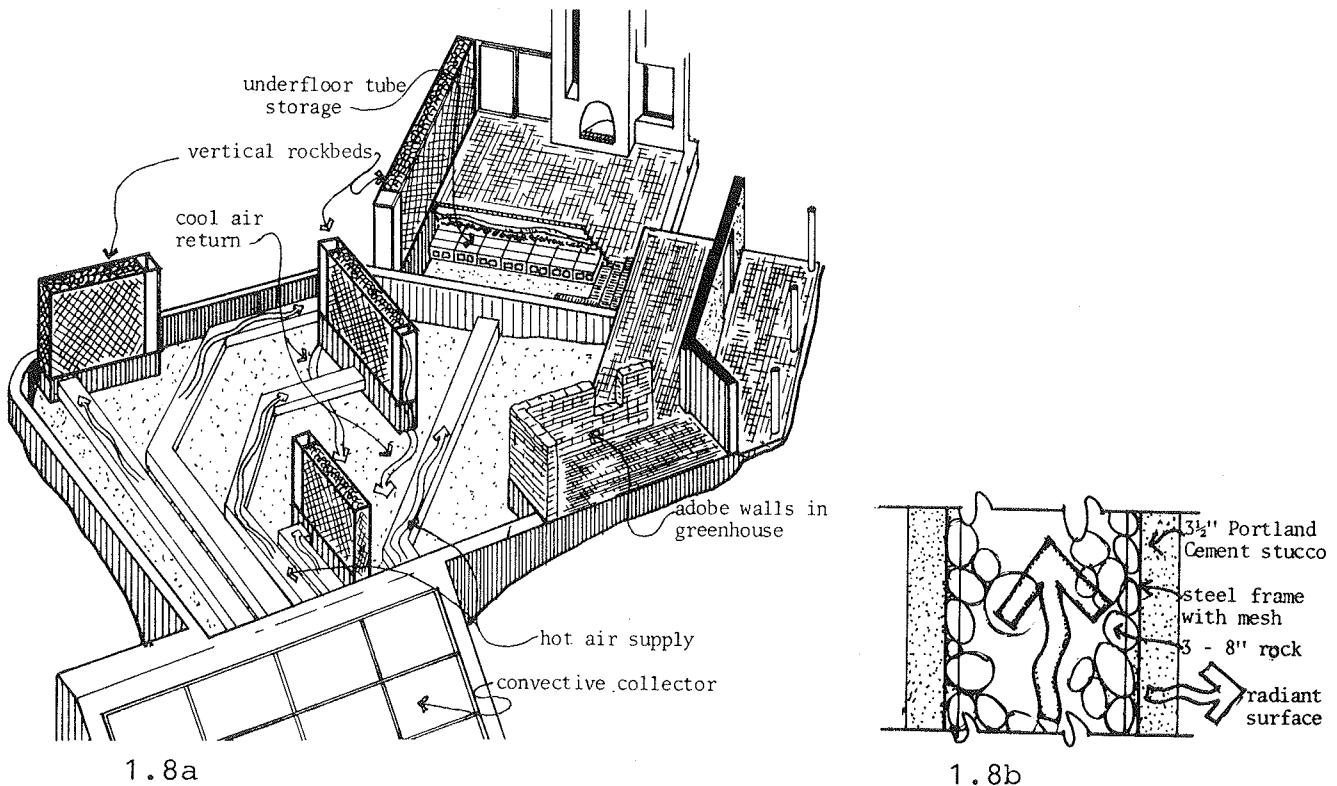
rummet og langs fundamentet. Varmen transportereres fra lageret til rummet ved hjælp af en varmepumpe. Dette system udskiller sig fra hovedparten af de øvrige ved, at der er isoleret mellem lageret og rummet. Erfaringerne med systemet som helhed har ikke været gode. Tagrumssolfangeren har fungeret godt, men kanalsystemet har været dimensioneret således, at ventilatorens energiforbrug udgjorde 15% af den overførte mængde solvarme. Dette forhold, sammen med de relativt store varmetab fra lageret har medført, at den beregnede årseffekt-faktor på varmepumpesystemet (inkl. ventilator energi) er blevet lille.



Figur 1.7 Snit i tagrumssolfanger [8].

#### 1.2.3 Lagring\_i\_vægge

Et alternativ til varmelagring i vandrette lag er, at varmelageret anbringes i vægge. En mulighed er at opbygge en hul væg, hvori der anbringes et stenlager (figur 1.8), [9].



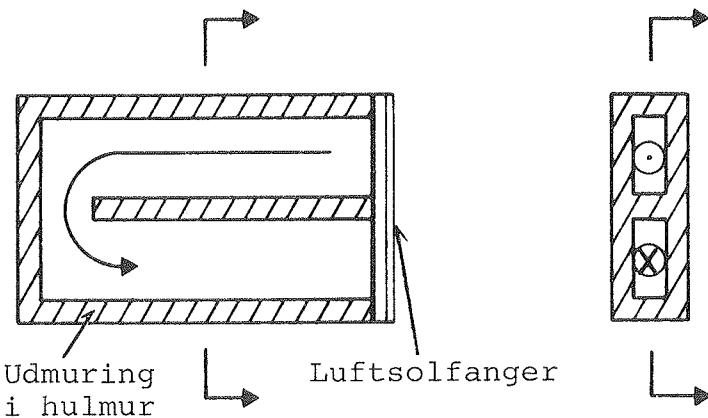
Figur 1.8 "Vertical rockbed project" [9].

1.8a: Placering af solfanger, kanaler og stenmagasin.

1.8b: Snit i stenmagasin.

Varmeafgivelsen sker fra væggens overflader. Et problem ved systemet er de relativt mange og lange kanaler. Systemet kræver, at der er opbygget en kasse, hvori stenene kan anbringes. I stedet for kan der anvendes en hulmur af f.eks. murværk, hvor luftspalten kan anvendes til transport af luften (figur 1.9). Et problem kan være den relativt store permeabilitet af fugerne mellem stenene, hvilket mindsker tætheden af lageret.

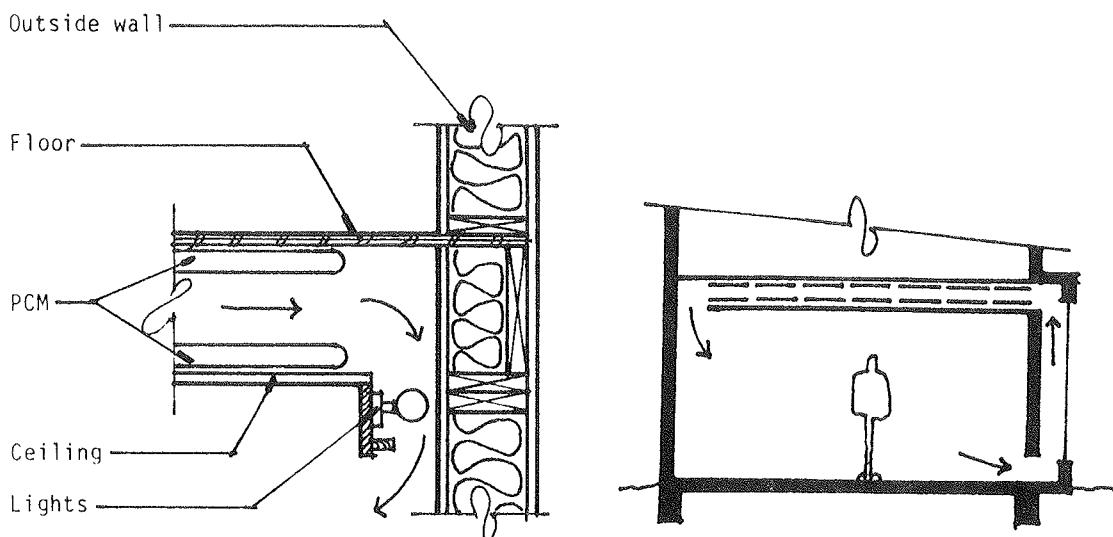
En anden mulighed er at udvikle en meget grov beton, således at det svarer til et stenlager, hvor stenene er sammenkittede af en cementpasta. Denne porøse beton vil kunne være bærende. Beklædes væggen på begge sider, kan der dannes luftspalter, som kan benyttes til fremløb- og returluft. Ved anvendelse af mangehulsten vil det være muligt at udvikle et tilsvarende system.



Figur 1.9 Forslag til anvendelse af indvendig skillevæg i form af en hulmur til kombineret lager- og ventilationskanal. Lodrette snit.

#### 1.2.4 Lagring\_i\_faseændringsmaterialer

I stedet for at anvende et bygningsmateriale til varmelager kan der anvendes et faseændringsmateriale, som for et givent begrænset temperaturinterval kan have en væsentlig større varmelagringsevne pr. volumen-enhed eller masse-enhed end de sensibelt lagrende materialer. En ofte anvendt indkapslingsmetode er ved anvendelse af tynde poser med faseændringsmateriale. Poserne skal normalt anbringes vandret for at undgå afblanding af faseændringsmaterialerne. Et eksempel på anvendelse af materialerne er vist på figur 1.10 [10].



Figur 1.10 Faseændringsmaterialer anvendt i spalte i loft. [10].

#### 1.2.5 Driftserfaringer

Fra de referencer, der er gennemgået, fremgår, at udbyttet normalt ikke er helt så stort som beregnet. Mange rapporterer om utæthed som hovedårsagen til forskellen. Specielt er utætte spjæld og samlinger angivet som en væsentlig faktor. Hvis solfangeren placeres lavere end varmelageret, vil risikoen for utilsigtede varmetab blive formindsket. Til trods for disse problemer rapporterer mange om gode måleresultater.

## 2. BEREGNING AF SOLVARMESYSTEMER MED BYGNINGSINTEGREREDE VARMELAGRE

### 2.1 Beregningsmodel

For at undersøge de energi- og komfortmæssige konsekvenser ved anvendelsen af de beskrevne systemtyper i Danmark er der opstillet en EDB-beregningssmodel. Modellen skal være i stand til at beregne:

- a) Varmebalance for et lager.
- b) Varmebalance for en bygning.
- c) Udbytte af en solfanger.

I det eksisterende programmel er der kun i ringe grad lagt vægt på simulering af samspillet mellem a) og b).

Det eksisterende program er derfor udbygget til at kunne behandle disse systemer samtidigt.

#### 2.1.1 Lagermodel

Som udgangspunkt er benyttet en en-dimensonal lagermodel, (figur 2.1). I beregningen opdeles lageret i et antal segmenter, der har forskellige temperaturer og som udveksler varme med rummet fra lagerets overflade. Varmetransporten foregår udelukkende ved hjælp af den luft, der passerer lageret. EDB-programmet, der simulerer lageret, er opbygget til dette projekt.

For at beregne temperaturerne i det enkelte lagerelement i lageret kan følgende ligning opstilles analogt med Duffie og Beckman [11].

$$\frac{dT_{b,i}}{d\theta} = \eta N(T_{f,i} - T_{b,i}) + \sum_{j=1}^{N_{\text{seg}}} \frac{N(U\Delta A)_{i,j}}{(\dot{m} C_p)_f} (T'_{a,j} - T_{b,i})$$

hvor

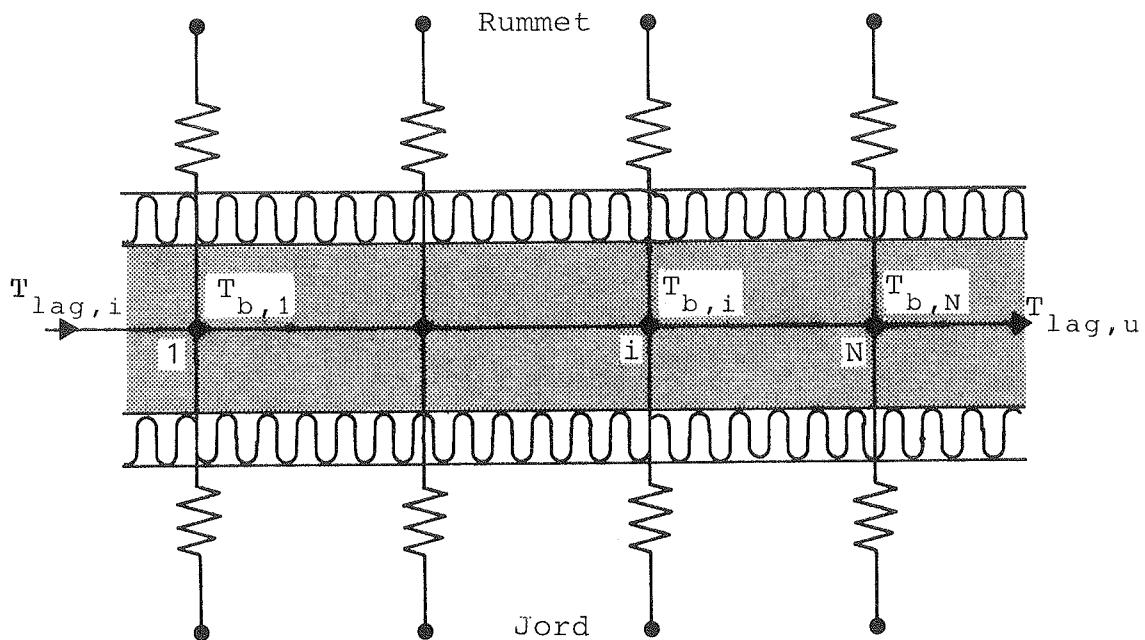
$T_{b,i}$  = lagertemperaturen i lag i ( $^{\circ}\text{C}$ )

N = antallet af segmenter i lageret

- $N_{\text{omg}}$  = antallet af elementer i omgivelserne
- $T_{f,i}$  = temperaturen af det varmetransporterende medium ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $(U\Delta A)_{i,j}$  = varmeoverføring mellem lag i og omgivelserne  
(element j) (W/K)
- $T'_{a,j}$  = omgivelsernes temperatur (element j) ( $^{\circ}\text{C}$ )  
(f.eks. rumlufttemperatur, overfladetemperatur  
eller jordtemperatur)
- $(\dot{m} C_p)_f$  = det varmetransporterende mediums kapacitetsstrøm (W/K)
- $\eta$  = konstant lig  $1 - e^{-NTU/N}$  (-)
- NTU = dimensionsløs varmeovergang til lagermateriale =  
 $(h_v AL) / (\dot{m} C_p)_f$  (-)
- A = tværnitsareal af lager ( $\text{m}^2$ )
- L = lagerets længde (m)
- $h_v$  = volumetrisk varmetransmissionskoefficient mellem  
lager og varmetransporterende medium ( $\text{W}/(\text{m}^3 \text{K})$ )

Ifølge [11] kan den volumetriske varmetransmissionskoefficient  
for et stenmagasin bestemmes til:

- $$h_v = 650 \left( \frac{G_o}{D} \right)^{0,7} \quad (\text{W}/(\text{m}^3 \text{K}))$$
- $G_o$  = massestrømmen (kg/s)
- D = partikel diameteren (m)
- $\theta$  = dimensionsløs tid  
 $= \tau (\dot{m} C_p)_f / \left( (\rho C_p)_b (1-\varepsilon) AL \right)$  (-)
- $\tau$  = tid (s)
- $(\rho C_p)_b$  = produktet af masse og varmefylde for stenlager  
(J/ $\text{m}^3 \text{K}$ )
- $\varepsilon$  = porositetten for lageret (-)



Figur 2.1 Beregningsmodel til beregning af temperaturer i varmelager.

Ligningen kan løses ved en Crank-Nicolson metode, hvor den afledeede  $\frac{dT_{b,i}}{d\theta}$  erstattes med  $(T_{b,i}^+ - T_{b,i})/\Delta\theta$ .

$T_{b,i}^+$  er lagerets temperatur i det efterfølgende tidsstep.

Løses ligningen m.h.t.  $T_{b,i}^+$  fås:

$$T_{b,i}^+ = \frac{\eta N \left( T_{f,i} - \frac{T_{b,i}}{2} \right) + \sum_{j=1}^N \left( \frac{N(U\Delta A)}{(m C_p)_f} (T_{a,j} - T_{b,i}) \right) + \frac{T_{b,i}}{\Delta\theta}}{\frac{1}{\Delta\theta} + \frac{\eta N}{2} + \sum_{j=1}^N \left( \frac{N(U\Delta A)}{2(m C_p)_f} \right)}$$

Temperaturen af det varmetransporterende medium kan bestemmes af:

$$\frac{T_{f,i+1} - T_{b,i}}{T_{f,i} - T_{b,i}} = e^{-\frac{NTU}{N}}$$

$$T_{f,i+1} = T_{b,i} + (T_{f,i} - T_{b,i}) e^{- \frac{NTU}{N}}$$

hvor  $T_{f,i}$  og  $T_{f,i+1}$  er temperaturerne af det varmetransporterende medium henholdsvis før og efter passage af element nr. i.

Varmestrømmene til og fra segment nr. i af lageret kan bestemmes til:

Akkumuleret i lager:

$$Q_{b,i} = \frac{(\rho C_p)_{b,i} (1-\varepsilon) \cdot A \cdot L}{\tau \cdot N} \cdot (T_{b,i}^+ - T_{b,i}) \quad (W)$$

Varmestrøm til omgivelser: (nr. j)

$$Q_{a,j} = (U \Delta A)_{i,j} \cdot \left( T_j - \frac{(T_{b,i}^+ + T_{b,i})}{2} \right) \quad (W)$$

Varmestrøm til varmetransporterende medium:

$$Q_f = (\dot{m} C_p)_f (T_{f,i+1} - T_{f,i})$$

Varmeovergangen fra lageret til omgivelserne er i edb-modellen opdelt i varmeovergang til jord, til rumluft og til de indvendige overflader i rummet. Der er dog ikke i denne rapport beregnet varmeovergang til jord, da lagrene antages placeret i rummene. Varmeovergangen ved stråling mellem lagerets overflade, der vender mod rummet, sker efter de sædvanlige ligninger for strålingsudveksling mellem to overflader med konstant temperatur i et lukket hulrum.

Varmeudveksling ved konvektion fra lagerets overflade, der vender mod rummet, bestemmes i afhængighed af om overfladen er varmere eller koldere end rumluften [13].

I beregningerne er som lager undersøgt et stenmagasin og et betonhuldæk. Alle lagrene forudsættes at have en flad kasseformet geometri med en tykkelse på 0,20 m og en længde i luftstrømmens retning på hhv. 3 og 7 m for stenmagasinet og betonhuldækket. Der er forudsat varmeafgivelse fra begge sider af lageroverfladen. I stenmagasinet antages en middel-

stendiameter på 40 mm, og betonhuldækket antages at have cirkulære kanaler med en diameter på 100 mm. I begge tilfælde er forudsat en porøsitet på 30% og en volumetrisk varmekapacitet (incl. hulrum) på  $1,5 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ .

Varmelageret er termisk koblet til bygningen på tre måder. Varmeovergangen kan ske fra lagerets overflade, der vender mod rummet, ved konvektion og stråling, og/eller varmeovergangen kan ske ved ventilation af varm luft fra lageret til rummet. I rapporten vil konsekvenserne af de forskellige styringsstrategier blive vist.

#### 2.1.2 Bygningsmodel

Som bygningsmodel er anvendt EDB-beregningssprogrammet BA4 [14]. I dette program er temperaturerne repræsenteret ved ét knudepunkt, der repræsenterer rumlufttemperaturen, ét der repræsenterer rummenes indvendige overfladetemperatur og ét der repræsenterer rummenes varmekapacitet. Beregningsmodellen er tidligere modifieret til at kunne regne på varmeafgivelse fra en overflade, som f.eks. en solvæg.

Forudsætninger for husmodellen er vist i figur 2.2. Bygningen antages at være et enfamiliehus på  $130 \text{ m}^2$ , der opfylder bygningsreglementets krav til varmeisolering. Vinduesarealet udgør 15% af gulvarealet og er orienteret øst/vest. Huset tilføres brugsvarme (interne varmetilskud) fra belysning, el-apparater og personer på i alt 18,2 kWh/døgn. Der er regnet med natsænkning til minimum  $17^\circ\text{C}$ . I reference [15] er der redegjort nøjere for forudsætningerne.

#### 2.1.3 Solfangermodel

Som udgangspunkt for beregning af solfangerdelen er benyttet en effektivitetskurve for udbyttet, da betydningen af en nøjagtig beregning af solfangerudbyttet må anses for at være begrænset, når hele systemet skal vurderes. Solfangereffektiviteten for små indfaldsvinkler er sat til:

$$\eta = 0,70 - 4,7 \frac{T_i - T_{ude}}{E} \quad \text{hvor}$$

Bruttoetageareal	$m^2$	130
Rumvolumen, indvendigt	$m^3$	267
<u>Klimaskærm</u>		
Ydervægge, k-værdi	$W/m^2K$	0,30
Materiale, indvendigt	-	spånplade/tegl
Loft, k-værdi	$W/m^2K$	0,20
Materiale, indvendigt	-	spånplade
Gulv, ydre randfelt	$W/m^2K$	0,30
" indre -"	$W/m^2K$	0,30
Materiale, indvendigt	-	spånplade/klinkegulv
<u>Vinduer og døre</u>		
Glastype	-	2 lag alm.
Syd areal	$m^2$	0
Øst + Vest Glasandel	$m^2$	19,5
k-værdi dag/nat	$W/m^2K$	0,70
Nord	$m^2$	2,4/2,8
Døre k-værdi	$m^2$ $W/m^2K$	0 indkluderet i vinduer
<u>Ventilation</u>		
Naturligt luftskifte	$h^{-1}$	0,55
Mekanisk ventilation	$h^{-1}$	0
Max. ekstra ventilation ved overtemperatur	$h^{-1}$	4,0
<u>Opvarmning</u>		
Tilladelig temperatur interval		
dag	$^{\circ}C$	20 - 26
nat	$^{\circ}C$	17 - 26
Varmeanlæggets maksimale effekt	W	15.000
Interne varmetilskud (belysning, el-apparater, personer)	kWh/dag	18,2
Dimensionerende varmetab ( $t_i = 20^{\circ}C$ , $t_u = -12^{\circ}C$ , $t_j = 8^{\circ}C$ )	W	5.790
<u>Skyggeforhold</u>		
Reflektionskoefficient for terræn	%	25
Horisontafskærmning	o	5

Figur 2.2 Forudsætninger for beregning af rummodel.

$$\begin{aligned} T_i &= \text{indløbstemperaturen } ^\circ\text{C} \\ T_{ude} &= \text{udelufttemperaturen } ^\circ\text{C} \\ E &= \text{solindstrålingen } \text{W/m}^2 \end{aligned}$$

Solfangeren antages orienteret sydvendt med en hældning fra vandret på  $60^\circ$ . Luftflowet er sat til  $0,018 \text{ m}^3/\text{s m}^2$  solfanger. Værdierne for solfangereffektivitet er hentet fra en amerikansk markedsført solfanger (Tritec Airhair Collector 51) med to lag glas [16]. Værdierne er baseret på det transparente areal.

Ventilatorens effekt sættes til 100 W. Der regnes med et rørtab, hvor rørene antages at have en diameter på 280 mm og en isolering på 50 mm. Rørlængden antages at være 20 m, hvoraf halvdelen varmetabsmæssigt antages at være placeret i det fri.

For at kunne vurdere solfangersonsystemet, hvis det udelukkende anvendes til brugsvandsopvarmning, er der for et solfangerareal på  $10 \text{ m}^2$  udført en beregning af udbyttet på årsbasis. Et resume af forudsætningerne er vist i figur 2.3, og de øvrige er angivet af Furbo [17].

#### 2.1.4 Systemudformning

I rapporten er beskrevet forskellige former for sammenkobling af solfanger, lager og bygning:

1. Referencetilfælde hvor bygningens opvarmningsbehov beregnes med lageret, hvor der sker varmeovergang til lagerets overflader, men hvor der ikke er luftflow gennem lageret. Der er ikke regnet med solfanger i referencemodellen.
2. Solvarme direkte til rum. I dette tilfælde er solfangeren koblet direkte til rummet uden at der anvendes et separat lager. Det eneste lager der anvendes er i form af bygningens varmeakkumuleringsvne.
3. Solvarme med passiv varmeafgivelse fra lager. Solfangeren opvarmer udelukkende lageret uden at luften

Solfanger:

Solfangereffektivitet for små indfaldsvinkler:

$$\eta = 0,70 - 4,7 \cdot \frac{T_i - T_{ude}}{I}$$

Solfangerareal :  $10 \text{ m}^2$   
Volumenstrøm :  $0,018 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$   
Ventilatoreffekt :  $100 \text{ W}$   
Solfangerhældning fra vandret:  $60^\circ\text{C}$   
Solfangerorientering : Sydvendt

VARMELAGER:

Beholdermateriale : Stål  
Form: Cylinderformet  
højde/diameter : 4,3  
godstykkelse : svøb : 5 mm  
endebunde : 5 mm  
Beholdervolumen : 210 l  
Beholderisolering : materiale : Mineraluld  
tykkelse : 5 cm  
kuldeboplacering : Lagerbund  
kuldebrostørrelse :  $1 \text{ W}/^\circ\text{C}$   
Varmevekslerspiral : placering : Nederste del af lageret  
dimension : 4 m, 3/4" rør  
Omgivelsestemperatur :  $22^\circ\text{C}$

Solfangerkredsen:

Rørmateriale : Stål  
Rørdimension : 3/4"  
Rørisolering : materiale : Mineraluld  
tykkelse : 5 cm  
Rørlængde : indendørs : 10 m  
udendørs : 10 m

Styresystem:

Start- og stop-temperaturdifferens mellem solfangervæskens fremløbstemperatur til og retourtemperatur fra varmelageret: Startdifferens:  $10^\circ\text{C}$   
Stopdifferens:  $0,5^\circ\text{C}$

Varmtvandsforbrug:

Volumen : 150 l/dag  
Forbrugsmønster : kl. 07: 30 l  
kl. 12: 30 l  
kl. 18: 30 l  
kl. 20: 30 l  
kl. 22: 30 l  
Koldtvandstemperatur :  $10^\circ\text{C}$   
Varmtvandstemperatur :  $45^\circ\text{C}$

Oliefyrsunit:

Tomgangstab : 350 W  
Fyringsnyttevirkning : 0,85

Figur 2.3 Forudsætninger for beregning af brugsvandsanlæg.  
[17].

direkte passerer rumluften. Varmeafgivelsen sker udelukkende ved konvektion og stråling fra lageroverfladen.

4. Solvarme med både aktiv og passiv varmeafgivelse fra lager. Solfangeren leverer varm luft direkte til lageret. Returluft til solfangeren passerer rummet, hvis der er et opvarmningsbehov. Der passerer dog ikke mere luft end at varmebehovet netop dækkes. Er der ikke noget opvarmningsbehov, kan lageret opvarmes af solfangeren uden at returluft til solfangeren passerer rummet.

Hvis solfangeren ikke kører, er der mulighed for at ventilere rumluft gennem lageret til at dække opvarmningsbehovet.

Andre styringsstrategier er mulige, men de valgte giver mulighed for at vurdere det spektrum, hvori andre styringsformer kan ventes at ligge.

## 2.2 Beregningsresultater

På grundlag af forudsætningerne skitseret i afsnit 2.1, er der udført et antal beregninger af solvarmeanlægget. I det følgende er udelukkende angivet udbyttet af solvarmeanlægget til rumopvarmning, mens det forventede udbytte ved kombination af rum- og brugsvandsopvarmning er angivet i konklusionen (afsnit 4).

### 2.2.1 Referencetilfælde

For at bestemme udbyttet af solvarmeanlægget er det nødvendigt at definere et udgangspunkt, som udbyttet måles i forhold til. I denne rapport er der ved beregninger af udbyttet af solvarmeanlægget benyttet opvarmningsbehovet af bygningen med lageret, hvor lageret kun udveksler varme ved konvektion og stråling mellem lageroverfladen og rummet. I disse tilfælde regnes der ikke med luftflow i lageret. Valget af referencetilfælde medfører, at der allerede ved solfangerarealet  $0 \text{ m}^2$  er opnået en energibesparelse, idet varmelageret akkumulerer en

del af solindfaldet gennem vinduerne. Dette fremgår af nedenstående tabel, der viser opvarmningsbehovet for de anvendte referencetilfælde som funktion af bygningsmodel og varmeakkumuleringsevne, (figur 2.4).

Akkumulerings- evne	Lager- størrelse $m^3$	Tilladelig max. rumluft- temperatur $^{\circ}C$	Opvarmnings- behov kWh/år
Let rummodel	0	26	8670
	2		8530
	4		8450
	10		8340
	20		8330
Tung rummodel	0	26	8150
	2		8160
	4		8180
	10		8220
	20		8300
Let rummodel	0	24	8690
Tung rummodel	0		8150

Figur 2.4 Opvarmningsbehov ved varierende rummodel, lagervolumen og maksimal rumlufttemperatur for referencemodellerne. Varmelageret er uisoleret og udveksler kun varme med rummet.

Det ses, at varmelageret i de lette rummodeller øger varmeakkumuleringsevnen således, at forskellen i opvarmningsbehovet mellem den lette og tunge rummodel er beskeden, når der er et stort varmelager.

Endvidere ses, at energiforbruget i den tunge rummodel øges med op til 2% ved et lager på  $20 m^3$  i forhold til modellen uden lager. Dette forhold skyldes, at introduktion af store fladearealer, der udveksler varme ved konvention og stråling til rummet, øger konduktansen, der er i BA4 programmet mellem rumluften og overfladerne.

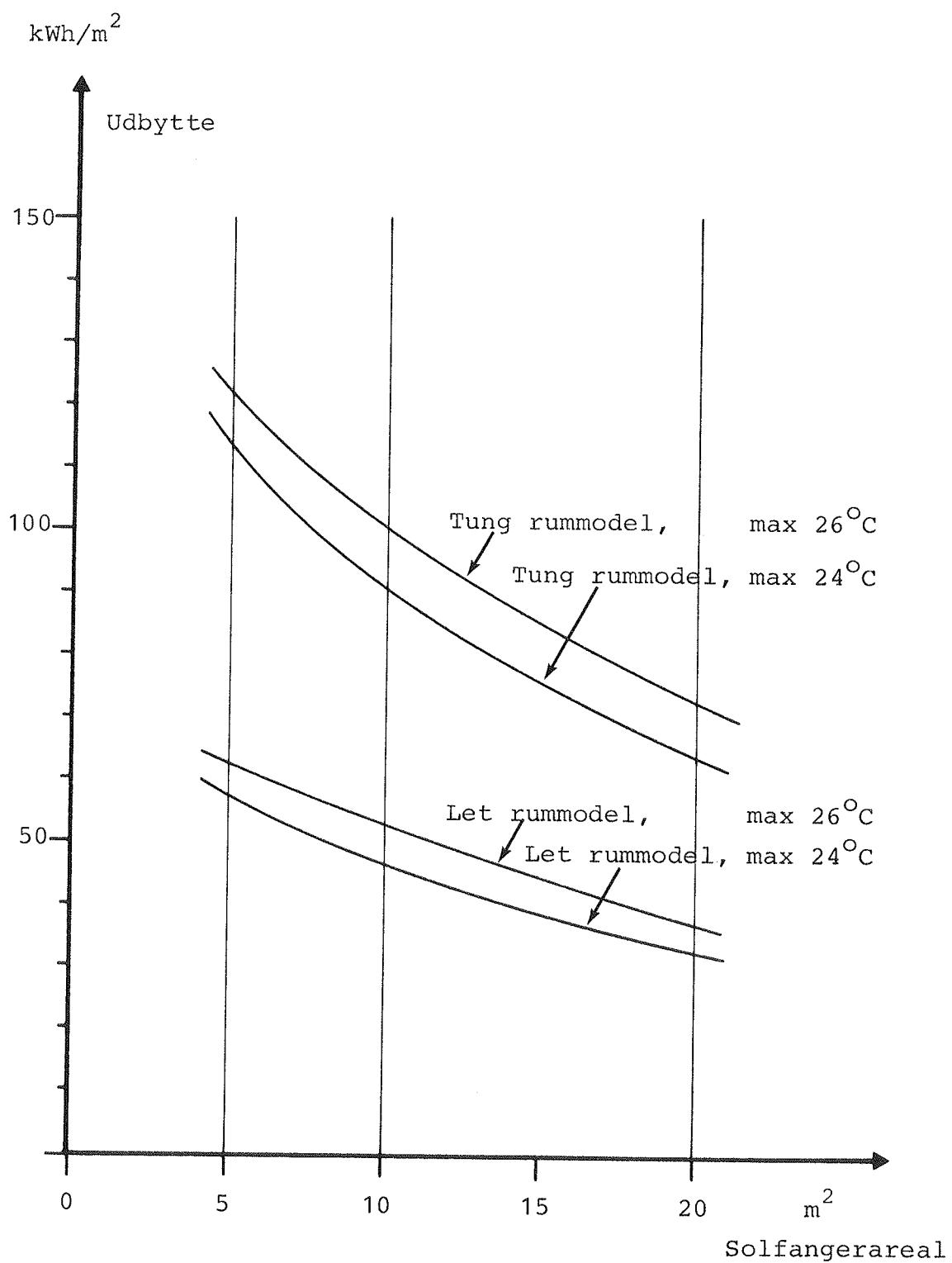
Ændring af den tilladelige maksimale rumlufttemperatur har kun ringe indflydelse på opvarmningsbehovet, da der beregningsmæssigt kun anvendes forceret ventilation med udeluft i perioder, hvor der kun er et lille opvarmningsbehov.

#### 2.2.2 Solvarme direkte til rummet

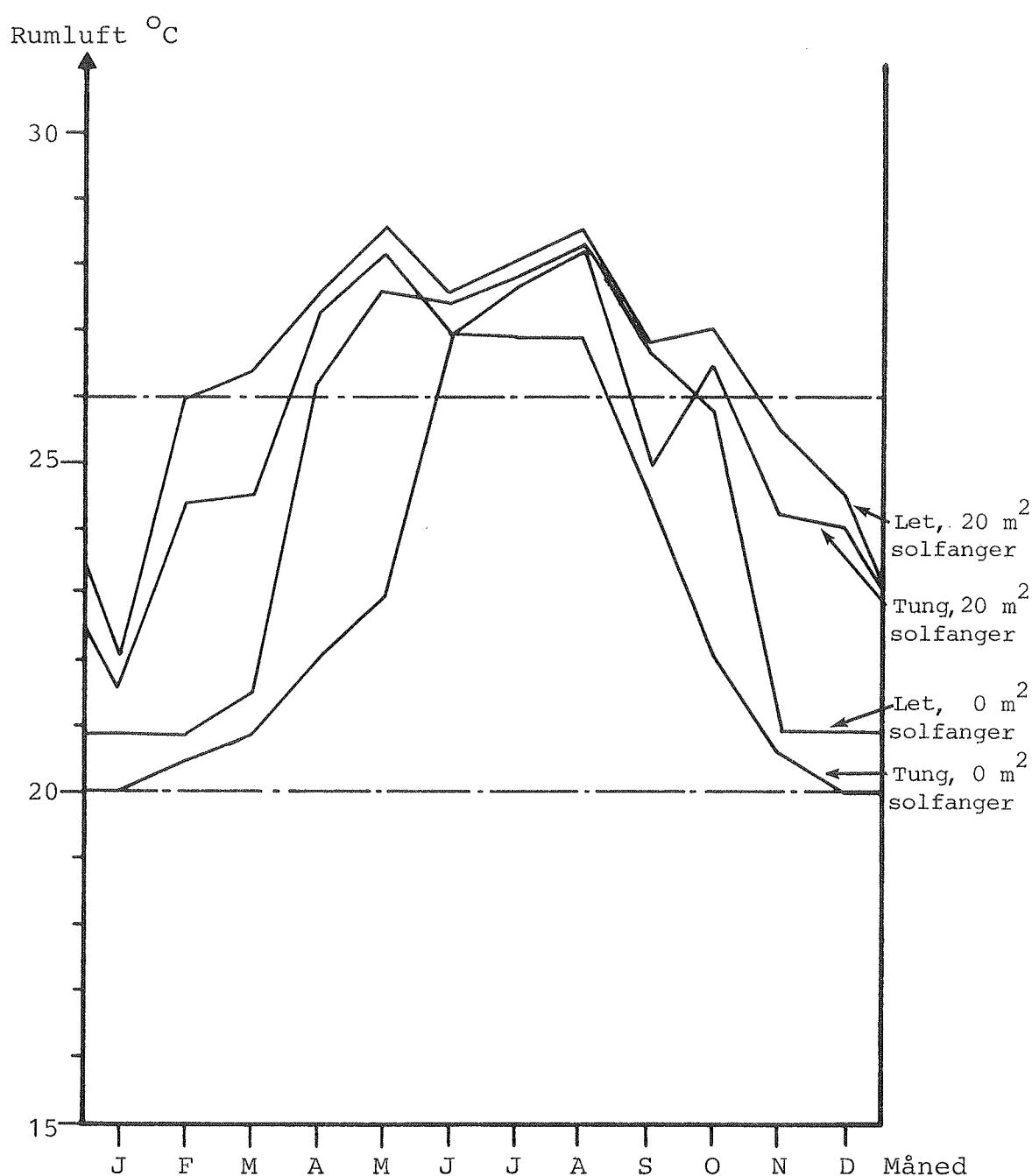
For at bestemme udbyttet, i tilfælde af at den varme luft blæses direkte ind i huset, er der udført en række beregninger. I beregningerne er varieret følgende parametre: Bygningens varmeakkumuleringsevne, solfangerarealet og den maksimalt tilladelige rumlufttemperatur. Den solopvarmede luft tilføres kun i den udstrækning, at den ønskede maksimale rumlufttemperatur ikke overskrides. I beregningerne er denne sat til enten  $24^{\circ}\text{C}$  eller  $26^{\circ}\text{C}$ . Resultaterne er vist på figur 2.5. Det ses, at solfangerarealet som ventet har en væsentlig indflydelse på udbyttet. Jo større solfangerarealet er, desto mindre er udbyttet pr.  $\text{m}^2$  solfanger. En anden meget væsentlig parameter er bygningens varmeakkumuleringsevne. Ved  $5 \text{ m}^2$  solfanger falder udbyttet med 48%, hvis rummet har en lille varmeakkumuleringsevne fremfor en stor. Den maksimalt tilladelige rumlufttemperatur har også en vis indflydelse på udbyttet. Reducerer den maksimale rumlufttemperatur fra  $26^{\circ}\text{C}$  til  $24^{\circ}\text{C}$ , reduceres udbyttet med 8-12%. Rumlufttemperaturen, der forekommer, er vist på figur 2.6.

I sommerhalvåret forekommer relativt høje rumlufttemperaturer, selv i de rummodeller hvor der ikke er tilført varme fra solfangeren. Årsagen til temperaturer højere end  $26^{\circ}\text{C}$  er, at den beregningsmæssige ventilationsluftmængde ikke er tilstrækkelig stor til at fjerne overskudsvarmen, og at der ikke anvendes solafskærmning til at reducere rumlufttemperaturerne. Hvis der blev anvendt solafskærmning, ville problemet med de uønskede høje temperaturer blive reduceret.

I den tunge rummodel med  $20 \text{ m}^2$  solfanger forekommer uacceptable temperaturer (90% fraktile større end  $25,5^{\circ}\text{C}$ ) i månederne april til oktober. I den lette rummodel er det samme tilfældet i månederne februar til november.



Figur 2.5 Udbytte af solfanger hvor luften blæses direkte ind i rummene angivet som funktion af solfangerareal, rummodel og maksimal rumlufttemperatur.



Figur 2.6 90% fraktil af rumlufttemperaturer for de enkelte måneder uden og med indblæsning af varm luft fra 20  $\text{m}^2$  solfanger. Kun indblæsning af varm luft ved lufttemperaturer på under 26  $^{\circ}\text{C}$ . Over 26  $^{\circ}\text{C}$  anvendes (beregningsmæssigt) forceret ventilation i perioden 1/6 - 30/9.

På figur 2.7 er vist resultatet af tilsvarende beregninger, hvor der kun er tilført solvarme i det omfang, at lufttemperaturen ikke overstiger 24°C. Kurverne viser i sommermånederne sammenfald mellem kurverne med og uden solfanger for den samme tyngde af rummodellen. Kurverne viser, at der kun sker en begrænset stigning (max. 1°C) i den viste temperatur i de måneder, hvor der forekommer høje temperaturer. Ved styring til maksimalt 24°C er den dominerende årsag til overtemperaturer (over 26°C) solindfaldet gennem vinduer. Benyttes samme kriterie som ved forrige figur (90% frakt til større end 25,5°C) har den lette rummodel højere værdier i månederne april til august samt oktober, mens den tunge rummodel har højere værdier i månederne juni til august samt oktober.

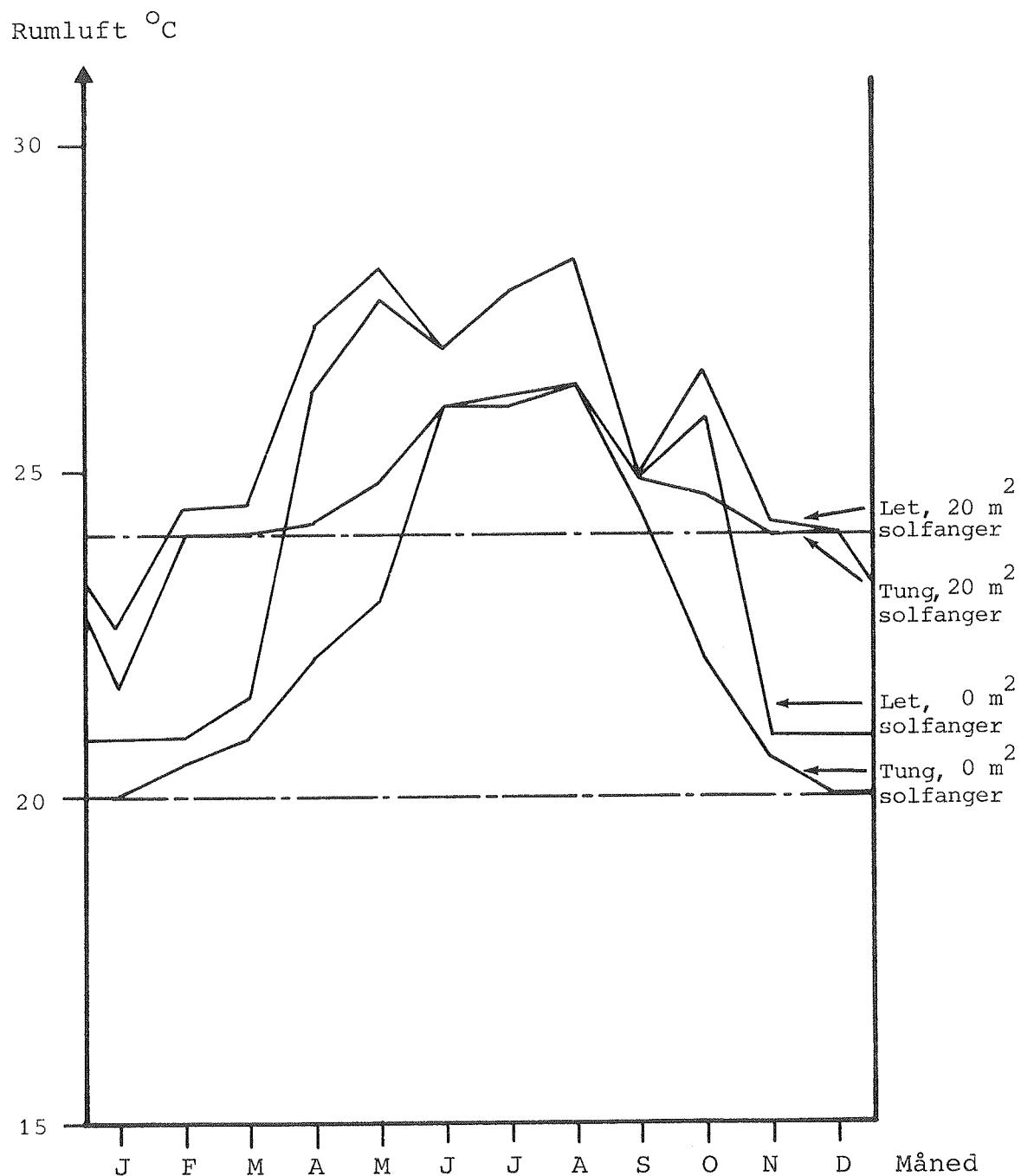
Sammenlignes de to styringsgrænser ses, at den termiske komfort øges væsentligt ved at anvende 24°C som grænseværdi fremfor 26°C. Endvidere er i det forrige vist, at reduktionen af udbyttet er beskeden ved at anvende en grænse på 24°C fremfor en grænse på 26°C.

#### 2.2.3 Passiv varmeafgivelse fra lageret

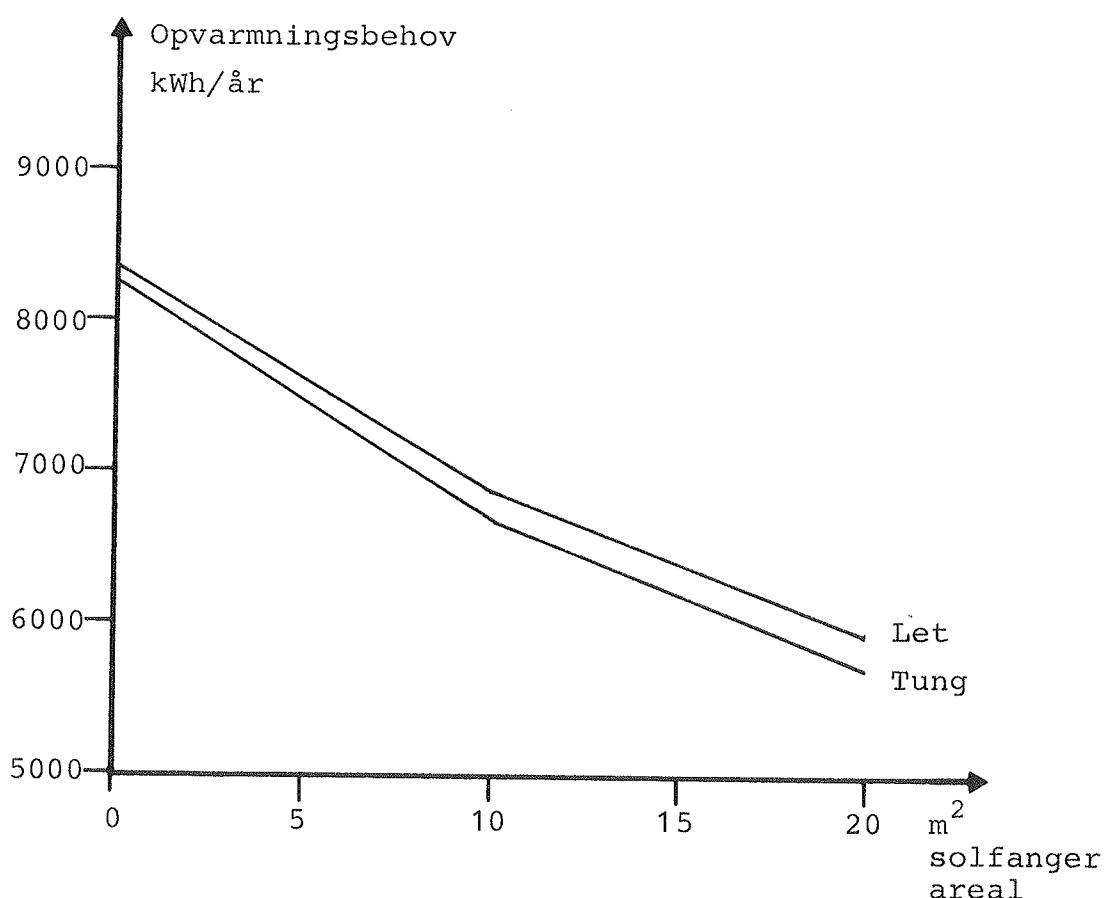
I dette afsnit er anvendt systemløsninger, hvor opladningen af lageret er aktiv, mens varmeafgivelsen fra lageret sker udelukkende passivt ved konvektion og stråling fra lagerets overflade. Styringsmuligheden findes således hovedsagelig kun i tilførslen af varme til lageret. Resultater fra beregninger af dette system er udført med varierende solfangerareal, varmeakkumuleringsevne af bygningen, lagervolumen og isolering af lageret.

På figur 2.8 er vist opvarmningsbehovet fundet ved beregning af et system med et uisolert stenmagasin som lager. Lagerets overfladeareal er sat til  $10 \text{ m}^2$  pr.  $\text{m}^3$  lager.

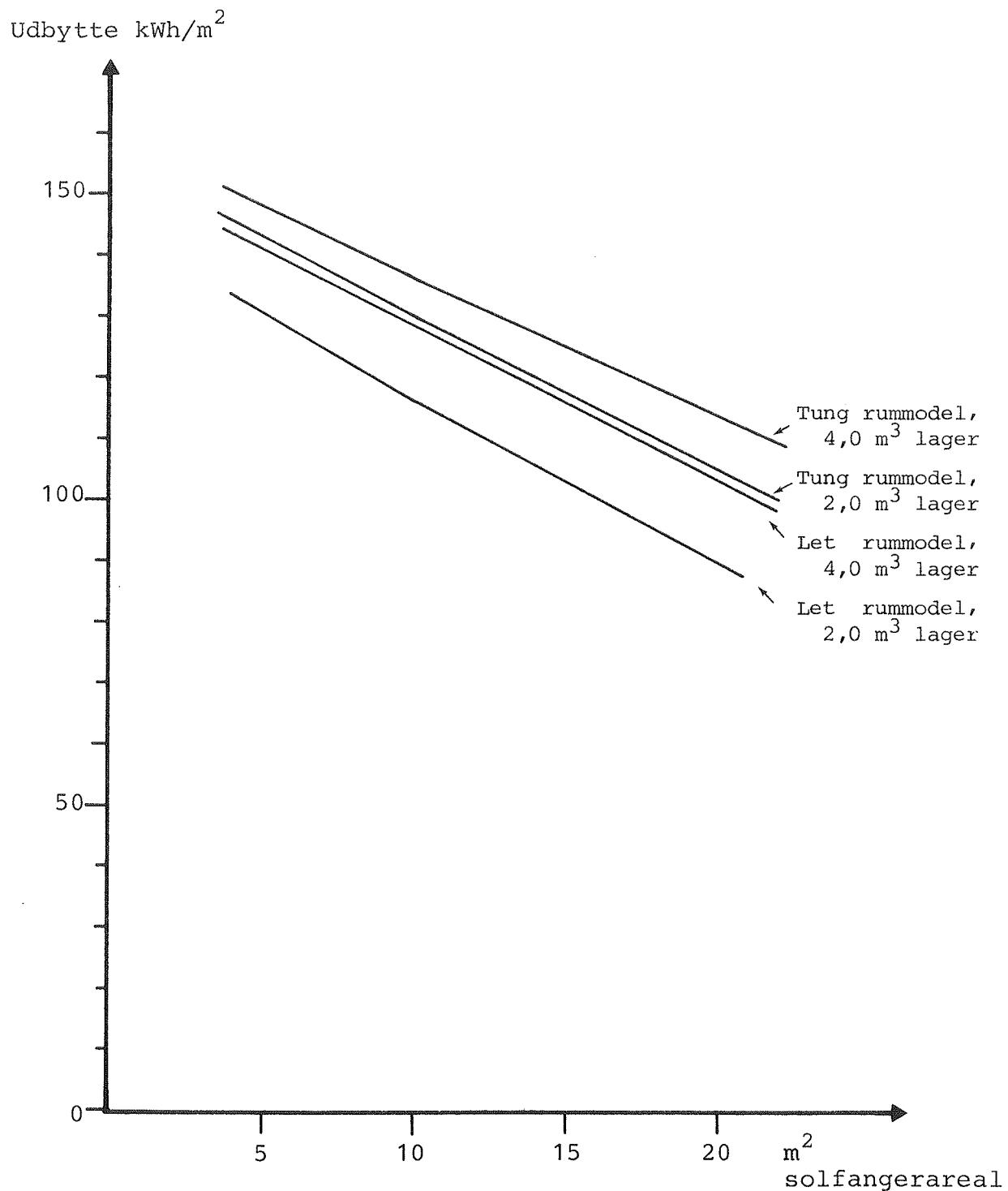
På grundlag af forskellen i opvarmningsbehovet mellem den aktuelle rummodel med solvarmesystem og reference-rummodellen med lager er udbyttet af solvarmesystemet beregnet. På figur 2.9 er udbyttet vist som funktion af solfangerarealet ved



Figur 2.7 90% fraktil af rumlufttemperaturen for de enkelte måneder uden og med indblæsning af varm luft fra  $20 \text{ m}^2$  solfanger. Kun indblæsning af varm luft ved lufttemperaturer på under  $24^{\circ}\text{C}$ . Over  $24^{\circ}\text{C}$  anvendes (beregningsmæssigt) forceret ventilation i perioden 1/6 - 30/9.



Figur 2.8 Opvarmningsbehovet i et parcelhus som funktion af solfangerareal og rummodel. Lageret har passiv varmeafgivelse.



Figur 2.9 Udbytte af solvarmeanlæg med passiv varmeafgivelse fra et uisoleret stenmagasin som funktion af solfangerareal, rummodel og lagerstørrelse.

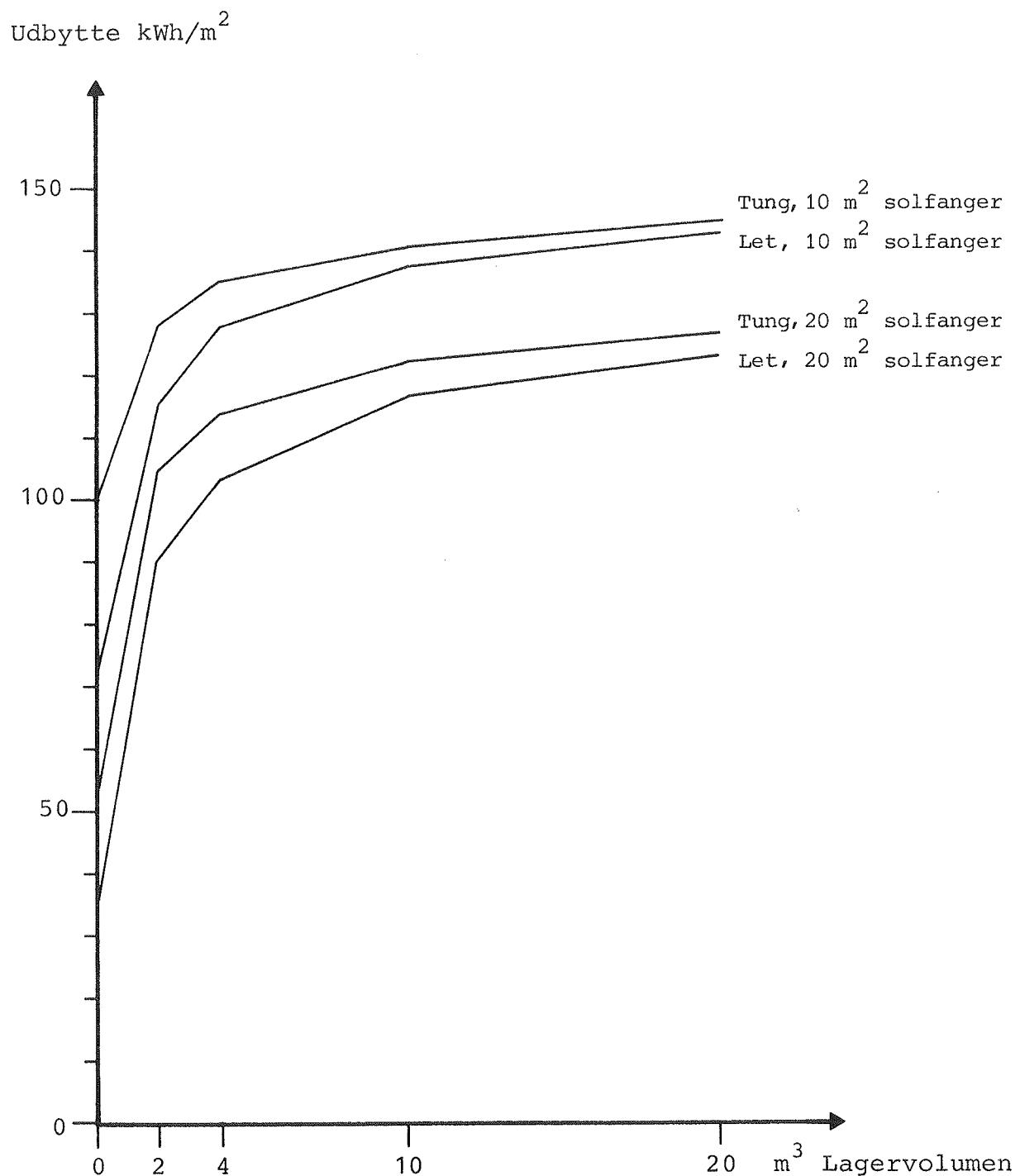
varierende type rummodel og lagerstørrelse. Af kurverne ses, at af de valgte parametre giver en tung rummodel,  $4 \text{ m}^3$  lager og et solfangerareal på  $5 \text{ m}^2$  det største udbytte, nemlig  $148 \text{ kWh/m}^2$ . Reduktion af lagervoluminet til det halve reducerer udbyttet med 3%. For den lette rummodel er reduktionen 7% ved at halvere lagervoluminet ved  $5 \text{ m}^2$  solfangerareal, mens reduktionen er 13% ved  $20 \text{ m}^2$  solfangerareal. Udbyttet af solfangeren bliver reduceret med mellem 5 og 14% ved at anlægget bliver placeret i en bygning med den lille varmeakkumuleringsevne fremfor i bygningsmodellen med stor varmeakkumuleringsevne.

Ændringen af udbyttet ved varierende lagervolumen er vist på figur 2.10. Det ses, at de første  $2 \text{ m}^3$  lager er de væsentligste, mens en øgning af lagervoluminet fra 10 til  $20 \text{ m}^3$  kun medfører en forøgelse af udbyttet på mellem 3 og 6%.

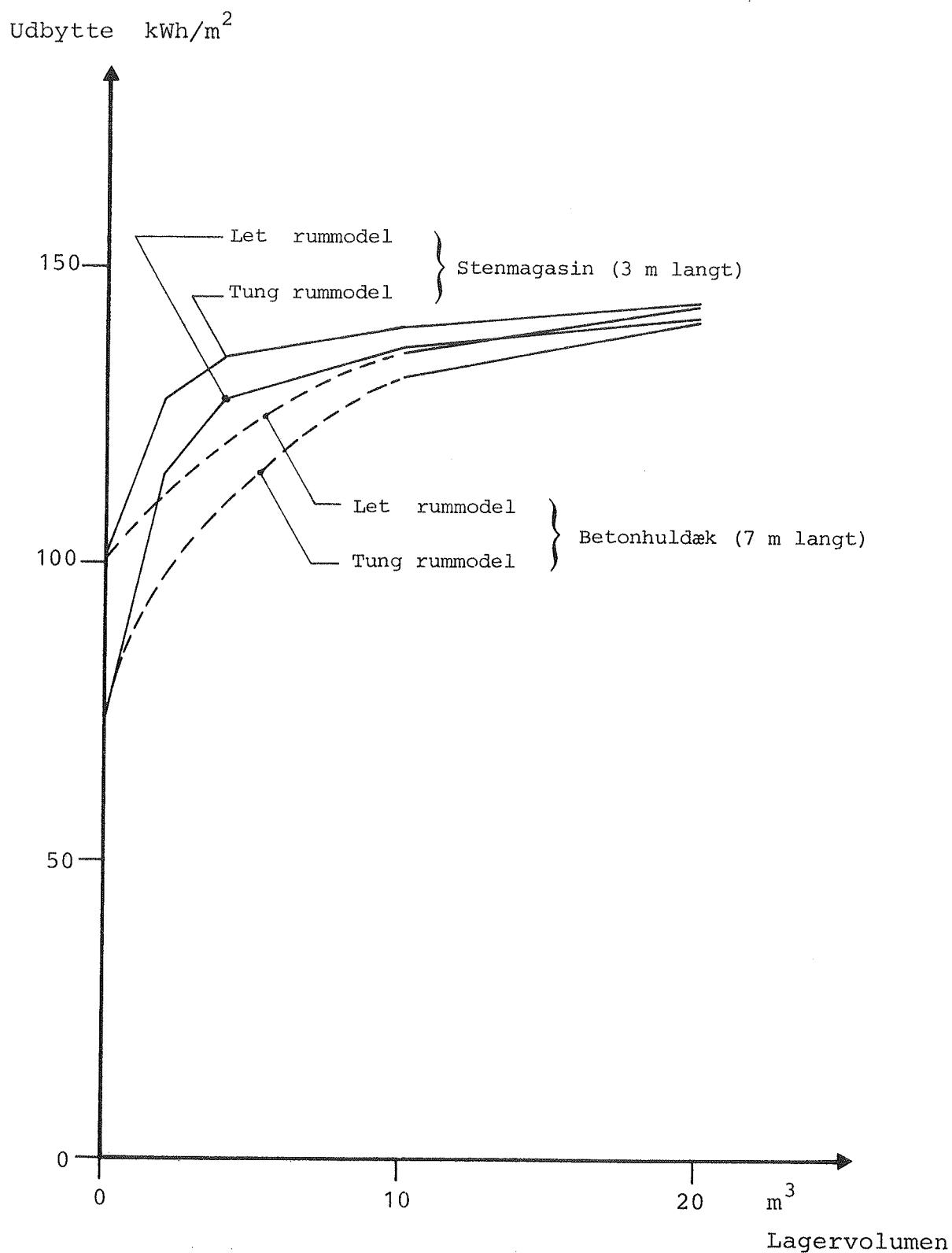
Hvis bygningens varmekapacitet er lille, opnås et større udbytte ved en forøgelse af lagervoluminet, end hvis bygningens varmekapacitet er lille.

Et alternativ til at anvende et stenmagasin er varmelagring i betonhuldæk. For at opnå en god varmeovergang til lageret er længden, luftstrømmen skal passere, øget fra 3 m ved stenmagasinet til 7 m ved betonhuldækket. På figur 2.11 er vist resultatet af beregning af udbyttet ved varierende lagervolumen for stenmagasin og betonhuldæk. For store lagervoluminer i forhold til solfangerarealet er der lille forskel på udbyttet ved sammenligning mellem de to systemer. Er lagerets volumen lille, formindskes udbyttet ved anvendelse af den valgte udformning af betonhuldækket.

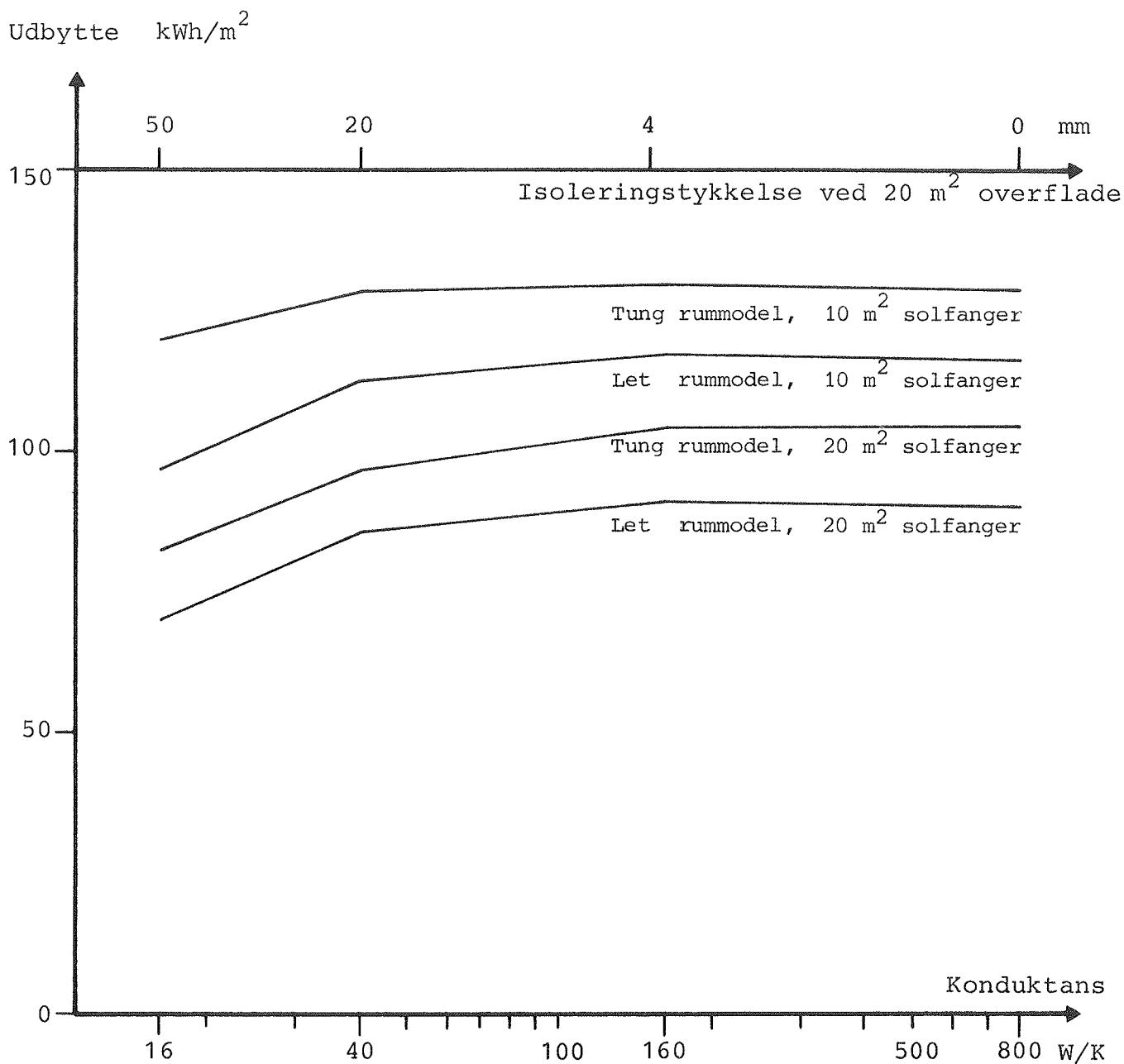
For at undersøge effekten af isolering på lageroverfladen er foretaget et antal beregninger af udbyttet med varierende konduktans mellem varmekapacitet i lager og lageroverflade, figur 2.12. Kurverne viser, at optimum ikke er en helt uisolert overflade, men derimod opnås en, ganske vist megen beskeden, forøgelse af udbyttet ved at reducere konduktansen fra  $800 \text{ W/K}$  til  $160 \text{ W/K}$ . Derimod reduceres udbyttet en del, hvis konduktansen reduceres yderligere. En konduktans på



Figur 2.10 Udbytte af solvarmeanlæg med passiv varmeafgivelse fra uisoleret stenmagasin som funktion af lagervolumen med varierende rummodel og solfangerareal.



Figur 2.11 Udbytte af solvarmeanlæg med passiv varmeafgivelse i afhængighed af lagervolumen med varierende lager-type og rummodel. Udstrækningen af lagrene i luftstrømmens retning er for stenmagasinet 3 m og for betonhuldækket 7 m. Solfangerareal 10 m<sup>2</sup>.



Figur 2.12 Udbytte af solvarmeanlæg med aktiv opladning og passiv afladning af stenmagasin. Udbyttet er beregnet med varierende akkumuleringsevne af rummet, solfangerareal og konduktans mellem varmekapacitet i lager og lageroverflade. Lagervolumen 2 m<sup>3</sup>. Lageroverfladeareal 20 m<sup>2</sup>.

160 W/K svarer til en isoleringstykke på 4 mm, hvis der anvendes mineraluld. Resultatet viser, at gulvbelægninger, tæpper m.v. ikke nedsætter udbyttet, men derimod er i stand til at forøge det i beskedent omfang.

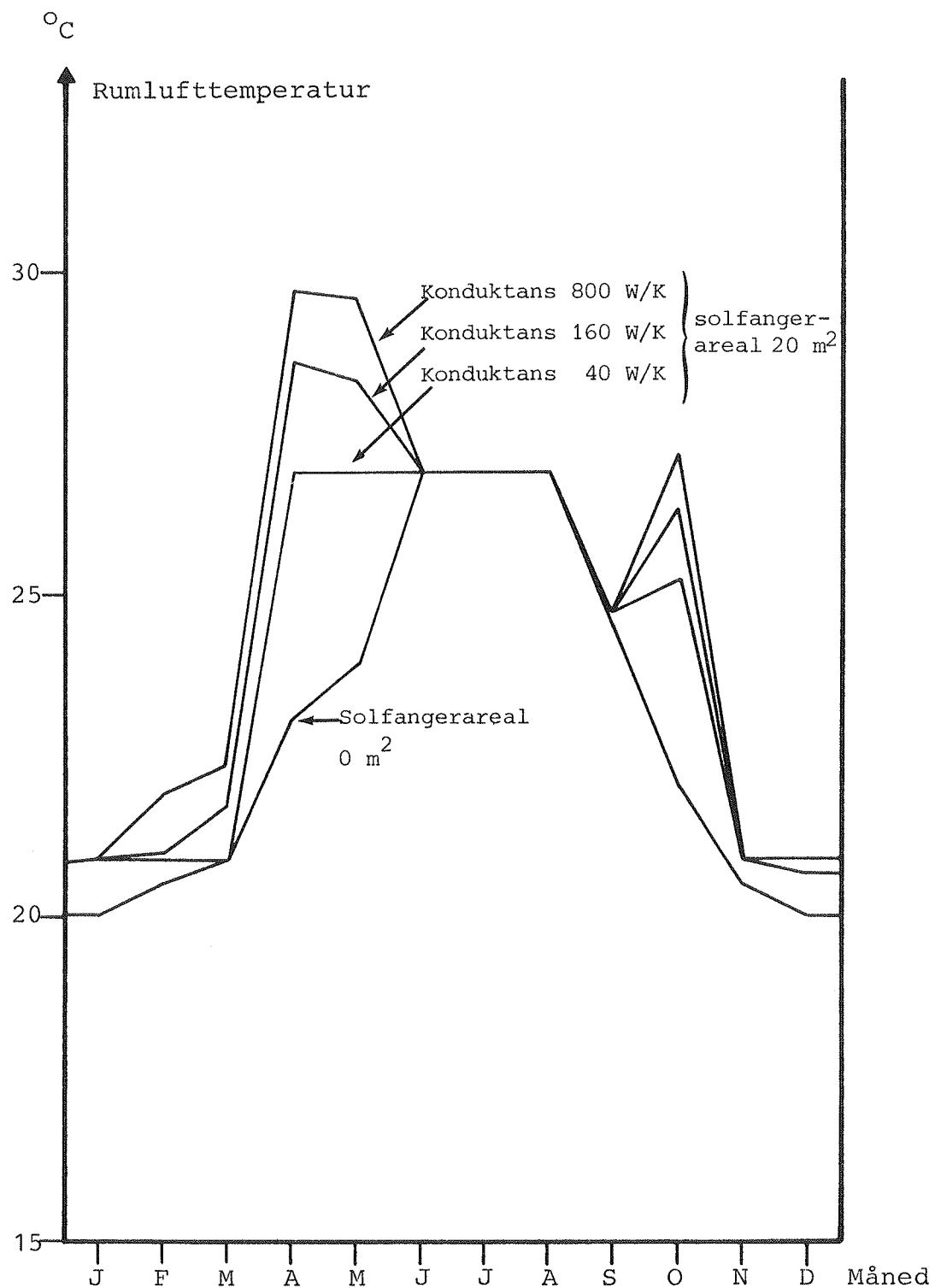
For at undersøge konsekvenserne ved at isolere lageret er 90% fraktilerne af rumlufttemperaturerne i hver måned vist i figur 2.13. Det ses, at isolering af lageret er i stand til i væsentligt omfang at reducere de høje rumlufttemperaturer, der kan forekomme i månederne april og maj. Det skal bemærkes, at der ikke beregningsmæssigt er anvendt forceret ventilation i disse to måneder. Normalt vil beboere åbne vinduerne for at reducere rumlufttemperaturen.

Sammenfattende ses, at der både opnås bedre temperaturforhold og et større udbytte ved at anvende en vis begrænset isoleringstykke uden på lageret. Alternativt kan forholdet mellem lagerets overfladeareal og volumen reduceres for at begrænse varmeafgivelsen.

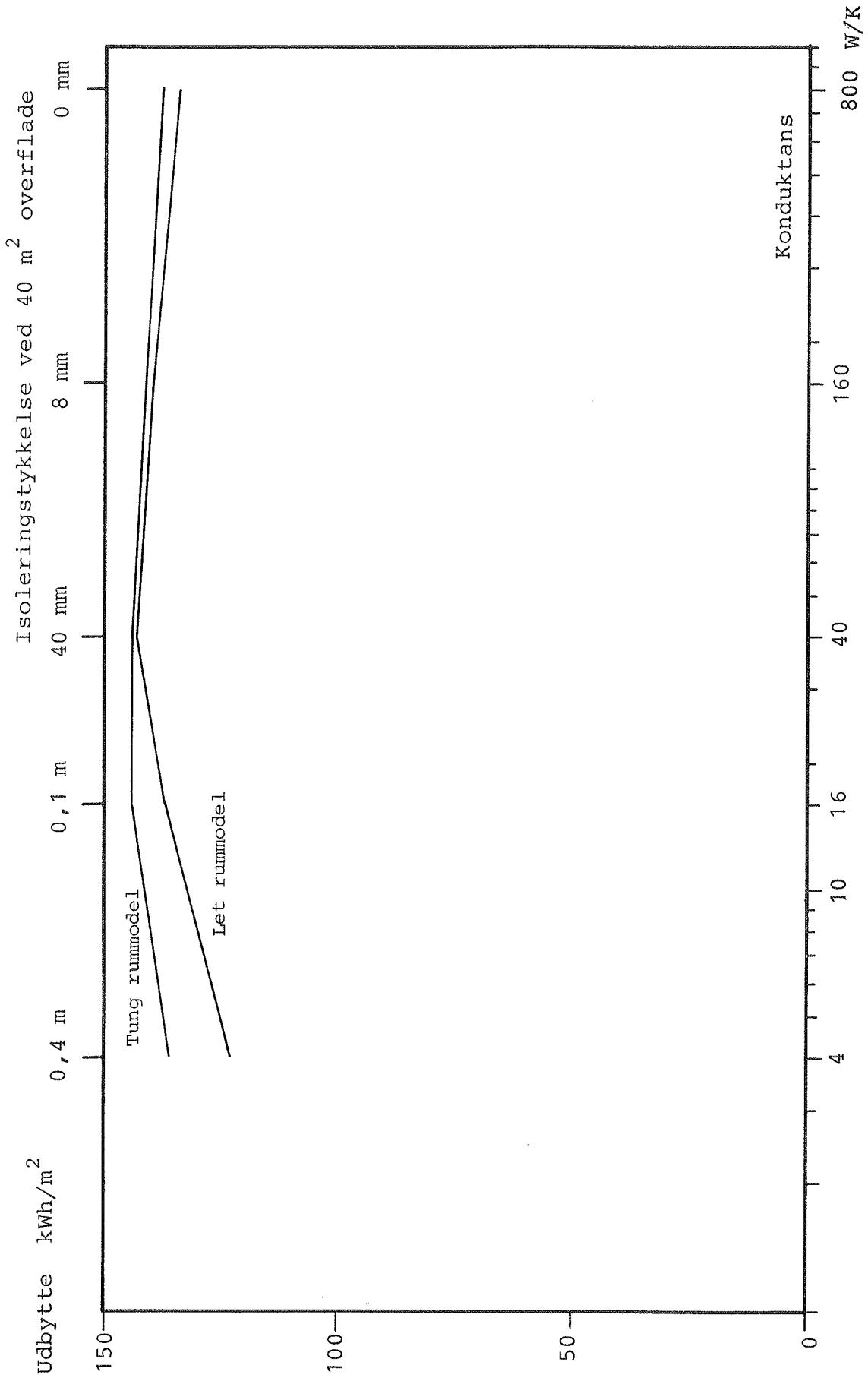
#### 2.2.4 Aktiv og passiv varmeafgivelse fra lageret

I dette afsnit er undersøgt tilfælde, hvor der er mulighed for både en aktiv og en passiv varmeafgivelse fra varmelageret. Dette muliggør en isolering af lageret således, at rumlufttemperaturerne lettere kan reguleres. Endvidere vil det principielt være muligt at øge udbyttet fra solvarmesystemet ved at have mulighed for styring af varmeafgivelsen.

Resultatet fra en beregning af udbyttet som funktion af konduktansen for et solvarmesystem, benyttet i en let og en tung rummodel, er vist i figur 2.14. Kurverne viser, at der findes en optimal isoleringstykke. For den tunge rummodel er optimum mellem 40 og 100 mm mineraluld, mens optimum for den lette rummodel er ca. 40 mm. Årsagen til en optimal tykkelse kan forklares med, at lageret for det første ikke benyttes til brugsvandsopvarmning. Kravet til høje temperaturer i lageret er derfor mindre, end når det udelukkende benyttes til rumopvarmning. For det andet er varmeovergangen mellem



Figur 2.13 90% fraktile af rumlufttemperaturer for de enkelte måneder for rummodel med solvarmeanlæg med varierende konduktans mellem varmekapacitet og lageroverflade samt for referencerummodel. Forudsætninger: Tung rummodel, 2,0 m<sup>3</sup> lager, 20 m<sup>2</sup> lageroverfladeareal. I perioden 1/6 - 30/9 anvendes (beregningsmæssigt) forceret ventilation.



Figur 2.14 Udbyttet af solvarmeanlæg med både aktiv og passiv varmeafgivelse fra stenmagasin i afhængighed af varierende konduktans mellem varmelagerkapacitet og lageroverflade. Solfangerareal 10 m<sup>2</sup>, lagervolumen 4 m<sup>3</sup>, overfladeareal 40 m<sup>2</sup>.

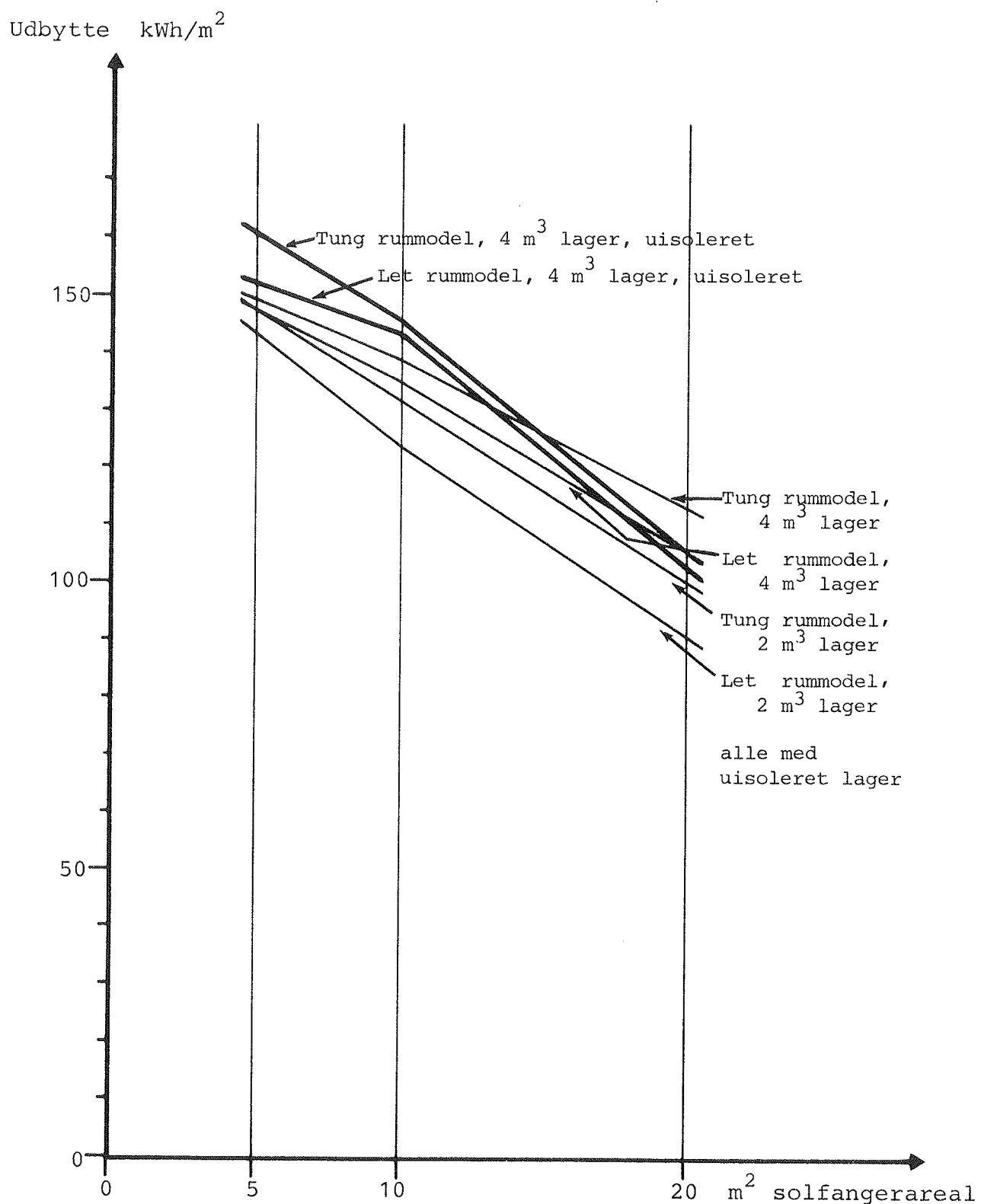
lager og rumluft ved tvungen konvektion begrænset, især ved små temperaturforskelle. Derved vil der på visse tidspunkter blive afgivet mindre varme fra velisolerede lagre end fra lagre, der kun er isoleret i begrænset omfang. En mindre varmeafgivelse medfører højere temperaturer af lageret og dermed en lavere gennemsnitseffektivitet af solfangeren.

Årsagen til, at der i den tunge rummodel er optimum ved en større isoleringstykkelse end i den lette rummodel kan forklares med, at lageret har en varmeakkumulerende effekt med hensyn til solindfald gennem vinduer, og at denne effekt går tabt ved at isolere lageret.

Et andet forhold, der er værd at bemærke, er, at merudbyttet ved at isolere lageret er ret beskedent. Anvendelse af 40 mm isolering på et  $40 \text{ m}^2$  stort areal øger udbyttet med 6%.

Udbyttet som funktion af solfangerarealet er vist (figur 2.15) med varierende rummodel, lagerstørrelse og isolering af lageret. Af kurverne for et lagervolumen på  $4 \text{ m}^3$  ses, at kurven for et isoleret og et uisoleret lager krydser hinanden. Dette indikerer, at optimale konduktans mellem varmekapacitet i lager og lageroverflade er meget afhængig af solfangerarealet og lagervolumen. Ønskes den optimale isoleringstykkelse for en given kombination af lagerstørrelse og solfangerareal er det nødvendigt at optimere i det enkelte tilfælde.

For små solfangerarealer er en stor isoleringstykkelse det optimale. En forklaring på dette kan være, at den opsamlede mængde solvarme er beskeden, og at det er bedst at denne varmemængde afgives netop, når der er brug for den. Ved store solfangerarealer er det optimale, ud fra hensynet til udbyttet, at lageret er uisoleret. En forklaring på dette kan være, at når den opsamlede mængde solvarme er relativt stor i forhold til varmebehovet, er det en fordel at kunne benytte hele bygningens varmekapacitet bedst muligt. Dette støttes af, at forskellen i udbytte mellem solvarmeanlægget med det isolerede lager og det uisolerede lager ved  $20 \text{ m}^2$  solfangerareal, er større ved den tunge rummodel end ved den lette rummodel.



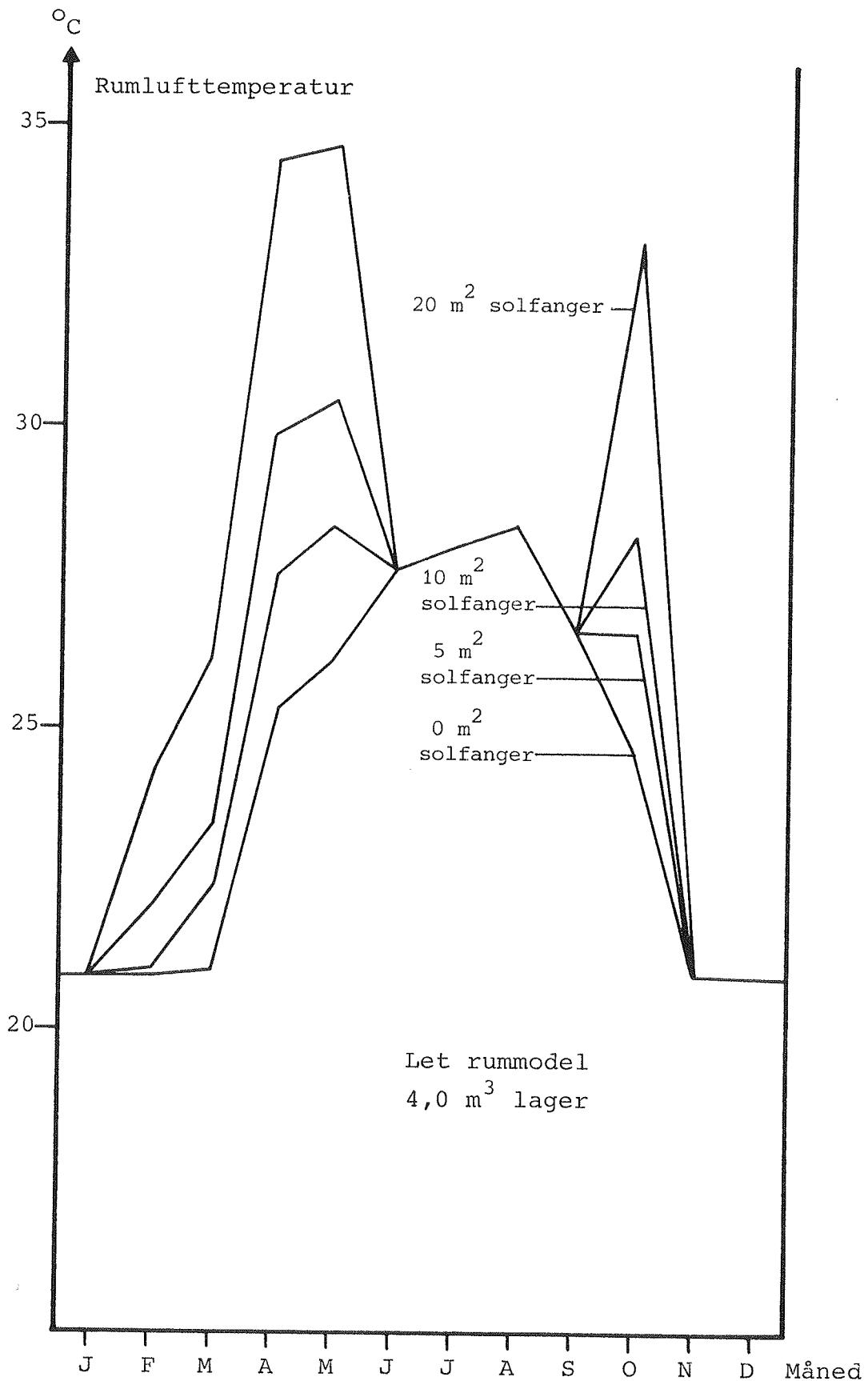
Figur 2.15 Udbytte af solvarmeanlæg som funktion af solfanger-arealet med varierende rummodel, lagervolumen og isolans af lageret. Det isolerede lager har et overfladeareal på 40 m<sup>2</sup> og en konduktans mellem varmekapacitet og lageroverflade på 40 W/K.

Det er dog væsentligt ikke at udelukkende vurdere systemerne på grundlag af udbyttet. Temperaturforholdene er også en vigtig faktor. På figur 2.16 og figur 2.17 ses 90% fraktilerne af rumlufttemperaturer for de enkelte måneder ved anvendelse af solvarmeanlægget i en let og tung rummodel. Lageret er uisoleret.

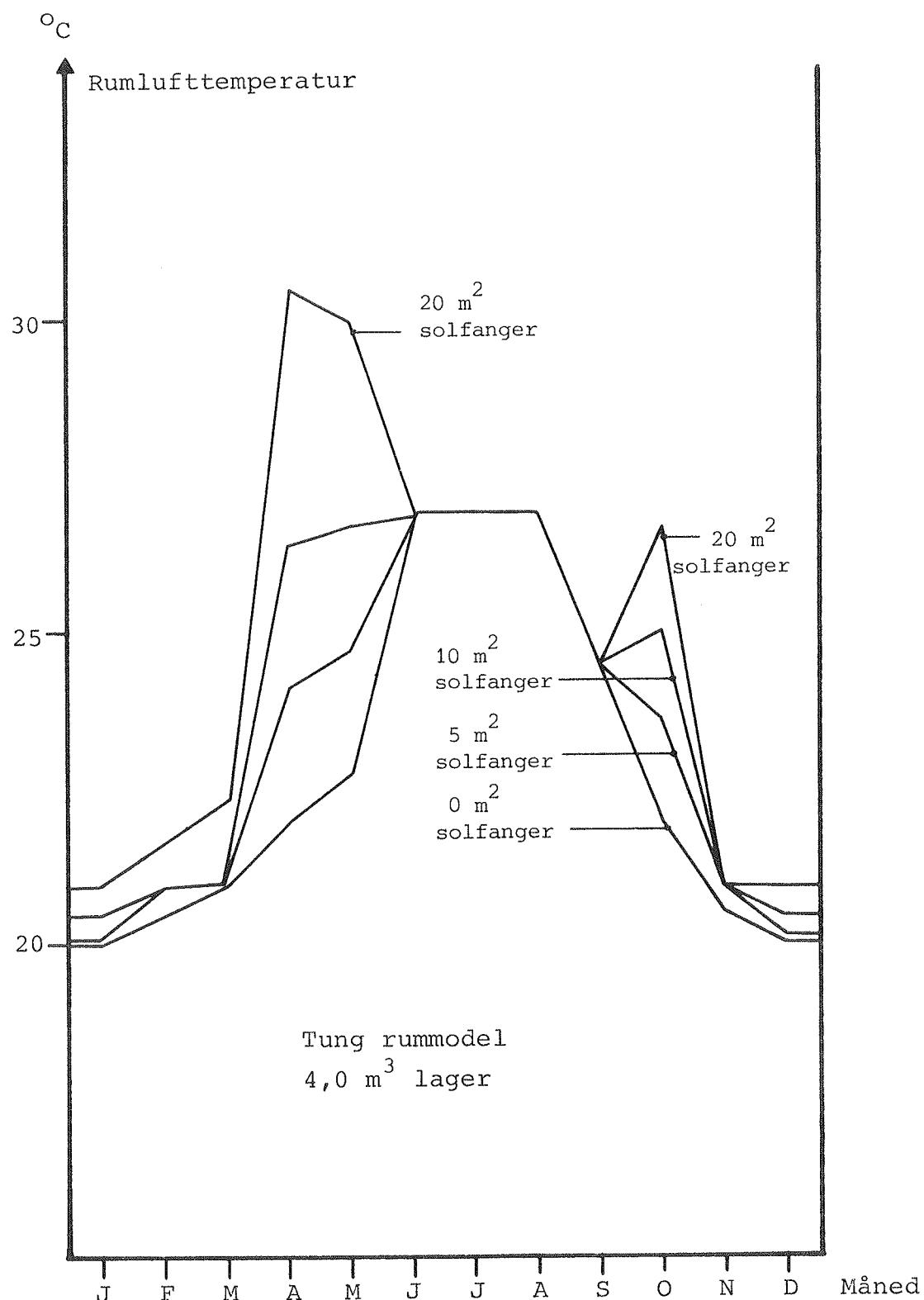
Det ses, at den lette rummodel giver uacceptable høje temperaturer i månederne april og maj, selv for kun  $5 \text{ m}^2$  solfanger. Ved den tunge rummodel kan et  $5 \text{ m}^2$  solfangerareal accepteres, mens  $10 \text{ m}^2$  solfangerareal i månederne april og maj er på grænsen af det acceptable.

Af figurerne ses tydeligt de større rumlufttemperaturer, der forekommer i de lette rummodeller i forhold til de tunge. For tilfældet med en tung rummodel,  $10 \text{ m}^2$  solfangerareal og  $4 \text{ m}^3$  lager, er 90% fraktiler optegnet med varierende konduktans (figur 2.18). Kurverne viser, at der ikke kan ventes særlige problemer med høje rumlufttemperaturer, selv i tilfælde med et uisoleret lager. Ved den udbyttemæssigt set optimale konduktans ( $4 \text{ W/K}$ ) er temperaturniveauet yderligere sænket.

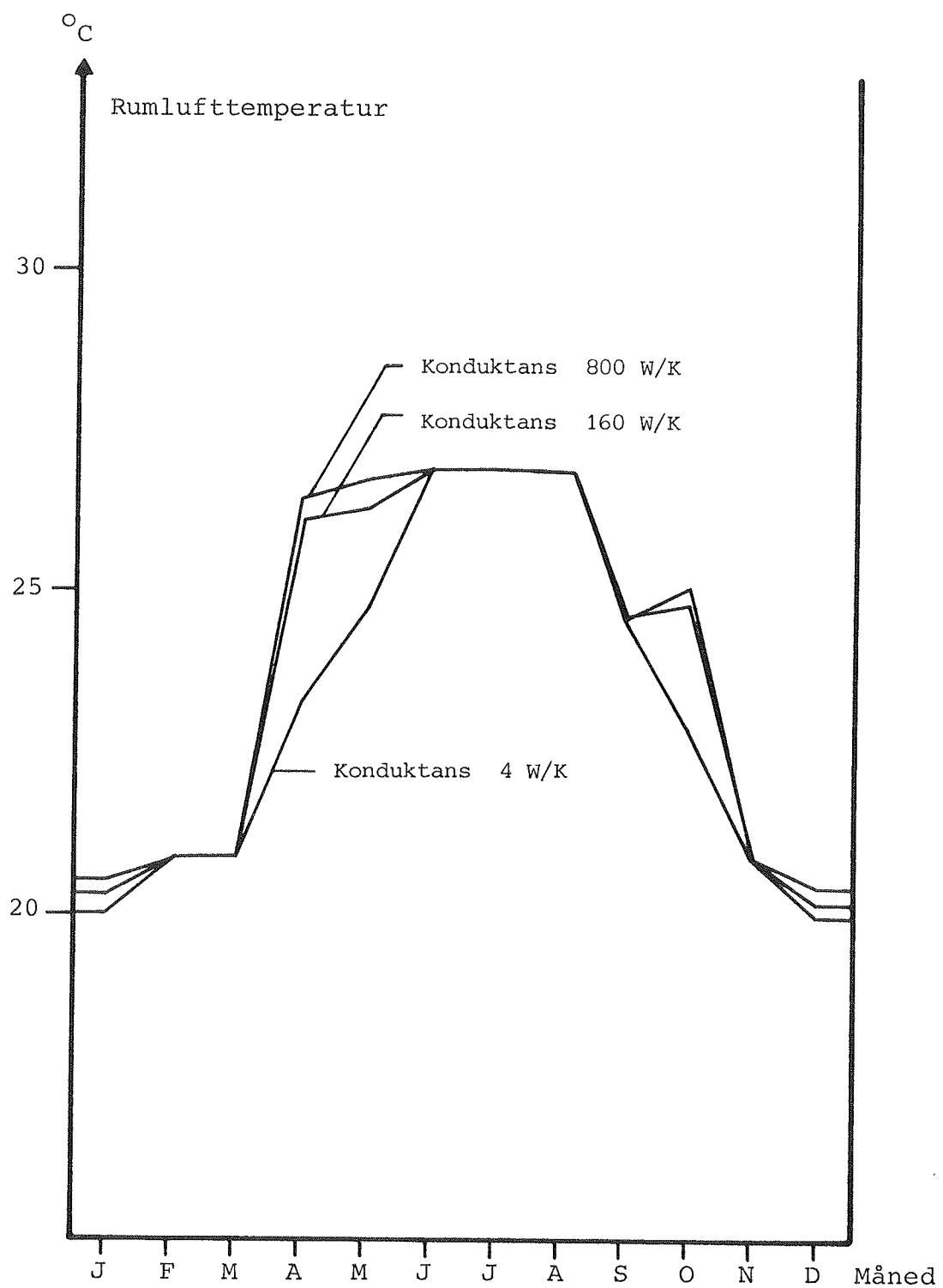
Resultaterne fra dette afsnit viser, at det er nødvendigt at vurdere udbyttet og temperaturforholdene ved valg af systemstørrelse. Der gælder som regel, at jo større udbyttet er (eller rettere udnyttelsesgraden af den opsamlede solvarme), jo bedre bliver temperaturforholdene. Denne sammenhæng kan forklares med, at jo lavere rumlufttemperaturen kan holdes, desto mindre mængde tilført solvarme går tabt. Sammenhængen gælder dog ikke, når det er varmeovergangen mellem solfanger og rum (eventuelt via lageret) der varieres.



Figur 2.16 90% fraktil af rumlufttemperaturer for de enkelte måneder for en rummodel med solvarmeanlæg med varierende solfangerareal. Forudsætninger: Let rummodel, 4,0 m<sup>3</sup> lager. I perioden 1/6 - 30/9 anvendes (beregningsmæssig) forceret ventilation.



Figur 2.17 90% fraktil af rumlufttemperaturer fra de enkelte måneder for en rummodel med solvarmeanlæg med varierende solfangerareal. Forudsætninger: Tung rummodel 4,0 m<sup>3</sup> lager. I perioden 1/6 - 30/9 anvendes (beregningsmæssig) forceret ventilation.



Figur 2.18 90% fraktil af rumlufttemperaturer for de enkelte måneder for en rummodel med solvarmeanlæg med varierende konduktans mellem varmekapaciteten i lager og lageroverflade. Forudsætninger: Tung rummodel, 10 m<sup>2</sup> solfangerareal, 4 m<sup>3</sup> lager, 40 m<sup>2</sup> lageroverfladeareal. I perioden 1/6 - 30/9 anvendes (beregningsmæssig) forceret ventilation.

### 3. PROJEKTERING AF LAGERET

I det følgende er angivet en række forhold, der har betydning ved projektering af lagre integreret i bygningskroppen. Først beskrives en række projekteringshensyn vedrørende lagre af stenmagasiner og betonhuldæk, termisk komfort og endelig en række mere generelle forhold.

#### 3.1 Stenmagasin

Stenmagasiner er som vist i afsnit 1 ofte anvendt som varmelagre i forbindelse med solopvarmet luft. Et stenlager vil normalt blive projekteret ud fra hensynet til varmelagringskapacitet, tryktab og varmeovergang mellem luft og sten.

For stenmagasiner kan sammenhængen mellem længde af stenmagasin, tryktab, diameter af sten samt fiktiv hastighed (volumenstrøm divideret med stenmagasinets tværnitsareal) ses på figur 3.1. For at mindske tryktabene er det vigtigt at undgå små diametre af sten og at undgå store fiktive hastigheder.

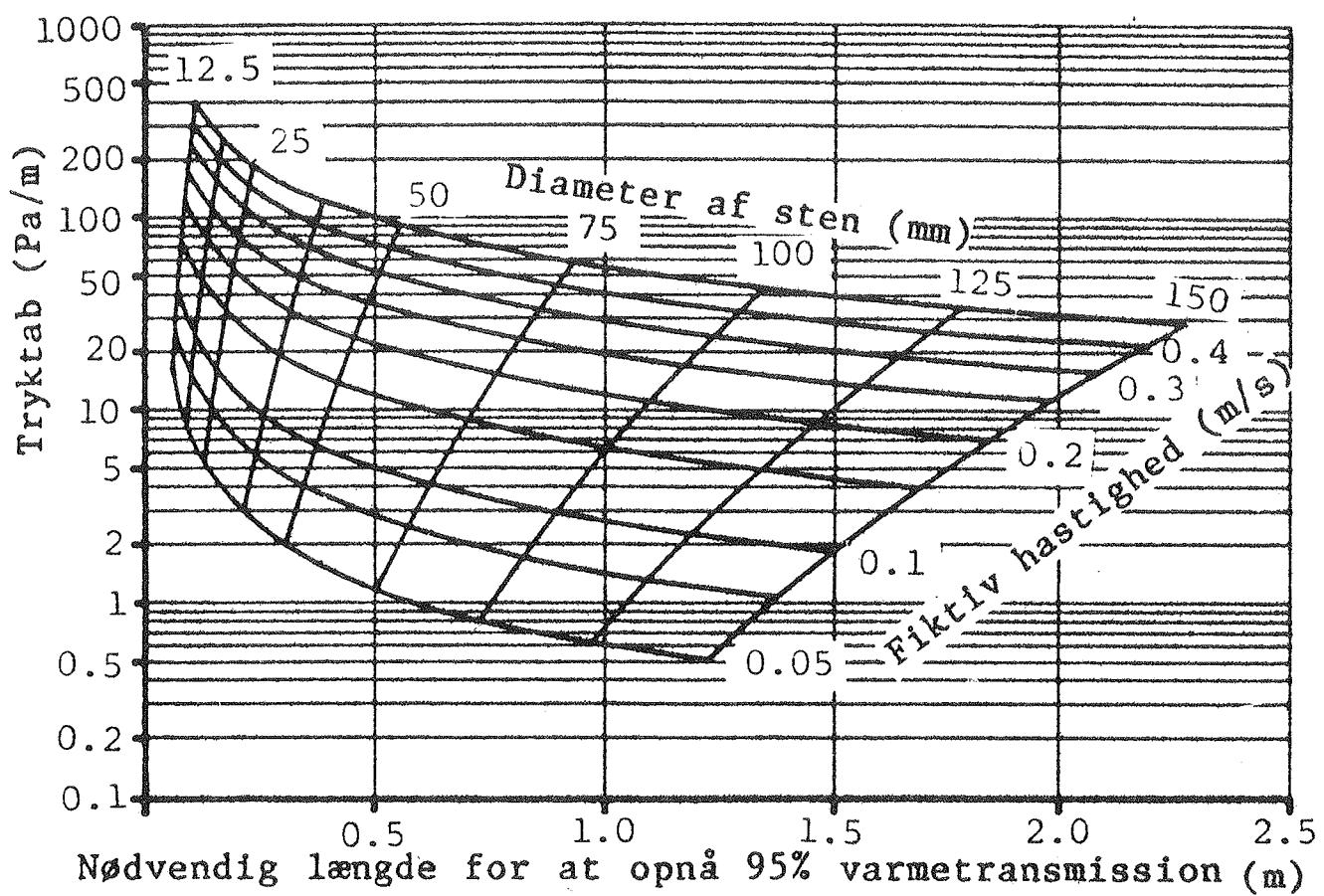
Figuren viser den nødvendige længde af stenmagasinet for at få afgivet 95% af den tilførte lufts varmeindhold. For de ofte anvendte stendiametre fra 30-50 mm skal der kun en længde af stenmagasinet på 0,2-0,5 m for at få afgivet 95% af luftens varmeindhold til varmelageret.

For at begrænse tryktabet vil stenlageret ofte blive udformet med ret små dimensioner i luftstrømmens retning (f.eks. 3 m). Dette kan medføre et ret kompliceret arrangement med manifolder, som vist i afsnit 1. (f.eks. figur 1.3).

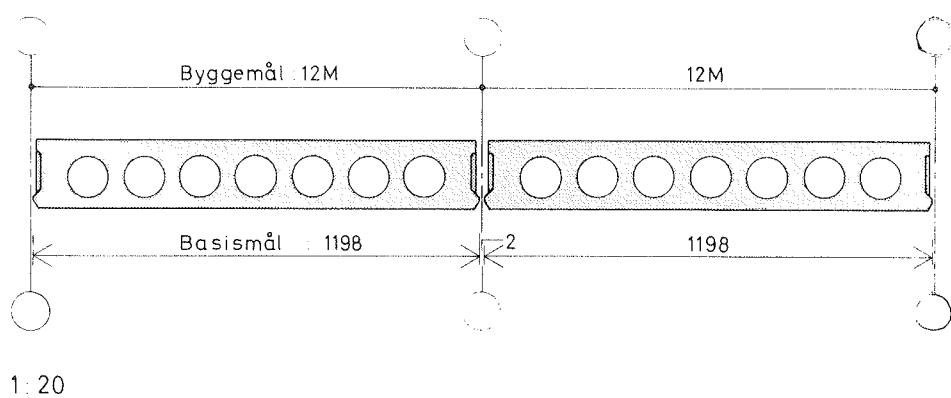
#### 3.2 Kanaler i betonhuldæk

For at kunne sammenligne varmelagring i betonhuldæk med stenmagasiner beregnes varmeovergangen mellem luft og indvendig kanaloverflade.

Som udgangspunkt benyttes et standard betondækelement med en tykkelse på 0,185 m og en kanaldiameter ( $d_i$ ) på 0,10 m, (figur 3.2). For tvungen laminar strømning kan varmeoverførings-



Figur 3.1 Kurver, der viser ydeevne af stenmagasin (ved havniveau). [18].



Figur 3.2 Lodret snit i betonhulldæk. [19].

koefficienten  $\alpha$  bestemmes ved hjælp af følgende formel: [13]

$$N_u = \left[ 3,65 + \frac{0,0688 \left( \frac{R_e \cdot P_r \cdot d_i}{l} \right)}{1 + 0,045 \left( \frac{R_e \cdot P_r \cdot d_i}{l} \right)^{\frac{2}{3}}} \right] \left( \frac{\eta_s}{\eta_v} \right)^{0,14} = \frac{\alpha_i \cdot d_i}{\lambda}$$

$d_i$  = rørdiameter, m

$l$  = rørlængde, m

$N_u, R_e, P_r$  = modeltal (Nusselt, Reynold, Prandtl)

$\eta_s$  og  $\eta_v$  = den dynamiske viskositet ved henholdsvis væskens  
og rørvæggens temperatur

$\lambda$  = varmeledningsevnen, W/m K

For tvungen turbulent strømning i rør gælder formlen: [13]

$$N_u = 0,116 \left( R_e^{\frac{2}{3}} - 125 \right) P_r^{\frac{1}{3}} \left[ 1 + \left( \frac{d_i}{l} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \left( \frac{\eta_s}{\eta_v} \right)^{0,14}$$

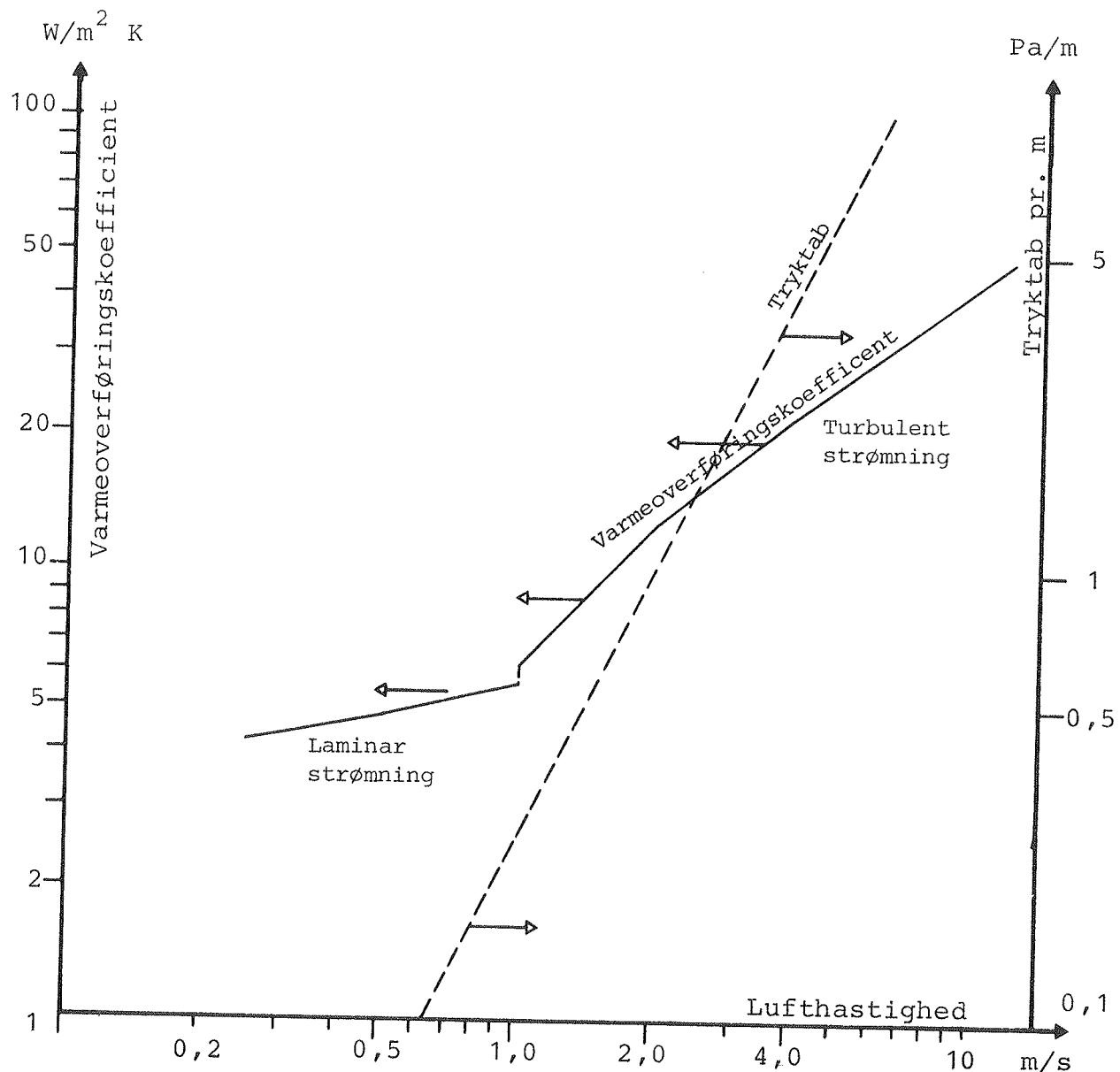
Indsættes verdien for luft med  $20^\circ C$ , kan Reynoldtallet ( $R_e$ ) bestemmes ved forskellige lufthastigheder ( $v$ ).

$v$	0,5	1,0	2,0	4,0	m/s
$R_e$	3300	6600	13200	26400	-

Tabel 3.1 Reynoldtallet for betonkanal med diameter 100 mm ved  $20^\circ C$  og varierende lufthastighed.

Er  $R_e > 8000$ , er strømningen altid turbulent. I området  $2320 < R_e < 8000$  kan strømningen ofte betragtes som laminar, hvis strømningen er faldet til ro og rørindløbet er afrundet.

På figur 3.3 er varmeoverføringskoefficienten vist for forskellige hastigheder. Ligeledes er tryktabet ved luftstrømning i betonkanaler vist. I appendix A er vist, hvorledes den nødvendige længde til opnåelse af en bestemt varmeafgivelse



Figur 3.3 Varmeoverføringskoefficient og tryktab for kanaler i beton med en diameter på 100 mm. Temperatur  $20^\circ\text{C}$ .

fra det varmetransporterende medie kan bestemmes. Antages at der er en konstant afstand på 150 mm mellem kanalerne, kan det relative hulrums areal beregnes til 28%. Den fiktive lufthastighed kan derved, i dette tilfælde, sættes til  $v_{fikt} = 0,28 v$ . Den nødvendige længde  $L_{95\%}$  og  $L_{80\%}$  for at få afgivet 95% og 80% af varmen fra luften kan dermed beregnes:

$v$	$v_{fikt}$	$\alpha_i$	$L_{95\%}$	$L_{80\%}$	$\Delta P$
m/s	m/s	$W/m^2 K$	m	m	Pa/m
0,5	0,14	4,8	9,5	5,1	0,1
1,0	0,28	6,0	15,1	8,1	0,26
2,0	0,56	12,4	14,6	7,8	1,0
4,0	1,12	21,8	16,6	8,9	4,0

Tabel 3.2 Varmeovergang  $\alpha_i$  og tryktab  $\Delta P$  som funktion af lufthastigheden ved strømning af luft i en kanal i betonhul dæk med en diameter på 100 mm. Den længde der er nødvendig for at få overført henholdsvis 95% og 80% af varmen ( $L_{95\%}$  og  $L_{80\%}$ ). Fiktiv hastighed ved en dæktykkelse på 185 mm.

Sammenlignes tabellen med figur 3.1 ses, at for samme fiktive hastighed er tryktabet i kanalerne væsentlig mindre end i et stenmagasin. Til gengæld er det nødvendigt at have en meget større kanallængde for at få overført den samme varmemængde til lageret. Dette giver mulighed for en relativt simpel kanalføring ved anvendelse af kanalhul dæk sammenlignet med stenmagasiner, men til gengæld er varmetransmissionen til lageret mindre, hvilket medfører højere returtemperaturer til solfangeren og dermed en lavere solfangereffektivitet.

### 3.3 Komforthensyn

Ved beregningerne af forskellige systemudformninger (afsnit 2.2) er den termiske komfort vurderet på grundlag af rumlufttemperaturerne, men andre faktorer er også vigtige for at oprettholde acceptabelt termisk indeklima. En faktor, der er ligeså vigtig som rumlufttemperaturen, er middelstrålings-

temperaturen. Denne er udeover evt. solindfald afhængig af temperaturerne af de indvendige overflader i rummet. Da temperaturen igennem lageret varierer, lagerstørrelsen varierer og isoleringen af lageret varierer, har det ikke været muligt at inddrage middelstrålingstemperaturen direkte i beregningen af den termiske komfort.

Af hensyn til ubehag ved berøring bør overfladetemperaturer holdes inden for visse grænser. På grundlag af målinger har Olesen [20] fundet komfortintervaller for forskellige gulvmaterialer. Tallene er baseret på berøring med bare fødder, og at mindre end 10% forventes at være utilfredse ved eet minuts ophold.

Gulvtype	Komfortområde for gulvtemperaturer °C
5 mm korkparket på beton	17 - 31
Fyrretræsgulv	18 - 31
Natursten	27 - 32
5 mm mosaiksten på gasbeton	26 - 32
2,5 mm hård linoleum på trægulv	24 - 32
2,5 mm hård linoleum på beton	24 - 32

Tabel 3.3 Temperaturgrænser for forskellige gulvtyper ved bare fødder [20].

Ifølge ISO [21] forslag anbefales i opvarmningssæsonen, at gulvtemperaturerne skal ligge mellem 19°C og 26°C. Dog tillades op til 29°C ved anvendelse af gulvvarme. Disse temperaturer anbefales for at undgå ubehag, når der anvendes fodtøj; på mindre felter kan tillades en lidt højere temperatur. Anbringes varmeafgivere lodret, vil kravet vedrørende komfortinterval ved berøring ikke være så restriktivt.

På et lodret plan tillades en maksimal termisk strålingsasymmetri på 5 K, hvis det er et varmt loft, der giver anledning til asymmetrien. Er det gulvet eller væggene, der er

varme, tillades en væsentlig større termisk strålingsasymmetri. Varmeafgivere placeret lodret kan altså tillades at have væsentlig højere overfladetemperaturer end opvarmede gulve.

For at kunne vurdere forholdene vedrørende overfladetemperaturer af lageret er 90% fraktilerne af den varmeste trediedel af lageret vist på figur 3.4. Kurverne er optegnet ved varierende lagerstørrelse og med et solfangerareal på  $10 \text{ m}^2$ . For ikke at få for store problemer med uacceptabel termisk diskomfort skønnes, at varmelagrene med et volumen på  $10 \text{ m}^3$  og  $20 \text{ m}^3$  kan placeres i gulvet, mens varmelagrene på  $2 \text{ m}^3$  og  $4 \text{ m}^3$  nok bør placeres i vægge. En anden måde at reducere problemet med overfladetemperaturer på kan være anbringelse af tæpper de steder, hvor der opnås de højeste temperaturer. Dette vil ifølge afsnit 2.2 ikke reducere udbyttet.

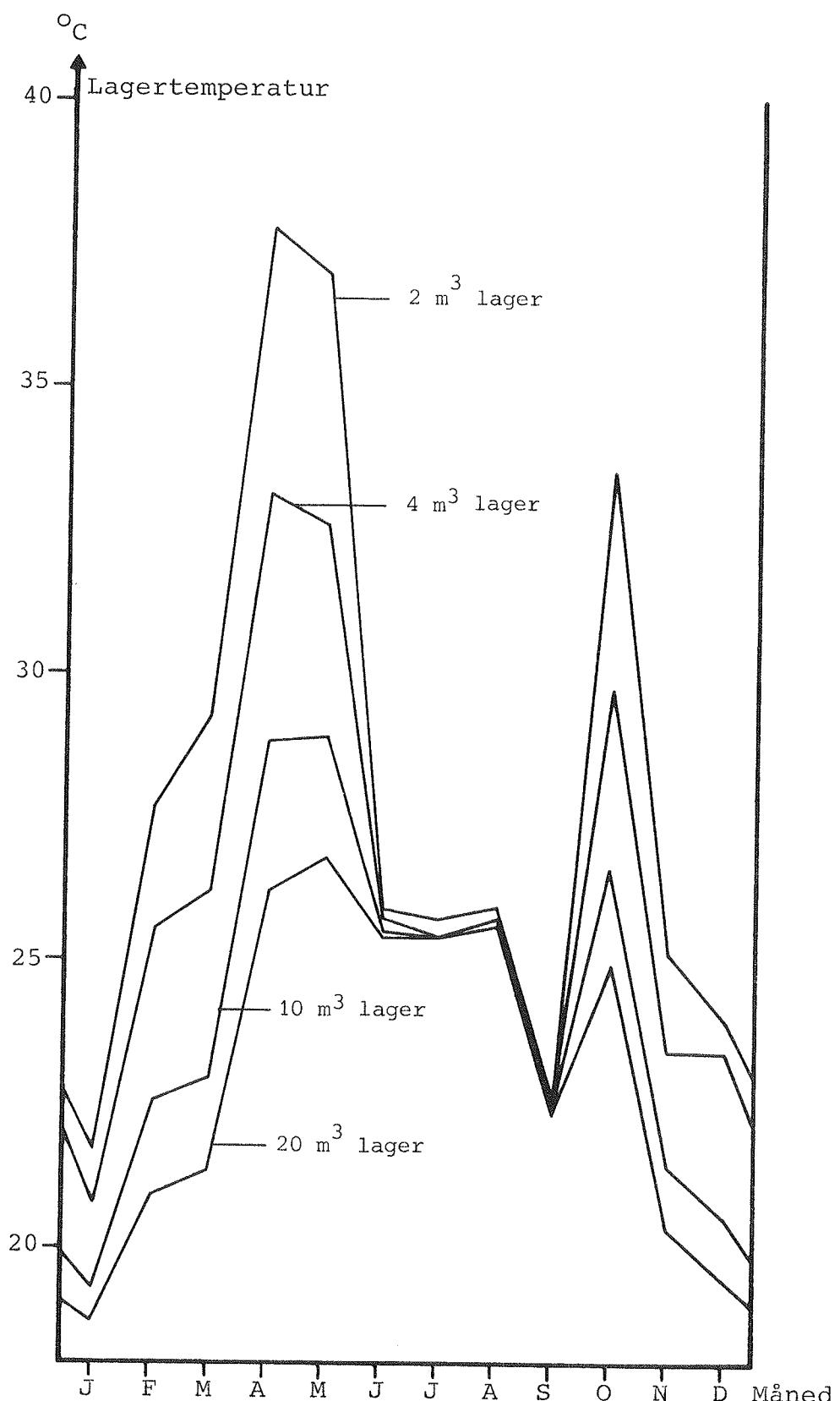
### 3.4 Systemudformning

Med udgangspunkt i de udførte beregninger og de udenlandske erfaringer vil der her blive givet nogle retningslinier for projektering af luftbaserede solvarmesystemer med bygningsintegriterede varmelagre.

Et vigtigt spørgsmål er størrelsen af solfangeren. Ud fra hensyn til dækningsgraden bør solfangerarealet være størst muligt, men af hensyn til udbyttet pr.  $\text{m}^2$ , og dermed økonomien, bør der ikke vælges for stor en solfanger. Samtidig vil der ved store solfangerarealer og med lageret koblet direkte til rummet (ingen isolering) være problemer med styring af temperaturerne.

Solfangeren bør have en god effektivitet for at kunne udnytte mest muligt diffust solindfald om vinteren.

Kanalføringen mellem solfanger og lager bør være kort af hensyn til pris og tryktab. Kanalerne bør i videst muligt omfang føres inden for klimaskærmen af hensyn til varmetabet. En stor isoleringstykkelse er nødvendig, hvis kanalerne føres uden for klimaskærmen, eller hvis luft cirkuleres med henblik på brugsvandsopvarmning. Lageret bør lukkes med tætte spjæld



Figur 3.4 90% fraktil af lagertemperatur for de enkelte måneder. Forudsætninger: Solvarmeanlæg med 10 m<sup>2</sup> solfanger, uisoleret stenmagasin, kun passiv varmeafgivelse.

for at undgå selvcirkulation til solfangeren i perioder, hvor der ikke opsamles solvarme.

Et andet problem er tætheden af samlinger og tætheden af lagermaterialet; hvis det f.eks. er af mursten, kan det være vanskeligt at opnå tilstrækkelig tæthed af fugerne mellem stenene.

Varmelagerets størrelse bør vælges ud fra en række forhold:

1. Udbytte af solfanger
2. Hensyn til temperaturforhold
3. Pris
4. Placeringsmuligheder
5. Tryktab.

Ud fra hensynet til udbytte og temperaturforhold bør lageret være størst muligt, mens det ud fra hensynet til prisen og placeringsmulighederne ikke bør være for stort. Vælges et lille lager, bør der være en god varmeovergang mellem luft og lager. Hvis valget står mellem et stenmagasin fremfor laging i et kanalhuldæk, vil stenmagasinet ofte være det mest hensigtsmæssige. Er lageret derimod stort, er der kun en lille forskel i udbyttet mellem et stenmagasin og et kanalhuldæk. Af hensyn til tryktab og kanalføring vil det i dette tilfælde være fordelagtigt at benytte et kanalhuldæk. Vedrørende placeringen af et uisoleret lager vil det ud fra hensynet til overfladetemperaturer kun være muligt at benytte gulvet (etageadskillelser eller terrændæk) som lager, hvis lageret er tilstrækkeligt stort i forhold til solfangerareal. Er lageret lille, kan det kun placeres i gulvet, hvis det er isoleret, ellers er en placering i væggene at foretrække.

Lagerets længde i luftstrømmens retning er nedadtil begrænset af den varmeovergang, der er ønsket mellem luft og lager. Opadtil er længden bl.a. begrænset af de tryktab, der vil forekomme over lageret.



4.

#### KONKLUSION

I rapporten er undersøgt en række muligheder for anvendelse af bygningsintegrerede varmelagre i forbindelse med solvarmeanlæg.

Indblæsning af varm luft direkte til rummet, hvor kun bygningens varmeakkumuleringsevne udnyttes, ventes for de valgte rummodeller med  $10 \text{ m}^2$  solfanger at give udbytte til udelukkende rumopvarmning på mellem 50 og  $100 \text{ kWh/m}^2\text{år}$  med det største udbytte i den tunge rummodel.

Tilføres den solopvarmede luft i stedet et varmelager, hvor varmeafgivelsen udelukkende er passiv, stiger udbyttet til mellem 115 og  $135 \text{ kWh/m}^2\text{år}$ . Forskellen skyldes hovedsagelig variationer af varmelagerets størrelse, med det største udbytte ved det største varmelager. Ved dette system vil en begrænset isolering af lageret, f.eks. et tæppe, ikke ændre udbyttet af systemet. For små solfangerarealer (op til ca.  $10 \text{ m}^2$ ) vil det være muligt at udforme systemet således, at uacceptabelt høje temperaturforhold ikke forekommer.

Er der mulighed for at afgive varmen aktivt, kan udbyttet ved  $10 \text{ m}^2$  solfangerareal øges til ca.  $145 \text{ kWh/m}^2\text{år}$ , forudsat at lageret isoleres. For hver udformning eksisterer en optimal isoleringstykke. Er isoleringsevnen større end optimum, vil udbyttet altså blive reduceret.

Bygningen, hvori et uisoleret lager placeres, bør have en vis varmeakkumuleringsevne, ellers vil rumlufttemperaturen komme til at ligge for tæt på lagerets temperatur.

Ud over de i rapporten viste muligheder vil der, for at øge udbyttet, være mulighed for at udnytte varmelageret til forvarmning af ventilationsluften. Dette vil give mulighed for et større udbytte, da lagertemperaturer lavere end rumlufttemperaturen derved kan udnyttes. Lavere lagertemperaturer vil give en større solfangereffektivitet.

En anden oplagt mulighed med dette system vil være kombination med brugsvandsopvarmning. Dette kan ske ved hjælp af en

luft-til-vand varmeveksler og et by-pass spjæld således, at lageret ikke behøver at blive opvarmet i sommermånederne. En beregning viser, at udbyttet kan sættes til ca.  $120 \text{ kWh/m}^2\text{år}$ . for et  $10 \text{ m}^2$  anlæg i månederne maj til september. Antages at halvdelen af den solopvarmede mængde brugsvand kan opvarmes uden en reduktion af udbyttet til rumopvarmning, kan udbyttet til brugsvandsopvarmning sættes til i alt  $150 \text{ kWh/m}^2\text{år}$ . Kan et oliefyr med et tomgangstab på 350 W slukkes i perioder med en dækningsgrad af solvarmeanlægget på over 95%, kan udbyttet yderligere forøges med ca.  $140 \text{ kWh/m}^2\text{år}$ .

Sammenfattende kan konkluderes, at der findes gode muligheder for at udnytte varmelagre integreret i bygningskroppen i forbindelse med aktive solvarmeanlæg, idet udbyttet forøges, og komforten forbedres i forhold til udnyttelse af solindfald gennem vinduer.

På grundlag af ovenstående vurderes at det er ønskeligt at arbejde videre med de beskrevne systemtyper. For at kunne anvende systemerne i praksis, er det nødvendigt at udføre forsøg og demonstrationsprojekter til effervisning af den forventede ydeevne.

REFERENCELISTE

- [1] Anderson, L.O. et al. Storage of heat and coolth in hollow-core slabs. Swedish experience, and application to large, american-style buildings. October 1979. Lawrence Berkeley Laboratory, University of California. LBL-8913, EEB-79-1.
- [2] Strängbeton brochure.
- [3] Bernander, K.G. Use of the heat capacity of the concrete structure for saving energy and improving the room climate in buildings. Nordisk Betong. 5-1981.
- [4] Barra, O. & Costantini, T. Un prototipo di sistema passivo a parametri modulabili per la climatizzazione solare degli ambienti. (A prototype of passive solar house with variable parameters). La Termotecnica, nr. 8 august 1979.
- [5] Morris, W.S. Performance evaluation of a thermosiphon rockbed system. Progress in Passive Solar Energy Systems, volume 8, American Solar Energy Society, Inc. Page 265-269, 1983.
- [6] Agnew, W.C. & McIntosh, W.C. A state-of-the-art thermo-siphon system. Progress in Passive Solar Energy Systems, volume 8, American Solar Energy Society, Inc. Page 761-764, 1983.
- [7] Kohler, J. Active Collectors with Passive Delivery. Page 24-27, Solar Age, January 1983.
- [8] Kielsgaard Hansen, K. Luftsolfanger og varmelagring i jord. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. Meddelelse nr. 118, 1982.
- [9] Jones, M.M. & Morris, M.S. Two innovative passive air thermosiphon houses in Santa Fe. Proceedings 5th National Passive Solar Conference, AS/ISES. Page 1051-1055, 1980.

- [10] Darby, R. & Wright, D. An integrated phase change heating and cooling system for retrofit and new construction. *Progress in Passive Solar Energy Systems*, volume 8, Amercian Solar Energy Society, Inc. Page 755-760.
- [11] Duffie, J.A. & Beckman, W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley-Interscience Publication. 1980.
- [12] Beregning af bygningers varmetab. Dansk Ingeniørforening. 4. udgave 1977. DS 418.
- [13] Glent Ventilation. Glent & Co. A/S. 1970.
- [14] Lund, H. Program BA4, Users Guide. Report no. 44. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark. 1979.
- [15] Olsen, L. Grimmig, M. Steensen, P. Beregning af passiv solvarmeudnyttelse i et parcelhus. Arbejdsrapport. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole, og Varmeteknik, Teknologisk Institut. LfV rapport nr. 81-26. 1982.
- [16] Solar Products Specifications Guide. Solar Vision, Inc., Harrisville, N.H. June 1983.
- [17] Furbo, S. Varmelagring til solvarmeanlæg. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. Meddelelse nr. 162. September 1984.
- [18] Balcomb, J.D. *Passive Solar Design Handbook*, volume 2. National Technical Information Service, 5285 Port Royal Road, Springfield, Va. 22161, USA. 1980.
- [19] Nissen, H. Modul og montagebyggeri. Polyteknisk Forlag. 1970.
- [20] Olesen, B.W. Termiske komfortkrav til gulve. Laboratoriet for Varme- og Klimateknik, Danmarks Tekniske Højskole, Lyngby. 1975.
- [21] ISO Draft Proposal DP7730. Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. January 1982.

- [22] Short, W. & Kutscher, C.F. Analysis of an Active Charge/Passive Discharge Solar Space Conditioning System Employing Air Collectors and Hollow-core Concrete Block Floor. Solar Energy Research Institute. SERI/TR-253-2340. July 1984.



## SUMMARY

This report contains a study of the possibilities of using unconventional storage systems for solar-assisted space heating systems.

To start with the project was carried out by a review and assessment of existing storage systems integrated in the building structure.

A computer simulation model was developed for determination of the temperatures and heat fluxes for a system with a building model, a storage model and a solar collector model. A sensitivity study regarding the useful solar energy and the air temperatures has been completed. The performance of the system of solar collectors with different areas, storage volumes, storage types, thickness of storage insulation, control strategies and building thermal mass has been estimated.

Simulations have been performed on an air based solar heating system and two types of storages were used, namely a rock bed system and a storage in hollow core slabs. Three different control strategies have been investigated:

1. supply of solar heated air without any other storage than the thermal mass in the building,
2. supply of solar heat to storage with passive heat discharge from the surface only,
3. a combination of active and passive discharge.

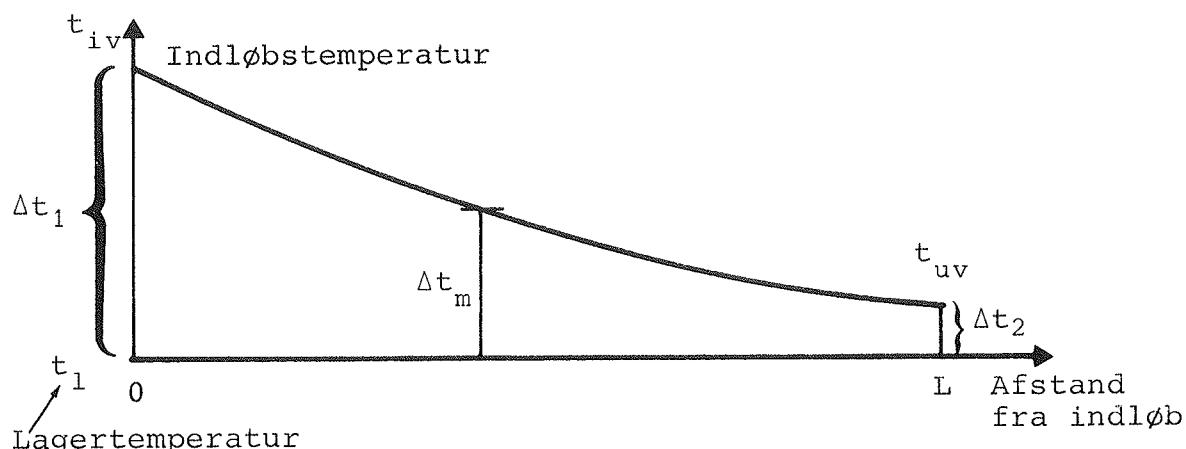
On the basis of these results a set of design guidelines have been established and the report is concluded by the expected performance when the space heating system is combined with a domestic hot water system.



APPENDIX A

Bestemmelse af kanallængder for en given varmeovergang

For at bestemme hvor store længder der er nødvendige for at få afgivet en vis andel af varmen, bestemmes i det følgende, under forudsætning af konstant lagertemperatur  $t_1$  og varmeovergangstal, hvor stor en længde der er nødvendig for at opnå den ønskede varmeafgivelse.



Figur A.1 Temperaturprofil i luft ved konstant lagertemperatur.

For at få afgivet andelen  $\eta$  af varmen gælder at (se figur A.1):

$$\Delta t_2 = (1 - \eta) \Delta t_1$$

Den logaritmiske middeltemperaturforskel kan dermed bestemmes til:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \left( \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)} = \frac{\eta \Delta t_1}{\ln \left( \frac{1}{1-\eta} \right)}$$

Den varmemængde, der afgives fra det varmetransporterende medie: kan bestemmes af:

$$Q_1 = (\Delta t_1 - \Delta t_2) \cdot \rho c_p \cdot v A_{tv} = \eta \Delta t_1 \cdot \rho c_p \cdot v A_{tv}$$

hvor

$$\rho = \text{massefylden} \quad \text{kg/m}^3$$

$$c_p = \text{varmefylden} \quad \text{J/m}^3\text{K}$$

$$v = \text{hastigheden} \quad \text{m/s}$$

$$A_{tv} = \text{tværsnitsarealet m}^2$$

Den varmemængde, der er afgivet fra mediet til væggen, kan bestemmes af:

$$Q_2 = \Delta t_m \cdot \alpha \cdot 0 \cdot L = \frac{\eta}{\ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)} \Delta t_1 \cdot 0 \cdot L$$

hvor

$$\alpha = \text{varmeovergangstallet} \quad \text{W/m}^2\text{K}$$

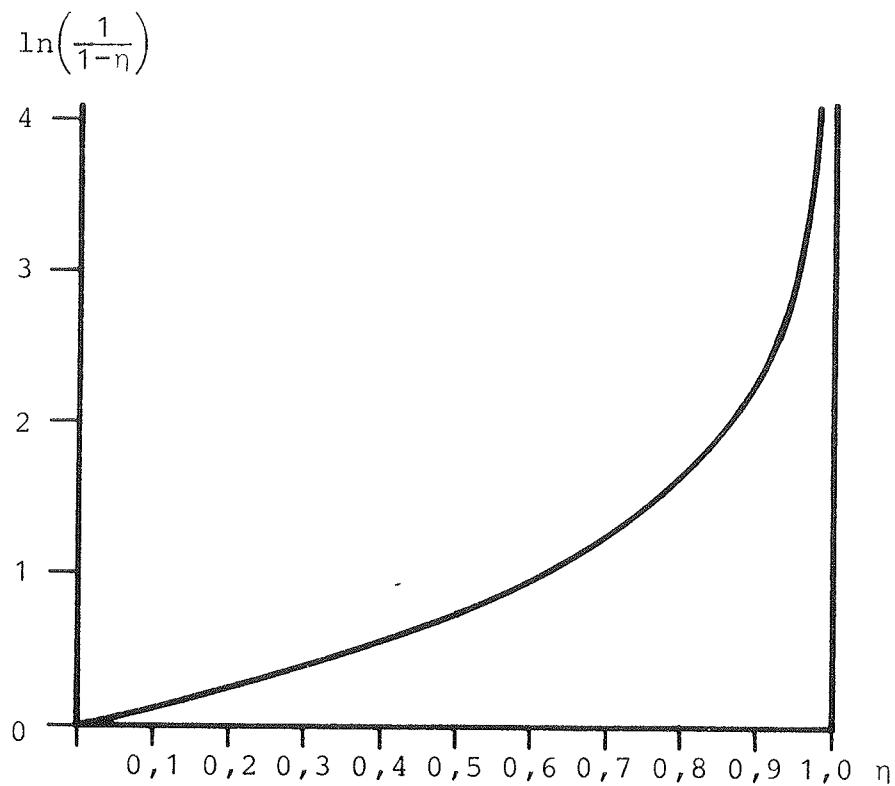
$$0 = \text{kanalens omkreds} \quad \text{m}$$

$$L = \text{kanalens længde} \quad \text{m}$$

Sættes  $Q_1 = Q_2$  kan  $L$  bestemmes for givne værdier af de øvrige variable:

$$L = \frac{\ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right) \rho c_p \cdot v A_{tv}}{\alpha \cdot 0}$$

Størrelsen  $\ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)$  kan aflæses af figur A.2. Det ses, at ønskes en varmeoverføring på over 80%, sker der en meget stor øgning af den nødvendige længde.



Figur A.2 Den relative længde af kanal der er nødvendig for at få overført andelen  $\eta$  af varmeindholdet i forhold til længden ved  $\eta = 0,63$ .



## 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 Byggeforsknings-  
institut  
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. Ørstedts Instituttet  
P. Steensen, civilingeniør, Teknologisk Institut  
P.J. Snare, civilingeniør, Energistyrelsen  
Sekretær for styregruppen: Mads Lange, Teknologisk Insti-  
tut.

### Adresser:

Laboratoriet for Varmeisolering, Bygning 118, Danmarks Tek-  
niske Højskole, 2800 Lyngby - tlf. 02 - 88 35 11.

Teknologisk Institut, Varmeteknik, Gregersensvej, 2630  
Tåstrup - tlf. 02 - 99 66 11.



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 enfamiliehuses energiforbrug. Anker Nielsen, november 1980.
- Nr. 8. Heat Storage with an incongruently melting salt hydrate as storage medium based on the extra water principle. Simon Furbo, december 1980.
- Nr. 9. Enfamiliehuse med glasbeklædte uderum. Anker Nielsen, marts 1981.
- Nr. 10. Kemiske varmelagre. Teori og praksis. Peter L. Christensen, december 1981.
- Nr. 11. Varmtvandsforbrug i boliger. Niels Mejlhede Jensen, februar 1982.
- Nr. 12. Prøvemetoder 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 Mejlehede 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 varmepumpelager. Otto Dyrnum, april 1984.
- Nr. 18. Varmeovergang i små solvarmelagre. Søren Østergaard Jensen, november 1984.
- Nr. 19. Varmelagring ved hjælp af en kemisk varmepumpe med vandig saltopløsning som absorptionsmiddel. Otto Dyrnum, november 1984.
- Nr. 20. BLAST - EDB-program til beregning af passiv solvarme. Jørgen Erik Christensen, november 1984.

Energiministeriets solvarmeprogram:

- Nr. 1. Kombineret solvarme-varmepumpeanlæg. Beregning af et anlæg til en mindre bebyggelse. Leif Sønderskov Jørgensen, april 1979.
- Nr. 2. Solvarme-fjernvarmeanlæg. Beregning af et centralt anlæg med og uden varmelager. Leif Sønderskov Jørgensen, december 1979.
- Nr. 3. Solvarmeanlæg i Gentofte. Målinger på anlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand. Årsrapport. Leif Sønderskov Jørgensen et al, februar 1980.
- Nr. 4. Beregningsprogram til solvarmeanlæg. For TI-59 programmer-bar lommeregnehmaskine. Frank Bason, T. Vest Hansen, 1980.
- Nr. 5. Solvarmeanlæg i Herfølge. Brugsvand, 1/2 års målinger. Otto Paulsen, juli 1980.
- Nr. 6. Solvarmeanlæg i Greve. Målinger på anlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand. Årsrapport. Leif Sønderskov Jørgensen et al, juli 1980.

- Nr. 7. Solfangeres langtidsholdbarhed. Erfaringer med solfangeres utsat for det naturlige vejrlig under kontrollerede, realistiske, ens driftsforhold i 3 år på prøvestand. T. Vest Hansen et al, juli 1980.
- Nr. 8. Solvarmesystemprøvestand. Resultater fra det første projekt på prøvestanden. Ole Balslev Olesen, Carsten Nielsen, 1981.
- Nr. 9. Solvarmeanlæg på Juelsminde campingplads. Brugsvand, 3 års målinger. Otto Paulsen, august 1980.
- Nr. 10. Energiministeriets solvarmeprogram. Statusrapport, august 1980.
- Nr. 11. Energiministeriets solvarmeprogram. Projektforslag - langtidsplanlægning, oktober 1980.
- Nr. 12. To solvarmeanlæg til varmt brugsvand. En beskrivelse og vurdering efter 4 måneders drift af anlæggene. Klaus Ellehauge et al, december 1980.
- Nr. 14. Solvarmeanlæg i Blovstrød. 2 1/2 års målinger på 10 m<sup>2</sup> brugsvandsanlæg. Benny Bøhm, Peter Steensen, maj 1981.
- Nr. 15. Solvarmeanlæg til rumopvarmning. En udredning baseret på 2 års målinger på anlæg i Greve og Gentofte. Svend Erik Mikkelsen, Leif Sønderskov Jørgensen, august 1981.
- Nr. 16. Solvarmeanlæg til varmt brugsvand. En udredning baseret på 1 års målinger på 2 anlæg. Klaus Ellehauge et al, september 1981.
- Nr. 17. Solvarmeanlæg i Herfølge. Varmtvandsanlæg i tæt-lav byggeri. Otto Paulsen, maj 1982.
- Nr. 18. Korrosion i solfangerabsorbere. En undersøgelse af korrosionsforholdene i solfangeres væskekanaler. Finn Yding, juli 1982.
- Nr. 19. Fokuserende solfanger med klimaskærm. Forundersøgelse. Knud Ladekarl Thomsen, september 1982.
- Nr. 20. Solfangeres driftssikkerhed og holdbarhed. Peder Vejsig Pedersen, Svend Erik Mikkelsen, juli 1983.
- Nr. 21. Solvarme - fjernvarmeanlæg. Teknisk-økonomisk analyse af systemkombinationer. Benny Bøhm, Svend Erik Mikkelsen, maj 1983.

- Nr. 22. Solfangerabsorberes overfladebestandighed. Pauli Andersen, februar 1984.
- Nr. 23. Solvarmeanlæg i Rødovre.
- Nr. 24. Solvarmeanlæg til varmt brugsvand i Gl.Holte. En vurdering efter et års målinger. Sten Melson, januar 1984.
- Nr. 26. Solvarmeanlæg med stort udbytte - systemanalyse. Sten Melson, Ole Balslev-Olesen, april 1984.
- Nr. 27. Kombineret solvarme-varmepumpeanlæg i Næstved. Klaus Ellehauge, Niels Mejlhede Jensen, juni 1984.
- Nr. 28. Et solvarmeanlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand. Målinger på systemprøvestand. Ole Balslev-Olesen, Nick Bjørn Andersen, september 1984.
- Nr. 29. Billig solfanger/lager unit til brugsvandsopvarmning, Ivan Katić, Simon Furbo, december 1984.