

TO FORSLAG TIL UDFORMNING AF SOLVÆGGE

En undersøgelse baseret på indendørs målinger

Casper Paludan-Müller

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

MEDDELELSE NR. 186 OKTOBER 1987

FORORD

Denne rapport beskriver resultaterne fra arbejdet med undersøgelsen af to forskellige forslag til konstruktion af solvægge. Projektet er en del af "område 9: Solenergi" under Energiministeriets forskningsprogram EFP-86, og det er oprindeligt benævnt "Passiv solvarme: Undersøgelse af solvægge i indendørs prøvestand".

Projektet er gennemført med deltagelse af de nedenstående medarbejdere ved Laboratoriet for Varmeisolering:

Casper Paludan-Müller, civilingeniør, lic.techn.

Svend Aage Svendsen, lektor, civilingeniør, lic.techn.

Michael Ramskov, maskinarbejder

Jens Olsen, maskinarbejder

Bertil Morelli, elektromekaniker

Elin van Kooten, sekretær

Per Madsen, stud.polyt. (tegninger)

Der rettes endvidere en tak til ingeniørfirmaet Larsen og Nielsen A/S for fremstilling og fri levering af det beton-element, som blev benyttet til den ene af solvæggene.

RESUMÉ

To forskellige forslag til udformning af solvægge er blevet undersøgt. Den ene solvæg var en uventileret Trombe-væg, hvor der i dæklagssystemet indgik et lag af det transparente isoleringsmateriale silica aerogel. Som udvendigt dæklag blev benyttet et lag glas, og varmelageret bestod af en massiv betonmur. Den anden solvæg var en ventileret Trombe-væg bestående af to lag glas foran en uisoleret hulmur. Der var varmetransport mellem hulrummet foran absorberen og hulrummet i muren ved luftcirkulation gennem ventilationsåbninger øverst og nederst i formuren. Hulmuren var udført med fuldt udmurede partier ("faste bindere"), sådan som det ofte er tilfældet for eksisterende byggeri.

De to solvægge blev opbygget med realistiske dimensioner, hvorefter deres egenskaber blev målt i laboratoriets indendørs prøvestand for solvægge. Måleresultaterne blev sammenlignet med resultaterne fra teoretiske beregninger, og der blev konstateret en rimelig god overensstemmelse. Endelig blev der foretaget EDB-beregninger af de årlige energibesparelser, der kan forventes, når solvæggene benyttes i nybyggeri og i eksisterende byggeri.

SUMMARY

Two different proposals for design of solar walls have been investigated. One of the solar walls was an unvented Trombe wall for which the transparent insulation material, silica aerogel, was a part of the cover system. As outer cover was used a layer of glass, and the storage was a solid concrete wall. The second solar wall was a vented Trombe wall consisting of two layers of glass in front of an uninsulated cavity wall. Heat transfer took place between the air space in front of the absorber and the cavity in the wall by air circulation through vents at the top and at the bottom of the outer leaf of the wall. The wall was built with headers, thus resembling a typical wall from an existing dwelling.

The two solar walls were built with realistic dimensions, and their characteristics were measured in the laboratory's indoor test facility for solar walls. The results of the measurements were compared to the results from theoretical calculations, and a reasonably good agreement was obtained. Finally, computer calculations were carried out in order to predict the yearly energy savings that can be expected when the solar walls are used in new buildings and in existing buildings.

Indholdsfortegnelse

1.	INDLEDNING	1
1.1.	Forslag til udformning af solvægge	1
1.2.	Undersøgelse af solvægge	2
2.	EKSPERIMENTEL UNDERSØGELSE	5
2.1.	Beskrivelse af solvæggene	5
2.2.	Termisk netværksmodel	12
2.3.	Forsøgsopstilling	14
2.4.	Måleresultater	17
2.4.1	Måling på solvæggen med dæklag af silica aerogel .	17
2.4.2	Måling på solvæggen med varmelagring i hulmur	17
3.	TEORETISK MODEL FOR SOLVÆGGENE	23
3.1.	Beregninger for solvæggen med silica aerogel	23
3.2.	Beregninger for solvæggen med varmelagring i hulmur	32
4.	BEREGNING AF UDBYTTET FRA SOLVÆGGENE	39
4.1.	Generelt	39
4.2.	Årsberegninger for solvæggen med silica aerogel ..	44
4.2.1	Energibesparelse og kølebehov	44
4.2.2	Parametervariationer	46
4.3.	Årsberegninger for solvæggen med varmelagring i hulmur	51
4.3.1	Energibesparelse og kølebehov	51
4.3.2	Parametervariationer	53
4.4.	Efterisolering af ydermur	55
5.	ØKONOMISK VURDERING	57
6.	KONKLUSION	59
	REFERENCER	61
	Forskningsudvalget for energianvendelse i bygninger	62
	Liste over udsendte rapporter	63

1. INDLEDNING

1.1. Forslag til udformning af solvægge

Brugen af solvægge er en af de foranstaltninger, hvormed "passiv solvarme" kan medvirke til dækning af en bygnings energibehov til rumopvarmning.

Der er selvsagt et utal af forskellige måder, hvorpå en solvæg kan udformes. Formålet med dette projekt er at undersøge, om to foreslåede solvæg-konstruktioner fungerer som forventet, og derpå at beregne den forventede energibesparelse.

Den ene af solvæggene består af en massiv betonmur, der fungerer som varmelager, og en velisoleret dæklagskonstruktion på murens udvendige side. Ved at benytte det transparente, isolerende materiale "silica aerogel" i dæklagskonstruktionen opnås en meget lav varmetabskoefficient mellem muren og det fri, samtidig med at der opretholdes en god transmittans for solstråling.

For den anden solvæg har varmelageret form af en hulmur, hvorpå der udvendigt er anbragt en dæklagskonstruktion med to lag glas. I perioder med solindfald sker der (ud over varmelædningen) en varmetransport fra absorberen til muren, ved at der cirkulerer luft fra hulrummet mellem absorberen og det inderste lag glas til hulrummet inde i muren. Luftcirkulationen opstår på grund af naturlig konvektion, og luften strømmer gennem åbninger øverst og nederst i den udvendige vange. Muren er udført med faste bindere, dvs. for- og bagvange er holdt sammen med faste udmurede partier, både i vandret retning (øverst og nederst på den etagehøje mur) og i lodret retning (med visse mellemrum).

En mere detaljeret beskrivelse af solvæggene er givet i det flg. kapitel. Det skal nævnes, at begge vægge kan anvendes i forbindelse med eksisterende byggeri. For den førstnævnte solvæg kan der være tale om at benytte en eksisterende massiv facade (der dog typisk vil bestå af tegl i stedet for beton). Den anden solvæg vil kunne finde anvendelse i den del af det eksisterende byggeri, hvor der er anvendt hulmure med faste bindere. I dette tilfælde vil det ikke kunne svare sig at isolere muren ved blot at indblæse isoleringsgranulat i hulmuren på grund af kuldebroerne ved de massive murpartier. Hvis man ønsker at efterisolere en sådan mur, må det ske i form af en mere besværlig udvendig eller indvendig efterisolering.

Det skal nævnes, at dette projekt er udført på baggrund af tidligere projekter om solvægge, udført ved Laboratoriet for Varmeisolering (LfV). Disse er bl.a. beskrevet i [1], [2] og [3].

1.2. Undersøgelse af solvægge

Den energibesparelse og det indeklime, der opnås ved anvendelsen af solvægge, afhænger af en lang række faktorer. Heraf knytter nogle sig til udformningen af solvæggen, og nogle knytter sig til konstruktion og indretning af bygningen.

En solvægs virkemåde er bestemt ved forskellige fysiske egenskaber. Disse vedrører transmission og absorption af solstråling, varmeoverføring mellem solvæggen og dens omgivelser samt varmelagringskapaciteten af solvæggens lager. Disse egenskaber kan beskrives teoretisk, men idet der altid må gøres en række tilnærmelser og antagelser, vil der ofte være en stor usikkerhed forbundet med den teoretiske beregning. Det er derfor vigtigt at godt-

gøre, at den teoretiske beskrivelse er tilstrækkelig nøjagtig, og dette sker ved at sammenligne beregningerne med måleresultater for den aktuelle solvæg.

De to solvægge, der er blevet undersøgt i dette projekt, er begge blevet bygget op med realistiske dimensioner på LfV, hvorefter der er blevet foretaget målinger i en særlig indendørs forsøgsfacilitet.

På grundlag af målinger og beregninger af solvæggen samt en teoretisk beskrivelse af den øvrige bygning kan den årlige energibesparelse beregnes med hjælp af et edb-program. Med edb-programmet beregnes også behovet for køling i de perioder, hvor der skal fjernes overskudsvarme for at opnå en acceptabel termisk komfort.

Det skal bemærkes, at den overskudsvarme, der må fjernes, vil være temmelig stor i sommermånederne. I denne periode er det derfor vigtigt, at det er muligt at afskærme solvæggen mod solstråling. Den nærmere udformning af en solafskærmning er ikke blevet undersøgt i dette projekt. Her har det først og fremmest været formålet at undersøge, hvorvidt solvæggene vil kunne give en anselig energibesparelse. Såfremt dette er tilfældet, kan der tages stilling til spørgsmålet om afskærmning om sommeren, og dette vil normalt kunne løses ved brug af kendte metoder.

2. EKSPERIMENTEL UNDERSØGELSE

I dette kapitel er der givet en beskrivelse af de to solvægge, der er blevet undersøgt, og den forsøgsopstilling, som blev benyttet ved målingerne, er vist. Endvidere er anført måleresultaterne fra de forskellige forsøg.

2.1. Beskrivelse af solvæggene

Solvæg med dæklag af silica aerogel

Virkemåden af denne solvæg fremgår af figur 2.1. Beton-elementet, der blev benyttet som den massive, varmelagerende del af muren, havde en tykkelse på 0,15 m, mens højde og bredde var 2,50 m og 1,50 m.

På figur 2.2 er vist en detalje med opbygningen af dæklagssystemet. Yderst er benyttet et almindeligt lag glas (6 mm). Mellem glas og absorber er anbragt et lag af 22 mm silica aerogel. Til absorberen blev anvendt alm. matsort pejselak.

Materialet silica aerogel består af kiselsten (SiO_2) i en meget porøs struktur. Materialet har særdeles gunstige egenskaber i forbindelse med udnyttelse af solvarme, idet det har en god transmittans for solstråling, samtidig med at varmetabet på grund af stråling og ledning gennem materialet er lille. Detaljerede beskrivelser af materialet findes bl.a. i [4] og [5].

Den silica aerogel, der blev brugt til solvæggen, er fremstillet i Sverige under navnet "Airglass". Fremstillingen sker ved at en blanding af SiO_2 og metanol anbringes i en autoklave, hvor den udsættes for 250°C og 90 atm. tryk, svarende til det kritiske punkt for metanol. Herved ud drives alkoholen, så der kun er den porøse siliciumstruktur tilbage. Den benyttede Airglass har form af retvinklede prizmer med bredde og højde ca. 18 cm og tykkelse 22 mm.

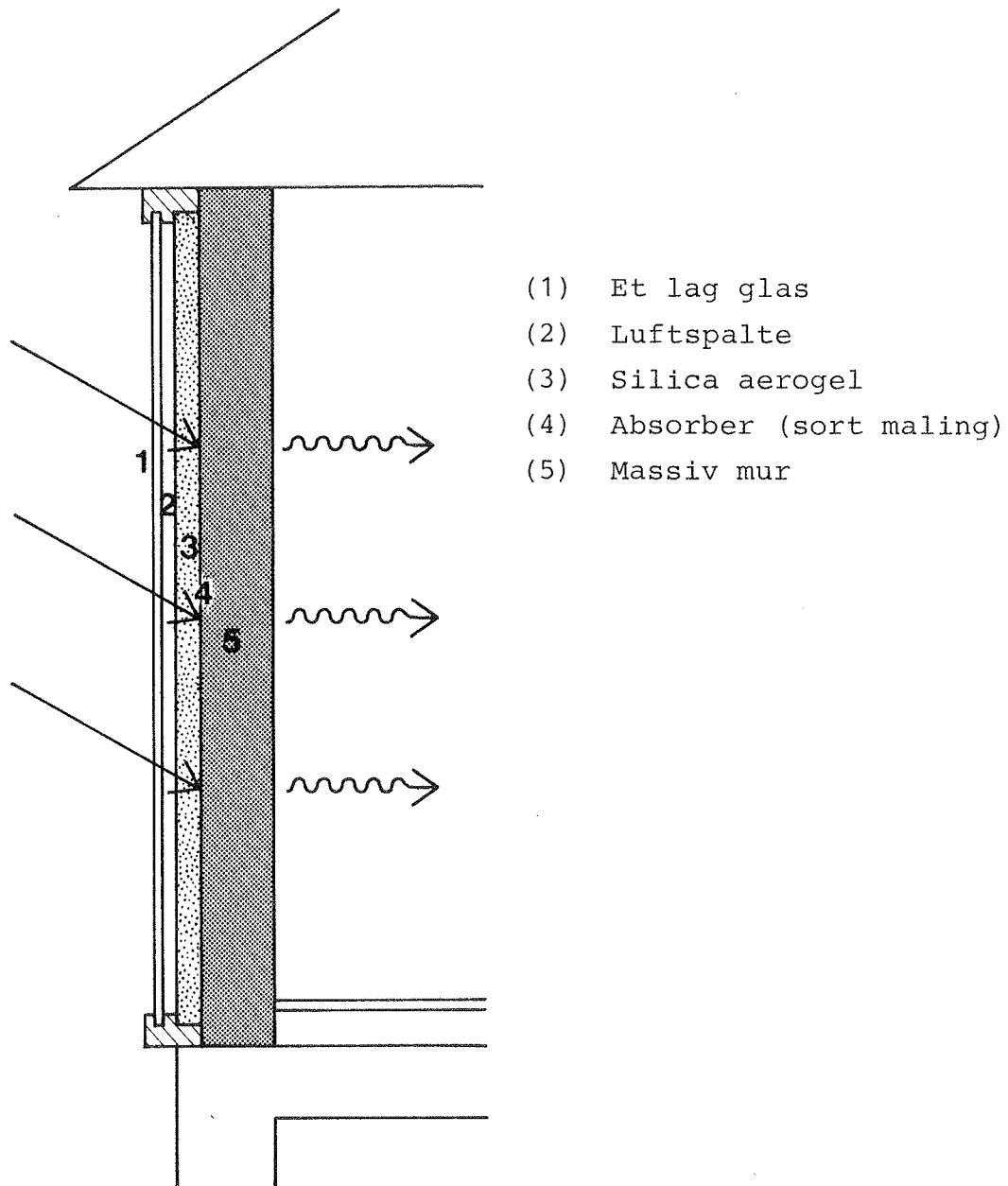


Fig. 2.1 Virkemåde af solvæggen med dæklag af silica aerogel. Solstrålingen absorberes på den udvendige side af den massive mur. Varmen afgives til rummet nogle timer efter at solindfaldet har fundet sted.

Rumvægten blev bestemt til 161 kg/m^3 ved opmåling og vejning. I efteråret 1986, da solvæggen med silica aerogel blev opbygget, var det ikke teknisk muligt at fremstille større stykker "Airglass", men i løbet af 1987 forventes det, at der kan produceres stykker på $60 \times 60 \text{ cm}$.

Silica aerogel er et skrøbeligt materiale, der skal beskyttes mod mekaniske påvirkninger. Det er følsomt over for fugt, idet materialet farves hvidt på de steder, hvor det kommer i berøring med vand, hvorved det mister sin transparens for solstråling. Med den benyttede solvæg vil der i perioder komme kondens på indersiden af solvæggens udvendige glas, og for at undgå at vanddråberne kommer i berøring med silica aerogel'en er der et hulrum med luft mellem de to materialer.

Som vist på figur 2.2 blev Airglass stykkerne lagt imellem to net, der er fastgjort til rammer bestående af tyndvæggede stålrør. I hver stålramme var der plads til 3 eller 4 rækker med 4 stykker. Da stykkerne ikke var helt regulære, var der tale om mellemrum af forskellig tykkelse mellem Airglass og stålramme, og de største mellemrum blev udfyldt med skumtætningsliste. Der var endvidere tale om en hel del forskellige mindre spalter (0-3 mm) mellem de enkelte stykker Airglass og mellem Airglass'en og mureverfladen. For at undgå et stort varmetab gennem stålprofilerne var der uden på disse anbragt et plastprofil, udfyldt med PUR-skum som vist på figur 2.2. Figur 2.3 er et foto, der viser Airglass stykkerne efter opsætning i stålrammerne.

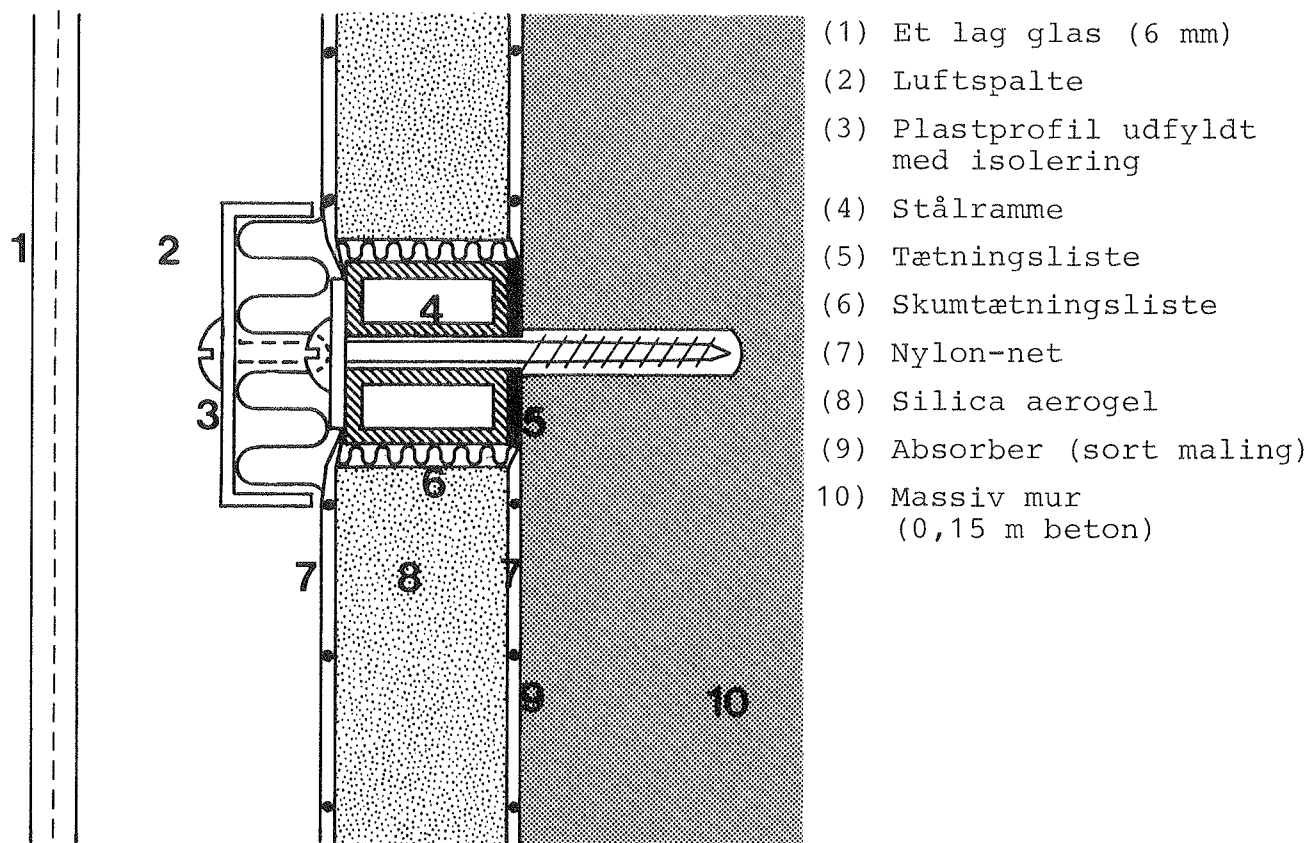


Fig. 2.2 Detalje af dæklagssystemet i målestoksforholdet 1:1.

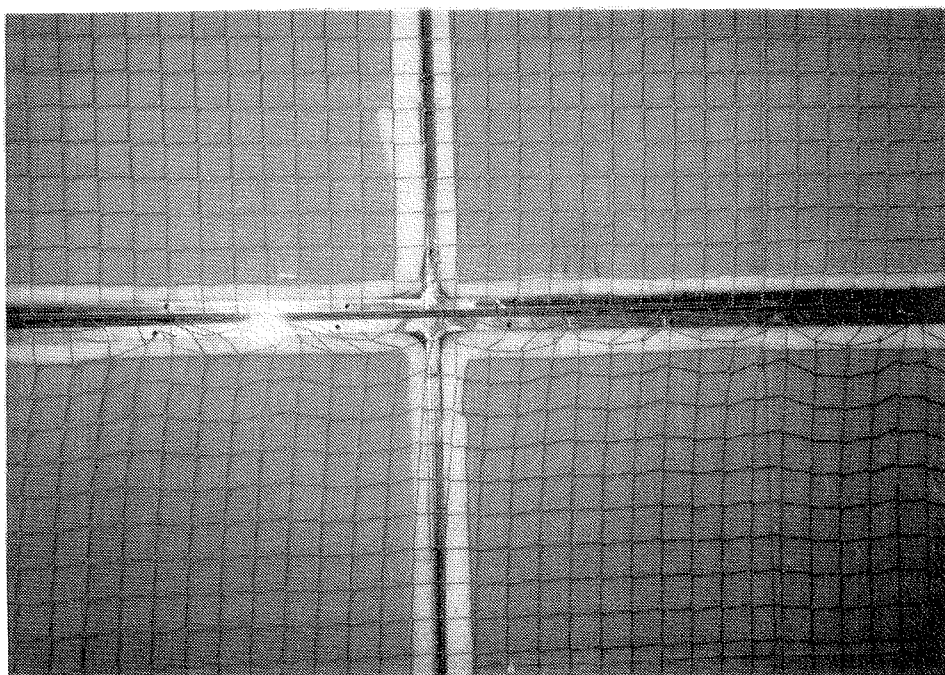


Fig. 2.3 Airglass stykker set forfra, efter at de er anbragt mellem to net i stålrammerne.

Solvæg med varmelagring i hulmur

Solvæggen er vist på figur 2.4. Hulmuren blev opmuret med massive sten. Murens højde var 2,52 m, og bredden var 1,31 m. Tykkelsen var 0,35 m, idet for- og bagvange var 0,11 m tykke (bredden af normal sten), og hulrummet var 0,13 m. Figur 2.5 viser den færdige hulmur inden montering af dæklag.

Der er massiv udmuring ud for de øverste og nederste tre skifter. I lodret retning er der fuld udmuring langs siderne og i midten af muren i $\frac{1}{2}$ stens bredde. Dette svarer til, at 36% af muren er fuldt udmuret.

De to "kanaler", svarende til hulrummene i muren, er hver ca. 0,5 m bredde. For hver kanal var der en rektangulær åbning øverst og nederst i den forreste vange med højde 0,13 m og bredde 0,15 m. For at hindre uønsket varmetab ved luftcirkulation (op gennem hulmuren og ned langs absorber og glas) i perioder, hvor luften i muren er varmere end luften foran muren, er der i de øverste åbninger anbragt en kontraventil i form af en tynd plastfolie (Teflon). I perioder, hvor der er tale om disse temperaturforhold, vil plastfolien blive suget ind mod et gitter, der er anbragt yderst i åbningen.

Konstruktion af dæklagssystem fremgår af figur 2.6. De to lag glas var monteret i en aluminiumramme uden brug af forseglings. Glas og ramme blev leveret som et færdigt panel (fra Vitral Glaspaneler).

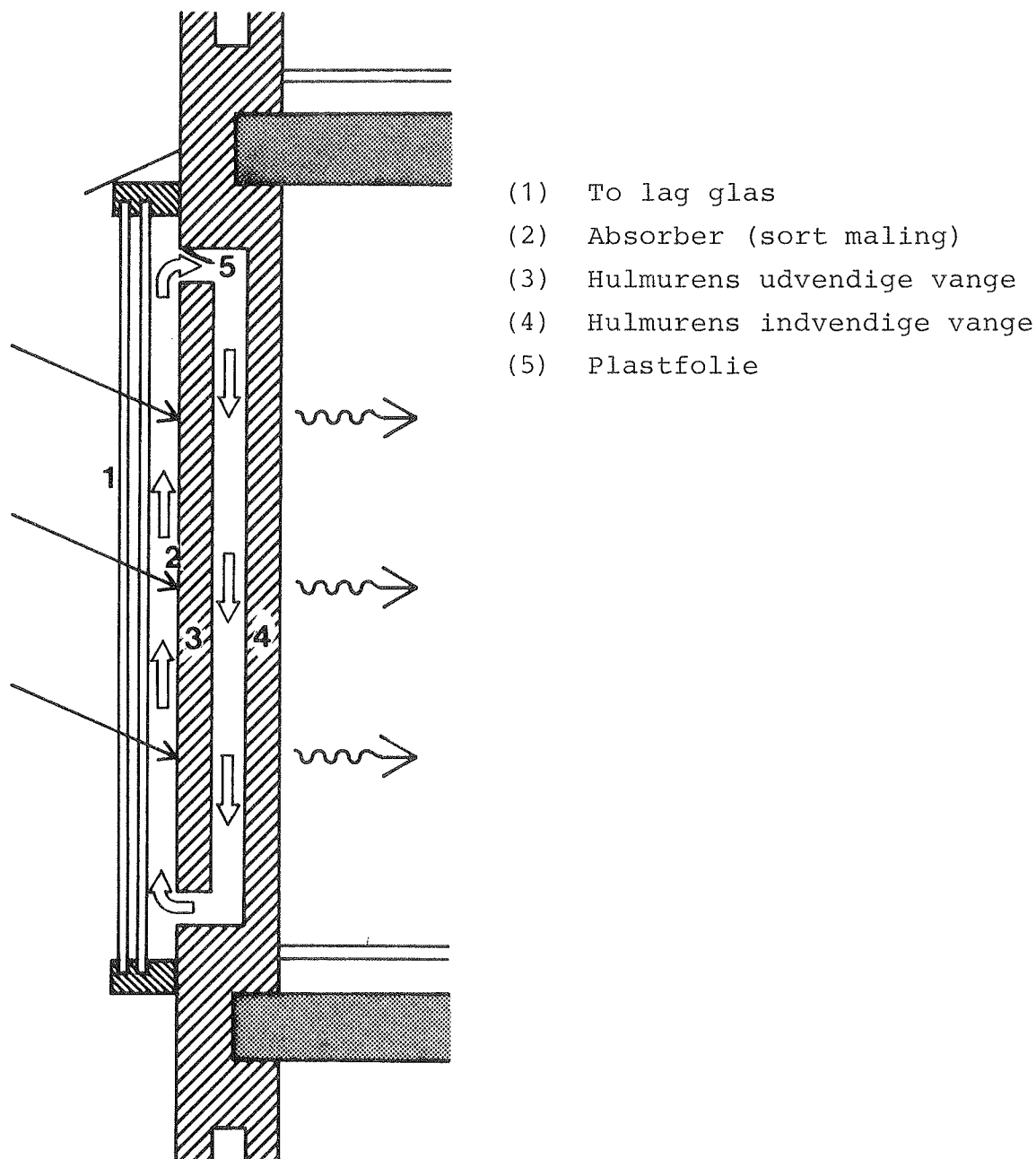


Fig. 2.4 Virkemåde af solvæggen med varmelagring i hulmur. Varmen fra solindstrålingen føres fra absorberen til muren ved ledning og ved naturlig cirkulation af luft. Varmen afgives til rummet nogle timer efter, at solindfaldet har fundet sted. I perioder uden sol forhindrer en plastfolie, at der kan ske varmetab fra muren ved luftcirkulation.

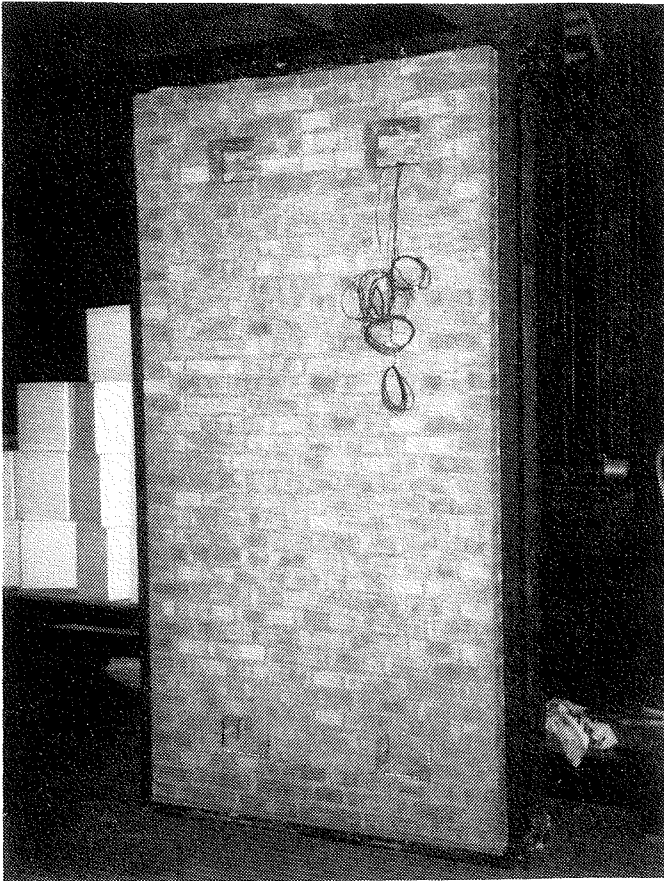
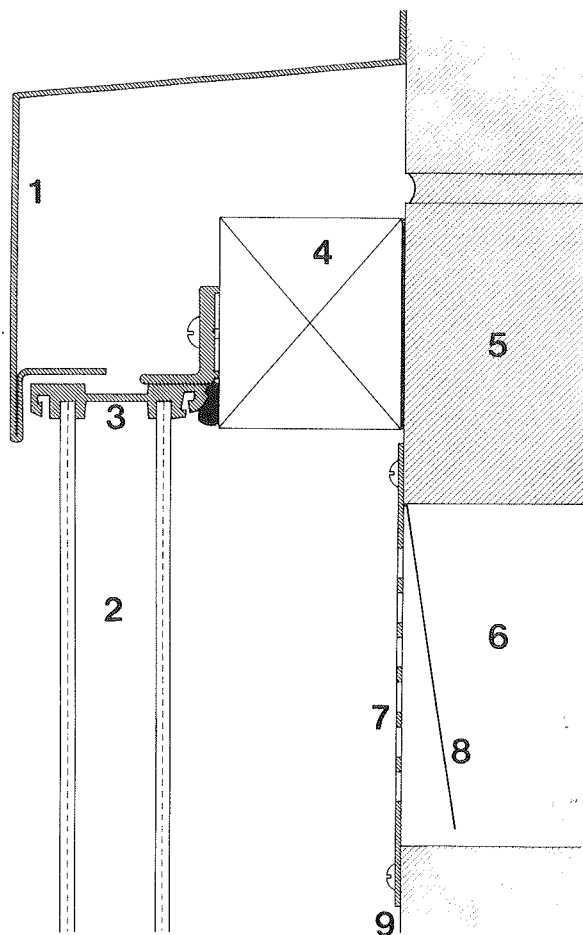


Fig. 2.5

Den færdige hulmur inden
maling af absorber og
montering af dæklagssystem.



- (1) Inddækning
- (2) To lag 4 mm glas
- (3) Aluminiumssprosse
- (4) Lægte af træ
- (5) Murstensvæg
- (6) Åbning til hulmur
i væggen
- (7) Metalrist
- (8) Plastfolie
- (9) Absorber

Fig. 2.6

Detalje af den øverste,
yderste del af solvæggen
i målestoksforhold 1:2,5.

2.2. Termisk netværksmodel

De egenskaber, der er bestemmende for solvæggens termiske virkemåde og derfor ønskes målt/beregnet, defineres ud fra en termisk netværksmodel af solvæggen. Netværksmodeller for de to solvægge er vist på figur 2.7 og figur 2.8. Egenskaberne defineres pr. m^2 af solvæggens absorberareal.

For begge solvægge er der tale om, at flg. egenskaber har betydning:

- Det effektive transmissionsabsorptionsprodukt for solstråling $(\tau\alpha)_e$
- Varmetabskoefficienten U_L for varmetab fra absorberen til det fri.
- Varmeoverføringskoefficienten U_{b-i} fra bagsiden af solvæggen til de indendørs omgivelser.
- Varmeledningsevnen λ_m for murmaterialet er bestemmende for varmeoverføringskoefficienterne mellem de netpunkter, der repræsenterer middeltemperaturen af de lag, muren er opdelt i.
- Produktet af massefylde og varmekapacitet $\rho \cdot c_p$ bestemmer varmekapaciteten af hvert af lagene.

For solvæggen med varmelagring i hulmur er det endvidere vigtigt at kende varmeoverføringskoefficienten U_{p-s} ved luftcirkulation mellem absorberen og overfladerne i hulmuren. Varmetabskoefficienten h_o for varmetab gennem åbningerne i muren og varmetabskoefficienten h_h mellem den udvendige og indvendige overflade af hulrummet i muren (i perioder uden luftcirkulation gennem hulmuren) skal også kendes.

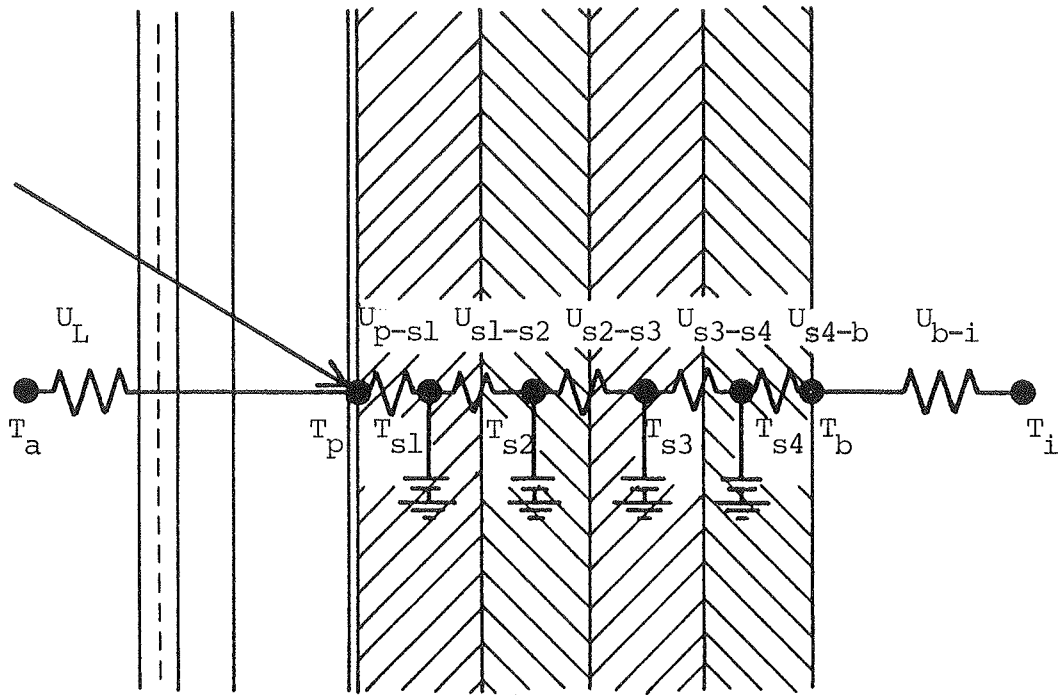


Fig. 2.7 Termisk netværk for solvæggen med dæklag af silica aerogel.

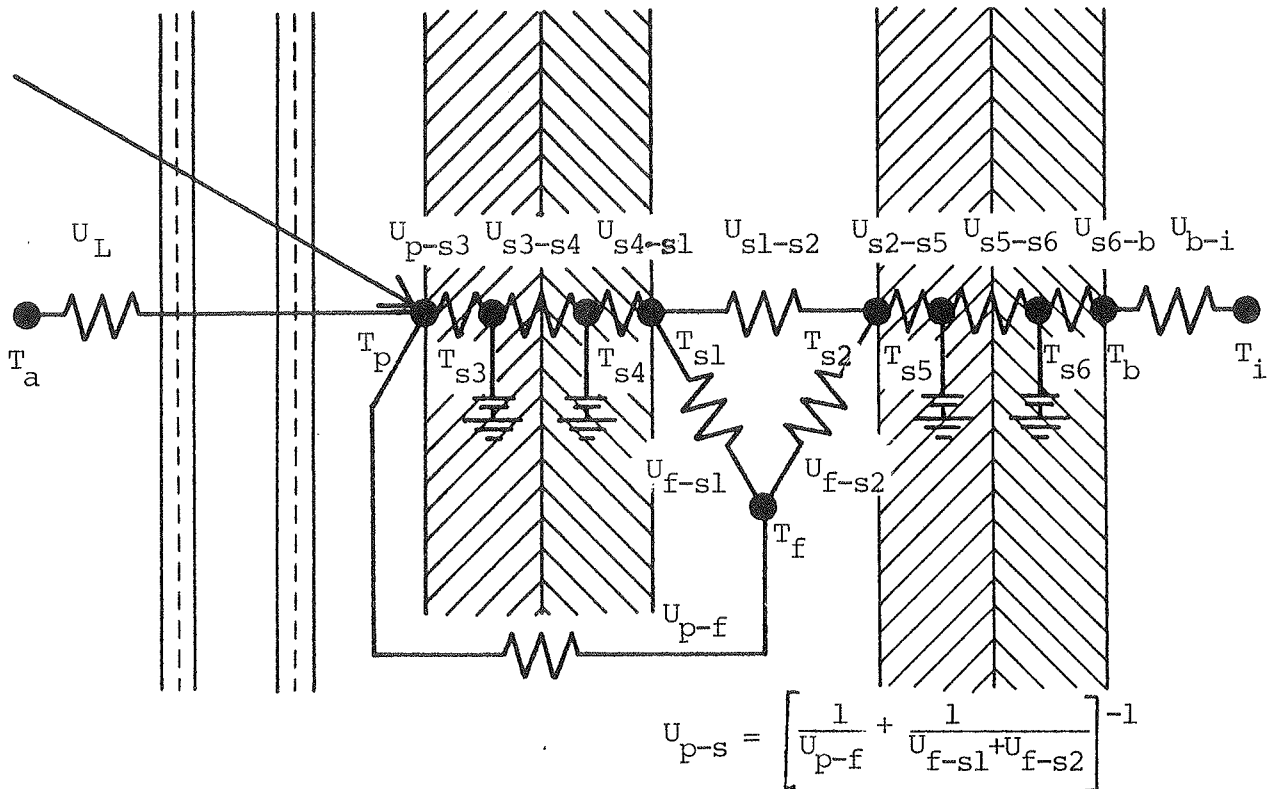


Fig. 2.8 Termisk netværk for solvæggen med varmelagring i hulmur.

2.3. Forsøgsopstilling

Målingerne på solvæggene blev udført i en særlig forsøgs-facilitet til indendørs måling på solvægge: Solvæggen installeres i en isoleret prøveramme, og der anbringes en isoleret "varm boks" på den indvendige side af væggen. I den varme boks er der indendørs klimaforhold, og varmestrommen til eller fra solvæggens bagside kan måles nøjagtigt. På den udvendige side af solvæggen kan anbringes en tilsvarende "kold boks", hvor der simuleres udendørs klimaforhold. Denne boks benyttes ved forsøg uden solstråling på solvæggen. Når der er tale om forsøg med solstråling, benyttes en solsimulator.

Luften i boksene afkøles ved at cirkulere den forbi en lamelkøleflade, der indgår i et væskesystem. Opvarmning af luften sker ved brug af en el-radiator.

På figur 2.9 er vist en tegning af forsøgsopstillingens sammensætning og virkemåde ved målinger med og uden solstråling. Det skal bemærkes, at bestemmelsen af $(\tau\alpha)_e$ for dæklagssystemet normalt foregår uden for opstillingen, idet de optiske egenskaber måles for små prøveemner af dæklagene. En mere detaljeret gennemgang af forsøgs-faciliteten og de forsøgsprocedurer, der anvendes, er givet i [3].

På figur 2.10 ses opstillingen forfra, idet der udføres forsøg med solstråling på solvæggen med dæklag af silica aerogel.

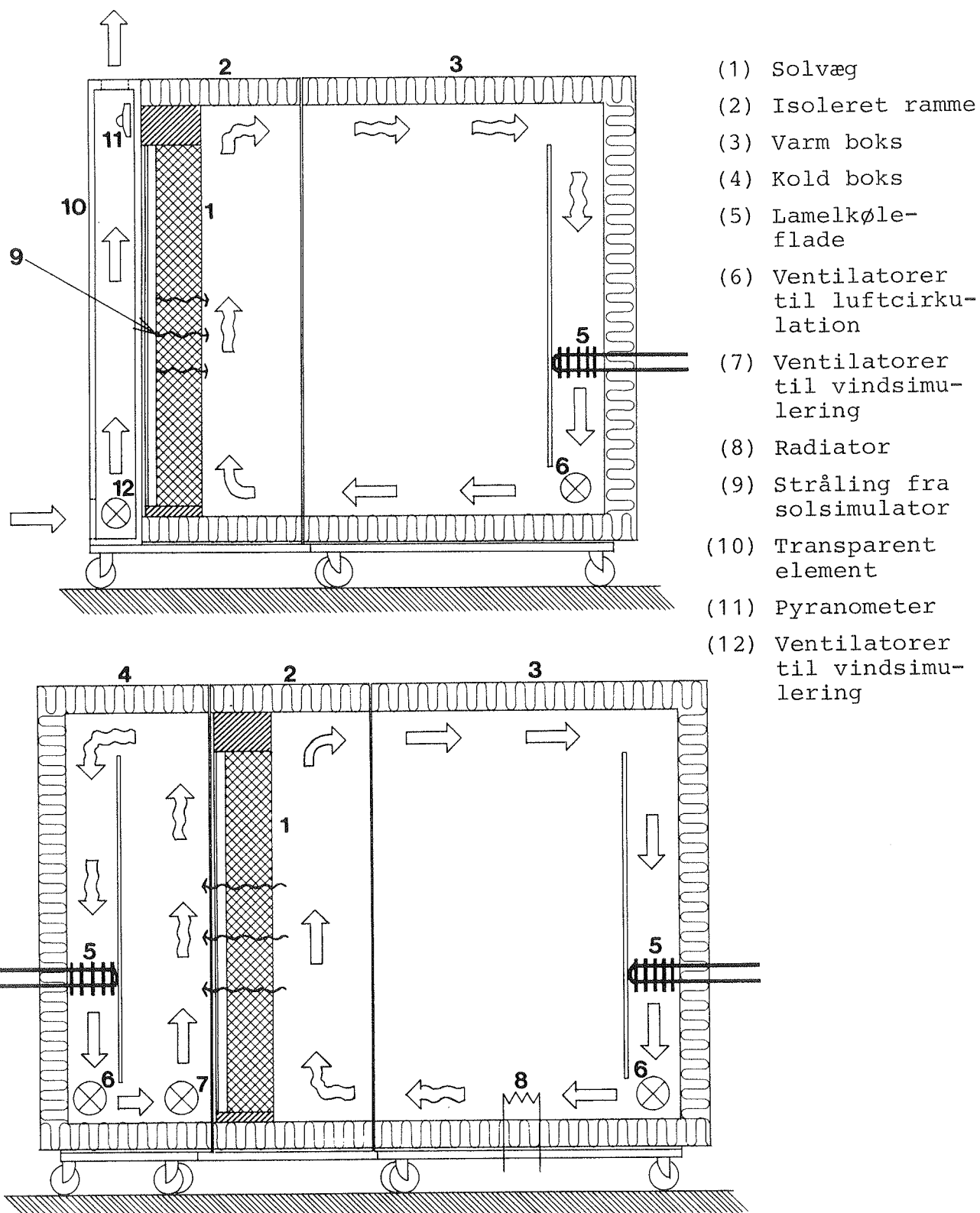


Fig. 2.9 Konstruktion af den indendørs forsøgsfacilitet til måling på solvægge. Sættningen af opstillingen er vist for målinger med solstråling (øverst) og målinger uden solstråling (nederst).

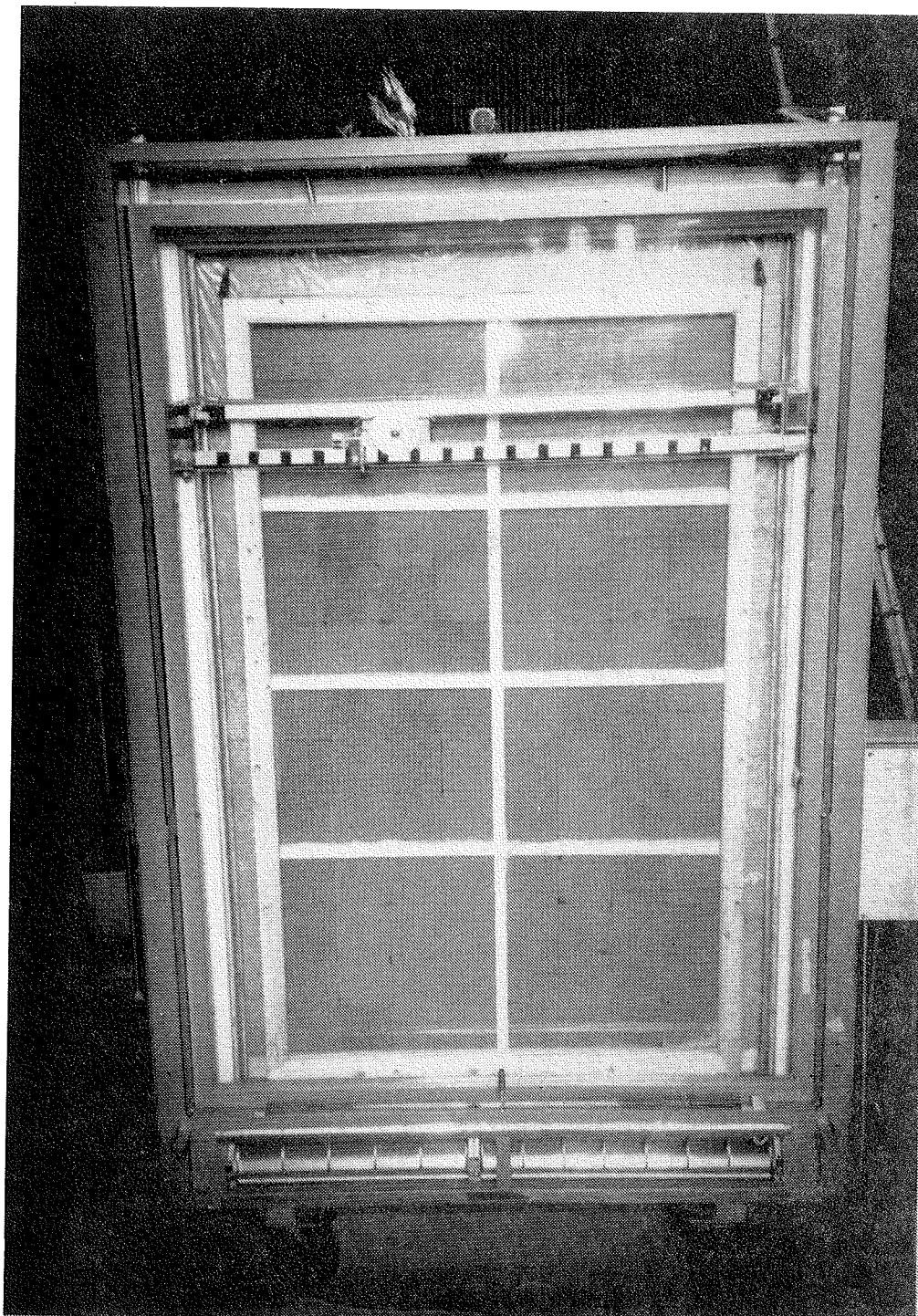


Fig. 2.10 Forsøgsopstilling set forfra, idet der udføres forsøg med solstråling på solvæggen med dæklag af silica aerogel.

2.4. Måleresultater

2.4.1 Måling på solvæggen med dæklag af silica aerogel

Der blev udført målinger af $(\tau\alpha)_e$, U_L , λ_m og $\rho \cdot c_p$. Endvidere blev der foretaget et "dynamisk forsøg" med opvarmning og afkøling af solvæggen.

Måleresultaterne for de forskellige egenskaber er vist i tabel 2.1. Endvidere er angivet den sandsynlige ubestemthed. Måleresultaterne er sammenlignet med teoretiske værdier i kapitel 3. Resultaterne for U_L svarer til en udvendig overgangsisolans på $0,04 \text{ m}^2\text{°C/W}$, dvs. en vindhastighed på ca. 4 m/s.

Det net, der holder Airgläss'en på plads, reducerer transmissionsabsorptionsproduktet ca. 5%. Denne reduktion er indeholdt i måleresultatet.

Ved det dynamiske forsøg blev solvæggen udsat for solstråling med varierende bestrålingsstyrke, idet bestrålingsstyrken blev ændret hver hele time i løbet af seks timer. Herefter fulgte en periode uden solstråling og med varmeafgivelse fra solvæggen til de indendørs omgivelser. Resultaterne for hver halve time af dette forsøg er angivet i tabel 2.2. De er sammenlignet med teoretiske beregninger i kapitel 3.

2.4.2 Måling på solvæggen med varmelagring i hulmur

Der blev foretaget målinger af $(\tau\alpha)_e$, U_L , h_h , λ_m og ρ . Resultaterne er samlet i tabel 2.3. U_L er angivet pr. m^2 af absorberen, og h_h er angivet pr. m^2 af hulrummets ene overflade. Resultaterne for U_L svarer til en udvendig overgangsisolans på $0,04 \text{ m}^2\text{°C/W}$. De forskellige ubestemtheder på målingerne er også vist i tabellen.

Produktet $\rho \cdot c_p$ er fundet ved brug af den teoretiske værdi af c_p på $840 \cdot 10^3 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$ [6]. ρ er målt ved opmåling og vejning af enkelte af de benyttede sten, og den viste sig at være 1780 kg/m^3 .

De målte værdier for egenskaberne er sammenlignet med teoretiske værdier i kapitel 3.

Ved måling af λ_m og h_h var dæklagssystemet endnu ikke monteret. Ved behandling af måleresultaterne er der her forudsat at være en-dimensional varmemestrøm gennem hulrum og de fuldt udmurede partier. Dette synes at være en forsvarlig antagelse, da varmeoverføringen gennem hulrummet viser sig at være nogenlunde lige så stor som varmeoverføringen ved ledning gennem de fuldt udmurede partier ud for hulrummet.

Plastfolien, som skulle give sikkerhed mod varmetransport ved konvektion fra hulrummet i muren til hulrummet mellem absorber og glas, blev inspiceret. Der viste sig at være en tendens til, at de nederste hjørner af folien krummede væk fra det gitter, som folien havde anlæg mod. Krumningen skyldtes spændinger i plastmaterialet. Ved målinger med varmetab gennem muren, hvor forskellen mellem de to hulrums temperatur var under ca. 10°C , gav dette anledning til luftstrømning gennem åbningen, hvilket gav sig udtryk i en blafrende bevægelse af foliens hjørner. Ved temperaturforskelle på over ca. 15°C blev folien overalt trykket ind mod gitteret. Ved målingerne i de to situationer kunne der dog ikke spores nogen mærkbar forøgelse af varmetabet som følge af utætheden.

Endvidere blev der foretaget et dynamisk forsøg med solvæggen på samme måde som forklaret i forrige afsnit. Resultaterne er opført i tabel 2.4. I kapitel 3 er de sammenlignet med resultater fra en beregning med den teoretiske model.

Egenskab	Symbol	Middeltemp. af absorber (°C)	Middeltemp. af murens bagside (°C)	Temp. af udeluft (°C)	Måleresultat	Ubestemthed
Varmetabskoeff. fra absorberen til udeluften	U_L	18,0	-	7,1	1,2 W/m ² °C	0,3 W/m ² °C
		16,9	-	1,4	1,1 -	0,2 -
		43,9	-	20,6	1,3 -	0,2 -
		49,8	-	20,2	1,4 -	0,2 -
Varmelednings- evne af betonen	λ	45,0	34,2	-	2,2 W/m°C	0,3 W/m°C
		36,8	29,7	-	1,8 -	0,3 -
		44,6	33,5	-	2,1 -	0,2 -
Varmekapacitet af muren	$\rho \cdot c_p$	-	-	-	1,6 · 10 ⁶ J/m ³ °C	0,4 · 10 ⁶ J/m ³ °C

Effektivt transm. abs.produkt for dæklagssystem og absorber	$(\tau\alpha)_e$	indfaldsvinkel 0°	0,63	0,02
		indfaldsvinkel 25°	0,63	0,02
		indfaldsvinkel 50°	0,57	0,02

Tabel 2.1. Oversigt over måleresultater for solvæggen med silica aerogel.

Tid efter start	Middeltemp. af udeluft	Middeltemp. af absorber	Middeltemp. af murens bagside	Middeltemp. af rumluft	Solenergi, der rammer glasset i 1-times periode	Solenergi, der absorberes af solvæggen i 1-times periode	Varme, der afgives fra solvæggens bagside i 1-times periode
timer	°C				Wh/m ² absorber		
0,0	21,1	19,1	18,7	18,0			
0,5	21,1	19,1	18,7	18,0	0	0	8
1,0	21,1	19,1	18,7	18,0			
1,5	22,1	19,7	18,7	18,0	43	26	6
2,0	22,5	19,9	18,8	18,0			
2,5	23,2	24,3	18,9	18,0	282	169	11
3,0	23,3	26,1	19,3	18,0			
3,5	23,4	34,3	20,0	18,1	722	448	24
4,0	23,5	38,2	21,2	18,3			
4,5	23,6	41,0	22,9	18,5	722	448	36
5,0	23,8	43,6	24,6	18,7			
5,5	23,9	39,0	26,3	19,0	282	169	66
6,0	23,9	38,5	27,5	19,2			
6,5	23,6	34,5	28,2	19,4	43	26	64
7,0	23,3	33,3	28,4	19,4			
7,5	23,4	31,9	28,3	19,6	0	0	64
8,0	23,4	31,1	28,1	19,6			

Tabel 2.2. Resultater fra det dynamiske forsøg for solvæggen med silica aerogel.

Egenskab	Symbol	Middelabsorbtemp. (°C)	Middeltemp. af udvendig overflade af hulrum (°C)	Middeltemp. af indvendig overflade af hulrum (°C)	Middeltemp. af murens bagside (°C)	Temp. af udeluft (°C)	Temp. af indeluft (°C)	Måleresultat	Ubestedthed
Varmetabskoefficient fra absorbereren til udeluften	U_L	8,7 34,6	- -	- -	- -	1,4 21,4	- -	3,2 W/m ² °C 3,9 W/m ² °C	0,8 W/m ² °C 0,5 W/m ² °C
Varmeoverføringskoeff. for hulrum i mur	h_h	-	32,1	40,1	-	-	-	7,8 W/m ² °C	1,8 W/m ² °C
Varmeledningsevne af mursten	λ_m	24,8	32,1	40,1	49,2	-	-	0,89 W/m°C	0,09 W/m°C
Varmekapacitet af muren	$\rho \cdot c_p$	-	-	-	-	-	-	$1,49 \cdot 10^6$ J/m ³ °C	- J/m ³ °C

Effektivt transm.abs. produkt for dæklagssystem og absorber	$(\tau\alpha)_e$	Indfaldsvinkel 0° Indfaldsvinkel 25° Indfaldsvinkel 50°	0,66 0,66 0,63	0,02 0,02 0,02
---	------------------	---	----------------------	----------------------

Tabel 2.3. Oversigt over måleresultater for hulumuren med dæklagssystem af to lag glas.

Tid efter start	Middeltemp. af udeluft	Middeltemp. af absorber	Middeltemp. af udv. overflade af hulrum i mur	Middeltemp. af indv. overflade af hulrum i mur	Middeltemp. af murens bagside	Middeltemp. af rumluft	Solenergi, der rammer glasset i 1-times periode	Solenergi, der absorberes af solvæggen i 1-times periode	Varme, der afgives fra solvæggens bagside i 1-times periode
timer	°C						Wh/m ² absorber		
0,0	23,4	20,4	19,8	18,8	18,0	17,2			
0,5	23,4	20,4	19,8	18,8	18,0	17,2	0	0	8
1,0	23,4	20,4	19,8	18,8	18,0	17,2			
1,5	23,5	21,7	19,9	19,0	18,0	17,2	45	29	8
2,0	23,5	22,3	20,0	19,2	18,0	17,3			
2,5	23,5	29,6	20,7	20,6	18,0	17,2	336	218	11
3,0	23,5	32,6	22,1	21,6	18,1	17,2			
3,5	23,5	44,4	24,4	24,9	18,1	17,2	745	492	18
4,0	23,7	49,4	27,6	26,9	18,4	17,3			
4,5	23,6	53,5	31,0	28,8	18,6	17,3	745	492	18
5,0	23,9	56,8	34,2	30,7	19,0	17,3			
5,5	23,9	49,4	36,4	29,7	19,5	17,3	336	218	21
6,0	24,0	48,4	37,5	30,2	19,9	17,4			
6,5	23,2	41,6	37,6	29,5	20,3	17,4	45	29	37
7,0	23,3	38,0	36,4	29,2	20,8	17,5			
7,5	22,7	37,0	35,9	29,0	20,9	17,6	0	0	32
8,0	22,1	35,5	34,7	28,6	21,1	17,6			

Tabel 2.4. Resultater fra det dynamiske forsøg med solvæggen med varmelagring i hulrum.

3. TEORETISK MODEL FOR SOLVÆGGENE

I dette kapitel er der gengivet de teoretiske udtryk, der ligger til grund for beregning af transmissionen af solstråling gennem solvæggens dæklag og transporten af varme i solvæggen. De teoretiske udtryk er sammenlignet med målingerne.

3.1 Beregninger for solvæggen med silica aerogel

Det effektive transmissionsabsorptionsprodukt

Det effektive transmissionsabsorptionsprodukt $(\tau\alpha)_e$ er beregnet for den matsorte absorber og dæklagssystemet bestående af et lag 6 mm glas og et lag 22 mm Airglass. Der benyttes

$$(\tau\alpha)_e = 1,01 \cdot \tau \cdot \alpha$$

Absorptansen α er 0,96 ud fra en måling på den anvendte sorte maling. Transmittansen τ fås af transmittanserne og reflektanserne i begge polarisationsretninger for de to materialer på samme måde som beskrevet i [7]. τ er reduceret med 5% på grund af tilstedeværelsen af nettet. Ved udregning af glassets transmittans er benyttet brydningsindekset $n = 1,526$ og ekstinktionskoefficienten $K = 17 \text{ m}^{-1}$.

Forholdene ved transmission af solstråling er noget anderledes for silica aerogel end for glas. Refleksionstabet på grund af brydning i overfladerne er meget lille, da brydningsindekset med den aktuelle massefylde kun er 1,03 [8]. Der sker ikke nogen særlig absorption i materialet, til gengæld sker der et energitab ved spredning af strålingen [4]. På samme måde som ved bestemmelse af absorberet stråling kan den andel af strålingen, som spredes, beregnes ved hjælp af en ekstinktionskoefficient.

Partikeldiameteren for silica aerogel er omkring 100 Å, hvilket er meget mindre end bølgelængden for størstedelen af strålingen fra solen. Der er derfor tale om "Rayleigh spredning", hvilket betyder, at ekstinktionskoefficienten K_λ ved spredning af stråling med bølgelængden λ er proportional med λ^{-4} . Ud fra måleresultater i [8] regnes der med

$$K_\lambda \approx \frac{2,9}{\lambda^4} \cdot 10^{-24} \text{ m}^{-1}$$

Ud fra strålingens spektralfordeling haves den samlede ekstinktionskoefficient K . For direkte solstråling ved "air mass 2" fås:

$$K = 18 \text{ m}^{-1}$$

En del af den stråling, som spredes, vil ramme absorbereren, og en del vil blive kastet bagud gennem glasset. Der gøres nu den forenkling, at halvdelen af den spredte stråling fortsætter fremad i strålingsretningen, mens den anden halvdel reflekteres bagud mod glasset. Idet der gøres denne tilnærmelse, kan der tages hensyn til udnyttelsen af den spredte stråling mod absorbereren ved at regne med en "effektiv" ekstinktionskoefficient på

$$K' = \frac{1}{2}K = 9 \text{ m}^{-1}$$

Det teoretiske $(\tau\alpha)_e$ er vist på figur 3.1. Overensstemmelsen med måleresultaterne er ganske god.

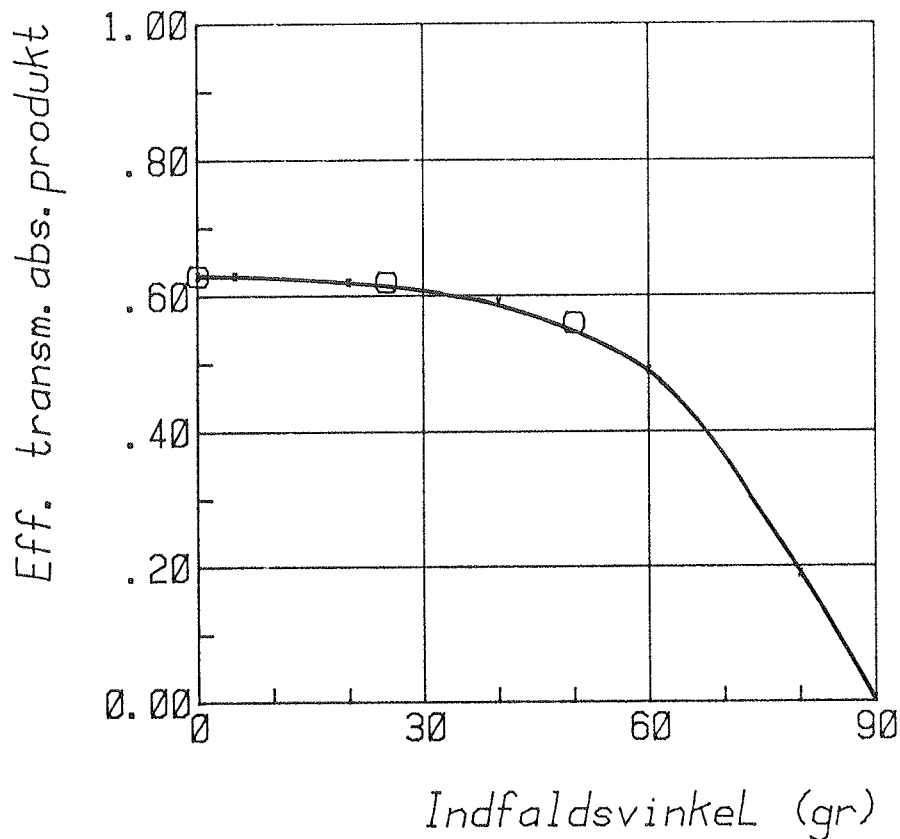


Fig. 3.1 Det effektive transmissionsabsorptionsprodukt for solvæggen med dæklag af silica aerogel. De beregnede værdier (kurven) er sammenlignet med de målte.

Varmetabskoefficienten for dæklagssystemet

Varmetabskoefficienten U_L findes af

$$U_L = \left[\frac{1}{\left[\frac{e}{\lambda_a} + \frac{1}{h_c + h_r} \right]^{-1} + U'_e} + \frac{1}{h_w + h'_r} \right]^{-1} + U''_e$$

Her er e og λ_a tykkelse og varmeledningsevne af Airglass-laget, h_c og h_r er varmeovergangstallene ved konvektion og stråling i hulrummet mellem glas og Airglass. U'_e er varmetabskoefficienten for "randtab" mellem absorber og glas. Disse omfatter varmetab gennem de isolerede

stålrammer, som Airglass stykkerne er anbragt i, og varmetabet på grund af luftcirkulation mellem absorber og glas. Luftcirkulationen skyldes spalter mellem Airglass og absorber. h_w og h'_r er varmeovergangstallene ved konvektion og stråling mellem glasset og de udendørs omgivelser. U_e er varmetabskoefficienten for randtab gennem trærammen rundt om dæklagssystemet. Alle de nævnte varmetabskoefficienter angives pr. m^2 af absorberen.

Ved bestemmelsen af λ_a antages det, at

$$\lambda_a = \lambda_r + \lambda_c$$

hvor λ_r er den del af varmeledningsevnen, der skyldes stråling gennem materialet, og λ_c er den del, der skyldes ledning gennem luften og selve materialet. I [9] er der for Airglass angivet $\lambda_a = 0,021 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$ ved atmosfærisk tryk og 20°C .

I flg. [10] varierer λ_r noget med temperaturen af de overflader, der udsender stråling, hvilket bl.a. skyldes, at materialets monokromatiske ekstinktionskoefficient (for absorption af stråling) er stærkt bølgelængdeafhængig. Med den aktuelle tykkelse af silica aerogel kan der tilnærmelsesvis ses bort fra indflydelsen af emitansen af overfladerne på de to sider af materialet, og λ_r kan bestemmes af

$$\lambda_r(T_r) = (16/3) \cdot n^2 \cdot \sigma \cdot T_r^3 / \bar{K}$$

hvor n er brydningsindekset, og σ er Stefan-Boltzman's konstant.

Ekstinktionskoefficienten $\bar{K}$ for den samlede stråling kan findes af

$$\bar{K} = 67 \cdot 10^6 \cdot \rho \cdot T_r^{-2,6}$$

hvor ρ er materialets massefylde.

Temperaturen T_r kan sættes til gennemsnittet af de absolute temperaturer af de to omgivende overflader.

Udtrykket for λ bliver med de gældende værdier af n og ρ

$$\lambda_r(T_r) = 0,30 \cdot 10^{-16} \cdot T_r^{5,6}$$

dvs. ved $T_r = 293 \text{ K}$ (20°C) have

$$\lambda_r = 0,002 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Ud fra den opgivne værdi for λ_a fås

$$\lambda_c = 0,021 - 0,002 = 0,019 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Der benyttes dermed flg. udtryk for Airglass'ens varmeledningsevne:

$$\lambda_a = 0,019 + 0,30 \cdot 10^{-16} \cdot T_r^{5,6}$$

Udtrykket giver f.eks., at λ_a stiger til 0,027, hvis T_r forøges til 373 K (100°C).

Med hensyn til U'_e gav en beregning, at varmetabskoefficienten for varmetab gennem de isolerede stålrammer er $0,16 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$. Varmetabskoefficienten på grund af luftcirkulation mellem luftspalten ved absorberen og luft hulrummet ved glasset blev også beregnet. Den vil variere meget alt efter spaltevvidden og forskellen mellem absorbertemperatur og glastemperatur. Med temperaturforskelle fra 0°C til 50°C og med en luftspalte på 1 mm vil den være mellem 0 og $0,01 \text{ W/(m}^2^\circ\text{C)}$, mens den for en spaltevidde på 3 mm vil være mellem 0 og $0,40 \text{ W/(m}^2^\circ\text{C)}$.

Det antages, at der kan regnes med en gennemsnitlig værdi for U_e' på $0,3 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

En beregning gav $U_e'' = 0,1 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

De forskellige "almindelige" varmeovergangstal ved stråling og konvektion, der indgår i udtrykket for U_L , bestemmes som angivet i [3].

U_L er vist på figur 3.2. Der er regnet med en vindhastighed på 4 m/s , og udelufttemperaturen er sat til 10°C . Også her er der tale om en god overensstemmelse mellem målinger og beregninger. Endvidere er vist den værdi for U_L , der kunne opnås, såfremt det var muligt at undgå de randtab, der repræsenteres ved U_e' .

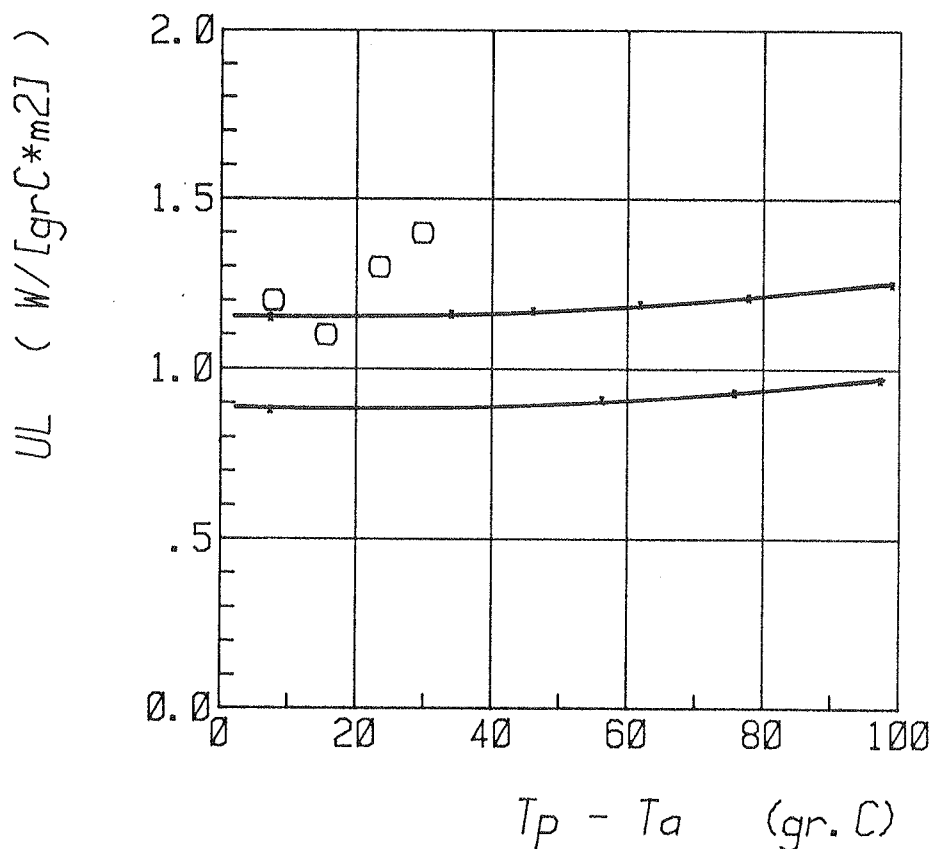


Fig. 3.2 Varmetabskoefficienten U_L for solvæggen med dæklag af silica aerogel. De målte værdier er markeret med cirkler. Kurverne viser de teoretiske værdier med og uden randtabskoefficienten U_e'' .

Det skal nævnes, at der kan opnås en betydeligt lavere værdi for U_L , såfremt der skabes mulighed for evakuering af silica aerogelen.

Øvrige egenskaber

Varmeoverføringskoefficienten ved stråling og konvektion fra væggen bagside til rummet beregnes på normal vis.

Varmeoverføringskoefficienter mellem netpunkter i og på muren bestemmes som forholdet mellem murens varmeledningsevne og afstanden mellem netpunkterne.

Varmekapaciteten for hvert af de lag, muren er opdelt i, fås som produktet af lagets tykkelse og $\rho \cdot c_p$.

Gennemsnittet af den målte λ_m er $2,0 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Dette er noget højere end de $1,6 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, som den praktiske varmeledningsevne for beton kan sættes til ifølge [11], idet betonen normalt forudsættes at have rumvægten 2300 kg/m^3 i tør tilstand og fugtindholdet antages at være 2-5 vægt%. Afvigelsen kan skyldes ubestemtheden på målingen, og den kan skyldes, at betonen ikke har været i tør tilstand, hvormed der kan have været tale om en varmetransport ved fordampning og diffusion af fugt.

Den målte værdi af $\rho \cdot c_p$ på $1,6 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3^\circ\text{C}$ er samtidig lavere end den værdi $2,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3^\circ\text{C}$, der svarer til den førnævnte rumvægt og den teoretiske varmfylde $960 \text{ J/m}^3^\circ\text{C}$ [6]. Størstedelen af afvigelsen kan skyldes måleubestemthed.

Beregning af forløb med opvarmning og afkøling af væggen

Der blev foretaget en beregning af det opvarmnings- og afkølingsforløb, som blev udført ved det dynamiske forsøg med solvæggen. Der blev benyttet det samme EDB-program,

som anvendes til beregningen af udbyttet fra solvæggen som beskrevet i det følgende kapitel. Der sker en beregning af temperaturer og varmestrømme time for time, idet der benyttes de værdier, der ved det dynamiske forsøg er målt for solbestrålingsstyrken, vindhastigheden, temperaturen foran væggen og temperaturen i den varme boks.

I EDB-programmet er benyttet de teoretiske udtryk for varmeoverføringskoefficienter og optiske egenskaber. De målte værdier for λ_m og $\rho \cdot c_p$ ligger som nævnt i forrige afsnit langt fra de tabelværdier, der normalt benyttes. Ved en beregning, hvor de målte værdier blev benyttet, skete varmeafgivelsen fra bagsiden af solvæggen alt for hurtigt i forhold til det målte. Den sandsynlige forklaring herpå er, at de virkelige værdier for λ_m og $\rho \cdot c_p$ har været tættere på tabelværdien. Det blev derfor valgt at sætte $\lambda_m = 1,8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ og $\rho = 2,0 \text{ J/m}^3\text{C}$, der ligger tæt på tabelværdierne, samtidig med at de ligger inden for ubestemthedsintervallet for måleresultatet. Hermed viste der sig at være en rimelig god overensstemmelse mellem målinger og beregninger, hvormed den teoretiske model i det store og hele kunne accepteres.

På figur 3.3 er vist de beregnede og målte temperaturer. Den (for hver hele time) beregnede absorbertemperatur afviger $0\text{--}2^\circ\text{C}$ fra den målte værdi. For temperaturen på murens bagside er der tale om afvigelser på under $0,3^\circ\text{C}$. I løbet af de otte timer afgives der ifølge beregningerne 230 Wh pr. m^2 absorber fra murens bagside, hvilket er 8% mindre end den samlede målte varmeafgivelse.

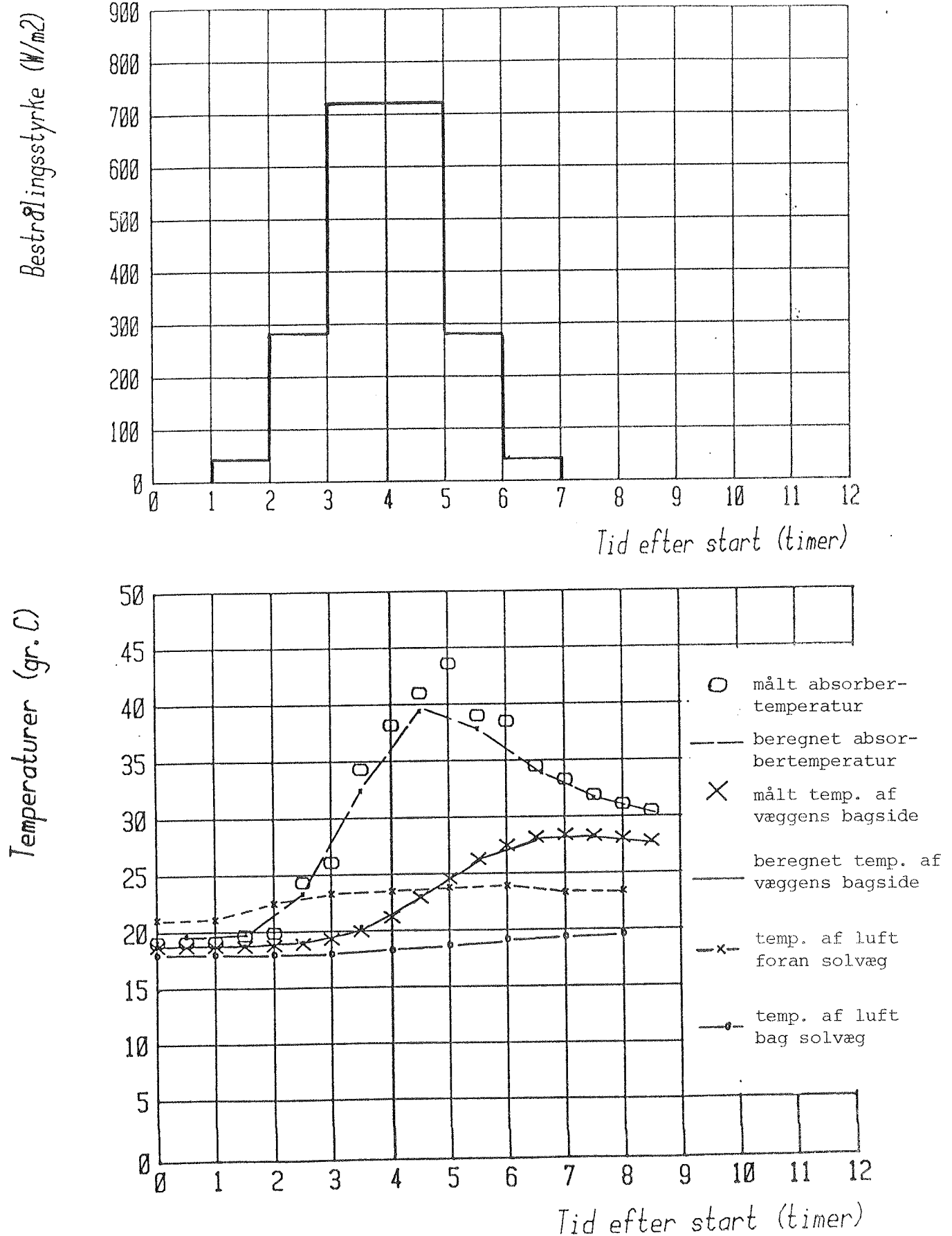


Fig. 3.3 Forløb med dynamiske forhold i tilfælde af opvarmning og afkøling af solvæggen med silica aerogel. Øverst: Variation af solbestrølingsstyrken på væggen. Nederst: Variation af diverse temperaturer.

3.2. Beregninger for solvæggen med varmelagring i hulmur

Det effektive transmissionsabsorptionsprodukt

For to stk. 4 mm glas og den benyttede matsorte absorber fås $(\tau\alpha)_e$ af

$$(\tau\alpha)_e = 1,02 \cdot \tau \cdot \alpha$$

I følge en måling haves $\alpha = 0,95$. τ beregnes som angivet i [6]. Der benyttes $n = 1,526$ og $K = 27 \text{ m}^{-1}$ for glasset.

De beregnede og målte værdier af $(\tau\alpha)_e$ er vist på figur 3.4. Der ses at være en fin overensstemmelse.

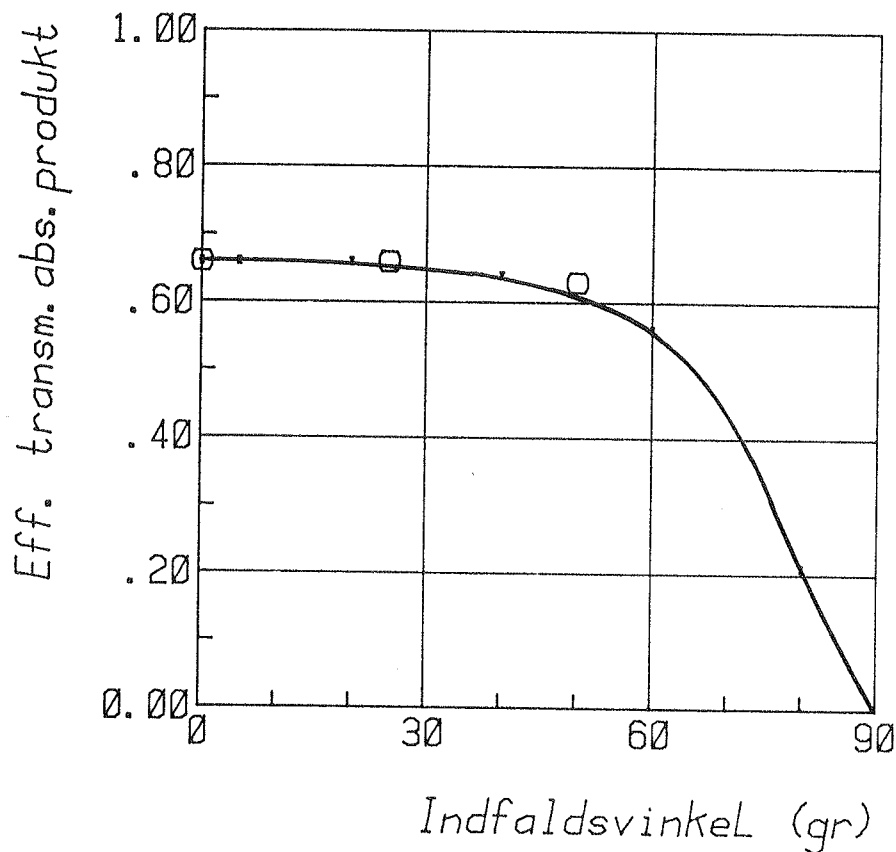


Fig. 3.4 Det effektive transmissionsabsorptionsprodukt for solvæggen med varmelagring i hulmur. De teoretiske værdier (kurven) er sammenlignet med de målte.

Varmetabskoefficienten for dæklagssystemet

Varmetabskoefficienten fra absorberen til det fri bestemmes på to forskellige måder, alt efter om der er tale om varmetransport ved luftcirkulation gennem hulmuren eller ej.

I tilfælde af, at der ikke er luftcirkulation, haves

$$U_L = \left[\frac{1}{h_{c1} + h_{r1}} + \frac{1}{h_{c2} + h_{r2}} + \frac{1}{h_w + h'_r} \right]^{-1} + U_e$$

h_{c1} og h_{r1} er varmeovergangstallene ved konvektion og stråling mellem absorberen og det inderste lag glas.

h_{c2} og h_{r2} er de tilsvarende størrelser for hulrummet mellem de to lag glas. h_w og h'_r er varmeovergangstallene mellem det yderste lag glas og omgivelserne. Bestemmelsen af varmeovergangstallene sker som vist i [3].

U_e omfatter varmetabet gennem den aluminiumsramme, som fastholder de to lag glas, og varmetabet gennem trærammen mellem glaspanelet og muren. En beregning gav $U_e = 1,0 \text{ W/(m}^2\text{°C)}$.

I tilfælde af, at der er luftcirkulation på grund af solstråling, kan det vises, at U_L bliver

$$U_L = \frac{U_t \cdot (h_c + 2 \cdot h_{r1})}{2 \cdot h_{r1} + U_t + h_c} + U_e$$

hvor

$$U_t = \left[\frac{1}{h_{c2} + h_{r2}} + \frac{1}{h_w + h'_r} \right]^{-1}$$

h_c er varmeovergangstallet ved konvektion fra absorber eller glas til den cirkulerende luft. h_c beregnes ud fra [7]:

$$h_c = Nu \cdot \frac{\lambda}{D_h} \quad \text{med}$$

$$Nu = 5,4 + \frac{0,00190 (Re \cdot Pr \cdot D_h / L)^{1,71}}{1 + 0,00563 (Re \cdot Pr \cdot D_h / L)^{1,17}}$$

hvor λ er luftens varmeledningsevne, D_h er kanalens hydrauliske diameter, Re er Reynold tallet, Pr er Prandtl tallet, og L er kanalens længde.

U_L er afbildet for de to tilfælde på figur 3.5. Der er regnet med en vindhastighed på 4 m/s, og h_c er sat til 3 W/m² °C, hvilket er en typisk forekommende værdi. Udelufttemperaturen er sat til 10°C. Beregningerne stemmer udmærket overens med måleresultaterne, der gælder for situationen uden varmetransport ved luftcirkulation gennem hulmuren.

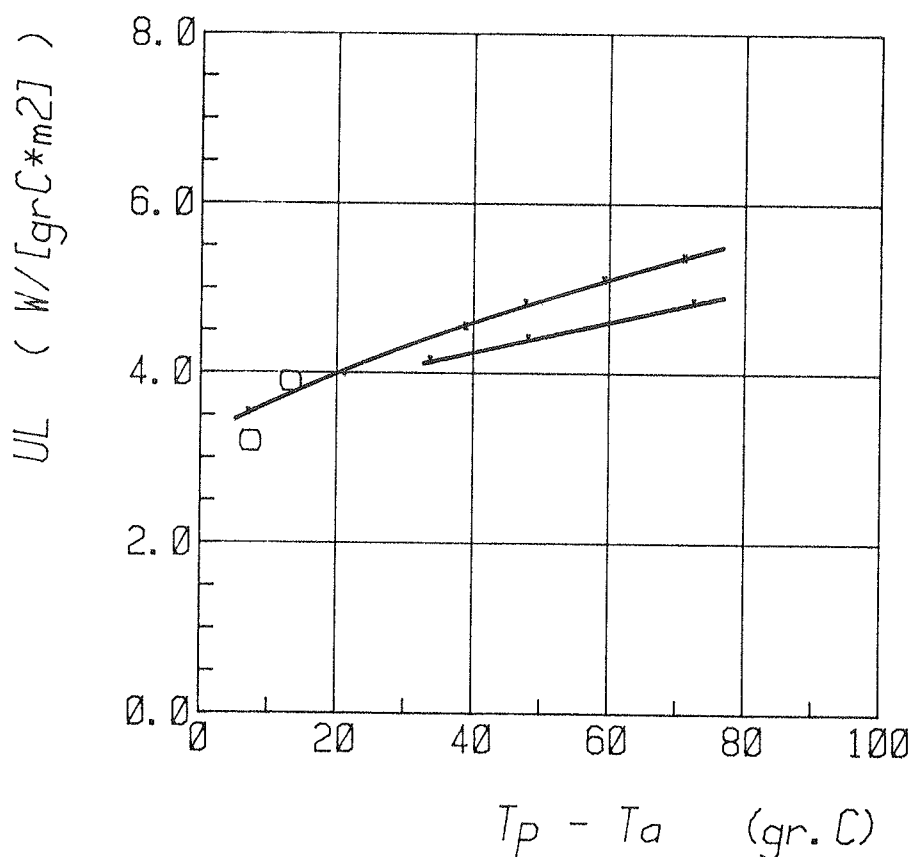


Fig. 3.5 Varmetabskoefficienten U_L for solvæggen med varmelagring i hulmur. Nederste og øverste kurve viser den teoretiske værdi for tilfælde med og uden luftcirkulation. Også måleresultaterne er vist.

Varmeoverføringskoefficienten mellem absorberen og overfladerne af hulrummet i muren

Den samlede effekt q_u , der overføres fra absorberen til overfladerne af hulrummet i muren ved luftcirkulation kan udtrykkes som

$$q_u = U_{p-s} \cdot (T_p - T_s)$$

hvor T_p er middelabsorbertemperaturen, og T_s er middeltemperaturen af muroverfladerne. Varmeoverføringskoefficienten U_{p-s} kan skrives

$$U_{p-s} = \left[\frac{1 - F' \cdot F''}{F' \cdot F'' \cdot U_L} + \frac{1}{\dot{m} \cdot c_p \cdot (\exp(A_s \cdot h_c / \dot{m} \cdot c_p) - 1)} \right]^{-1}$$

F' er solfangereffektivitetsfaktoren, F'' er flowfaktoren, $\dot{m}$ er massestrømmen pr. m^2 absorber, c_p er luftens varmekapacitet, A_s er forholdet mellem arealet af hulrummets overflader og absorberarealet, og h_c er det konvektive varmeovergangstal fra luften til overfladerne.

De forskellige forudsætninger, som danner baggrund for udtrykket samt metoden til beregning af massestrømmen, er forklaret i [3]. Endvidere er benyttet den forudsætning, at den effekt, der ledes ind i muren, er konstant for hele absorberarealet. Dermed indgår F' og F'' på sædvanlig vis i beregningerne. F' og F'' er iflg. [7]:

$$F' = \frac{2 \cdot h_r \cdot h_c + h_c \cdot U_t + h_c^2}{(U_t + h_r + h_c) \cdot (h_r + h_c) - h_r^2}$$

$$F'' = \frac{\dot{m} \cdot c_p}{U_L \cdot F'} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot c_p}\right) \right]$$

U_{p-s} viser sig at være omkring $1,2 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, hvilket er ret beskedent, dvs. der overføres ikke særlig megen varme ved luftcirkulationen. At varmeoverføringskoefficienten er

så lav hænger sammen med, at den varmeafgivende overflade (absorberen) ikke er placeret lavere end den varmeoptagende overflade (hulrummets sider). Dermed bliver det naturlige drivtryk ikke særlig stort, og massestrøm og lufthastighed er beskedne. Beregningerne viste, at middellufthastigheden ved absorberen og i hulmuren typisk vil være henholdsvis 0,20-0,30 m/s og 0,10-0,15 m/s. Der er ikke foretaget nogen sammenligning med måleresultater, da det ikke var muligt at foretage en eksperimentel bestemmelse af U_{p-s} ved måling på solvæggen.

q_u skal opdeles i den del, som overføres til den udvendige vange, og den del, som overføres til den indvendige vange. I beregningerne sker der som vist på det termiske netværk (fig. 2.8) en opdeling ved indlæggelse af et netpunkt for middellufttemperaturen i hulrummet og netpunkter for mid- deltemperaturerne af overfladerne på hver side af hulrummet. Idet symbolerne refererer til det termiske netværk, haves:

$$U_{p-f} = \left[\frac{1}{U_{p-s}} - \frac{1}{A_s \cdot h_c} \right]^{-1}$$

$$U_{f-s1} = \frac{1}{2} \cdot A_s \cdot h_c$$

$$U_{f-s2} = \frac{1}{2} \cdot A_s \cdot h_c$$

Øvrige egenskaber

Varmeoverføringskoefficienten ved stråling mellem overfladerne på de to sider af hulrummet udregnes på normal vis. Der gælder i øvrigt de samme bemærkninger, som blev anført for solvæggen med silica aerogel vedrørende bestemmelsen af varmeoverføringskoefficienter og varmekapaciteter for netpunkter i muren.

Den målte værdi af λ_m på 0,89 W/m°C er en del højere, end hvad der forventes ved den fundne massefylde på 1780 kg/m³. Ifølge [11] kan forventes $\lambda_m = 0,67$ W/m°C, såfremt forholdene er som for indvendigt murværk med et fugtindhold på 0,5 vægt%. At den målte λ_m er større, kan skyldes de samme forhold, som tidligere er nævnt for betonmurens varmeledningsevne. Endelig er det muligt, at der i virkeligheden er målt en korrekt værdi, og at afvigelsen fra værdien i [11] skyldes, at der er tale om to forskellige teglsten med hver sine egenskaber.

Beregning af forløb med opvarmning og afkøling af væggen

Beregningen af forløbet ved det dynamiske forsøg foregik som beskrevet for solvæggen med silica aerogel. Der blev benyttet de teoretiske udtryk for varmeoverføringskoefficienter og optiske egenskaber. Endvidere blev benyttet måleresultaterne for murens materialeegenskaber.

De beregnede og målte temperaturer er vist på figur 3.6. Afvigelsen mellem den målte og den beregnede absorbertemperatur er på 0-2°C. For temperaturen på murens bagside var afvigelsen 0-0,6°C. Varmeafgivelsen fra murens bagside i løbet af de otte timer beregnes til 101 Wh pr. m² absorber. Dette er 28% mindre end den målte varmeafgivelse. Forskellen kan skyldes ubestemtheden på målingerne, som er ret stor i sammenligning med den beskedne varmestrøm fra solvæggen. Ubestemtheden skyldes navnlig variationen af temperaturen i den varme boks. Det besluttedes herefter at acceptere den samlede teoretiske model til beskrivelse af solvæggen.

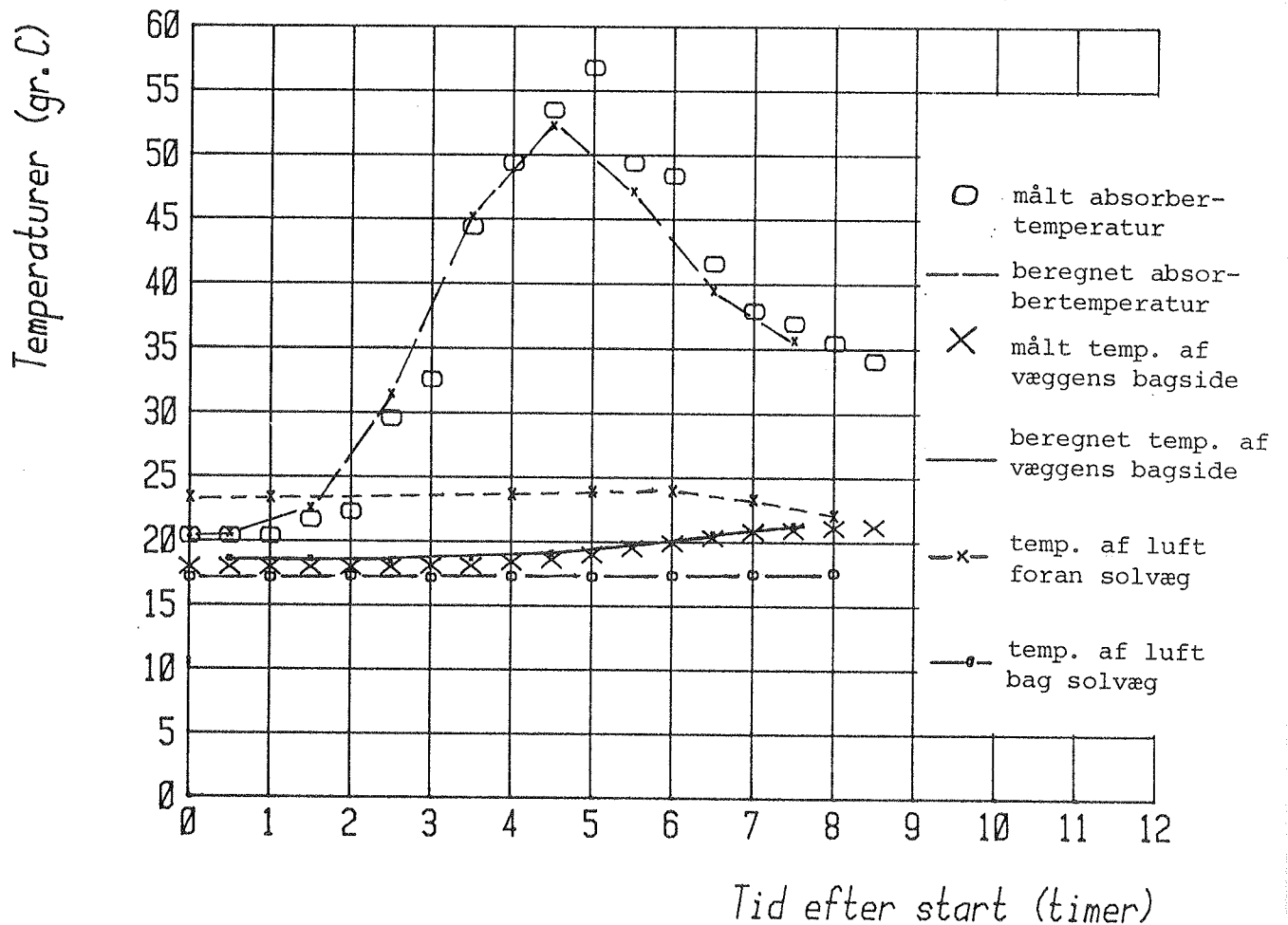
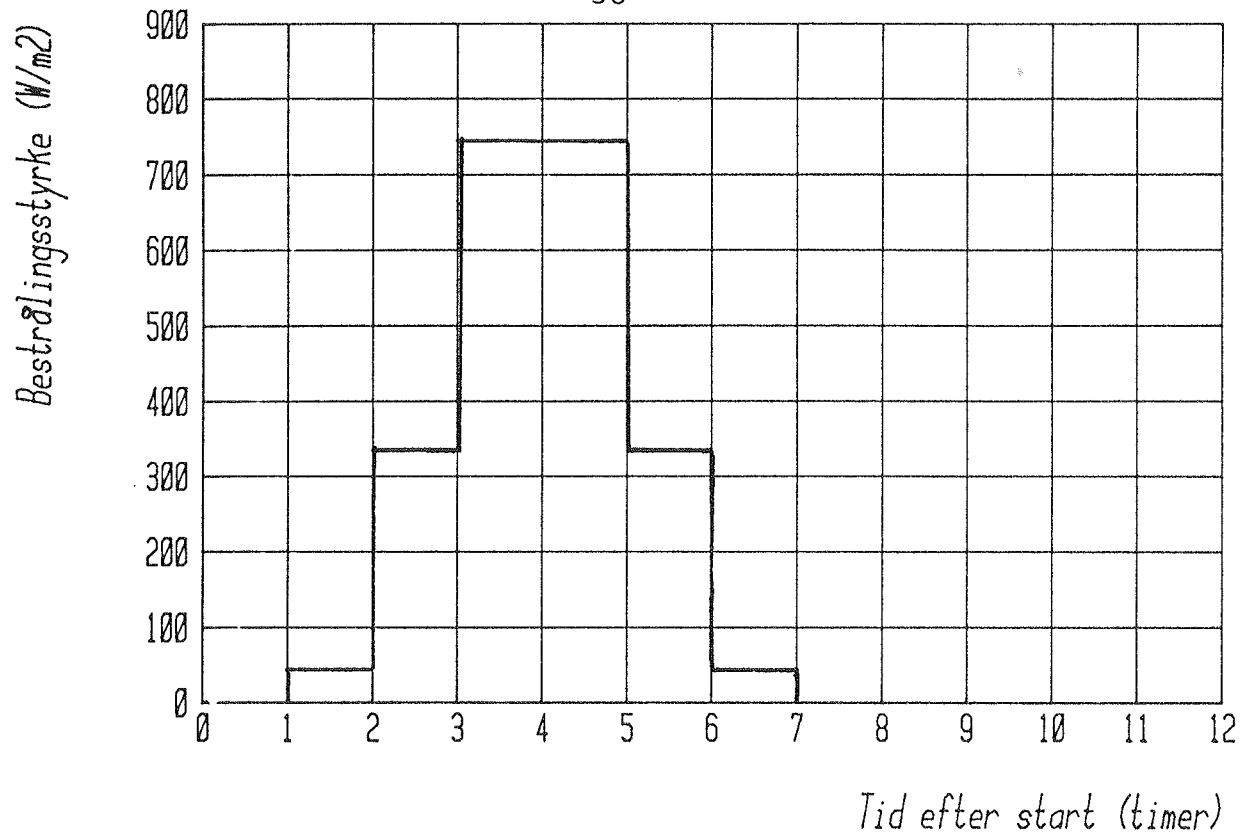


Fig. 3.6 Forløb med dynamiske forhold i tilfælde af opvarmning og afkøling af solvæggen med varmelagring i hulmur. Øverst: variation af solbestrålingsstyrken på væggen. Nederst: variation af diverse temperaturer.

4. BEREGNING AF UDBYTTET FRA SOLVÆGGENE

Kapitlet omhandler de EDB-beregninger, som er blevet udført til beregning af udbyttet fra de to solvægge. Sammenhængen mellem udbyttet og forskellige parametre vedr. udformningen af solvæggen og den øvrige bygning er blevet undersøgt.

4.1 Generelt

EDB-modellen

Beregningerne foretages ved hjælp af en termisk netværksmodel, der omfatter solvæggen, den øvrige del af bygningen samt den indendørs og udendørs luft. De forskellige variable temperaturer, som indgår i modellen, findes ved løsning af et ligningssystem, der er opstillet på grundlag af varmebalancer for de enkelte netpunkter. Dette gøres for hver time i året, idet der benyttes udendørs klimadata svarende til det danske referenceår TRY [12]. Beregningerne udføres ved hjælp af et EDB-program som beskrevet i [3]. EDB-programmet er udviklet på grundlag af det amerikanske program PASOLE [13].

Bygningsbeskrivelse

Det er tanken, at solvæggene skal kunne anvendes i såvel eksisterende byggeri som nybyggeri. Til brug for beregningerne defineres derfor to forskellige boliger: en lejlighed med bruttoetageareal 70 m^2 og et nyt enfamiliehus med bruttoetageareal 140 m^2 .

For at kunne sammenligne solvæggens ydelse (pr. m^2 af solvæggens absorber) for disse to boliger er de enkelte parametre, der beskriver de to bygninger, så vidt muligt valgt, så de har den samme værdi i forhold til boligens bruttoetageareal. Den sydvendte solvægs absorberareal er således i begge tilfælde 10% af bruttoetagearealet. Vinduesarealet er 15% af bruttoetagearealet. 60% af vinduesarealet forudsættes at

vende mod syd, mens 40% vender mod nord. Der er to lag glas i vinduerne, og den transparente del udgør 70% af det samlede vinduesareal. Der regnes med skygge fra tagudhæng på samme måde som i [3]. Begge bygningers varmetabskoefficient for varmetab til omgivelserne er $1,5 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$ i forhold til bruttoetagearealet. Denne værdi inkluderer varmetabet gennem den del af den almindelige ydervæg, som solvæggen erstatter. De forskellige karakteristiske værdier for boligerne er vist i tabel 4.1.

	Lejlighed i eksisterende byggeri	Nyt enfamiliehus
Bruttoetageareal	70 m ²	140 m ²
Areal af solvægs absorber	7 m ²	14 m ²
Sydvendte vinduer: samlet areal	6,3 m ²	12,6 m ²
transparent areal	4,41 m ²	8,82 m ²
Nordvendte vinduer: samlet areal	4,2 m ²	8,4 m ²
transparent areal	2,94 m ²	5,88 m ²
Samlet varmetabskoefficient til omgivelser (alm. facade i stedet for solvæg)	105 W/°C	210 W/°C
Overfladeareal af termisk masse i form af 0,10 m tyk teglstensmur	84 m ²	168 m ²
Tilskud af gratisvarme fra el og personer	9100 Wh/døgn	18200 Wh/døgn
Nedre grænse for rumtemp. dag/nat	20°C/17°C	20°C/17°C
Øvre grænse for rumtemp.	24°C	24°C

Tabel 4.1. Karakteristiske parametre for de to boliger.

Det termiske netværk, som beskriver begge boliger, er vist på figur 4.1. Som det ses, regnes det indvendige af bygningen som værende én zone med den samme rumlufttemperatur. Den termiske masse i bygningen ækvivaleres med en indvendig mur, der består af 0,10 m tegl og har et overfladeareal på $1,2 \text{ m}^2$ pr. m^2 af bruttoetagearealet. Dette svarer til en typisk værdi for den samlede varmekapacitet af de varmeakkumulerende masser i en "middeltung" bygning, hvor en del skille vægge og den indvendige del af ydermuren er udført af tegl.

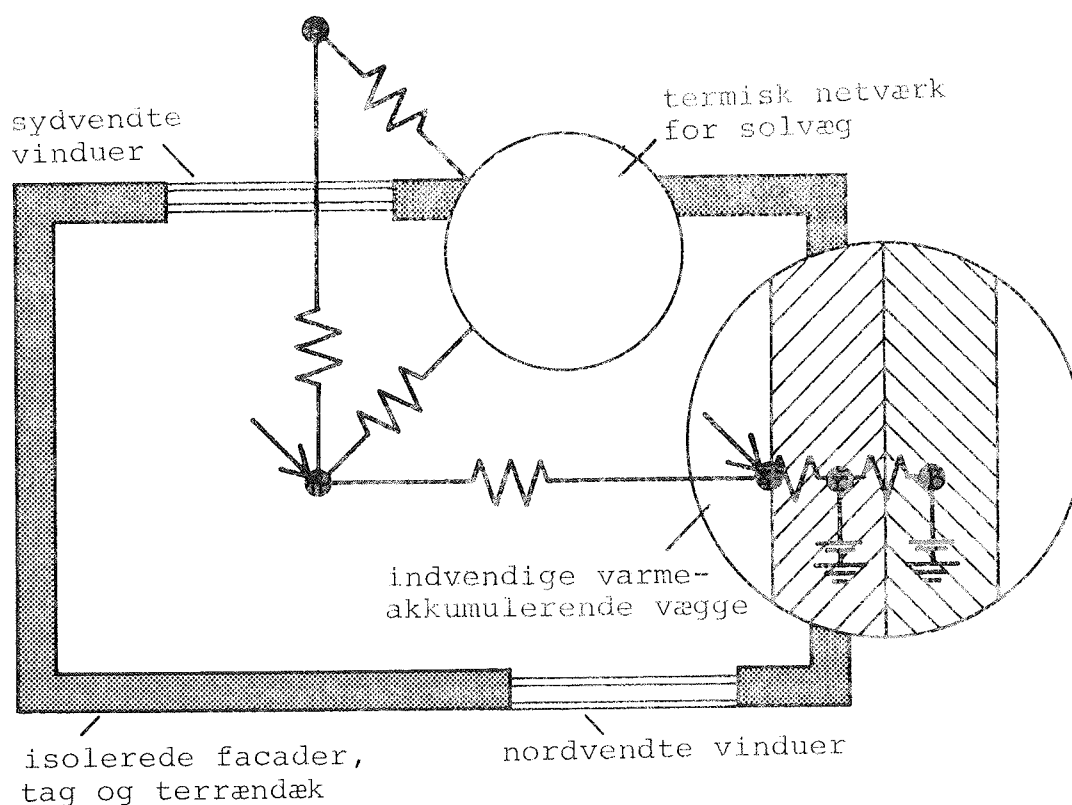


Fig. 4.1 Termisk netværksmodel af bygning med solvæg. Det termiske netværk for solvæggen er som vist på fig. 2.7 og fig. 2.8.

Gratisvarmen fra personer, belysning og elektriske apparater sættes til 18.200 Wh pr. døgn for enfamiliehuset ud fra de timeværdier, der er angivet i [14]. For den langt mindre lejlighed tænkes beboerantal og energi til belysning at være det halve. Antal og drifttid af elektriske apparater vil også være mindre i dette tilfælde. Som en rimelig antagelse sættes gratisvarmetilskuddet, således til det halve af værdien for enfamiliehuset, d.v.s.

9.100 Wh pr. døgn. For begge boliger haves altså et tilskud på 130 Wh/m^2 pr. døgn i forhold til bruttoetagearealet.

Rumlufttemperaturens minimumsværdi sættes til 20°C om dagen og 17°C om natten, idet natsænkningen er i funktion mellem kl. 11 om aftenen og kl. 7 om morgenen. Den maksimale værdi er 24°C , og hvis den overskrides, ventileres der med udeluft, forudsat udeluftens temperatur er lavere end rumluftens temperatur.

Beregning af energiforbrug for bygninger uden solvæg

Til at starte med er energiforbruget til rumopvarmning beregnet for hver af de to boliger, idet der ikke er benyttet nogen solvæg. I stedet er der tale om en almindelig muret ydervæg. For den eksisterende bygning er der tale om en 35 cm massiv mur eller en 35 cm hulmur som den, der er benyttet ved forsøgene. I begge tilfælde er U-værdien $1,5 \text{ W/m}^2\text{C}$. For det ny enfamiliehus er der tale om en 35 cm isoleret hulmur med k-værdien $0,35 \text{ W/m}^2\text{C}$. Ved beregningerne tages der hensyn til den solstråling, som absorberes på ydermurens udvendige overflade. De årlige værdier for energiforbruget til rumopvarmning og behovet for køling ved ventilation med udeluft er vist i tabel 4.2.

Bygning	Sydfacade	Q_v	Q_k
70 m ² lejlighed i eks. byggeri	35 cm massiv mur	5158 kWh/år	414 kWh/år
	35 cm uisoleret hulmur	5155 kWh/år	420 kWh/år
140 m ² nyt enfamiliehus	35 isoleret hulmur	10492 kWh/år	743 kWh/år

Tabel 4.2. Energiforbrug til rumopvarmning Q_v og behovet for køling Q_k for de to boliger.

Beregning af energibesparelse m.v.

I det følgende er angivet resultaterne fra beregningerne af den årlige energibesparelse og det årlige kølebehov i tilfælde af, at der benyttes en af de undersøgte solvægge. Energibesparelsen fås som forskellen mellem energiforbruget til rumopvarmning for bygningerne med og uden solvæg. Endvidere angives det årlige udbytte pr. m² af solvæggen. Det er den årlige energibesparelse delt med solvæggens absorberareal.

4.2 Årsberegninger for solvæggen med silica aerogel

4.2.1 Energibesparelse og kølebehov

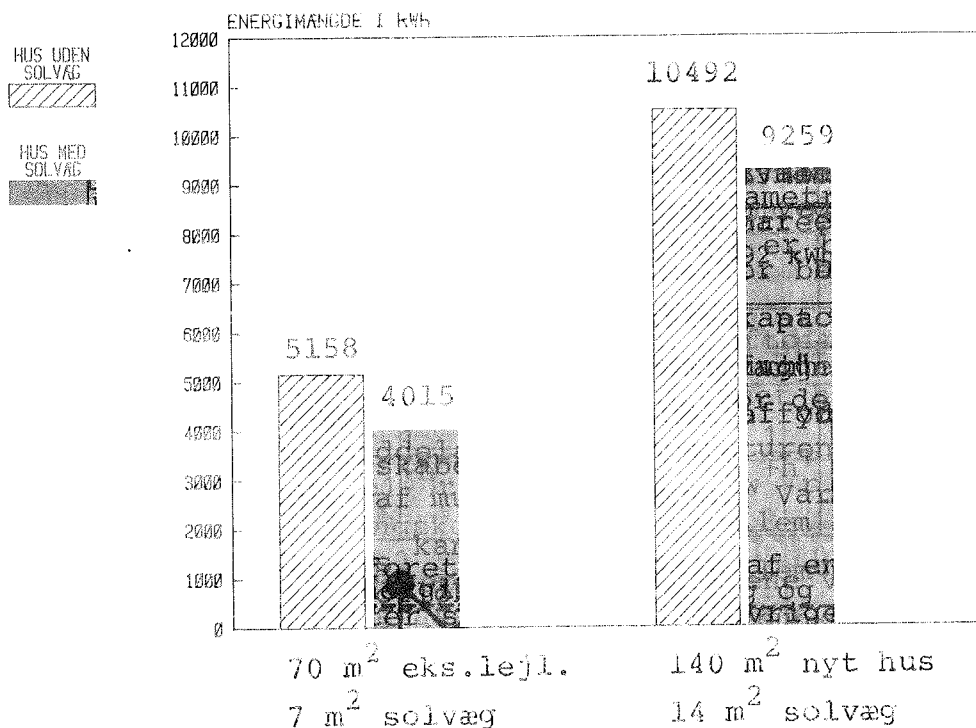
For såvel den ny som den eksisterende bygning tænkes den massive del af solvæggen at bestå af en 35 cm tyk teglstensmur. Alle forhold vedr. dæklagssystemet er som for den solvæg, der blev opbygget til forsøgene. Resultaterne for energiforbrug til rumopvarmning og kølebehov for de to bygningstyper er afbildet på figur 4.2. Værdierne for den årlige energibesparelse og det årlige udbytte er angivet i tabel 4.3.

Den relative energibesparelse, dvs. energibesparelsen i forhold til energiforbruget til rumopvarmning for bygningen uden solvæg, er 12% for den ny bygning og 22% for den eksisterende bygning. Den langt større besparelse i det sidste tilfælde skyldes medregningen af det meget store varmetab for den uisolerede facade. I begge tilfælde sker der omtrent en fordobling af behovet for køling af rumluften.

Bygningstype	140 m ² nyt enfamiliehus	70 m ² lejlighed i eksist. byggeri
Energibesparelse	1233 kWh/år	1143 kWh/år
Relativ energibesp.	11,8%	22,2%
Udbytte pr. m ² absorber	88 kWh/m ² /år	163 kWh/m ² /år
Forhold mellem udbytte og solindfald på glasset	10,8%	20,0%

Tabel 4.3. Resultater fra årsberegningerne for solvæggen med silica aerogel.

ENERGIBEHOV TIL RUMOPVARMNING



BEHOV FOR KØLING AF RUMLUFT

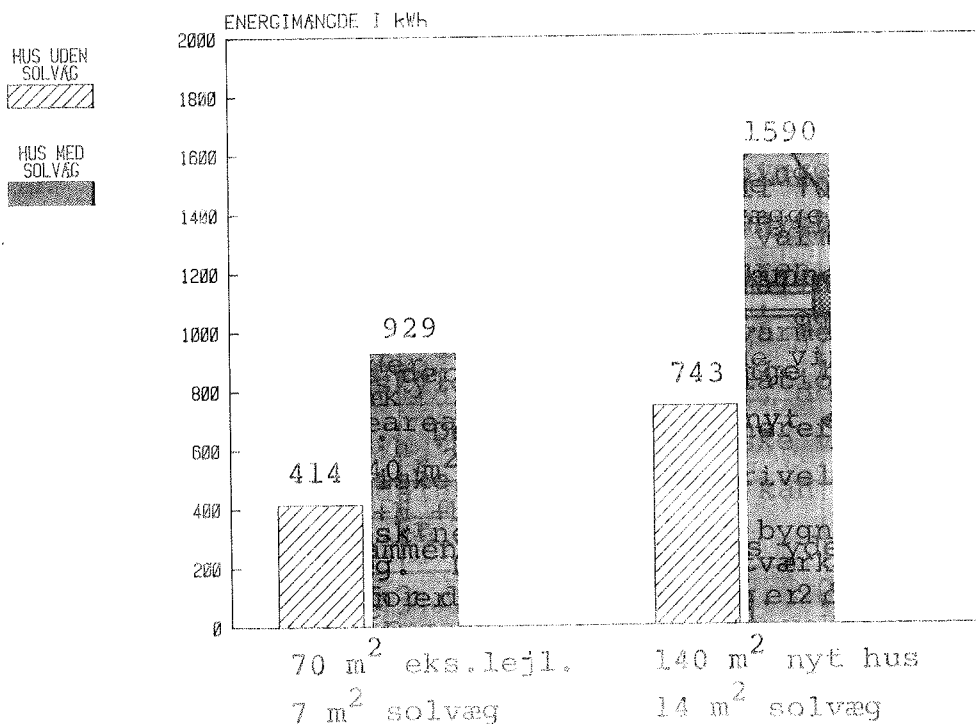


Fig. 4.2 Resultater fra årsberegningerne for solvæggen med silica aerogel.

4.2.2 Parametervariationer

Variation af bygningsparametre

For at undersøge i hvor høj grad resultaterne er afhængige af forudsætningerne vedrørende selve bygningen, blev der foretaget en del beregninger, hvor disse forudsætninger blev ændret enkeltvis. Beregningerne blev udført for det nye enfamiliehus, og resultaterne er samlet i tabel 4.4.

Parameterændring	Udbytte fra solvæg	Forøgelse af udbytte	Relativ forøgelse af udbytte
	kWh/m ² /år	kWh/m ² /år	%
Alle parametre har "referenceværdier"	88	-	-
Varmetabskoeff. fra bygn. til omgivelser:			
forøgelse med 1/3 af ref.værdi	111	+23	+26
reduktion med 1/3 af ref.værdi	59	-29	-33
Vinduesarealet:			
forøgelse med 1/3 af ref.værdi	69	-19	-22
reduktion med 1/3 af ref.værdi	98	+10	+11
Termisk masse:			
indvendige vægge af gasbeton	90	+2	+2
indvendige vægge af beton	89	+1	+1
Orientering:			
facade med solvæg mod vest	24	-64	-73
facade med solvæg mod sydvest	62	-26	-30
Ingen natsenkning af rumtemp., dvs.minimumsværdi er 20°C døgnet rundt	98	+10	+11
Gratisvarme fra el og pers.: reduktion med 1/3 af ref.værdi	100	+12	+14

Tabel 4.4. Variation af de parametre, der beskriver det ny enfamiliehus.

Det ses, at udbyttet varierer særdeles meget med bygningens varmetabskoefficient. Mængden af gratisvarme fra solindfald og fra el og personer er også af stor betydning. Der vil kunne opnås et noget højere udbytte, såfremt der ikke benyttes natsækning af rumlufttemperaturen. Derimod er udbyttet fra denne type solvæg stort set uafhængigt af omfanget af den termiske masse i bygningens rum. Det er åbenbart vigtigt, at solvæggen vender mod syd, hvis der skal opnås et højt udbytte. For en vestvendt solvæg vil det langt lavere solindfald i vinterhalvåret give et udbytte, som kun er 27% af udbyttet fra den sydvendte solvæg.

Betydning af solvægareal

For det ny enfamiliehus blev det undersøgt, hvordan energibesparelsen ændrer sig, hvis den del af sydfacaden, der udføres som solvæg, forøges eller formindskes. Resultaterne er vist i tabel 4.5. Det ses, at udbyttet kun er svagt faldende ved en forøgelse af arealet.

Absorberareal	Udbytte pr. m ² absorber	Relativ energi- besparelse
	kWh/m ² /år	%
7 m ²	89	5,9
14 m ²	88	11,7
21 m ²	83	16,6

Tabel 4.5. Sammenhæng mellem energi-
besparelse og absorberareal
for enfamiliehuset.

Forbedring af murens egenskaber

Såfremt der i tilfældet med det ny enfamiliehus benyttes en 25 cm betonmur i stedet for den 35 cm tykke teglstensmur fås, at udbyttet forøges til $102 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$. Med den forbedrede varmeledning gennem muren (og en uformindsket varmekapacitet) opnås altså en klar forbedring af udbyttet.

Såfremt der vælges en 15 cm tyk betonvæg som ved målingerne, vil udbyttet blive mindre. Dette skyldes den forringede varmekapacitet og et kortere tidsinterval mellem solindfald og varmeafgivelse fra væggen bagside.

Forbedret montering af Airglass stykker

Tilstedeværelsen af de rammer, hvori Airglass stykkerne er monteret, og diverse luftspalter mellem og bag ved stykkerne medfører en betydelig forøgelse af varmetabskoefficienten gennem dæklaget. Endvidere bliver det effektive transmissionsabsorptionsprodukt forringet på grund af det net, som fastholder stykkerne. Det er undersøgt, hvor stor en forbedring af udbyttet der kan opnås, hvis silica aerogelen bliver monteret på en måde, så man undgår de ovennævnte tab. Beregningerne gav, at udbyttet for det ny enfamiliehus vil blive forøget til $113 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$. For den eksisterende bolig vil udbyttet blive forøget til $187 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$.

Variation af tykkelse af silica aerogel laget

Det antages nu, at silica aerogelen er monteret, så de ovennævnte tab undgås. Endvidere benyttes der for det ny enfamiliehus en 0,25 m tyk betonmur i stedet for teglstensmuren. For hver af de to bygninger er tykkelsen af aerogel laget herefter varieret. Resultaterne er vist på figur 4.3.

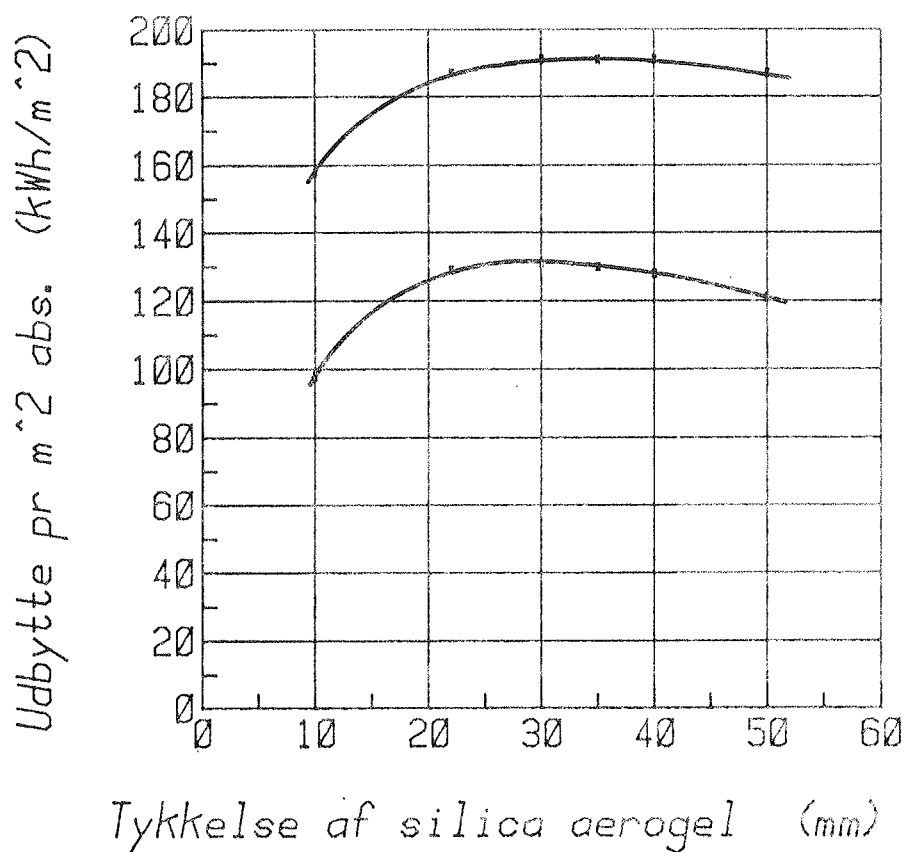


Fig. 4.3 Variation af tykkelsen af silica aerogel laget for den eksisterende bygning (øverst) og den ny bygning (nederst).

Det viser sig, at der i begge tilfælde fås det største udbytte med mellem 20 og 40 mm silica aerogel. For mindre tykkelser bliver varmetabskoefficienten gennem dæklaget for stor, og for større tykkelser er de optiske tab for store på grund af spredning i materialet. Der opnås i bedste fald et udbytte på 131 kWh/m²/år i tilfældet med den ny bygning og 191 kWh/m²/år i tilfældet med den eksisterende bygning.

Forøget transmittans af silica aerogel og glas

Som forklaret i kapitel 3 er den "effektive" ekstinktionskoefficient for spredning af solstråling i silica aerogel sat til 9 m⁻¹. Dette gav overensstemmelse med de foretagne målinger af transmittansen. Andre målinger på prøver af Airglass på Lab. for Varmeisolering viser, at

ekstinktionskoefficienten kan være mindre. Det antages nu, at silica aerogelen er af en sådan kvalitet, at værdien af ekstinktionskoefficienten er halvt så stor som den værdi, der hidtil er benyttet. Tykkelsen af silica aerogel laget er 22 mm, og forudsætninger vedrørende montering af laget samt udformningen af den varmelagrende mur er som ovenfor. Med disse egenskaber vil man med det ny enfamiliehus opnå, at udbyttet stiger til $148 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$, og for det eksisterende byggeri opnås $201 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$.

Dæklagssystemets transmittans kan forbedres yderligere ved at benytte jernfrit glas, som tænkes at have en ekstinktionskoefficient på 4 m^{-1} . De øvrige forudsætninger, herunder silica aerogelens lave ekstinktionskoefficient, er uændrede. Det årlige udbytte for enfamiliehuset vil herefter stige til $162 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$, og for det eksisterende byggeri fås $213 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$.

Med de lave ekstinktionskoefficienter vil et endnu højere udbytte kunne opnås ved forøgelse af tykkelsen af silica aerogel laget.

Alternativ dæklagsudformning

Der er undersøgt en alternativ udformning af dæklagssystemet, for hvilken der ikke benyttes silica aerogel, men til gengæld benyttes en selektiv absorberbelægning. Denne har en absorptans for solstråling på 0,97 og en emittans for langbølget stråling på 0,10. Muren er som ved de forrige beregninger en 0,25 m tyk betonmur. Med den selektive absorber og det ene lag glas fås for enfamiliehuset et udbytte på $59 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$, og for det eksisterende byggeri fås $126 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$.

4.3. Årsberegninger for solvæggen med varmelagring i hulmur

4.3.1 Energibesparelse og kølebehov

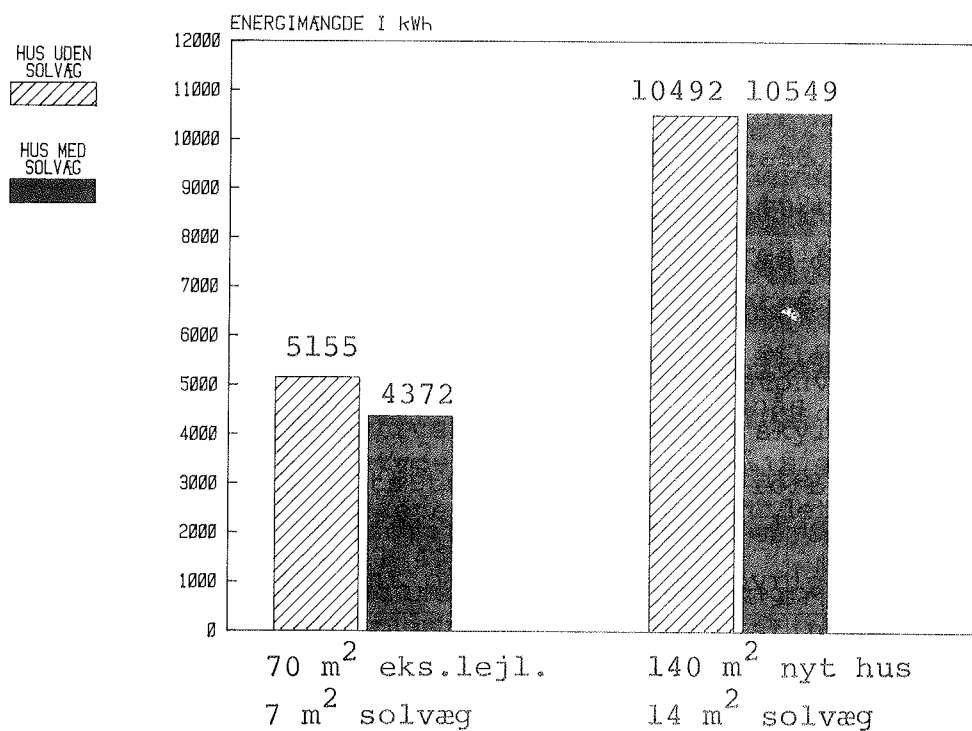
For begge bygninger tænkes solvæggen opbygget på nøjagtig samme måde som ved forsøgene. Det beregnede energiforbrug og kølebehov er afbildet på figur 4.4. Værdierne for den årlige energibesparelse og det årlige udbytte er angivet i tabel 4.6.

Det bemærkes, at der for det ny enfamiliehus er en lille negativ "energibesparelse" ved brug af solvæggen. Den er altså til mindre nytte end en almindelig isoleret hulmur, og den virker dermed ikke særlig interessant i forbindelse med nybyggeri. For det eksisterende byggeri er der som i tilfældet med solvæggen med silica aerogel tale om en langt større energibesparelse - der kan spares 10% af energiforbruget til rumopvarmning.

Bygningstype	140 m ² nyt enfamiliehus	70 m ² lejlighed i eks. byggeri
Energibesparelse	-57 kWh/år	528 kWh/år
Relativ energibesp.	-0,5%	10,2%
Udbytte pr. m ² absorber	-4 kWh/m ² /år	75 kWh/m ² /år
Forhold ml. udbytte og solindfald på glasset	-	9,2%

Tabel 4.6. Resultater fra årsberegningerne for solvæggen med varmelagring i hulmur.

ENERGIBEHOV TIL RUMOPVARMNING



BEHOV FOR KØLING AF RUMLUFT

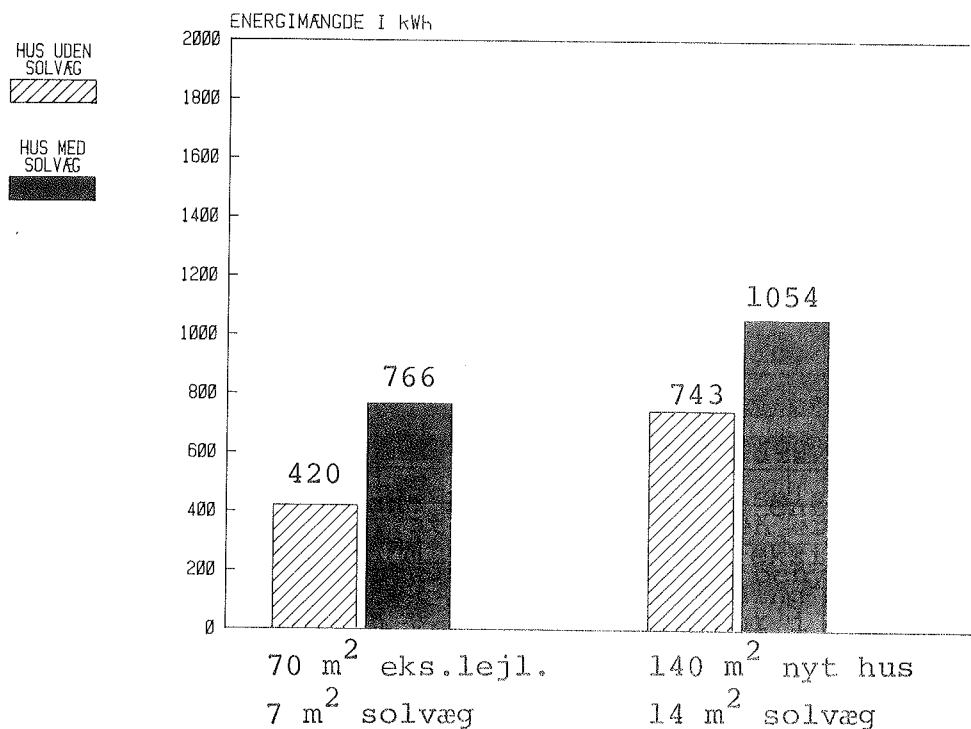


Fig. 4.4 Resultater fra årsberegningerne fra solvæggen med varmelagring i hulumur.

4.3.2 Parametervariationer

Alle parametervariationerne er foretaget for det tilfælde, at solvæggen benyttes i det eksisterende byggeri.

Udformning uden ventilationshuller

Der blev foretaget en beregning af udbyttet, når solvæggen er udført uden ventilationshuller i den ydre vange. Intuitivt forventes et fald i udbyttet, men det viser sig at blive $76 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$, dvs. ca. det samme som i tilfældet med ventilationshuller. En nærmere undersøgelse forklarer dette forhold: Det viser sig, at der med den lave varmeoverføringskoefficient kun vil overføres $11 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$ ved luftcirkulation mellem hulrummet foran absorbereren og hulrummet i muren. Til gengæld ledes der $11 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$ mindre fra absorbereren ind i muren, når der er mulighed for ventilation, end når der ikke er det. Ventilationshullerne giver altså alt i alt ikke anledning til en forøgelse af varmestrømmen fra absorbereren ind i væggen.

Betydning af selektiv absorber

Der tænkes benyttet en selektiv absorber med en absorptans for solstråling på 0,97 og en emittans for langbølget stråling på 0,10. Udbyttet beregnes til $112 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$ for udformningen med ventilationshuller og $108 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$ for udformningen uden ventilationshuller.

Nedsættelse af randtab

De aluminiumsprofiler, som glasset er monteret i, giver anledning til et mærkbart randtab. Såfremt dæklagskonstruktionen i stedet var udført så velisoleret, at man kunne se bort fra disse randtab, vil udbyttet være $93 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$, når der er tale om ventilationshuller, og $96 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$, når der ikke er tale om ventilationshuller.

Brug af glas med lavere absorption

Det benyttede glas viste sig at have en ret høj ekstinktionskoefficient for absorption af solstråling, nemlig omkring 27 m^{-1} . Almindeligt glas har typisk en ekstinktionskoefficient på omkring 17 m^{-1} . Udbyttet er beregnet under forudsætning af, at noget sådant glas benyttes, og idet det stadig antages, at der kan ses bort fra randtab. Udbyttet bliver henholdsvis $100 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$ og $103 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$ for udformningen med og uden ventilationshuller.

4.4. Efterisolering af ydermur

For den eksisterende bygning kan man foretage en efterisolering af ydervæggen som alternativ til etableringen af en solvæg. Ved en udvendig efterisolering med 100 mm mineraluld (type A) kan der for begge de betragtede ydervægge opnås en forbedring af U-værdien fra $1,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$ til $0,35 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

En beregning giver, at denne foranstaltning vil medføre en energibesparelse på $80 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$. Dette er under det halve af, hvad der kan opnås ved at montere et lag glas og 22 mm silica aerogel foran den massive mur, hvor mur-overfladen er malet sort. Energibesparelsen er ca. lige så stor som den besparelse, der kan opnås ved at anbringe to lag glas foran den sortmalede hulmur.

5. ØKONOMISK VURDERING

For at give et indtryk af, hvorvidt det er økonomisk fordelagtigt at benytte de to undersøgte solvægge, er der beregnet den simple tilbagebetalingstid ved investering i solvæggene. Beregningerne er i høj grad baseret på skøn, og de må derfor tages med et vist forbehold.

Idet det antages, at der benyttes olie til opvarmning, kan den simple tilbagebetalingstid findes af

$$n = \frac{P_a \cdot H \cdot \eta}{q_u \cdot P_o}$$

hvor P_a er anlægsprisen i kr/m^2 . H er oliens brændværdi (9,8 kWh/liter). η er kedelanlæggets virkningsgrad, som antages at være 0,80. q_u er udbyttet fra solvæggen i $\text{kWh/m}^2/\text{år}$. P_o er olieprisen, der sættes til 4,0 kr/liter.

Beregningerne er foretaget for:

- En solvæg med glas og 12 mm silica aerogel foran en 0,25 m massiv, sortmalet betonvæg, der udgør en del af sydfacaden i et nyt hus. Udbyttet fra denne væg er omkring $130 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$.
- En solvæg med glas og 22 mm silica aerogel foran en 0,35 m massiv, sortmalet teglstensmur, der udgør en del af sydfacaden i et eksisterende hus. Udbyttet er i dette tilfælde ca. $190 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$.
- En solvæg med to lag glas foran en 0,35 m sortmalet uisoleret hulmur af teglsten, der udgør en del af sydfacaden i et eksisterende hus. Der er ingen ventilationshuller for luftcirkulation. Udbyttet fra denne solvæg er ca. $90 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$.
- En eksisterende 0,35 m tyk massiv eller hul teglstensmur, som er udvendigt efterisoleret med 100 mm mineraluld (type A). Her kan der opnås en energibesparelse på ca. $80 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$.

Ved beregning af anlægsprisen er det antaget, at udgiften til betonvæggen i det ny byggeri modsvarer udgiften til den normale facade, som solvæggen erstatter. Prisen for silica aerogel er på nuværende tidspunkt temmelig høj, men den kan ved en fremtidig større produktion forventes at være omkring 200 kr/m². Dæklagskonstruktion i form af glas og evt. silica aerogel er monteret i en ramme, som sættes op på lægter, der er fastgjort til muren. Materialeudgifterne til glas, ramme, lægter, inddækning og maling sættes til 900 kr/m². Materialeudgifterne ved efterisoleringen sættes til 120 kr/m². De samlede udgifter til arbejds løn og evt. stillads sættes til 600 kr/m² i alle fire tilfælde. Den samlede anlægspris for solvæggene er til sidst reduceret med 30%, svarende til det statstilskud, der p.t. gives til projekter til udnyttelse af den passive solvarme.

Anlægsprisen i de fire tilfælde er angivet i tabel 5.1. Endvidere er angivet den beregnede simple tilbagebetalings-tid. For solvæggen med silica aerogel foran en eksisterende mur opnås en tilbagebetalingstid på 12 år. Til sammenligning er tilbagebetalingstiden for efterisoleringen 18 år.

Foranstaltning	årlig energi- besparelse	anlægspris	simpel tilbage- betalingstid
	kWh/m ² /år	kr/m ²	år
Solvæg med silica aerogel i nyt byggeri	130	1190	18
Solvæg med silica aerogel i eksisterende byggeri	190	1190	12
Solvæg med to lag glas i eksisterende byggeri	90	1050	23
Udvendig efterisolering af ydervæg	80	720	18

Tabel 5.1. Forhold vedrørende simpel tilbagebetalingstid for solvægge og efterisolering.

6. KONKLUSION

Ved hjælp af målinger og beregninger har det været muligt at foretage en nøje undersøgelse af de to foreslåede solvægkonstruktioner.

Målinger og beregninger af egenskaberne af solvæggen med silica aerogel viste, at dæklagssystemet havde de forventede gunstige egenskaber vedrørende transmission af solstråling og varmetab. Silica aerogel er dermed et særdeles velegnet materiale til solvægge. Materialet giver mulighed for at opnå et højt udbytte fra væggen, samtidig med at væggens virkemåde og opbygning er simpel.

Beregningerne af energiforbruget til rumopvarmning for et nyt hus, der er forsynet med en solvæg med 22 mm silica aerogel, viste at der kan opnås energibesparelser på mellem 12% og 22% af rumopvarmningsbehovet. Dette svarer til et årligt udbytte fra solvæggen på mellem 88 kWh pr. m² absorber og 162 kWh pr. m². Den nøjagtige størrelse af udbyttet afhænger af, hvor gunstige forudsætninger der gøres vedrørende murmateriale, randtab samt glassets og silica aerogelens ekstinktionskoefficient for solstråling. For det eksisterende byggeri viste beregningerne, at der vil være tale om endnu større energibesparelser, hvis en del af sydfacaden udføres som solvæg med silica aerogel. Her vil energibesparelserne være på mellem 22% og 29%, alt efter de gjorte forudsætninger. Dette svarer til et udbytte på mellem 163 kWh/m²/år og 213 kWh/m²/år.

For den opbyggede solvæg blev silica aerogelen leveret i små stykker, der ikke var helt regulære, og som blev monteret på en måde, der gav anledning til nogle ekstra optiske og termiske tab. Endvidere er det besværligt at håndtere og montere silica aerogelen sådan som det blev gjort ved opbygningen af forsøgsmodellen af solvæggen. Disse forhold vil kunne udbedres ved at udforme dæklagssystemet som en monteringsklar termorude, hvor større

stykker silica aerogel udfylder hulrummet mellem de to lag glas. Ved yderligere at evakuere termoruden er det muligt at opnå en betydeligt lavere varmetabskoefficient for dæklagssystemet, hvormed udbyttet fra solvæggen vil blive langt højere.

I den givne udformning gav hulumuren med to lag glas ikke nogen energibesparelse i det betragtede nye hus. Såfremt solvæggen benyttes i det eksisterende byggeri, vil den give en energibesparelse på 10% af rumopvarmningsbehovet. Dette svarer til et udbytte fra solvæggen på $75 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$.

Udbyttet kan forbedres med mellem 18 og $37 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$ ved at benytte en dæklagskonstruktion med forbedrede forhold m.h.t. randtab og transmission af solstråling eller ved at benytte en selektiv absorber. Det viste sig endvidere, at tilstedeværelsen af ventilationsåbningerne i muren stort set ikke betød noget for størrelsen af udbyttet. Det kan således ikke betale sig at konstruere solvæggen, så der er mulighed for ventilation.

Det skal til slut understreges, at rapportens forslag til udformning af solvægge ikke er ment som nogle konkrete anvisninger, i følge hvilke man umiddelbart kan opbygge væggene. Det vil således tage nogle år med udviklingsarbejde, førend en solvæg med silica aerogel vil være realistisk. Inden de omtalte solvægge kan opføres, er det endvidere nødvendigt at klarlægge diverse byggetekniske detaljer, så konstruktionerne sikres en lang levetid. Endelig skal der træffes foranstaltninger, så der ikke viser sig at blive tale om en væsentlig forringet termisk komfort som følge af uønsket varmetilførsel fra solvæggen om sommeren.

REFERENCER

- [1] "Transparent Insulation for Thermal Storage Walls. Final Report". L. Olsen, C. Paludan-Müller. Meddelelse nr. 143. Laboratoriet for Varmeisolering, 1983.
- [2] "Solvægge, målt og beregnet". L. Olsen. Meddelelse nr. 167. Laboratoriet for Varmeisolering, 1985.
- [3] "Undersøgelse af solvægge ved hjælp af en indendørs forsøgsopstilling". C. Paludan-Müller. Meddelelse nr. 179. Laboratoriet for Varmeisolering, 1987.
- [4] "Transparent Silica Aerogel for Window Insulation". M. Rubin, C.M. Lambert. Solar Energy Materials. No. 7, 1983.
- [5] "Aerogels". J. Fricke. Proceedings in Physics 6. Springer-Verlag, 1986.
- [6] "Bygningsmaterialer. Grundlæggende egenskaber". S.G. Bergström m.fl. Danmarks Ingeniørakademi, Bygningsafdelingen, materiallære, 1974.
- [7] "Solar Engineering of Thermal Processes". J.A. Duffie, W.A. Beckman. John Wiley & Sons, 1980.
- [8] "Production of Silica Aerogel". S. Henning, L. Svensson. Physica Scripta. Vol. 23, 1981.
- [9] "Airglass". Brochure fra Airglass AB.
- [10] "Infrared Radiative Heat Transfer in Highly Transparent Silica Aerogel". R. Caps, J. Fricke. Solar Energy. Vol. 36, No. 4, 1986.
- [11] "Dansk Ingeniørforenings regler for beregning af bygningers varmetab". DS 418. Teknisk Forlag, 1986.
- [12] "Vejrdata for VVS og energi. Dansk referenceår TRY". B. Andersen m.fl. Statens Byggeforskningsinstitut, 1982.
- [13] "PASOLE: A General Simulation Program for Passive Solar Energy". R.D. McFarland. LASL, 1978.
- [14] "6 lavenergihuse i Hjortekær. Statusrapport 1". Lavenergihusprojektet under Handelsministeriet. A.Aa. Nielsen, M.R. Byberg, R.G. Djurtoft, B. Saxhof. Meddelelse nr. 84. Laboratoriet for Varmeisolering, 1979.

Forskningsudvalget for energianvendelse i bygninger, april 1987

J. Kelnæs, afd.chef, Teknologisk Institut (formand)

Ole Jensen, civilingeniør, Statens Byggeforskningsinstitut
(sekretær)

M.R. Byberg, lektor, civilingeniør, Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole

Erik Christoffersen, afd.leder, Statens Byggeforskningsinstitut

Vagn Korsgaard, professor, Laboratoriet for Varmeisolering,
Danmarks Tekniske Højskole

M. Malte Johansen, afd.chef, Jysk Teknologisk

P.J. Snare, eksped.sekr., Energistyrelsen

Bent Petersen, kontorchef, Byggestyrelsen

Peter Steensen, civilingeniør, Teknologisk Institut

Olaf Smith-Hansen, civilingeniør, Rockwool A/S

Knud Hallgreen, ingeniør, Danfoss A/S

Jørgen S.R. Nielsen, civilingeniør, Birch & Krogboe K/S

Peter Dorph-Petersen, fuldmægtig, Energiministeriet

Liste over udsendte rapporter

Solvarmeprogrammet:

1. Kombineret solvarme-varmepumpeanlæg. Beregning af et anlæg til en mindre bebyggelse. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, april 1979.
2. Solvarme-fjernvarmeanlæg. Beregning af et centralt anlæg med og uden varmelager. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, september 1979.
3. Solvarmeanlæg i Gentofte. Målinger på anlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand. Årsrapport. Laboratoriet for Varmeisolering, februar 1980.
4. Beregningsprogram til solvarmeanlæg. For TI59 programmerbar lommeregnekalkulator. Teknologisk Institut, 1980.
5. Solvarmeanlæg i Herfølge. Solvarmeanlæg til opvarmning af brugsvand, 1/2 års målinger. Teknologisk Institut, juli 1980.
6. Solvarmeanlæg i Greve. Målinger på anlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand. Årsrapport. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, juli 1980.
7. Solfangeres langtidsholdbarhed. Erfaringer med solfanger udsat for det naturlige vejrlig under kontrollerede, realistiske, ens driftsforhold i 3 år på prøvestand. Teknologisk Institut, juli 1980.
8. Solvarmesystemprøvestand. Resultater fra det første projekt på prøvestanden. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, 1981.
9. Solvarmeanlæg på Juelsminde campingplads. Brugsvand, 3 års målinger. Teknologisk Institut, august 1980.
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. Laboratoriet for Varmeisolering, december 1980.
14. Solvarmeanlæg i Blovstrød. 2 1/2 års målinger på 10 m² brugsvandsanlæg. Teknologisk Institut, maj 1981.
15. Solvarmeanlæg til rumopvarmning. En udredning baseret på 2 års målinger på anlæg i Greve og Gentofte. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, august 1981.

16. Solvarmeanlæg til varmt brugsvand. En udredning baseret på 1 års målinger på 2 anlæg. Laboratoriet for Varmeisolering, september 1981.
17. Solvarmeanlæg i Herfølge. Varmtvandsanlæg i tæt-lav byggeri. Teknologisk Institut, maj 1982.
18. Korrosion i solfangerabsorbere. En undersøgelse af korrosionsforholdene i solfangeres væskekanaler. Teknologisk Institut/Korrosionscentralen, juli 1982.
19. Fokuserende solfanger med klimaskærm. Forundersøgelse. Risø, september 1982.
20. Solfangeres driftssikkerhed og holdbarhed. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, juli 1983.
21. Solvarme - fjernvarmeanlæg. Teknisk-økonomisk analyse af systemkombinationer. Teknologisk Institut/Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, maj 1983.
22. Solfangerabsorberes overfladebestandighed. Teknologisk Institut, februar 1984.
23. Solvarmeanlæg i Rødovre. Teknologisk Institut, februar 1984.
24. Solvarmeanlæg til varmt brugsvand i Gl.Holte. En vurdering efter et års målinger. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, oktober 1983.
25. Sol i boligen - et ide-katalog. Teknologisk Institut, marts 1984.
26. Solvarmeanlæg med stort udbytte - systemanalyse. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, april 1984.
27. Kombineret solvarme-varmepumpeanlæg i Næstved. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, juni 1984.
28. Et solvarmeanlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand. Målinger på systemprøvestand. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, september 1984.
29. Billig solfanger/lager unit til brugsvand. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, december 1984.
30. Projekteringsvejledning for passiv solvarme. Teknologisk Institut, december 1985.
31. Plast og gummi i solvarmeanlæg. Teknologisk Institut, maj 1985.
32. Hydrofil solfanger - Prøvning af prototype. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH. September 1985.

33. Solvarmeanlæg med stort udbytte - demonstration. Teknologisk Institut, oktober 1985.
34. Solvarmeanlæg i Brøndby. Solvarmeanlæg til opvarmning af brugsvand i en etageejendom, 2 års målinger. Teknologisk Institut, januar 1986.
35. Selvcirkulerende solvarmeanlæg i Lyngby - resultater og erfaringer fra et års målinger. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH. Januar 1986.
36. Konstruktion af solfangere. En Håndbog/idebog. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, marts 1986.
37. Driftserfaringer med solvarmeanlæg: Erfaringer fra besigtigelse af 51 anlæg. Teknologisk Institut, januar 1987.
38. Solvarme i offentlige bygninger - demonstrationsanlæg. Et års målinger på et 18 m² anlæg på en kommunal materielgård. Teknologisk Institut, februar 1987.
39. Solvarme i nybyggeri. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, marts 1987.
40. Selektive overflader i solfangere. Teknologisk Institut, oktober 1987.
41. Solvarmeanlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand. Demonstrationsanlæg i Ejby. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, oktober 1987.
42. To forslag til udformning af solvægge. En undersøgelse baseret på indendørs målinger. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, oktober 1987.

Varmelagerprogrammet (Laboratoriet for Varmeisolering)

1. Litteraturundersøgelser og vurdering af kemiske varmelagre. Peter L. Christensen, august 1979.
2. Sæsonlagring af varme i store vandbassiner. Udført af Dipco Engineering ApS, november 1979.
3. Beregning af energiforbrug i bygninger (EFB-1). En metode til brug for bordregnemaskiner. Anker Nielsen, februar 1980.
4. Beregning af energiforbrug i bygninger (EFB-1). Brugervejledning for TI-59. Anker Nielsen, februar 1980.
5. Prøvning af varmelagerunits til solvarmeanlæg. Simon Furbo, april 1980.

6. Beregning af ruminddelte bygningers energiforbrug. Anker Nielsen, oktober 1980.
7. Vinduets betydning for enfamiliehusenes energiforbrug. Anker Nielsen, november 1980.
8. Heat Storage with an incongruently melting salt hydrate as storage medium based on the extra water principle. Simon Furbo, december 1980.
9. Enfamiliehus med glasbeklædte uderum. Anker Nielsen, marts 1981.
10. Kemiske varmelagre. Teori og praksis. Peter L. Christensen, december 1981.
11. Varmtvandsforbrug i boliger. Niels Mejlhede Jensen, februar 1982.
12. Prøvemetoder for mindre varmelagre og erfaringer fra prøvningerne. Simon Furbo og Jan-Erik Larsen, november 1982.
13. Solopvarmning gennem vinduer. Niels Mejlhede Jensen, november 1982.
14. Økonomisk solbidrag til opvarmning af brugsvand. Sven Pedersen, Simon Furbo, Preben Nordgaard Hansen og Vagn Ussing, december 1982.
15. Birkerød solhus. Beregninger og målinger. Niels Mejlhede Jensen, december 1983.
16. Lagertyper og lagerstørrelser i solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning. Søren Østergaard Jensen og Simon Furbo, marts 1984.
17. Prøvning af kemisk varmepumpelager. Otto Dyrnum, april 1984.
18. Varmerovergang i små solvarmelagre. Søren Østergaard Jensen, november 1984.
19. Varmelagring ved hjælp af en kemisk varmepumpe med vandig saltopløsning som absorptionsmiddel. Otto Dyrnum, november 1984.
20. BLAST - EDB-program til beregning af passiv solvarme. Jørgen Erik Christensen, november 1984.
21. Solvarmeanlæg med bygningsintegrerede varmelagre. Lars Olsen, december 1984.
22. Prøvning af et kemisk varmepumpelager med saltopløsning som absorptionsmiddel. Otto Dyrnum, marts 1985.
23. Smeltevarmelagre baseret på salthydrater placeret i plastslanger. Simon Furbo, august 1987.