

Solvæg som energidiode

Niels Kristian Vejen
Gitte Blaagaard

Laboratoriet for Varmeisolering
Danmarks Tekniske Universitet
Meddelelse nr. 269, Oktober 1994

Forord

Dette er den afsluttende rapport for projektet "Solvæg som energidiode". Projektet er udført på Laboratoriet for Varmeisolering (LfV), DTU i perioden 1/03-93 til 31/07-94. Projektet er finansieret af Energistyrelsens Udviklingsprogram for Vedvarende Energi (UVE). Projektets journalnr. hos Energistyrelsen er 51182/92-0064.

Efter ønske fra Energistyrelsens arbejdsgruppe for passiv solvarme har projektet været opdelt i to faser. I første fase er det sandsynliggjort, at der ikke er nogen sundhedsmæssige problemer ved anvendelsen af mineraluld som absorber i en solvæg til forvarmning af ventilationsluft. I anden fase er der foretaget undersøgelse af den særlige solvægskonstruktion: "solvægsenergidioden".

Rapporten beskriver en forsøgsrække, der er brugt til at validere en matematisk model af solvægsenergidioden. Dernæst beskrives en simulering af solvægsenergidioden foretaget med et edb-program opbygget på grundlag af den matematiske model. Inddata og resultater samt produktion af solvægsenergidioden og økonomien i dens anvendelse beskrives. Til sidst omtales solvægsenergidiodens mulige anvendelsesområder samt eventuelle problemer i forbindelse med anvendelsen.

Målinger på og simuleringer af solvægsenergidioden er også udført som en del af et eksamensprojekt på LfV af Gitte Blaagaard.

Overvejelser omkring profiludformning og samling er også udført som en del af et eksamensprojekt fra maskinretningen på DIA af Henning Brendstrup og Dan C. V. Andersen.

Fra LfV har følgende medarbejdere deltaget:

Niels Kristian Vejen, Civilingeniør
Gitte Blaagaard, Civilingeniør
Svend Svendsen, Professor
Hamid Jalali, Teknisk tegner
Poul Dedenroth, Maskinarbejder
Peter Cort Jensen, Tømrer

Indholdsfortegnelse

1 Indledning	1
2 Beskrivelse af solvægsenergidiode	2
3 Forsøg	3
3.1 Forsøgsopstilling	3
3.1.1 Beskrivelse af forsøgsvæggen	4
3.1.2 Beskrivelse af måleudstyr	6
3.2 Forsøgenes udførelse	8
4 Beskrivelse af model	9
4.1 Varmebalancer for solvægsenergidiode	9
4.2 Varmebalance for rumluften	10
4.3 Ventilationsbehov	10
4.4 Diskretisering og integrering	10
4.5 Kontrol af modellen	11
5 Simuleringer	12
5.1 Inddata	12
5.1.1 Vejrdata	12
5.1.2 Beskrivelse af referencehuset	12
5.1.3 Ventilationsbehov	12
5.2 Beregning af ydelse	13
5.2.1 Besparelsen ved en traditionel efterisolering	13
5.2.2 Ydelse fra solvægsenergidiode	13
5.3 Resultater	14
5.3.1 Årsydelsen af solvægsenergidiode	14
5.3.2 Overtemperaturproblematikken	17
5.3.3 Om materialevariationer	23
6 Produktion af solvæggen	25
6.1 Solvægsmodulerne	25
6.1.1 Dimensioner	25
6.1.2 Profilsystem og samling af moduler	25
6.2 Opsætning af moduler	27
6.2.1 Tætning langs modulerne	28
7 Økonomi	31
7.1 Prisen for opførelsen af en solvæg	31
7.1.1 Profilsystem i stål	31
7.1.2 Profilsystem i aluminium	31
7.1.3 Vitral system	31
7.1.4 Prisen for opbygningen af den ventilerede solvæg	31
7.2 Projektets lønsomhed	32
7.2.1 Udregning af simpel tilbagebetalingstid	32
8 Anvendelse	33
8.1 Mulige anvendelsesområder	33
8.2 Eventuelle problemer i anvendelsen	33

9 Konklusion	35
Referencer	36
Bilag	37

1 Indledning

Som et led i efterisolering af ældre bygninger er der en stigende interesse for at udnytte solens energi i solvægge. Solvægge kan udover at nedsætte en bygnings energiforbrug beskytte den bagved liggende ydermur mod nedbrydning forårsaget af f.eks. regn og blæst. Der er således også mulighed for at spare udgifter til reparation og vedligeholdelse af den eksisterende ydermur.

I bygninger med mekanisk ventilation er en stor del af energibehovet forbundet med ventilation af bygningen. Ved at forvarme ventilationsluften i en solvæg kan en del af dette energibehov dækkes af solen.

Formålet med dette projekt er at udvikle en kombination af tillægsisolering og en solvæg, en solvægsenergidiode. Den udviklede energidiode fungerer ved, at bygningens ventilations-system suger udeluft gennem en mineraluldsabsorber. Derved overføres der energi fra absorberen til ventilationsluften, der bliver forvarmet. Når der er sol på væggen bliver mineraluldsabsorberen varm, og der sker en opvarmning af ventilationsluften. Når der ikke er solstråling på væggen fungerer energidioden som modstrømsisolering, og en del af eller hele varmetabet fra rummene gennem væggen bliver optaget af luften og ført tilbage til huset som forvarmet ventilationsluft.

Det vil sige, at solvarme kan ledes ind i bygningen, og at energitabet ud gennem væggene reduceres eller standses. Herved opnås energidiode-effekten.

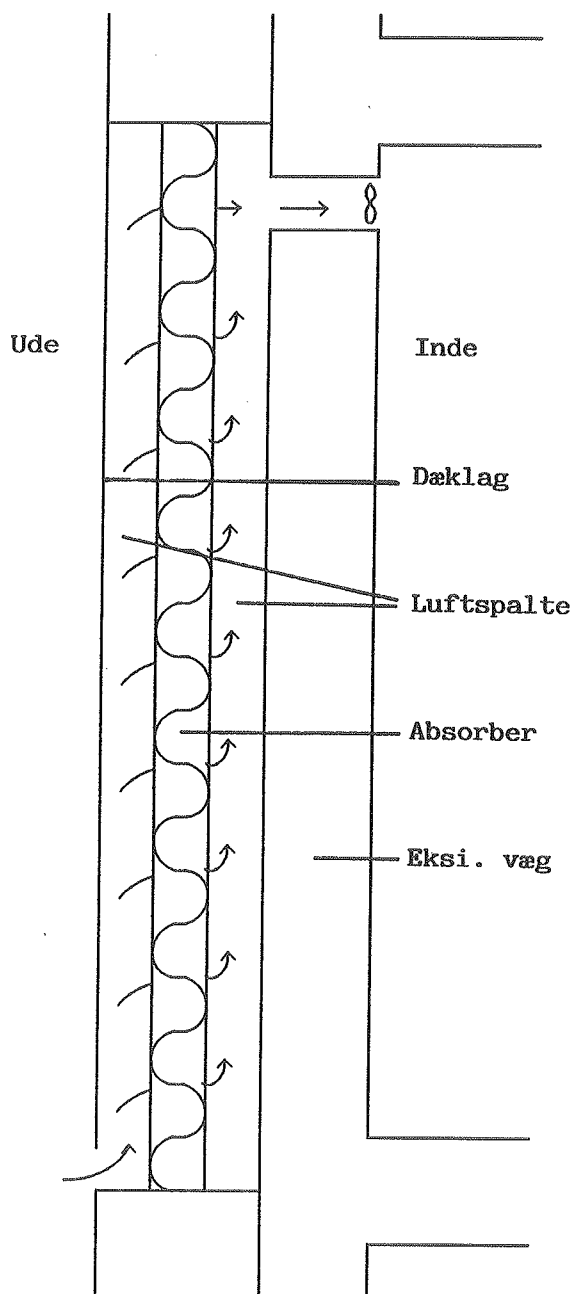
For at analysere solvægsenergidioden er der opstillet en matematisk model samt opbygget et beregningsprogram. Dernæst er der lavet en forsøgsrække til sammenligning af måleresultater med resultater beregnet af programmet. Forsøgene er foretaget i en indendørs opstilling under kontrollerede forhold.

Der er dernæst foretaget simuleringer til vurdering af solvægsenergidiodens energi- og indeklimamæssige betydning for en hel bygning.

På baggrund af simuleringeresultaterne er der foretaget en økonomisk vurdering af anvendelsen af solvægsenergidioden.

2 Beskrivelse af solvægsenergiodien

I dette afsnit gives en kort beskrivelse af solvægsenergiodien.



Figur 2.1 Principskitse af ventileret solvæg til forvarmning af ventilationsluft.

På fig. 2.1 er der vist en principskitse af solvægsenergiodien. Solvægsenergiodien opsættes på en ydervæg, hvor der laves en gennemføring, så der kan suges friskluft ind i rummet. Startende inde fra rummet består solvægsenergiodien af ydervæggen, en luftspalte, en mineraluldsabsorber, endnu en luftspalte og yderst et dæklag. Solvægsenergiodien fungerer ved, at et ventilations-system (ventilator) suger friskluft ind gennem solvæggen hele døgnet. I solvægsenergiodiegen forvarmes friskluften gennem mineraluldsabsorberen. Når der er indstråling (sol) på væggen, vil der ske en opvarmning af ventilationsluften. Når der ikke er indstråling, vil ventilationsluften gennem solvægsenergiodiegen formindske et varmetab fra det inddækkede areal, idet varme-strømmen ud gennem væggen vil forvarme ventilationsluften, der tilføres rummet. Om sommeren vil forbindelsen mellem solvæggen og rummet kunne lukkes for at forhindre overtemperaturer. Solvægsenergiodien skal fungere i forbindelse med et ventilationsanlæg. Dette kan enten være et eksisterende anlæg, som solvægsenergiodiegen kobles på, eller det kan være et ventilationsanlæg, som etableres samtidig med solvægsenergiodiegen. Anlægget kan naturligvis også anvendes til ventilation i resten af bygningen.

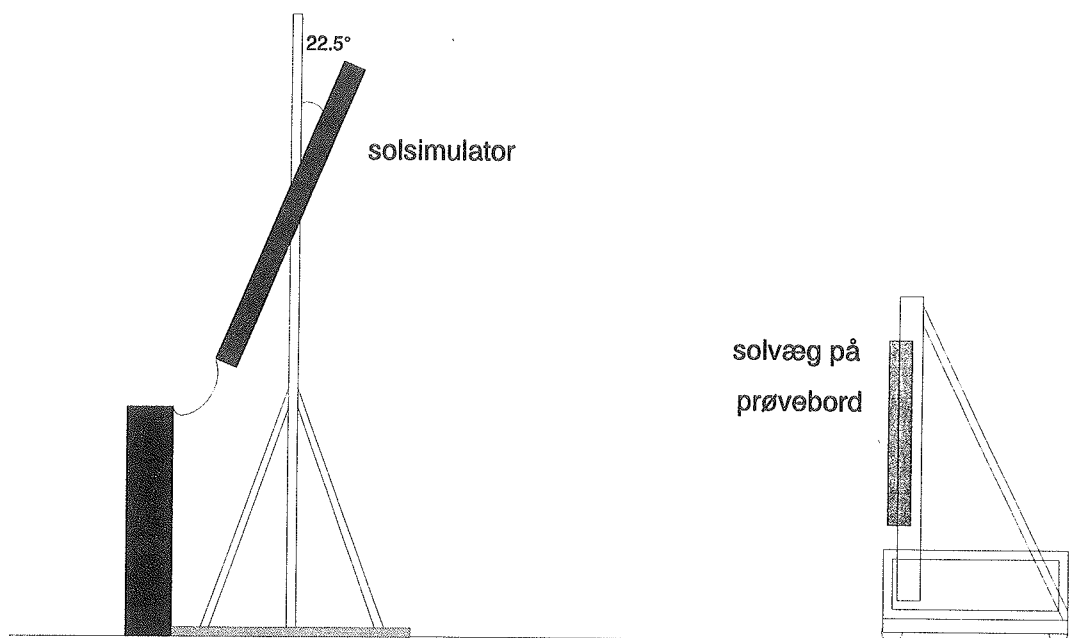
Ved opbygningen af denne vægtype er det vigtigt at sikre, at konstruktionen er udformet så luften bevæger sig igennem isoleringen, ellers vil væggenes ydelse formindskes.

3 Forsøg

I dette afsnit beskrives forsøgsopstillingen og det benyttede måleudstyr, og der gives en oversigt over de udførte forsøg. Desuden omtales sammenligningen af resultaterne af simuleringsprogrammet med forsøgsresultaterne kort.

3.1 Forsøgsopstilling

Forsøgene er udført i LfV's indendørs solsimulator under kontrolerede forhold.



Figur 3.1 Skitse af opstillingen med solsimulator og stativ til solvæg.

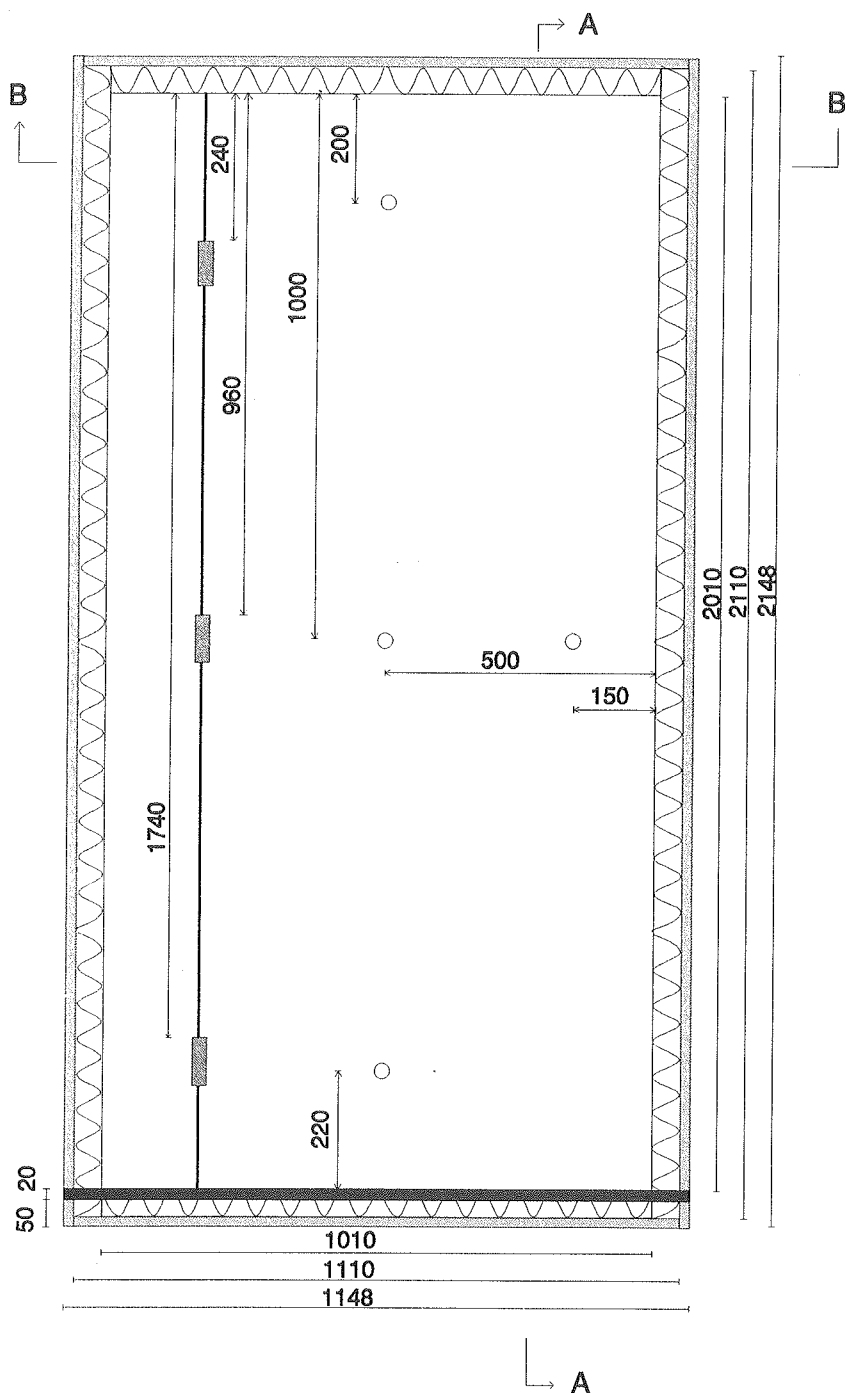
LfV's solsimulator benytter 64 lamper placeret i et stativ 4-6 meter over gulvet. Den spektrale fordeling af strålingen ligger meget tæt på den virkelige solstråling. Den øverste del af det stativ, lamperne sidder i, er bevægeligt, og til de forsøg, der er lavet til denne rapport, sidder stativet i en vinkel på 22,5° i forhold til lodret, således at strålingen får en indfaldsvinkel på 22,5° på solvæggen. Stativet står i en afstand af ca. 6,5 m fra solvæggens dæklag. Opstillingen er skitseret i fig. 3.1.

For at simulere gråvejr nedsættes solbestrålingsstyrken i solsimulatoren.

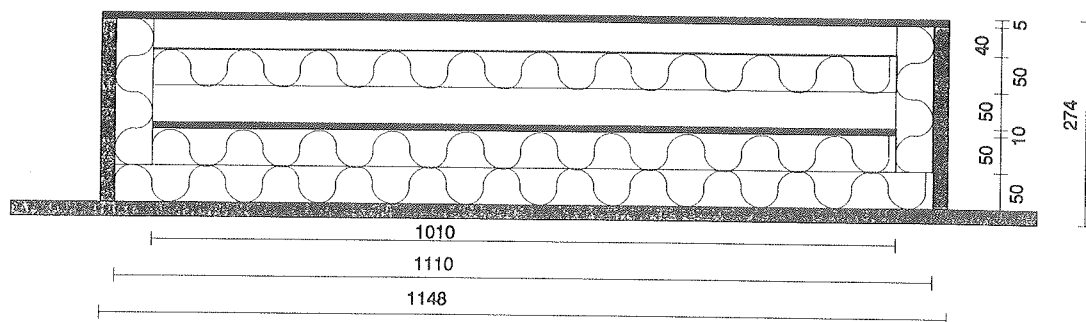
Nedsættelse af solbestrålingsstyrken ske vha. en opal skærm, som monteres foran solvæggen. Udover at nedsætte bestrålingsstyrken bevirker den også en spredning af solstrålingen, således at der i stedet for direkte stråling bliver tale om diffus stråling. Den under forsøgene anvendte skærm reducerer bestrålingsstyrken til ca. 10%, dvs. til ca. 80 W/m² svarende til overskyet vejr.

3.1.1 Beskrivelse af forsøgsvæggen

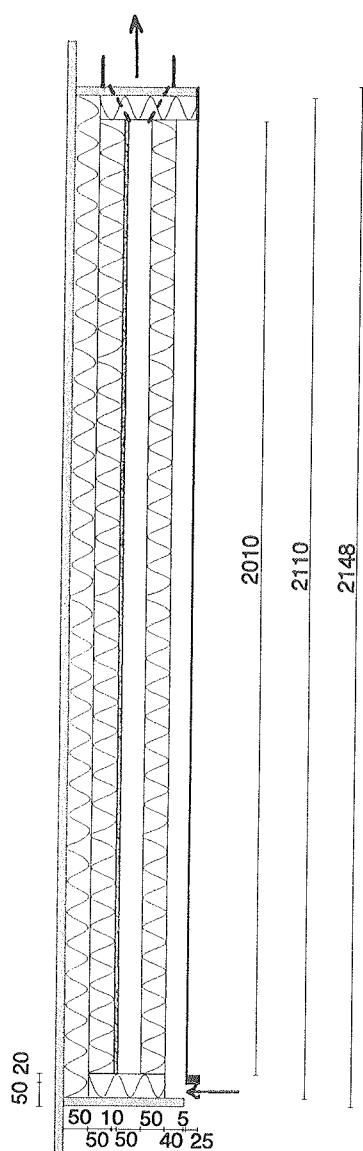
I fig. 3.2 ses en opstalt af forsøgsvæggen. På tegningen er indtegnet placeringen af hullerne til strålingstermometeret. Disse huller vil, når de ikke anvendes til målinger af mineraluldens overfladetemperatur, blive tætnet med klar tape. Desuden er der indtegnet målerør til måling af lufttemperaturen i den yderste luftspalte.



Figur 3.2 Opstalt af væggen. Alle mål i mm.
Huller til strålingstermometer Ø30.



Figur 3.3 Snit B-B i forsøgsvæggen. Alle mål i mm.



Figur 3.4 Snit A-A i forsøgsvæggen. Alle mål i mm.

På fig. 3.3 og fig. 3.4 ses to snit i forsøgsvæggen. Forsøgsvæggen er opbygget som en kasse af 19 mm krydsfinér isoleret med Rockwool Industribatts 80. Absorberen er Rockwool Industribatts Sort. Den er fastholdt af 4 stykker ståltråd på langs og på tværs af væggen. Da absorberen desuden sidder i spænd, er dette tilstrækkelig fastholdelse, også når der suges luft igennem. Kassen er tætnet med silikonefugemasse.

Som det kan ses på tegningerne, er dæklaget fastholdt af en liste ved luftindtaget. Dæklaget, som er 5 mm plexiglas, er fæstnet til krydsfinérkassen med skruer pr. ca. 20 cm.

Imellem krydsfinérkassen og dæklaget er anbragt en gummitætningsliste.

For at simulere den massive væg, er anvendt et væskekredsløb bagest i solvæggen. Kredsen består af en absorber fra en solfanger, og var under forsøget tilsluttet udstyr, som kan kontrollere væskens indgangstemperatur og flow.

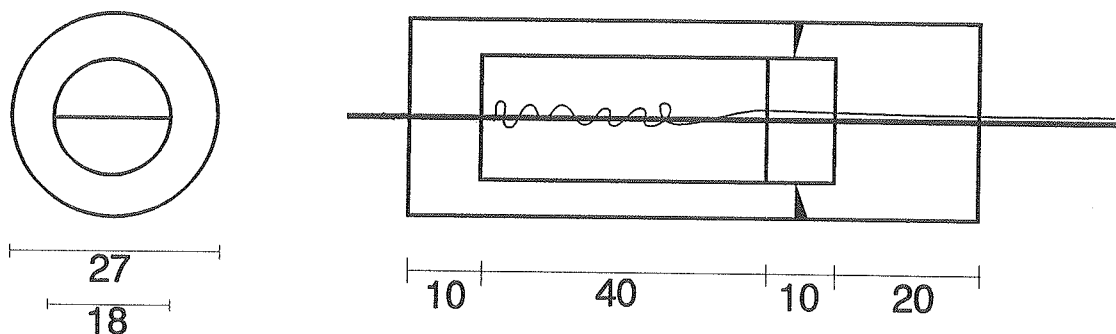
Af praktiske grunde anvendtes 50% glycol i væskekredsen under forsøget. Materialeoplysningerne er resumeret i skemaet nedenfor.

	Materiale	Firma	Tykkelse/mm	Egenskaber
Kasse	Krydsfinér		19	
Isolering	Industribatts 80	Rockwool	2 * 50	kl. 39
Dæklag	Acryl SE 1010	Rias	5	$a=2\text{ m}^{-1}$
Absorber	Industribatts sort	Rockwool	50	kl. 39

Tabel 3.1 Materialer anvendt i forsøgsvæggen.

3.1.2 Beskrivelse af måleudstyr

Målingerne af lufttemperaturen i den yderste luftspalte blev foretaget med termofølere, som på målestederne var anbragt indeni et aluminiumsrør som vist på fig. 3.5. Dette aluminiumsrør var anbragt inden i et lidt større aluminiumsrør. Termotråden blev fæstnet til en snor, som blev spændt op på forsøgsvæggen som vist på fig. 3.2.

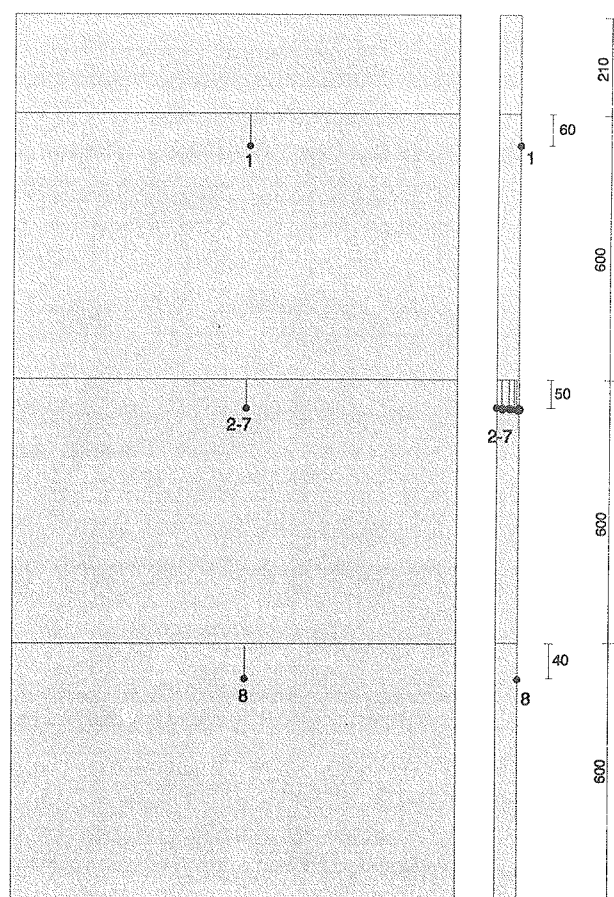


Figur 3.5 Rør til målinger af lufttemperaturer i luftspalten. Mål i mm.

Formålet med røret var at beskytte termofølerne mod direkte solbestråling. Der var fri luftpassage igennem røret. Med sol på solvæggen var der dog en risiko for, at målerørene ville blive opvarmede og dermed alligevel påvirke termofølerne, således at de målte temperaturer ville blive for høje. For at undersøge det blev der anbragt et lille stykke hvidt pap på dæklaget umiddelbart foran hvert målerør, så pappet skyggede for målerøret. Før pappet blev sat op, var alle de målte temperaturer stationære. Efter ca. 15 minutter var lufttemperaturerne igen stationære. På de to nederste målesteder var temperaturen faldet ca. 3°C , mens temperaturen på det øverste målested var faldet ca. 5°C .

Det antages derfor, at de målte temperaturer i den yderste luftspalte har en fejl på ca. 5°C . Fejlen vil naturligvis falde med solbestrålingsstyrken, således at målinger hvor solbestrålingsstyrken er væsentligt reduceret, ligger noget tættere på de rigtige temperaturer.

Temperaturmålingerne i absorberen foregik med termoelementer (kobber-konstantan). På fig. 3.6 kan termoelementernes placering i absorberen ses markeret med nummererede prikker.



Figur 3.6 Termofølernes placering i absorberen.
Alle mål i mm.

I nedenstående skema ses en oversigt over det anvendte måleudstyr. For yderligere data om det anvendte udstyr henvises til de tilhørende manualer.

Størrelse	Måleudstyr	Firma/type	Usikkerhed
Temperatur målinger	Termoelementer	Kobber-konstantan	0,1 K
Overfladetemperaturer	Strålingstermometer	Heimann KT16	2 K
Luftens volumenstrøm	Pitotrør og mikromanometer	Furness	1 m/s
Flow i væskekreds	Massestrømsmåler	Danfoss Massflo type MASS 1000	2 %
Dataopsamling	Datalogger + voltmeter	HP	-
Bestrålingsstyrke	Pyranometer	Kipp & Zonen CM11	3 %

Tabel 3.2 Måleudstyr anvendt ved forsøg.

3.2 Forsøgenes udførelse

Med den opbyggede forsøgsvæg er der udført en række indendørs forsøg i LfV's solsimulator. Forsøgene blev udført med varierende luftstrøm gennem solvæggen. Desuden blev der udført forsøg både med fuld solbestrålingsstyrke fra solsimulatoren og med en opal skærm mellem solvæggen og solsimulatoren. Forsøgene med indstråling på solvægsenergiodien dækker tilsammen dagtilfældet. Væsketemperaturen i den simulerende bagvæg blev i disse forsøg holdt omkring lufttemperaturen i forsøgshallen. Nattilfældet blev undersøgt ved at lave et forsøg uden solindstråling, hvor væsken blev opvarmet til ca. 20°C over lufttemperaturen i forsøgshallen. Derved opnåedes en varmetransport ud gennem solvæggen.

Alt i alt dækker forsøgene altså et bredt spektrum af de betingelser, man vil komme ud for ved praktisk anvendelse af solvægsenergiodien.

4 Beskrivelse af model

Her omtales modellen for solvægsenergidioden. Modellen bygger på kontrolvolumenmetoden, hvor der er opstillet varmebalancer for hver kontrolvolumen.

Der antages fuld opblanding af luften i luftspalterne, således at temperaturen er den samme overalt i et vandret snit i en luftspalte. Ligeledes antages dæklaget pga. sin lille tykkelse at have samme temperatur overalt i et vandret snit.

Ud fra modellen er der opbygget et program i Matlab, der er et interaktivt system og programmeringssprog, som er beregnet til behandling af matematiske funktioner.

4.1 Varmebalancer for solvægsenergidiode

Varmebalance for dæklaget

Dæklaget får tilført varme fra solen, hvis stråler dels absorberes i dæklaget, dels reflekteres og dels transmitteres gennem dæklaget. Desuden er der et varmetab til udeluften. Dæklaget varmeveksler konvektivt med luftstrømmen i luftspalten og ved stråling med absorberoverfladen.

Varmebalance for det yderste luftlag

Varmebalancen for det yderste luftlag består af en konvektiv varmeveksling med dæklag og absorber, samt af luftstrømmene til og fra kontrolvoluminet.

Varmebalance for absorber

Det antages, at luftens strømning gennem absorberen udelukkende foregår vinkelret på absorberen. Desuden antages det, at varmeledning lodret i absorberen kan negligeres. Absorberen deles op i flere kontrolvoluminer over sin tykkelse, for at simplificere beskrivelsen af temperaturforløbet igennem den. Yderst et randvolumen hvor luften kommer ind i absorberen med en anden temperatur end fibrene. Vha. dette kontrolvolumen bestemmes fibertemperaturen. Dernæst kommer et volumen, hvor luften varmeveksler med fibrene og derved opnår termisk ligevægt. På den inderste rand er et volumen til bestemmelse af randtemperaturen. I mellem voluminet, hvor ligevægten opstår, og det inderste randvolumen benyttes teorien for dynamisk isolering til bestemmelse af temperaturforløbet.

Varmebalance for det inderste luftlag

Varmebalancen for det inderste luftlag består af en konvektiv varmeveksling med muren og absorberens indvendige side, samt af luftstrømmene til og fra kontrolvolumnet.

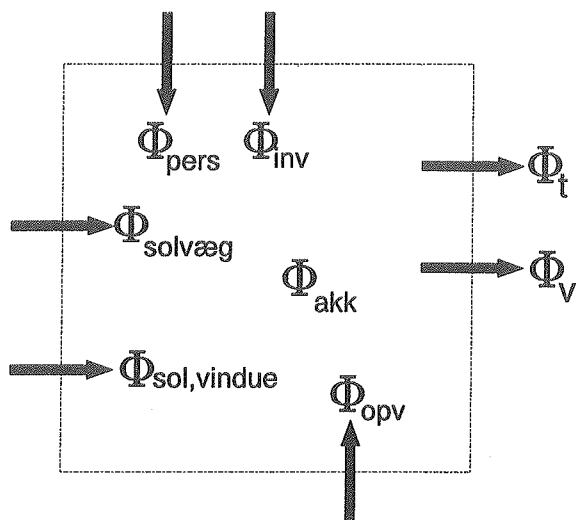
Varmebalance for væggen

Væggen er fra ydersiden til indersiden opdelt i tre kontrolvoluminer. I randvoluminerne negligeres ledning lodret og varmeakkumulering. I væggen yderste kontrolvoluminer er varmebalancen påvirket af varmestråling og konvektion fra absorberen, konvektiv varmeveksling med luftstrømmen i det inderste luftlag og varmeledning til de midterste kontrolvolumener i muren. De midterste kontrolvolumener modtager og afgiver varme ved varmeledning med de omgivende kontrolvolumener. Desuden akkumuleres der varme i dette kontrolvolumen. I de inderste kontrolvolumener sker varmeudvekslingen ved ledning til de midterste kontrolvolumener og til rumluften ved konvektion og ved stråling til rummets andre overflader.

4.2 Varmebalance for rumluften

Til beregningen af rumluftens temperatur under simuleringerne, har der været anvendt et referencehus, for hvilket rumluftens varmebalance er opstillet i en forenklet form:

Rumluftens temperatur vil påvirkes af følgende størrelser:



Figur 4.1 Varmebalance for rumluften.

- 1) Transmissionstabet Φ_t gennem vægge, vinduer, loft og gulv.
- 2) Ventilationstabet Φ_v .
- 3) Den fra solvæggen tilførte varme $\Phi_{solvæg}$.
- 4) Varmetilførsel ved solindfald gennem vinduer $\Phi_{sol,vindue}$.
- 5) Varmetilførsel fra personer og inventar Φ_{pers} og Φ_{inv} .
- 6) Varmetilførsel fra anden opvarmning end solvæggen, Φ_{opv} .
- 7) Varmeakkumulering i luft og vægge Φ_{akk} .

4.3 Ventilationsbehov

Luftstrømmen igennem solvæggen skal svare til husets ventilationsbehov. Dette kan regnes som værende en halv gang i timen ved tvungen ventilation og en halv gang i timen ved naturlig infiltration. Da det samlede luftvolumen i huset er 136 m^3 , skal volumenstrømmen af luft igennem solvæggen altså være $68 \text{ m}^3/\text{h}$.

4.4 Diskretisering og integrering

Matlab kan desværre ikke løse partielle differentialligninger. Derfor har det i programmet været nødvendigt at diskretisere de partielle differentialligninger ved at dele solvæggen op i am kontrolvoluminer i højden. I væggen er der desuden foretaget en diskretisering i x -retningen med an opdelinger, således at væggen ialt opdeles i et net bestående af $an \times am$ kontrolvoluminer. I hvert kontrolvolumen reduceres varmebalancen så til en ordinær differentialligning, som direkte kan løses vha. MatlabTM's indbyggede integrationsfunktion, kaldet *ode*, som er en forkortelse for *Ordinary Differential Equation*. Ialt bliver der altså am ordinære differentialligninger for hver af de partielle differentialligninger for dæklag, luftlag og absorber, samt $am \times an$ ordinære differentialligninger for væggen.

Ode-funktionen har to forskellige varianter i MatlabTM: Ode23 bruger 2.- og 3.-ordens Runge-Kutta metode, mens ode45 bruger 4.- 5.-ordens Runge-Kutta. I dette projekt er valgt at anvende ode45, som giver den største nøjagtighed i beregningerne, til beregning af temperaturerne i solvæggen, og ode23 til beregning af rumluftens temperatur.

4.5 Kontrol af modellen

Forsøgsresultaterne er anvendt til at kontrollere den matematisk model for solvægs-energidioden. Dette er gjort ved at simulere forsøgene med det opbyggede simuleringsprogram, som er lavet ud fra den matematiske model. Resultaterne af simuleringen er dernæst sammenlignet med de temperaturmålinger, der blev foretaget under forsøgene. Det blev fundet, at der indenfor en usikkerhed på ca. 10% var overensstemmelse mellem temperaturerne. Det skal her bemærkes, at der er en vis usikkerhed på nogle af de i modellen indgående varmeovergangstal. En meget stor del af uoverensstemmelsen mellem forsøgs- og simuleringsresultater skyldes sandsynligvis denne usikkerhed.

5 Simuleringer

Dette kapitel vil indeholde en gennemgang af, hvilke inddata der er anvendt i simuleringerne og hvordan ydelsen fra solvæggen beregnes. Desuden vil simuleringresultaterne blive præsenteret.

5.1 Inddata

5.1.1 Vejrdata

Til simuleringerne er anvendt vejrdata fra *Det dansk referenceår TRY*, som indeholder vejrdata for København. Kort beskrevet er TRY sammensat af timeværdier for en række vejrdata fra 12 typiske måneder, som tilsammen danner et år.

5.1.2 Beskrivelse af referencehuset

Det anvendte referencehus er en eksisterende 2-værelses lejlighed på 55 m² i en beboelsesejendom på Peder Skramsvej i Helsingør. Ejendommen er bygget i 1948, og ydervæggene er af massiv tegl i den betragtede lejlighed.

I implementeringen af huset i simuleringsprogrammet er der foretaget en række forenklinger af den anvendte lejlighed. Således er alle ydervægge regnet som 1½-stens mur, og de omkringliggende lejligheder og trapperummet er regnet som havende samme temperatur som den aktuelle lejlighed. Yderligere er husets orientering ændret, således at den gavl, hvorpå solvæggen regnes monteret, vender mod syd. Ved implementeringen af vinduerne er detaljeringsgraden yderligere formindsket, idet vinduerne er opdelt i fire grupper efter hvilket verdenshjørne, de vender mod.

I hver gruppe er der sket en vægtning af de forskellige egenskaber for de indgående vinduer, således at f.eks. U-værdi og korrektionsfaktorer regnes ens for hele gruppen af vinduer. Antallet af personer og varmeafgivelsen fra inventar og udstyr er konstant over året. Derudover er der foretaget den forenkling, at lejligheden regnes som ét stort rum med fuldstændig opblanding af luften.

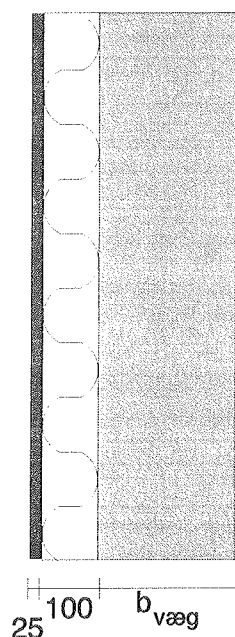
Alle disse forenklinger er foretaget for at få en simpel beregning af rumtemperaturen i lejligheden. Formålet med udregningen af lufttemperaturen er dels, at den medgår i simuleringen af solvæggen, dels at den påvirkes af solvæggen og muligvis bliver så høj, så det termiske indeklima i rummet bliver uacceptabelt.

5.1.3 Ventilationsbehov

Luftstrømmen igennem solvæggen skal svare til husets ventilationsbehov. Dette kan regnes som værende en halv gang i timen ved tvungen ventilation og en halv gang i timen ved naturlig infiltration. Da det samlede luftvolumen i huset er 136 m³, skal volumenstrømmen af luft igennem solvæggen altså være 68 m³/h.

5.2 Beregning af ydelse

5.2.1 Besparelsen ved en traditionel efterisolering



Til sammenligning med besparelsen ved opbygningen af den dynamisk isolerede solvæg vil det være relevant at udregne besparelsen ved en traditionel efterisolering. En traditionel efterisolering vil have den samme bagvæg som solvæggen, 100 mm mineraluld og en form for beklædning. Beklædningen kunne f.eks. bestå af træ eller af stålplader. Den efterisolerede væg er vist på fig. 5.1.

Figur 5.1 Efterisoleret væg.

5.2.2 Ydelse fra solvægsenergidioden

Den ventilerede solvæg har som tidligere beskrevet to forskellige formål: For det første skal den udnytte solvarmen til forvarmning af ventilationsluft, og for det andet skal den formindske varmetabet fra væggen vha. den dynamiske isolering, dvs. isoleringsmaterialet, hvorigennem luften strømmer. Ved indførelsen af dynamisk isolering vil varmetabet ud gennem væggen formindskes i forhold til en traditionelt isoleret væg. Den dynamiske isolering vil udover at mindske transmissionstabet medvirke til en forvarmning af ventilationsluften. Størstedelen af forvarmningen vil dog skyldes den tilførte solenergi. Ydelsen fra solvæggen består dermed af en kombination af ydelsen af dynamisk isolering og udnyttelse af solenergi.

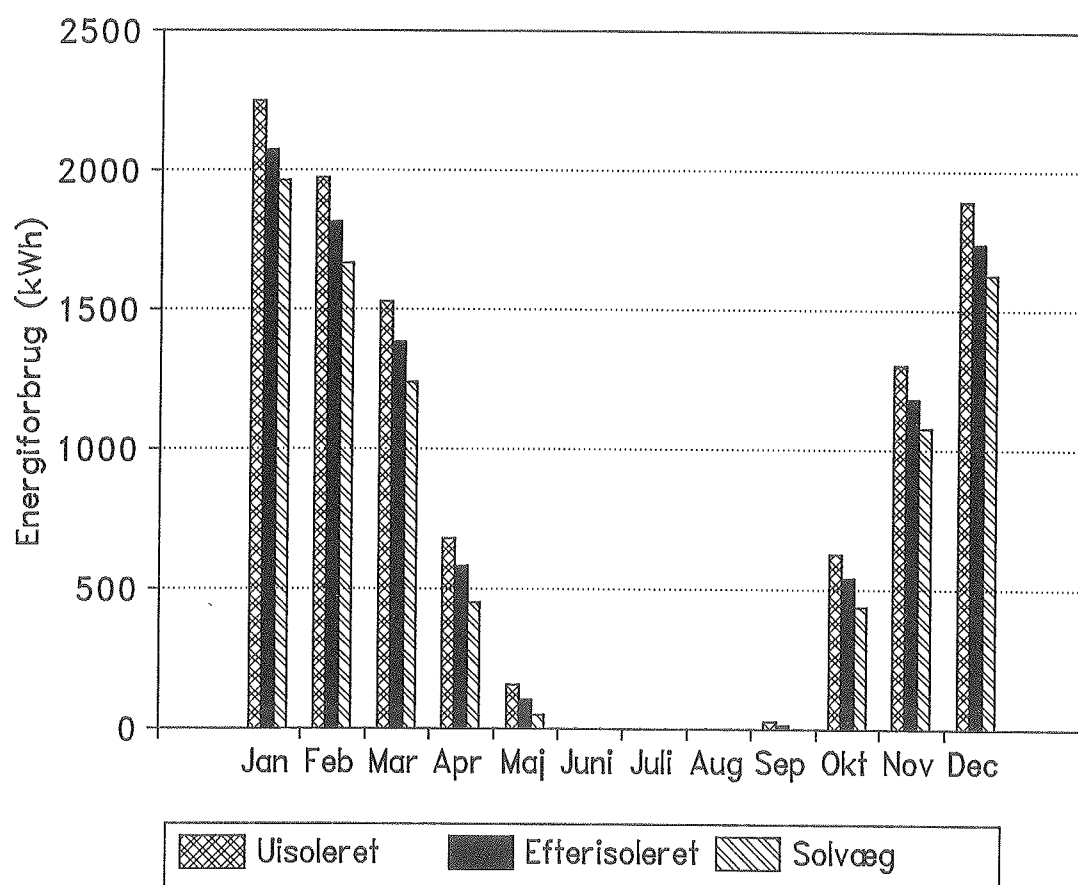
Solvæggens ydelse findes som den energibesparelse, man får ved opvarmning af et referencehus, når solvæggen monteres på dette. Der regnes her med, at opvarmning med andre energiformer end fra solvæggen kun sker til en rumtemperatur på 20°C. Den energimængde, der anvendes til opvarmning af referencehuset med og uden solvæg findes vha. en varmebalance for rumluften. Dette er nærmere omtalt på side 10.

5.3 Resultater

I dette afsnit vil resultaterne af simuleringerne af den ventilerede solvæg blive præsenteret. Alle resultaterne er baseret på en sydvendt solvæg.

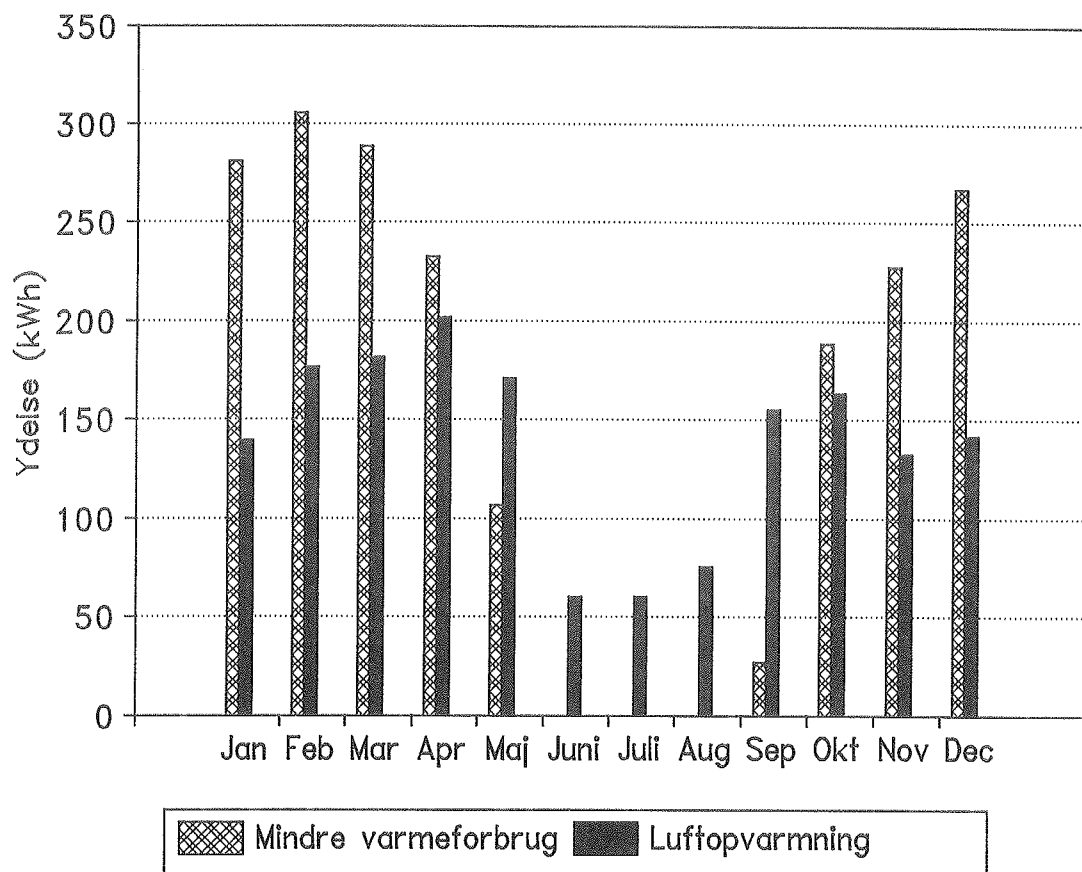
5.3.1 Årsydelsen af solvægsenergidioden

I dette afsnit er det valgt at se nærmere på, hvilken ydelse man kan få af et solvægsareal på $6,44 \text{ m}^2$. Dette areal svarer til arealet af 2 solvægsmoduler á $1,15 \times 2,80 \text{ m}^2$. I det anvendte referencehus udgør det 12% af lejlighedens gulvareal. Der regnes med et fast ventilationsbehov svarende til $0,5 \text{ h}^{-1}$ svarende til $68 \text{ m}^3/\text{h}$. Ydelserne er beregnet som beskrevet i afsnit 5.2.



Figur 5.2 Energiforbruget med hhv. uisoleret gavl, efterisoleret gavl og solvægsdiode på den sydvendte gavl, alle $6,44 \text{ m}^2$.

På fig. 5.2 er vist energiforbruget til opvarmning af reference-lejligheden vist for hhv. en uisoleret lejlighed som den eksisterende, lejligheden med $6,44 \text{ m}^2$ efterisolering og lejligheden med et tilsvarende solvægsareal påmonteret den sydvendte gavl. Energiforbruget er fordelt over årets måneder. Det ses, at der for alle måneder opnås en betydelig forbedring i ydelsen ved anvendelse af den ventilerede solvæg frem for traditionel efterisolering.



Figur 5.3 Solvæggens ydelse fordelt over måneder samt den energimængde, der tilføres rummet med luftstrømmen igennem solvæggen.

Solvæggens ydelse er tidligere defineret som den besparelse i energiforbruget til opvarmning, der opnås ved montering af solvæggen på den uisolerede væg. Dette er vist på fig. 5.3. På figuren ses desuden den energimængde, der tilføres rummet med luftstrømmen igennem solvæggen. Det skal her bemærkes, at solvæggens ydelse er beregnet som det energibehov, der er for at opvarme rumluften til 20°C i lejligheden, mens luftstrømmen igennem solvæggen fortsætter til rumluften opnår en temperatur på 25°C. Derfor opnås i sommermånederne en energitilførsel fra luftstrømmen, som overstiger solvæggens ydelse opgjort som besparelse på opvarmningen. Dette er udtruk for, at man i sommermånederne ikke kan udnytte hele den tilførte energi som reel besparelse. I vintermånederne, hvor rumtemperaturen på intet tidspunkt overstiger 20°C, vil energitilførslen fra luftstrømmen derimod udgøre en del af solvæggens ydelse.

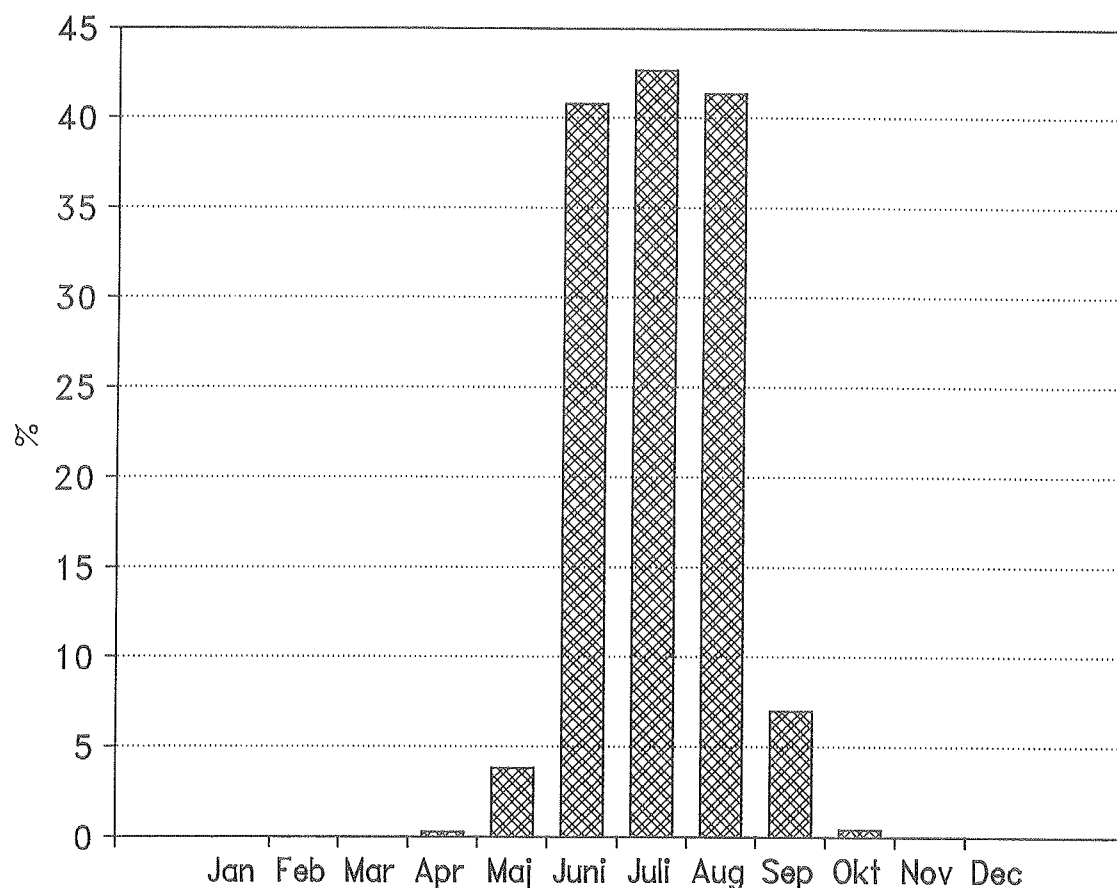
På årsbasis er energiforbrugene for lejligheden med de tre konstruktioner følgende:

Konstruktion	Energiforbrug (kWh/år)	Energibesparelse i forhold til uisoleret (kWh/år)	Energibesparelse i forhold til uisoleret (%)
Uisoleret	10426	-	-
Efterisoleret	9422	1004	9,6
Solvægs- energidiode	8501	1925	18,5

Tabel 5.1 *Energiforbrug og -besparelse for de tre konstruktioner.*

Det giver en årsydelse for solvæggen på 1925 kWh svarende til 300 kWh/m² solvæg på årsbasis. Ydelsen vil som ovenfor nævnt dels bestå af en formindskelse af transmissionstabet, og dels af en formindskelse af ventilationstabet, idet ventilationsluften forvarmes. Montering af solvæggen på husets sydvendte gavl vil altså kunne nedsætte lejlighedens behov for købt energi med ca. 18 %.

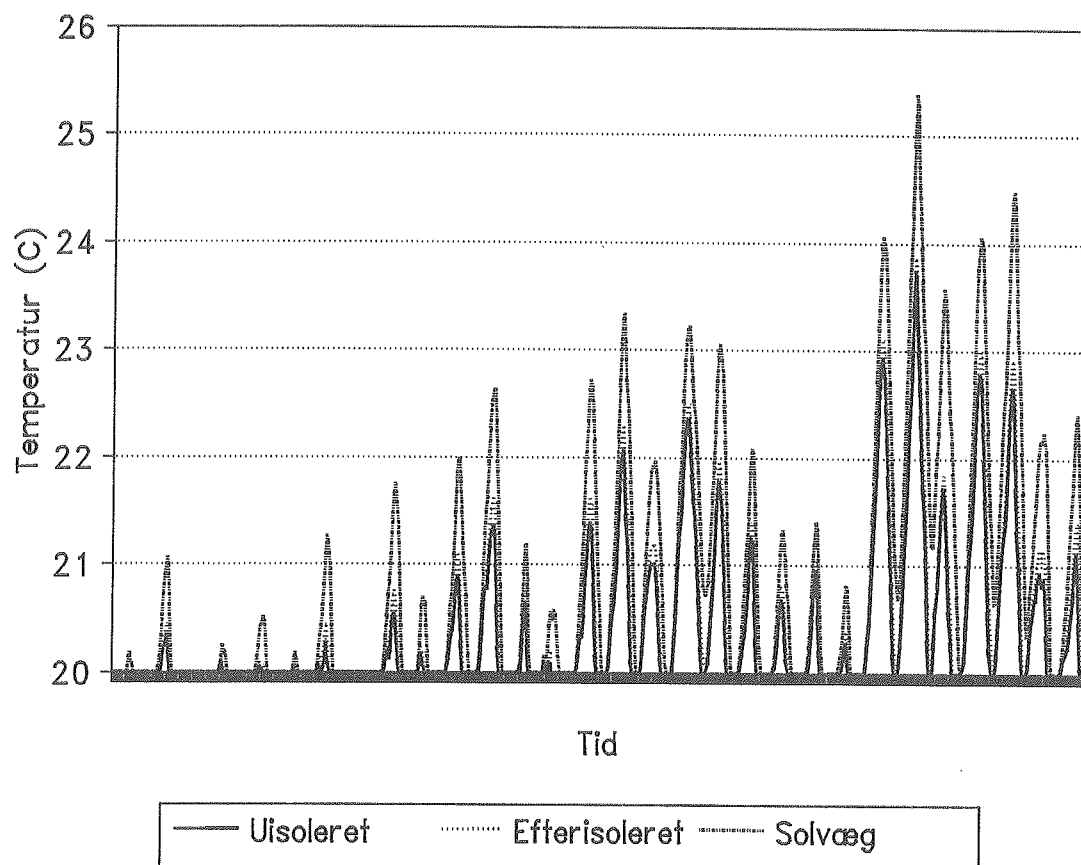
5.3.2 Overtemperaturproblematikken



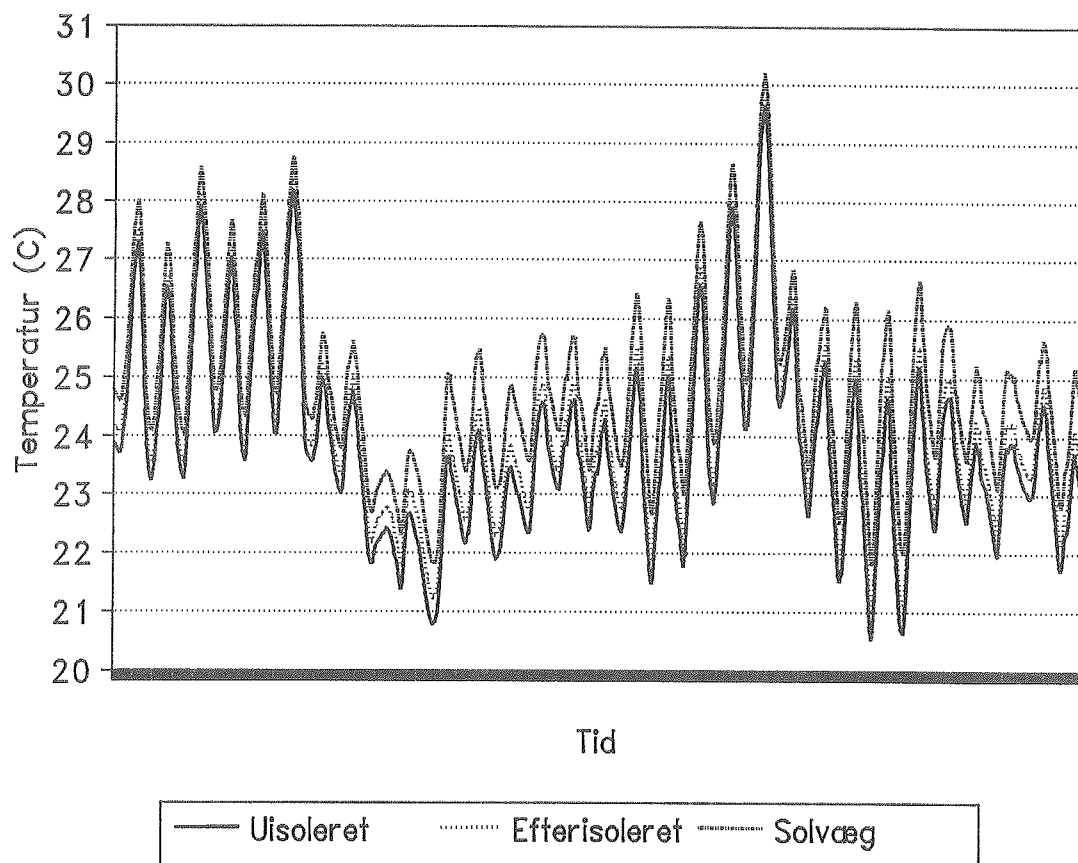
Figur 5.4 Den procentdel af tiden i hver måned, hvor luftstrømmen er lukket.

Som ovenfor nævnt er der i beregningerne lukket for luftstrømmen, når rumtemperaturen overstiger 25°C. Dette er gjort for at begrænse temperaturen i rummet, således at eventuelle problemer med overtemperaturer i lejligheden om sommeren minimeres. På fig. 5.4 ses, hvor stor en procentdel af tiden i hver måned, der er lukket for luftstrømmen, fordi rumtemperaturen overstiger 25°C. I sommermånederne er det tilfældet i mere end 40 % af tiden, mens temperaturen i vintermånederne på intet tidspunkt overstiger 25°C. Ud over at lukke for luftstrømmen, regnes der samtidig med, at der åbnes for vinduerne, når rumtemperaturen overstiger 25°C. Dette er simuleret som et luftskifte på 4 gange i timen.

På fig. 5.5 er rumtemperaturen i referencelejligheden vist i april måned. Det ses, at temperaturen i store dele af måneden overstiger 20°C. Dette gælder for alle tre vægtyper. Det er dog tydeligt, at de højeste temperaturer opnås med solvæggen. Overtemperaturer vil dog ikke være noget problem i april måned.



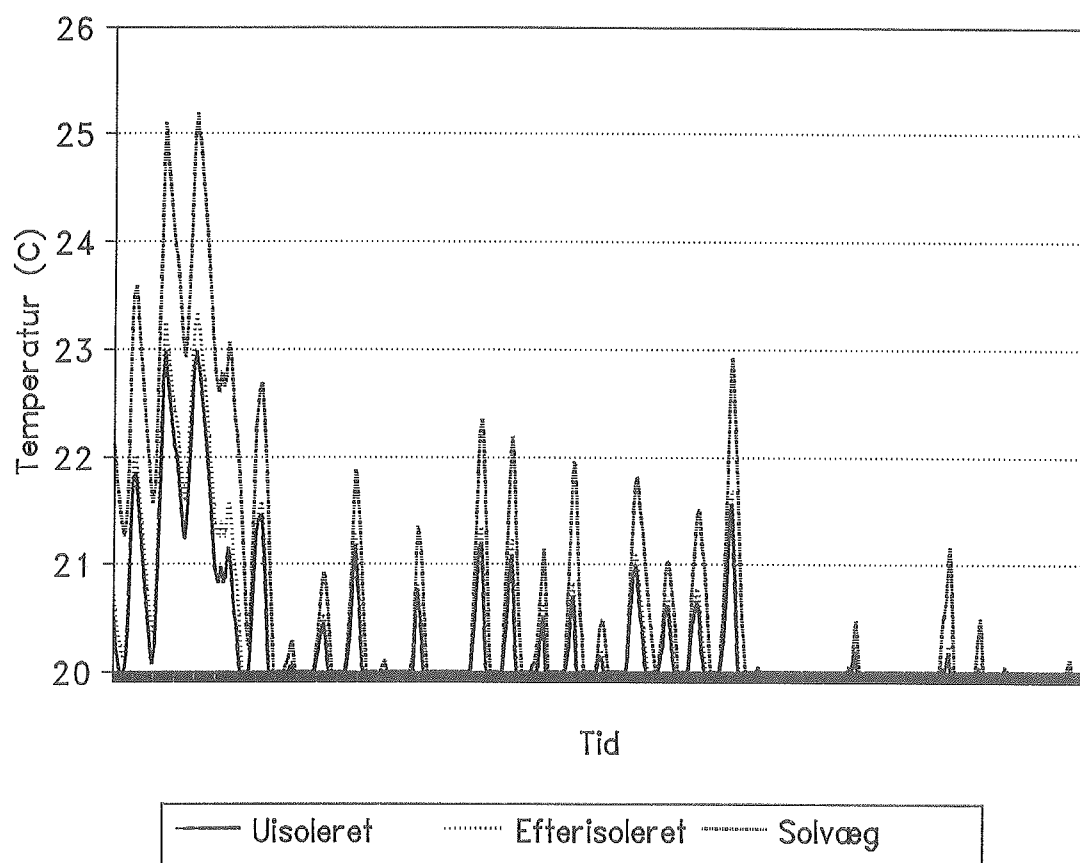
Figur 5.5 Rumtemperaturen i april med hhv. uisoleret og efterisoleret væg samt solvæg.



Figur 5.6 Rumtemperaturen i august med hhv. uisoleret og efterisoleret væg samt solvæg.

På fig. 5.6 ses rumtemperaturen i august måned. Det er tydeligt, at de højeste temperaturer opnås med solvæggen, selvom luftstrømmen som ovenfor nævnt er lukket i over 40 % af tiden i denne måned. Temperaturen kommer i længere perioder over 26°C , og det termiske indeklima må dermed anses for uacceptabelt. Det må dog tages i betragtning, at der her er tale om årets varmeste sommerdage, og solvæggen forværrer ikke det termiske indeklima væsentligt.

I Fig. 5.7 ses rumtemperaturkurverne for oktober. Rumtemperaturen er i langt størstedelen af tiden mellem 20°C og 25°C , og det termiske indeklima må dermed siges at være acceptabelt. Især i starten af oktober ses det, at solvæggen formår at tilføre en væsentlig energimængde til rummet, idet rumtemperaturen med solvæg i flere tidsintervaller er mere end 2°C højere end rumtemperaturen med den uisolerede væg. Forskellen mellem rumtemperaturen med den uisolerede væg og med den efterisolerede væg er derimod minimal.



Figur 5.7 Rumtemperaturen i oktober med hhv. uisoleret og efterisoleret væg samt solvæg.

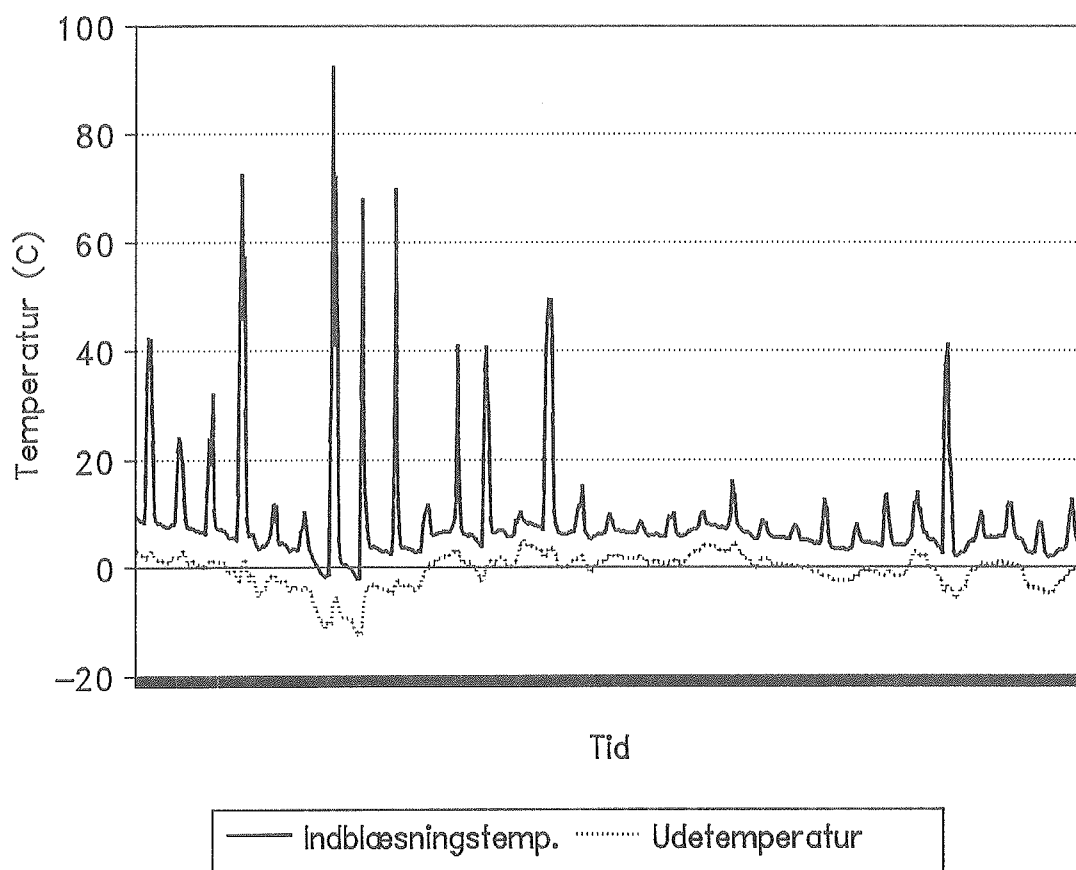
Udover problemerne med for høje rumlufttemperaturer kan indblæsningstemperaturen give problemer, hvis den bliver for høj, således at luftstrømmen kan give anledning til diskomfort, o.l. Indblæsningstemperaturen afhænger meget kraftigt af solstrålingens intensitet. En anden del af overtemperaturproblematikken end rumtemperaturen er luftens indblæsnings-temperatur. Indblæsningstemperaturen kan give problemer, hvis den bliver for høj, således at luftstrømmen kan give anledning til diskomfort, misfarvninger o.l. Indblæsningstempera-turen afhænger meget kraftigt af solstrålingens intensitet.

I sommermånederne er luftstrømmen lukket i en så stor del af tiden, at det ikke er fundet relevant at vise indblæsningstemperaturen for disse måneder.

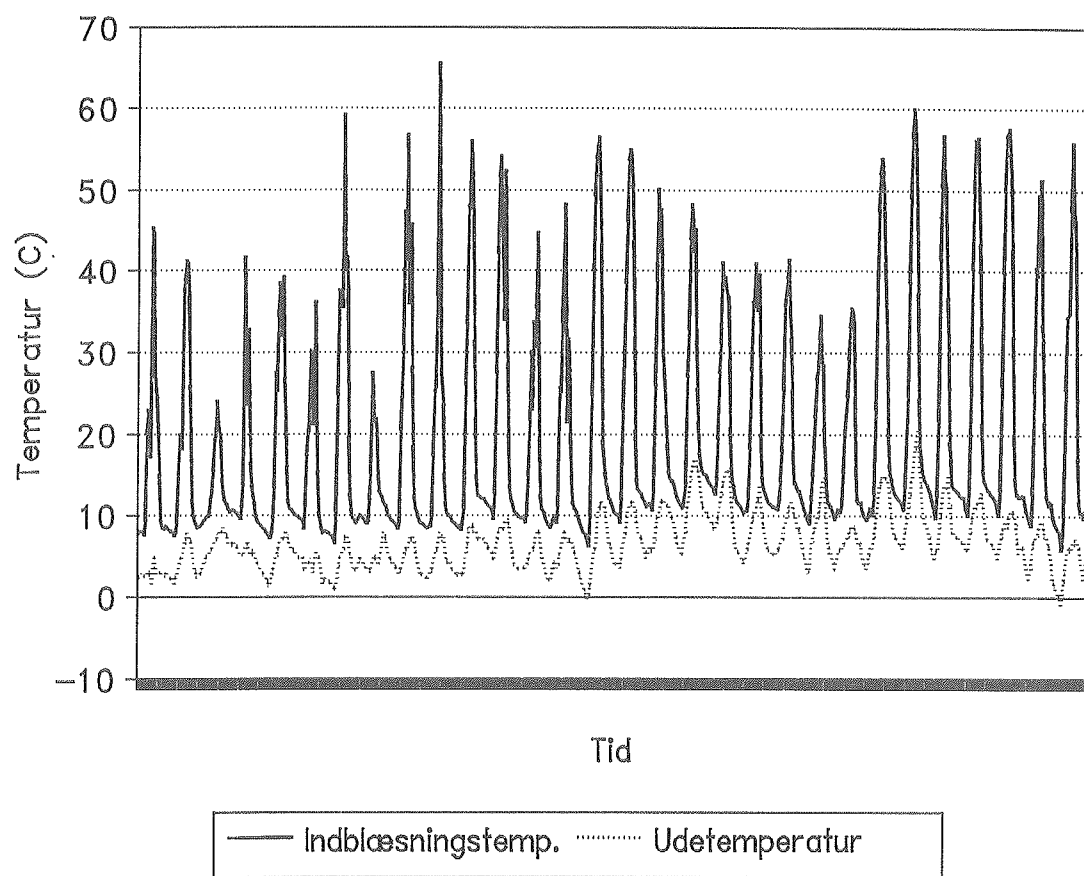
På fig. 5.8 - 5.10 er luftens indblæsningstemperatur vist sammen med udetemperaturen for hhv. januar, april og oktober. Det ses, at indblæsningsluften til tider bliver endog meget varm. Maksimumstemperaturen fås i januar, hvor indblæsningstemperaturen et kort tidsinterval er helt oppe på 92°C. Især i januar ses det tydeligt, at når der ikke er solindstråling på solvæggen, følger indblæsningstemperaturen og udetemperaturen hinanden med en rimeligt konstant afvigelse. Om foråret og efteråret, hvor solen er mere dominerende, fås oftere høje indblæsningstemperaturer, og de høje temperaturer holder sig over længere tidsintervaller.

I alle de tre viste måneder er det dog tydeligt, at indblæsningstemperaturen bliver så høj, at det kan volde problemer. Dette kunne muligvis løses ved at etablere en bedre varmeovergang

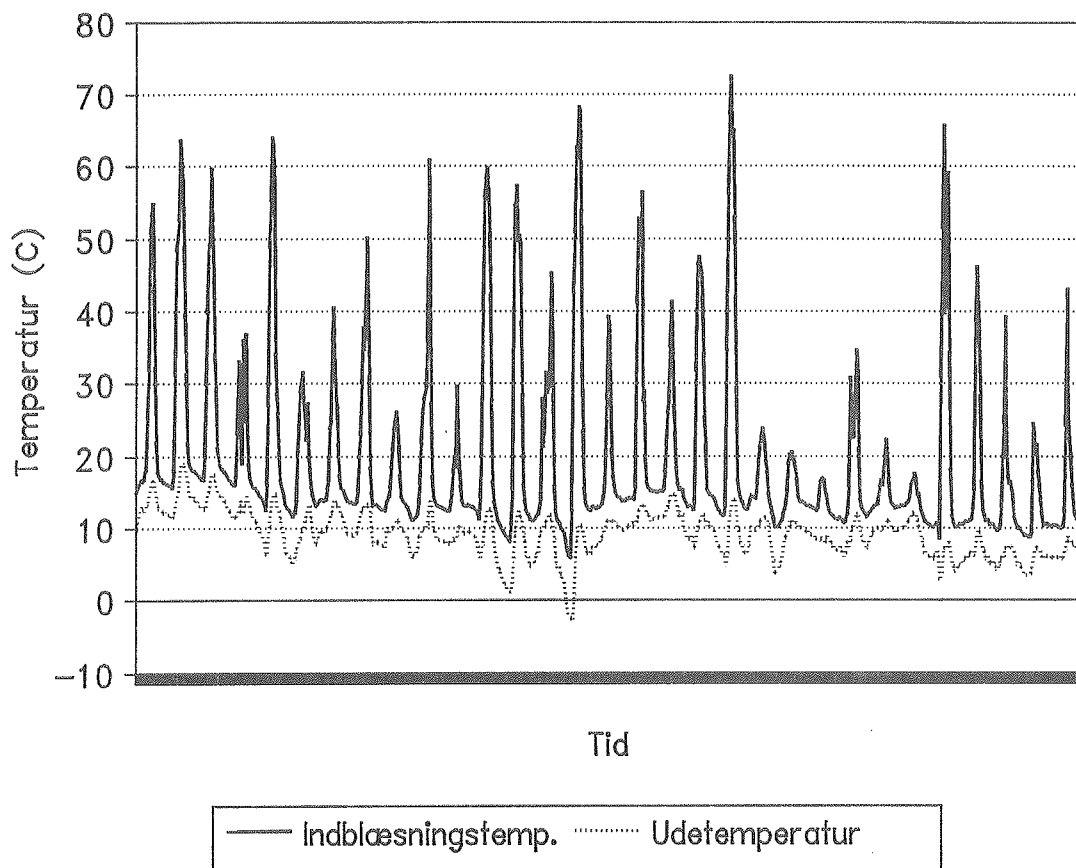
mellem den eksisterende væg og den inderste luftspalte, således at den store termiske masse i væggen kunne udnyttes til at dæmpe de store udsving i indblæsningstemperaturen. Dette har dog ikke været muligt at undersøge indenfor de givne tidsrammer.



Figur 5.8 *Luftens indblæsningstemperatur i januar.*



Figur 5.9 Luftens indblæsningstemperatur i april.



Figur 5.10 Luftens indblæsningsstemperatur i oktober.

5.3.3 Om materialevariationer

Absorberen

Den anvendte absorber til både forsøg og simuleringer er en 50 mm tyk Rockwool Industribatts Sort. Denne type mineraluldsbatts er pålagt en sort mineralvlies, hvilket gør den velegnet til at absorbere solstrålingen. Samtidig har den, som alle andre typer mineraluldsisolering en god isoleringsevne. En eventuel anvendelse af andre materialetyper må begrænses til materialer, der også har begge disse egenskaber, og som tillader en jævn luftgennemstrømning uden for stort tryktab. Der er ikke fundet alternativer på markedet med de samme egenskaber. Variationer af absorberen vil derfor umiddelbart indskrænke sig til variationer i tykkelsen. Rockwool Industribatts Sort fås i fire forskellige tykkelser, hvoraf den tykkeste er 50 mm. Mindre tykkelser vil naturligvis give en forringelse af ydelsen af den dynamiske isolering, og solvæggens pris vil antageligt ikke ændres tilsvarende.

Dæklaget

Det ideelle materiale til dæklag har en transmittans på 1 over for solstrålingen og en reflektans på 1 over for varmestråling fra absorberen. En lav varmeledningsevne til begrænsning af varmetabet til omgivelserne vil ligeledes være ønskelig. Derudover skal det naturligvis kunne fungere som klimaskærm for resten af solvægskonstruktionen, og det skal kunne klare de til tider meget høje temperaturer, der opstår i sommerperioden. Som en sidste

væsentlig faktor må prisen naturligvis ikke glemmes. De relevante dæklagsmaterialer, der mere eller mindre kan opfylde disse ønsker, er glas og plast.

Det afgørende for valget af dæklagsmateriale vil altså bl.a. være den maksimale anvendelsestemperatur. Det er derfor væsentligt at vide, hvor høj temperatur der opnås i dæklaget under solvæggens drift. Under simuleringerne med to solvægsmoduler á $1,15 \times 2,80 \text{ m}^2$ blev den maksimale dæklagstemperatur 93°C .

Bagvæggen

Bagvægsmateriale og -tykkelse er bestemt af, hvordan vægkonstruktionen i det aktuelle hus er opbygget.

De mest almindelige materialevalg i Danmark er beton, gasbeton eller tegl. I simuleringerne er regnet med en teglvæg af en tykkelse svarende til $1\frac{1}{2}$ sten. Dette vil være et ofte forekommende tilfælde ved anvendelse i renoveringsprojekter.

De materialeparametre for bagvæggen, der har betydning for solvæggens ydelse, er ud over tykkelsen varmeledningsevne λ , densitet ρ og varmekapacitet c_p . I [7] er det undersøgt, hvilken betydning variationer i disse parametre har for ydelsen af en uventileret Trombé-væg (solvæg med en tung bagvæg). Konklusionen af undersøgelsen er, at højere værdier af λ og $\rho \cdot c_p$ giver et større udbytte, samt at udbyttet stiger med vægtykkelsen. Udbyttet i den ventilerede solvæg stammer for størstedelen fra luftstrømmen. Luftstrømmen vil under transporten i den inderste luftspalte varmeveksle med væggen, hvorved man til dels opnår en virkning som i den uventilerede Trombé-væg. I den ventilerede solvæg vil opvarmningen af væggen med solindfald dog være væsentligt mindre end i den uventilerede Trombé-væg. Det må derfor konkluderes, at materialeparametrene for væggen ikke er væsentlige for solvæggens ydelse, men at de kan medvirke til en lille forbedring i ydelsen ved øget termisk masse i væggen.

6 Produktion af solvæggen

Det er ønsket at anvende et profilsystem, der gør at prisen pr. m² opsat solvæg ikke bliver væsentlig højere end en traditionel efterisolering. For at opnå dette må der anvendes et profilsystem, der specielt reducerer montageudgifterne, da disse i dag udgør en stor del af den samlede pris på solvægge.

I /1/ er et sådant profilsystem beskrevet, og med få ændringer vil det kunne benyttes til energidioden. I det følgende er der taget udgangspunkt i det, der i /1/ er beskrevet som "profilsystem 2".

Der er to faser i produktionen af solvæggen: Der er produktionen af de enkelte solvægsmoduler, og der er opsætningen af solvægsmodulerne på huset.

6.1 Solvægsmodulerne

I dette afsnit beskrives kort profilsystemet og produktionen af modulerne på fabrik.

6.1.1 Dimensioner

Dimensioner for det enkelte modul afhænger af de anvendte materialer samt af praktiske hensyn. Det kan eksempelvis være hensigtsmæssigt, at modulerne kan laves i forskellige størrelser, der kan tilpasses huset. Modulerne må ikke være større, end de er til at håndtere (evt. med hjælpemidler), men de må på den anden side ikke blive så små, at de bliver uøkonomiske pga. relativt stort indhold af profil og øgede montage udgifter.

Dybden af modulet skal være så lille som muligt af styrkemæssige hensyn og således, at der ikke skygges for vinduer o.l., samt at den samlede væg ikke bliver urimeligt tyk. På den anden side må dybden ikke være så lille, at lufthastighederne i solvæggen bliver høje og tryktabet dermed stort, så der skal bruges uforholdsmæssigt meget energi til at ventilere solvæggen.

6.1.2 Profilsystem og samling af moduler

Med udgangspunkt i "profilsystem 2" fra /1/ skal her skitseres et forslag til et profilsystem. Ved at ændre "Profilsystem 2" så der bliver plads til en porøs absorber i stedet for en teflon folie kan profilsystemet anvendes til solvægsenergioden.

Som porøs absorber er som tidligere omtalt valgt en Rockwool Industribatt Sort. Fordelene ved Rockwool Industribatt er, at den er godt varmeisolerende, er forholdsvis stiv, der er et lille tryktab over den, når der suges luft igennem den, og den er billig. Der kan muligvis findes andre materialer med lignende egenskaber, der med fordel kan anvendes i stedet, hvilket vil være ønskeligt, da der kan være visse problemer ved at anvende Rockwool som absorber. Disse problemer består i uønskede afgasningsprodukter og fiberløsrivelse fra mineralulden. Dette er nærmere undersøgt i første projektfase, se teksten i bilaget.

Rockwool absorberen skal kunne monteres i solvægsmodulet på fabrikken. Det er vigtigt at absorberen monteres, så der ingen frie kanter er, hvorfra der kan løsrive sig fibre, som kan blive ført ind i boligen med ventilationsluften.

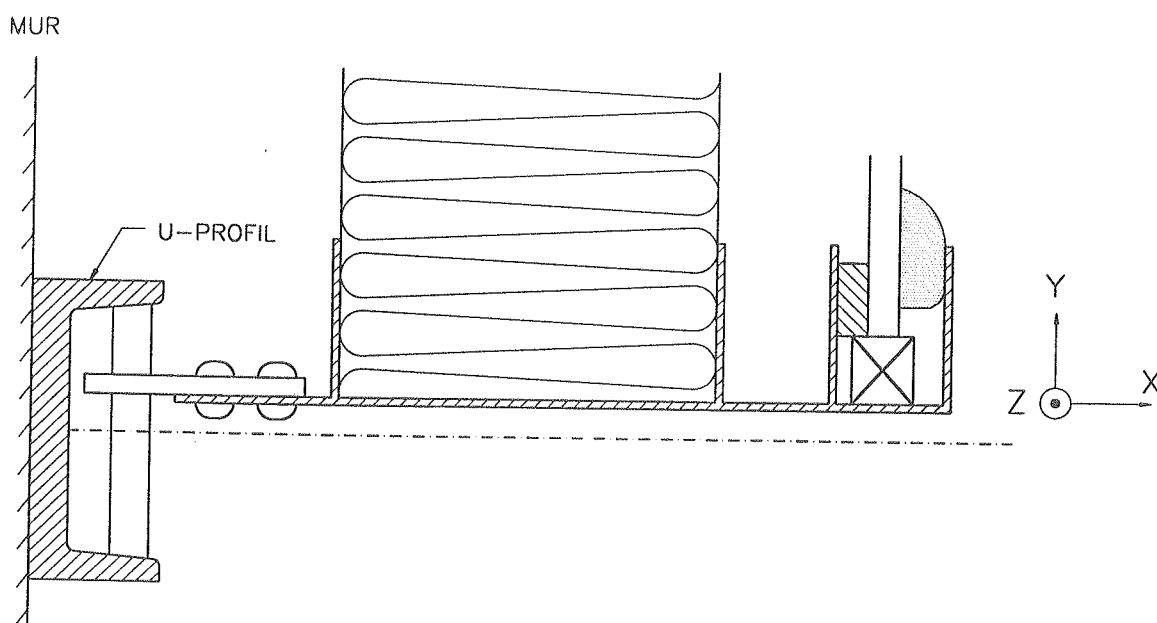
Afhængigt af modulstørrelsen kan det være nødvendigt at spænde hønsenet eller ståltråd ud til at holde absorberen på plads, så den ikke falder sammen eller buler ud.

Alt efter monteringsmetoden for absorberen kan forskellige udseender af profilsystemet tænkes.

I det følgende vises et par eksempler på profilsystemer, der kan anvendes til solvægs-energidioden. De viste eksempler vil være bedst egnede til ekstrudering, men profilerne kan også udformes, så de kan laves ved bukning.

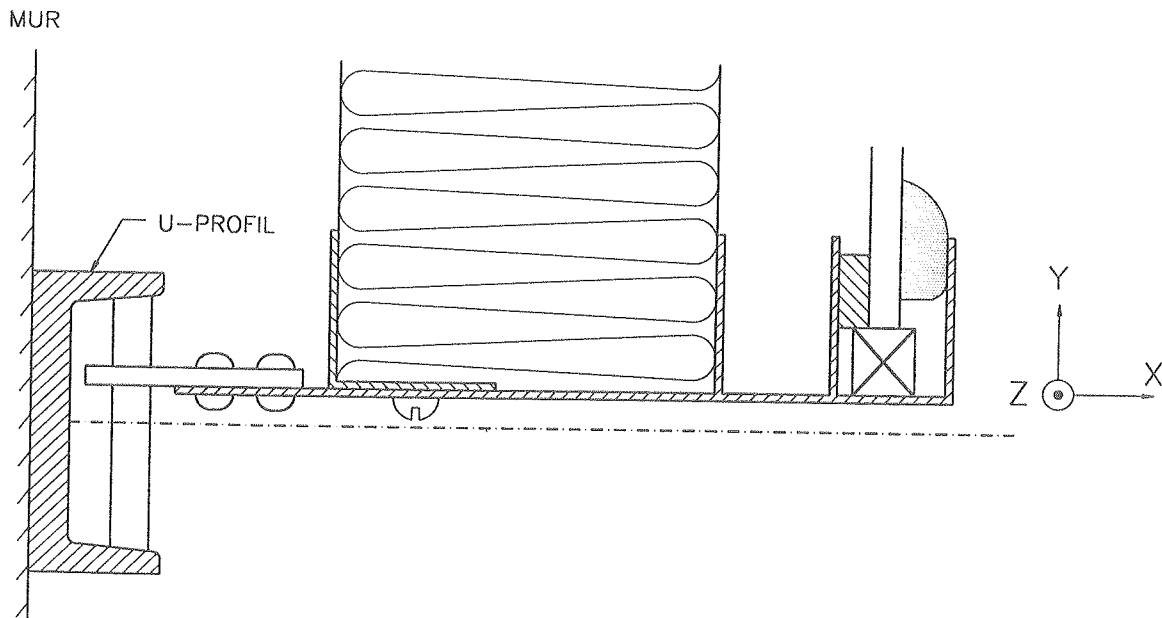
Under kommentarer til profilsystemet i /1/ er det nævnt, at det er at foretrække, hvis de enkelte rammeprofiler samles omkring dæklaget (glasset).

Hvis det er muligt at samle rammeprofilerne både omkring dæklaget og absorberen i samme funktion, kan følgende profilsystem foreslås.



Figur 6.1 Vandret snit. Profil som samles omkring absorber og dæklag i en funktion.

Hvis det er at foretrække, at profilrammerne samles omkring dæklaget, og absorberen først derefter lægges i og fastgøres kan følgende profilsystem foreslås:



Figur 6.2 Vandret snit. Profil som samles omkring dæklaget og absorberen lægges i efterfølgende.

Der monteres en sålbænk på modulets top, og på modulets bund monteres en tætningsliste. Se fig. 6.4.

Modulerne laves så færdige som muligt på fabrikken, så der skal bruges så lidt tid på byggepladsen som muligt til at montere modulerne.

6.2 Opsætning af moduler

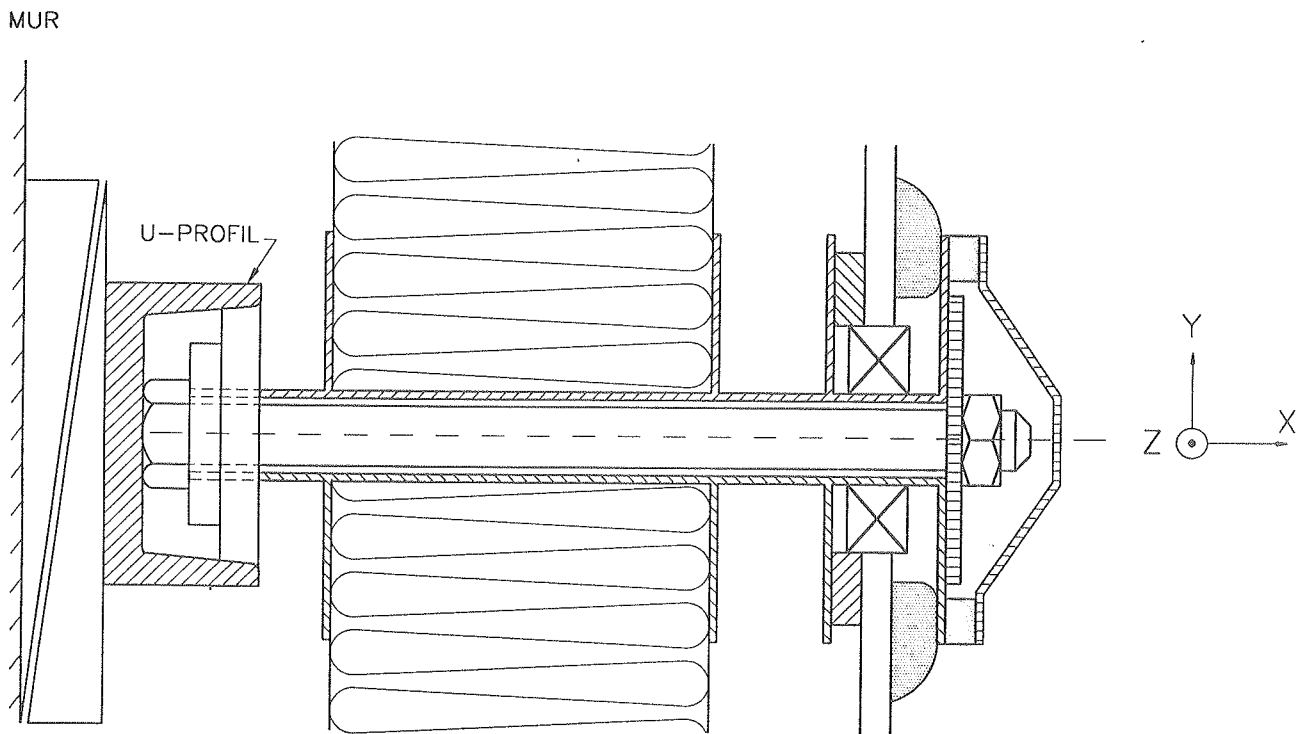
Her beskrives opsætningen af solvæggen på bygningen.

Modulerne fastgøres ved hjælp af kroge til lodrette U-skinner, der sidder på muren.

U-profilet monteres sådan, at modulerne ikke påvirkes af de ujævnheder, bygningens ydermur har. Når man har store flader af glas, der er sat op ved siden af hinanden, skal der næsten ingen forskydning til, før dette kan ses. Det er derfor meget vigtigt, at U-profilet monteres så nøjagtigt, at samtlige moduler sidder plant.

Profilsystemet kræver kun en lille afstand mellem modulerne, dvs. der opnås et stort glasareal.

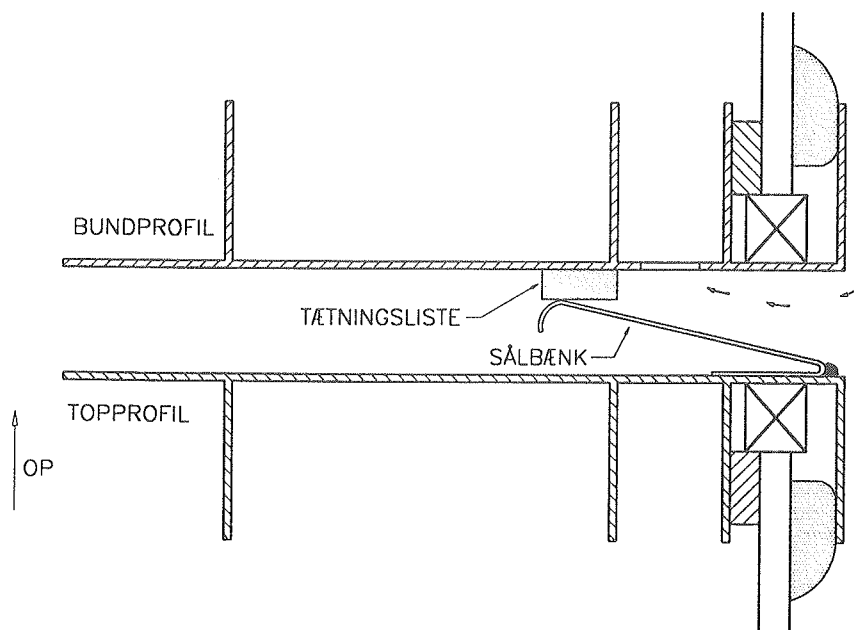
Modulerne er boltet fast således, at én skive holder på to moduler. Dette medfører, at to sidemoduler bliver berørt, hvis det mellemste skal udskiftes. Mellem muren og U-skinne er der på fig. 6.3 vist 2 kiler, som kompenserer for ujævnheder i muren.



Figur 6.3 Vandret snit af profilsystemet monteret på U-skinen.

6.2.1 Tætning langs modulerne

På toppen af modulerne er der monteret en sålbænk. Sålbænken virker som en bladfjeder, der trykker sig op med en tætningsliste, som er monteret i bunden af det øvre modul. Samlingen med sålbænk mellem top og bund af 2 profiler er vist på fig. 6.4.



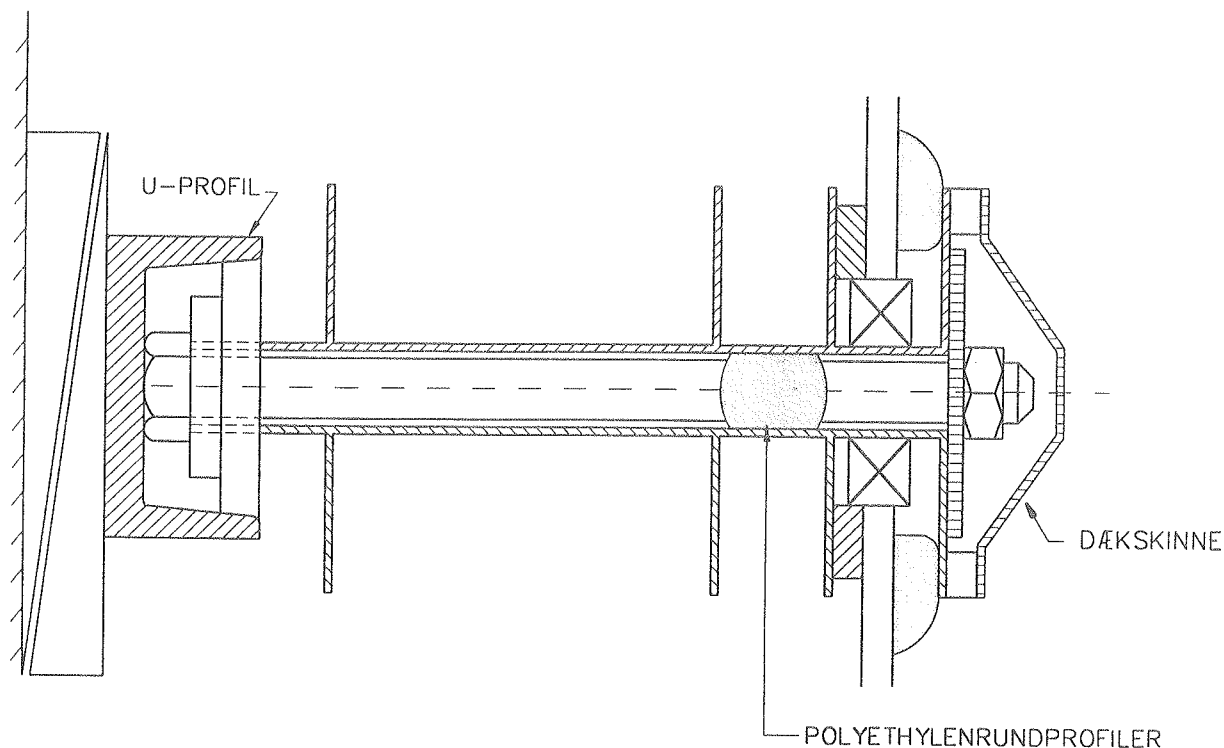
Figur 6.4 Lodret snit. Samling mellem top og bund af 2 profiler.

Efter at modulerne er ophængt og fastgjort, monteres der lodret mellem modulerne en

dækskinne. Dækskinnen har til formål dels at tætné mellem modulerne, så der ikke kommer vand ind til muren, dels at skjule den lodrette spalte mellem 2 moduler og de bolte, der holder modulerne på plads.

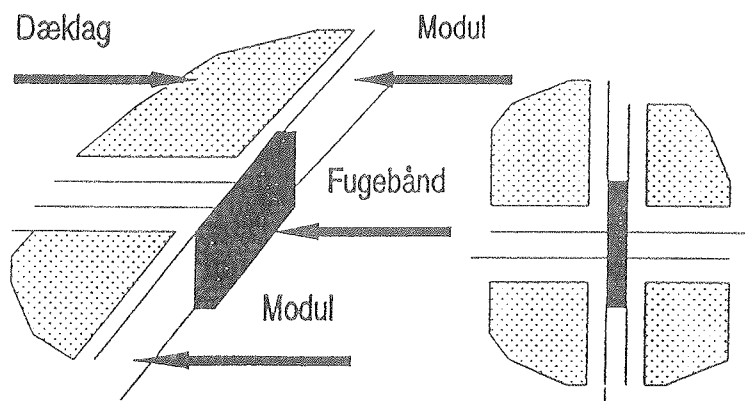
Som dobbelttætning mellem siderne af to moduler er der anvendt et polyethylenrundprofil, som vil tætné for luft og fugt, der slipper gennem dækskinnen. Se fig. 6.5.

MUR



Figur 6.5 Tætning mellem siderne af 2 moduler.

Den sidste tætning, der er nødvendig, er en tætning mellem hjørnerne på 4 moduler. Tætningen foretages med fugebånd i minimum sålbænkens dybde og ca. 60 mm i højden, så vand fra sålbænken hindres i at løbe ned mellem modulerne. Se fig. 6.6.



Figur 6.6 Tætning mellem hjørner af 4 moduler med fugebånd.

Alle samlinger er således sikret mod vandindtrængning. Det skal bemærkes, at der ikke er valgt en færdig løsning til tætning langs kanten af den samlede solvæg. Det samme gælder diverse tilslutninger til døre, vinduer m.m. Dette falder uden for projektets tidsramme og overlades til en eventuel fabrikant, der har erfaring i produktudvikling.

7 Økonomi

En meget væsentlig faktor for anvendelsen af den ventilerede solvæg er økonomien. I dette kapitel skal laves en overslagsberegning over økonomien i anvendelsen af en sådan solvæg.

7.1 Prisen for opførelsen af en solvæg

Det må forudsættes, at solvæggen opføres enten i forbindelse med et eksisterende mekanisk ventilationsanlæg eller i forbindelse med et ventilationsanlæg, der alligevel skulle installeres. Prisen for ventilationsanlægget regnes således ikke med i prisen for solvæggen.

Monteringen forudsættes at foregå vha. et profilsystem udviklet til solvægge som beskrevet i kap. 5. I /1/ er foretaget prisoverslag for tre forskellige af sådanne systemer, som er anvendelige til ventilerede solvægge. Resultaterne af prisoverslagene er beskrevet nedenfor. For yderligere oplysninger end de her givne må henvises til /1/.

7.1.1 Profilsystem i stål

For et profilsystem i stål ligger den forventede pris på ca. 900 - 1200 kr/m² alt efter produktionens størrelse. Den høje pris svarer til en produktion af ca. 100 solvægsmoduler. Prisen omfatter levering og montering af færdige solvægsmoduler inkl. udgift til byggeplads og diverse uforudseelige udgifter.

7.1.2 Profilsystem i aluminium

For et profilsystem i aluminium skønnes den samlede pris at blive max. 900 kr/m² ved fremstilling af en serie på ca. 100 moduler. Prisen omfatter de samme ting som prisen på stålprofilerne.

7.1.3 Vitral system

Det såkaldte Vitral system er et profilsystem i aluminium udført af firmaet Vitral ud fra profiler, der er udviklet til andre formål. Prisen for det samlede system inkl. montage bliver her mindst 1975 kr/m².

7.1.4 Prisen for opbygningen af den ventilerede solvæg

Ud fra ovenstående prisoverslag kan konkluderes, at prisen for den ventilerede solvæg kan holdes omkring 900 kr/m². Heri er inkluderet levering og montage af det færdige solvægsmodul. Denne pris er gældende for brug i forbindelse med renovering. I forbindelse med nybyggeri vil merprisen for solvæggen være mindre. Det skal her nævnes, at der i /8/ er fundet en merpris på 905 kr/m². Heri er indregnet, at dæklaget skal kunne rengøres indvendig, hvilket betyder en merudgift.

7.2 Projektets lønsomhed

Analysen af projektets lønsomhed sker ud fra følgende forudsætninger:

- Årsydelse 1925 kWh med 2 solvægsmoduler á $1.15 \times 2.80 \text{ m}^2$
- Investering 900 kr/m²
- Energipris 0.50 kr/kWh (svarende til olie eller gas)

7.2.1 Udregning af simpel tilbagebetalingstid

Den simple tilbagebetalingstid udregnes som investeringen delt med den årlige besparelse. Det giver:

$$T = \frac{I_0}{b_0} = \underline{6 \text{ år}}$$

Da solvæggens levetid må forventes at blive større end 6 år, er projektet set ud fra denne simple betragtning lønsomt.

8 Anvendelse

Dette kapitel skal beskrive, hvor den ventilerede solvæg kan anvendes i praksis og herunder hvilke etablerede komponenter/konstruktioner, den kan erstatte. Desuden skal en række mulige problemer i anvendelsen beskrives.

8.1 Mulige anvendelsesområder

Solvæggen vil være mest oplagt til boligbyggeri, hvor der er varme- og ventilationsbehov døgnet rundt. Da solvæggen giver den største ydelse om dagen, vil den kunne anvendes på erhvervs- og kontorbyggeri, hvor der ofte er et stort ventilations behov om dagen.

Anvendelsen af den ventilerede solvæg vil være begrænset til bygninger, hvor der er installeret eller skal installeres et mekanisk ventilationsanlæg. Da der nu installeres mekanisk ventilation i størstedelen af nybyggeriet og i mange ældre boligbyggerier i forbindelse med renoveringer, vil anvendelsesområdet dog stadig være forholdsvis stort. Medmindre der er tale om en meget lufttæt bygning, vil det være nødvendigt med en ventilator ved indblæsning fra solvæggen. Indblæsningen kan naturligvis kombineres med udsugning fra køkken og bad.

I forbindelse med nybyggeri kan solvæggen indbygges i vægkonstruktionen. Dette kan ske på større eller mindre flader - f.eks. vinduesbrystninger. Solvæggen kan så anvendes som et alternativ til en traditionel varmegenvindingsenhed i ventilationsanlægget.

Aktualiteten i renoveringssager vil være størst, hvor der både skal efterisoleres og installeres nyt mekanisk ventilationsanlæg. Solvæggen vil her være et oplagt alternativ til en traditionel udvendig efterisolering.

8.2 Eventuelle problemer i anvendelsen

Ved anvendelsen af den ventilerede solvæg må man være opmærksom på, om den luft, der trækkes ind gennem solvæggen, er forurennet. Dette kunne f.eks. være tilfældet, hvis solvæggen blev monteret på 1. sal af en gadefacade ud til en trafikeret vej.

Forurennet luft ville ud over ubehaget ved indblæsningen til rummet også kunne give en forringelse af solvæggens effektivitet. Dette kunne ske ved tilsnævning af dæklagets inderside, hvorved transmittansen ville forringes væsentligt. En løsning på et sådant problem kunne være opsætning af et filter ved luftindtaget. De hidtil udviklede profilsystemer til montering af solvægsmøbler /1/ tillader ikke pudning af dæklaget indvendig. Dæklaget må naturligvis holdes rent på ydersiden for at sikre optimal effektivitet.

Ved materialevalget må man være opmærksom på, om der kan forekomme afgasninger, fiberløsrivning eller lignende problemer. Derudover må man naturligvis være opmærksom på, at der kan opstå meget høje temperaturer i solvæggen, hvorfor materialernes maksimale anvendelsestemperaturer skal være høje. Ved anvendelsen af visse plastmaterialer til isolering eller dæklag kan der både være risiko for farlige afdunstninger og for materialedeformationer ud over det acceptable. Den i dette projekt anvendte mineraluldsabsorber har en max. anvendelsestemperatur på 200°C på vliessiden, som vil blive den varmeste.

Anvendelsen af mineraluld kan i visse tilfælde være problematisk pga. fiberløsrivning og afgasningsprodukter fra mineralulden. I forbindelse med dette projekt er udført et forprojekt (se bilag), som sandsynliggør, at der ikke er nogen sundhedsmæssig risiko ved at anvende ventilationsluft, der har passeret en dynamisk isolering af mineraluld. Dette er gjort ved forsøg, hvor fiberløsrivning og afgasning er undersøgt under de for denne anvendelse værste tænkelige forhold. Det må derfor antages, at anvendelse af mineraluld i en ventileret solvæg ikke udgør nogen sundhedsmæssig risiko.

9 Konklusion

Der er i dette projekt undersøgt en ventileret solvæg til forvarmning af ventilationsluft vha. dynamisk isolering.

Der er vha. varmebalancer lavet en detaljeret matematisk model for solvæggen. Modellen for den solvægsenergidiode er indlagt i et beregningsprogram, som herefter er sammenlignet med forsøgsdata fra en indendørs forsøgsopstilling. sammenligningen viste, at modellen giver resultater, der inden for en usikkerhed på ca. 10 % stemmer overens med de målte værdier. Modellen passer altså rimeligt.

Der er vha. beregningsprogrammet foretaget en række simuleringer med vejrdata fra *Dansk referenceår TRY*. Alle simuleringerne er sket med sydvendt solvæg. Ydelsen er beregnet som en formindskelse i energibehov til opvarmning af en referencelejlighed i forhold til samme lejlighed uden solvæggen. Denne formindskelse i opvarmningsbehov sker dels ved at den dynamiske isolering mindsker transmissionstabet, og dels ved en formindskelse i ventilations-tabet ved luftens opvarmning.

Det er vist, at den ventilerede solvæg har en betydelig større ydelse end en traditionel efterisolering.

Simuleringerne viste, at meget høje rumtemperaturer ikke vil blive et problem om sommeren, hvis der lukkes for luftstrømmen igennem solvæggen, når rumtemperaturen overstiger 25°C.

Solvæggen må forventes at skulle monteres i moduler vha. et profilsystem. Montering vil kunne ske i forbindelse med nybyggeri eller renovering, og kun i forbindelse med mekanisk ventilation. Det absorbermateriale, der i øjeblikket ser ud til at være det bedst anvendelige, er mineraluld pålagt en sort mineralvlies på overfladen. Valget af dæklag står mellem glas- og plastmaterialer.

De opnåede resultater viser en årsydelse for en 6,44 m² stor solvæg på 1925 kWh svarende til 300 kWh/m². Med en investering på 900 kr/m² giver dette en særdeles lønsom energibesparende foranstaltning.

Referencer

- /1/ Kirsten Isaksen: Profilsystem til solvægge. Meddelelse nr. 253, LfV, DTU. Juni 1993.
- /2/ Henning Brendstrup og Dan C. V. Andersen: Udvikling af monterings- og profilsystem til opbygning af solvægsmoduler. Undersøgelse af solvæg med porøs absorber. Eksamensprojekt udført ved DIA, Maskinafdelingen. Februar 1993.
- /3/ Vagn Korsgaard: Lav-energihus med modstrømsvægge. Meddelelse nr. 43, LfV, DTU. 1976.
- /4/ K. Johnsen, M. Kvetny, H.S. Andersen: Økonomisk vurdering af energibesparende foranstaltninger. SBI-anvisning 132, Statens Byggeforskningsinstitut 1982.
- /5/ B.B. Lauridsen, H. Nielsen: Skitseprojekt til et lavenergihus. Eksamensprojekt, LfV, DTU. Januar 1994.
- /6/ S. Svendsen: Transmission af solstråling i glas. LfV, DTU. Februar 1984.
- /7/ C. Paludan-Müller: Undersøgelse af solvægge ved hjælp af en indendørs forsøgsopstilling. Meddelelse nr. 179, LfV, DTU. April 1987.
- /8/ N.B. Andersen, T. Genborg, U. Falck: Driftserfaringer med brystnings-solvægge. Energiteknologi, Dansk Teknologisk Institut. 1993.

Bilag

Solvæg som energidiode

FORPROJEKT.

Redegørelse af de sundhedsmæssige problemer ved at
lade ventilationsluft passere gennem mineraluld i en solvæg.

Oktober 1993

Indhold

1	Indledning	41
2	Laboratorieforsøg	41
3	Andre undersøgelser	42
4	Montering	43
5	Konklusion	43

I denne rapport er der henvist til følgende rapporter

- Bilag 1 : Fiberafgivelse og afgangning fra mineraluld, Juli 1993, Bascon.
- Bilag 2 : Måling af fiberafgivelse i indvendigt isolerede ventilationskanaler, Byggeteknik, 1987.
- Bilag 3 : Health statement, Mineral Wool Insulation, Eurisol, 1991.
- Bilag 4 : Volatile organic compound emission from some building and furnishing materials, Proceedings of Indoor Air '93, Vol. 2.

1 Indledning

Denne rapport er 1. fase af projektet "Solvægge som energidiode".

Arbejdsgruppen for passiv solvarme har peget på det problematiske i at anvende mineraluld, som både kan afgive fibre og formaldehyd til friskluften, når den passerer gennem mineralulden.

Formålet med denne rapport er at sandsynliggøre, at der ikke er nogen sundhedsmæssig risiko ved at benytte ventilationsluft, der har passeret gennem en dynamisk isolering af mineraluld.

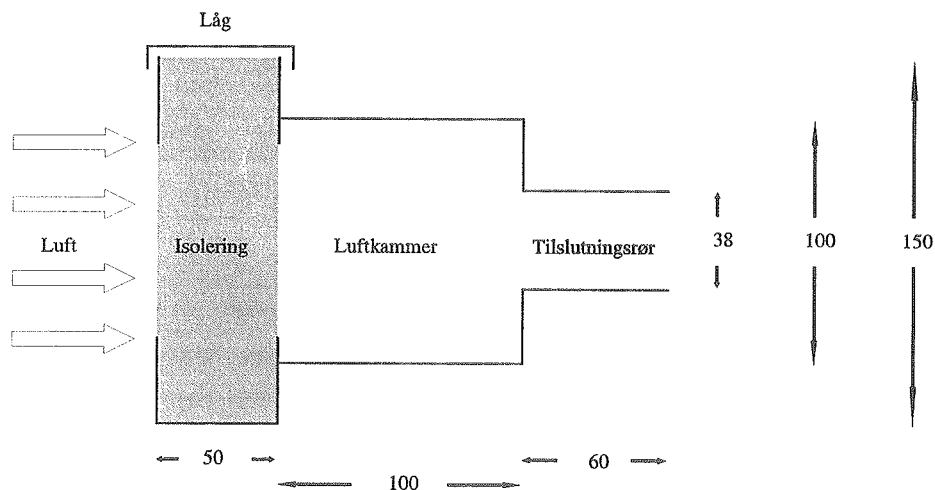
Dette er gjort ved at foretage laboratorieforsøg, hvor mængden af fibre og afgasningsprodukter i ventilationsluften er bestemt, efter at ventilationsluften har passeret gennem mineralulden.

2 Laboratorieforsøg

Til brug ved laboratorieforsøgene er der opbygget en forsøgsopstilling.

Forsøgsopstillingen består af en prøveholder, hvor mineraluldsprøven skydes ind i, og låget fastspændes, så luften kun kan passere vinkelret igennem prøven inden for prøvefeltets åbningsareal. Måleudstyret tilsluttes prøveholderens modsatte side.

Prøveholderen er vist på følgende figur.



Figur 1 Skitse af prøveholderen der er anvendt ved forsøg.

Prøveholderen er udformet, så der ikke er nogen mineraluldskanter, der er frie.

Det areal, hvor der ventileres luft gennem mineralulden, er bestemt ved den maksimale lufthastighed, der kan forventes i en solvæg.

Den maksimale lufthastighed gennem en solvægsenergidiode er fastlagt på grundlag af et skøn ved at antage, at en lejlighed på 300 m³ udelukkende ventileres gennem 5 m² solvæg.

Idet der maksimalt ønskes et luftskifte på 1 h⁻¹ fås:

$$V = \frac{300 \text{ m}^3 \cdot 1 \text{ h}^{-1}}{5 \text{ m}^2 \cdot 3600 \text{ s/h}} = 0,017 \text{ m/s} < 2 \text{ cm/s}$$

Det skønnes derfor, at en lufthastighed gennem mineralulden på 2 cm/s vil være den maksimale lufthastighed i en praktisk anvendt solvæg.

Den pumpe, der er anvendt ved forsøgene, kan maksimalt suge 10 l/min.

Ud fra et ønske om at foretage forsøgene med samme lufthastighed gennem mineralulden ved forsøgene som i en solvæg i praksis er arealet, der suges luft igennem ved forsøgene, bestemt.

$$A = \frac{10 \text{ l/min}}{1000 \text{ l/m}^3 \cdot 60 \text{ s/min} \cdot 0,02 \text{ m/s}} = 0,0083 \text{ m}^2 \approx 9 \text{ cm} \cdot 9 \text{ cm}$$

Med hensyn til afgasningsprodukter er forsøgene gennemført ved, at mineralulden har været anbragt ved ca. 130 °C i en uge, svarende til at mineralulden afgasser første gang, den bliver varm. Herefter er målingerne foretaget ved en temperatur på ca. 110 °C, som skønnes at være den maksimale temperatur, der kan opstå i solvægge.

Den undersøgte mineraluld er en Rockwool Industribatt, der er beklædning med sort væv på den ene side. Mineralulden anbringes med den sorte væv på sugesiden i prøveholderen.

Undersøgelserne er foretaget af BASCON Arkitekt- og ingeniørfirma A/S.

Resultaterne af undersøgelserne er givet i Bilag 1: "Fiberafgivelse og afgasning fra mineraluld Juli 1993".

Af denne rapport fremgår det, at fiberafgivelsen ligger på et lavt niveau og afgivelsen af formaldehyd ligger på et acceptabelt niveau, hvilket også gælder den øvrige afgasning.

3 Andre undersøgelser

Det er forsøgt at finde litteratur, der beskriver andre relevante målinger. Det er dog ikke lykkedes at finde noget, der behandler netop det at trække luft gennem mineraluld ved høje temperaturer.

I bilag 2 er der foretaget en undersøgelse af fiberafgivelsen fra indvendigt isolerede ventilationskanaler. Resultatet af undersøgelsen er, at der praktisk taget ikke er nogen fiberafgivelse.

I bilag 3 er der foretaget undersøgelser af de helbredsmæssige forhold ved arbejdet med mineraluld. Konklusionen er, at mineraluldsprodukter er årsag til minimal, hvis overhovedet nogen, helbredsmæssig risiko for mennesker.

I bilag 4 er der foretaget målinger af afgangningen fra mineraluld, der kommer direkte fra lager. Målingerne viser, at mineraluld har en VOC emission på $110 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ og de $57 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ stammer fra toluen. Det placerer mineraluld i emissionsgruppe MEC-C, som er gruppen af materialer med høj emission. Det må dog bemærkes, at mineraluld ligger i den lave ende af gruppen.

4 Montering

Ved monteringen af mineralulden i solvæggen er det vigtigt, at der ikke opstår frie kanter af mineralulden, hvorfra fiber kan løsrides.

Den beklædte side af mineraluldsbatten anbringes på sugesiden. Det vil dog være ønskeligt også at have den sorte side af mineralulden mod glasset. Dette kan opnås ved at anvende to industribatt's med den halve tykkelse og vende dem med den sorte side til hver sin side.

Det er ønsket, at mineralulden kan monteres i rammer af den type, der er udviklet i projektet "Profilsystem til solvægge" og beskrevet i [1].

Profilsystemet skal dog udvides, så der er plads til 50 mm mineraluld.

Mineralulden monteres i en ramme, som fastgøres til modulet på samme måde som rammen med teflonfolie. Rammen består af et U-profil, hvori isoleringen lægges.

Hvis det viser sig nødvendigt, anbringes der hønsenet på hver side af mineralulden for at undgå udbøjning og sammensynkning af mineralulden, hvorved der kan opstå frie kanter af mineralulden.

Det er ønskeligt, at mineralulden kan anbringes i rammerne, og at rammerne kan monteres i profilsystemet på fabrikken, før de enkelte moduler skal sættes op.

5 Konklusion

Der er i forprojektet foretaget en undersøgelse af de sundhedsmæssige problemer ved at passere ventilationsluft gennem mineraluld i en solvæg.

Undersøgelsen er gennemført ved at foretage laboratorieforsøg af fiberafgivelsen og afgivelsen af afgangningsprodukter fra mineraluld, når mineralulden er anbragt i en ovn ved 110°C , og der suges luft gennem den med en hastighed på 2 cm/s .

Undersøgelsen er foretaget af Bascon Arkitekt- og ingeniørfirma A/S. (Bilag 1)

Konklusionen af undersøgelserne er, at afgivelsen af fiber er meget lille. Der er tale om et niveau på $10 \text{ fibre}/\text{m}^3$ luft. Det forventes ikke at give anledning til gener, når niveauet er under $200 \text{ mineraluldsfibre}/\text{m}^3$ luft.

Formaldehydafgivelsen er på et acceptabelt niveau. Det samme gælder den øvrige afgang.

Hvad angår monteringen af mineralulden i solvæggen forventes det, at et profilsystem af den type, der er beskrevet i [1], kan anvendes, efter at der er foretaget mindre modificeringer og tilpasninger, så der er plads til 50 mm mineraluld.

Det forventes derudover, at mineralulden kan monteres i profilsystemet på fabrikken, før de enkelte moduler skal sættes op.

