Energiministeriets Solvarmeforskningsprogram - rapport nr. 47

SOLVÆGGE I DEN EKSISTERENDE BOLIGMASSE

Casper Paludan-Müller

Olaf Bruun Jørgensen

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

MEDDELELSE NR. 193 SEPTEMBER 1988

FORORD

En væsentlig del af den igangværende forskning i solenergi omhandler muligheden for at udnytte den passive solvarme ved hjælp af glastilbygninger, solvægge m.v. Blandt andet fremstår brugen af solvægge i forbindelse med renovering af det eksisterende byggeri som en attraktiv foranstaltning.

Denne rapport beskriver resultaterne fra projektet "Solvægge i den eksisterende boligmasse". Arbejdet har været financieret af energiministeriet, idet projektet er en del af "område 9: solenergi" under ministeriets forskningsprogram EFP-87.

Projektet er udført på Laboratoriet for Varmeisolering med deltagelse af nedenstående medarbejdere:

Casper Paludan-Müller, civilingeniør, lic.techn.
Olaf Bruun Jørgensen, civilingeniør.
Svend Aage Svendsen, lektor, civilingeniør, lic.techn.
Michael Ramskov, maskinarbejder.
Jens Olsen, maskinarbejder.
Bertil Morelli, elektromekaniker.
Bente Kjølhede Petersen, assistent.
Sally Lykke Høgsted, programmør (tegninger).

RESUMÉ

Projektet har haft til formål at klarlægge, hvilke udformninger af solvægge, der vil være fordelagtigt at anvende ved renovering af det eksisterende boligbyggeri. Der er set på forskellige opbygninger af uventilerede solvægge, hvor der ved anvendelsen af transparent isolering eller andre materialer er opnået lave U-værdier for dæklagssystemet. Endvidere er det undersøgt, hvorvidt det kan betale sig at benytte ventilerede solvægge (ved etablering af åbninger i den eksisterende ydermur bag solvæggens dæklag). Der kan enten være tale om cirkulation af rumluft bag dæklaget, eller solvæggen kan benyttes til opvarmning af den udeluft, der tilføres som frisk ventilationsluft.

Undersøgelsen er baseret på målte og teoretiske værdier for solvæggenes egenskaber. Der er foretaget omfattende EDB-simuleringer for at forudsige de forskellige solvægges indflydelse på energiforbrug og temperaturforhold ved anvendelse i forskellige typiske eksisterende etageboliger. Endelig er der foretaget en økonomisk vurdering. Værdien af de energibesparelser, som kan opnås, er sammenlignet med solvæggenes anlægspris for forskellige antagelser vedrørende energipriserne.

SUMMARY

The aim of this project has been to clarify which designs of solar walls, that are preferable in relation to renovation of the existing housing stock. The work includes a study of different unvented solar walls, where transparent insulation and other materials have been used in order to obtain a low U-value for the cover system. Further it is investigated whether it is a good idea to construct vented solar walls (openings are provided in the existing facade behind the cover system). The vents can be used for circulation of the room air, or they can be used for the supply of heated ambient air that covers the buildings need for fresh air.

The investigation is based on measured and theoretic values for the characteristics of the solar walls. Comprehensive computer simulations have been carried out in order to predict the influence of the solar walls on the energy consumption and the temperatures when used in different typical existing apartment houses. Finally an economic evaluation has been performed. The value of the energy savings that can be obtained is compared with the construction costs of the solar walls using different assumptions with regards to energy prices.

INDHOLDSFORTEGNELSE

RESUMÉ

SUMMARY

1. INDLEDNING 1
1.1. Baggrund 1
1.2. Projektets formål 2

2. UDFORMNING AF SOLVÆGGE 5
2.1. Forudsætninger for tilfredsstillende funktion .. 5
2.2. Trombe-vægge 8
2.2.1. Virkemåde 8
2.2.2. Transparent isolering 11
2.2.3. Mobil-isolering 14
2.3. Solvæg til friskluft ventilation 16
2.4. Hindring af overophedning af rum 19

3. UNDERSØGELSE AF UDVALGTE KONSTRUKTIONER 21
3.1. Identifikation af egenskaber 21
3.2. Udvalgte dæklagssystemer 23
3.2.1. Systemer med lav U-værdi 23
3.2.2. System med mobilisolering 28
3.3. Solvægge med ventilation 29
3.3.1. Ventileret Trombe-væg 29
3.3.2. Væg til opvarmning af den friske ventilationsluft 30
3.3.3. Ventilering af uønsket solvarme 32

4. BEREGNINGER 33
4.1. EDB-model 33
4.2. Karakterisering af eksisterende bygning 35
4.2.1. Udformning 35
4.2.2. Forhold vedr. energiforbruget 38
4.3. Beregninger for solvægge uden ventilation 41
4.3.1. Sammenhæng mellem dæklagets egenskaber og udbyttet 41
4.3.2. Udbytte for forskellige lejlighedstyper og dæklagssystemer 43

4.3.3. Mobil isolering foran solvæg 47
4.3.4. Udnyttelse af solindfald 49
4.3.5. Traditionel efterisolering 52
4.4. Udbytte fra solvæg med ventilation 54
4.4.1. Ventileret Trombe-væg 54
4.4.2. Væg til opvarmning af den friske ventilationsluft 54
4.5. Parametervariationer 56
4.5.1. Parameterændringer vedr. solvæggen 57
4.5.2. Bygningsorientering og skyggevirkning 61
4.5.3. Temperatursvingninger 64

5. ØKONOMISK VURDERING 69
5.1. Metode og forudsætninger 69
5.2. Solvæggenes rentabilitet..... 70

6. KONKLUSION 79

REFERENCER 83

APPENDIX 87
A1. Opbygning af dæklagssystem 89
A2. Indendørs forsøg med solvægge 93
A3. Beskrivelse af solvægge i EDB-model 100
A4. Solvarmeforskning under Energiministeriet 102

1. INDLEDNING

1.1. Baggrund

I det eksisterende byggeri er der et stort potentiale for udnyttelsen af den passive solvarme. En betydelig del af byggeriet er ganske vist mindre velegnet til udnyttelse af denne energikilde på grund af skyggeforhold eller en uheldig orientering i forhold til syd, men med boligmassens store omfang er der under alle omstændigheder mulighed for omfattende energibesparelser.

For alle boliger gælder selvfølgelig, at der i forvejen sker en udnyttelse af den passive solvarme, ved at solindfaldet gennem vinduerne medvirker til dækning af varmebehovet. Derudover kan der opnås et solvarme-tilskud til rumopvarmningen ved etablering af glastilbygninger eller solvægge. Interessen for den passive solvarme herhjemme har primært knyttet sig til brugen af glastilbygninger. Disse indebærer udover den forventede energibesparelse den fordel, at der tilføjes et attraktivt areal (en "udestue") til boligen. Med en solvæg opnås der ikke den samme rekreative forbedring af boligen som med en glastilbygning. Til gengæld vil der være mulighed for at opnå en langt større energibesparelse pr. m^2 af det tilføjede transparente areal.

Det er værd at nævne, at etableringen af solvægge eller glastilbygninger har særlige fordele i forbindelse med beton-facader, der er under nedbrydning af det udendørs klima. Her vil en glasafdækning af facaden give beskyttelse mod klimaet, hvormed man kan spare den dyre reparation af beton'en, der ellers ville være tiltrængt.

Et eksempel på renovering af et eksisterende byggeri ved brug af glastilbygninger er huset i Baggesensgade, som er vist på figur 1.1. Renoveringen er udført på en fem-etages ejendom fra 1894 på Nørrebro i København. Projektet er omtalt i [1]. Der er et enkelt eksempel på renovering ved brug af solvægge i Danmark, nemlig bebyggelsen Vesterbo i Værløse, som er vist på

figur 1.2. Der er tale om et fire-etages betonbyggeri fra 1958. Projektet omfatter også glastilbygninger, og det er beskrevet i [2] og [3] .

Der er ikke hidtil udført nogen omfattende beregnings- eller forsøgsmæssig undersøgelse af anvendelsen af solvægge i forbindelse med renovering af det hjemlige byggeri. Den foreløbige viden om emnet begrænser sig til beregninger af udbyttet for nogle enkelte specielle udformninger af solvægge. I [4] er der vist resultaterne for en solvæg med det ny transparente isolerende materiale silica aerogel og for nogle specielle udformninger af en solvæg med to lag glas.

1.2. Projektets formål

Det her beskrevne projekt har haft til formål at skabe et overblik over, hvorvidt en række enkle solvæg-konstruktioner vil være fordelagtige i forbindelse med renovering af boliger i Danmark. Opgaven indebærer nøje undersøgelser af de enkelte solvægge og detaljerede beregninger af deres indflydelse på forskellige bygningers energiforbrug.

Etableringen af solvægge må ikke medføre væsentlige forringelser af beboernes termiske komfort. Nødvendighed og art af foranstaltninger til modvirkning af overophedning af bygningen i sommerperioden er derfor også behandlet i projektet.

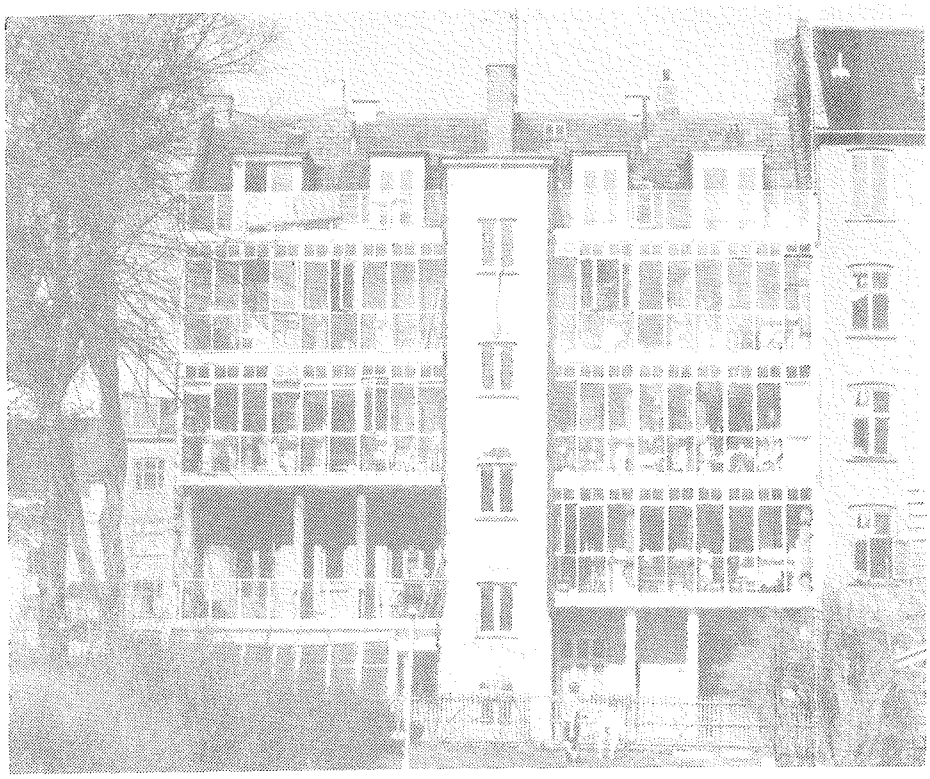


Fig. 1.1. Eksempel på renovering af facade ved brug af glastilbygninger (Baggesensgade).

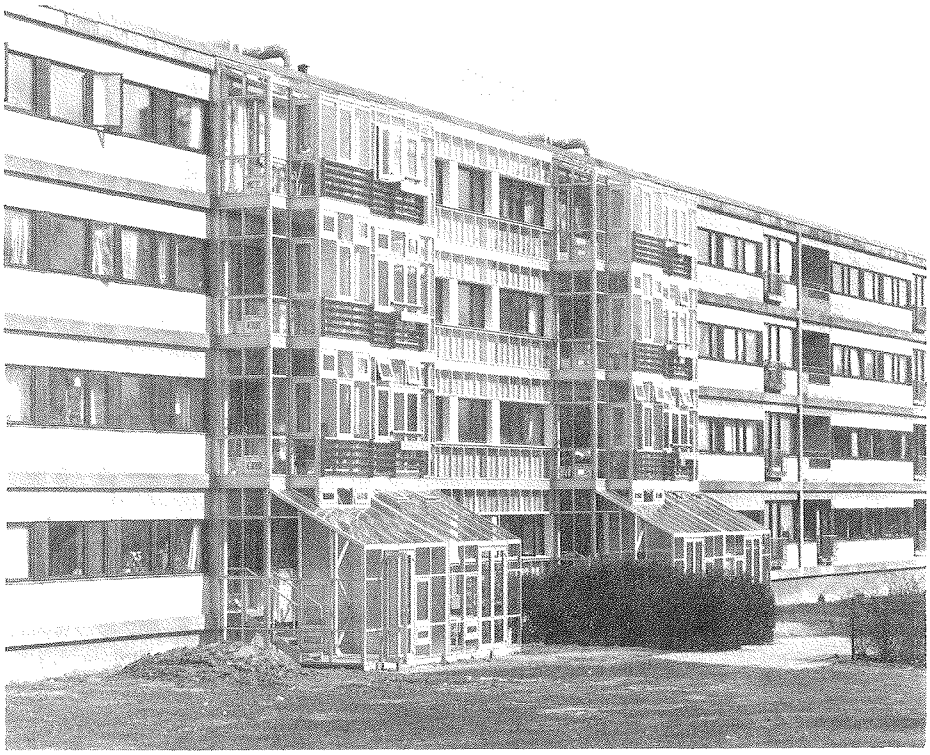


Fig. 1.2. Eksempel på renovering af facade ved brug af såvel solvægge som glastilbygninger (Vesterbo).

2. UDFORMNING AF SOLVÆGGE

Dette kapitel omfatter en oversigt over de forskellige forudsætninger, der skal være opfyldt for at sikre, at en solvæg fungerer tilfredsstillende. De forskellige typer solvægge, som kan tænkes anvendt i forbindelse med det eksisterende byggeri, er gennemgået.

2.1. Forudsætninger for tilfredsstillende funktioner

For at indpasningen af solvægge i et givent byggeri skal være vellykket, må der først og fremmest stilles nogle betingelser vedrørende bygningen og omgivelserne:

- For at opnå et rimeligt stort solindfald på solvæggen i løbet af varmesæson'en bør facaden være orienteret, så den højst afviger ± 45^{o} fra syd.

- Solindfaldet må ikke reduceres væsentligt på grund af skygge fra f.eks. andre bygninger eller fra vegetation.

Med hensyn til transport og lagring af solenergien må det forlanges at:

- Dæklagssystemet og absorberen skal have en høj transmittans og absorptans for solstråling.

- Varmetabskoefficienten mellem absorberen og det fri skal være lav.

- Det er vigtigt, at der kan ske en lagring af solvarmen, så den først tilføres, når der er et varmebehov for bygningen. Dette vil i de fleste tilfælde sige, at varmen afgives i de tidsrum, der ligger mellem perioderne med betydeligt solindfald gennem vinduerne. Den eksisterende facade (eller evt. andre dele af bygningen, der fungerer som varmelager), skal derfor have en god varmekapacitet.

- Varmetransporten fra absorberen til solvæggens lager, og varmetransporten fra lageret til rummene med varmebehov skal være effektiv.

Følgende krav skal være opfyldt for at hindre termisk diskomfort på grund af for høje temperaturer i rummet:

- Afgivelsen af varme fra solvæggen til rummet må ikke i for høj grad finde sted samtidig med solindfaldet gennem vinduerne. Dette krav vil selvfølgelig være opfyldt, hvis der indgår et velfungerende varmelager som nævnt ovenfor.

- Om sommeren, når der ikke er brug for varmen fra solvæggen til rumopvarmning, kan det være nødvendigt at have en form for solafskærmning eller en mulighed for bortventilering af den absorberede varme til det fri.

Med hensyn til holdbarheden af solvæggen er det vigtigt, at følgende er opfyldt:

- I den yderste del af facaden kan der forekomme temmelig høje temperaturer. De tilsvarende bevægelser i facadens materiale må ikke forårsage skader i form af revnedannelser eller lign.

- Materialer som f.eks. plast, der indgår i dæklagssystemet eller andre steder i konstruktionen, skal kunne modstå temperaturerne. Bevægelser på grund af termisk udvidelse skal kunne optages.

- Materialerne må ikke blive nedbrudt med tiden på grund af korrosion, ultraviolet lys eller andet.

- Konstruktionen skal som helhed kunne modstå påvirkninger fra det udendørs klima i form af vindbelastning og slagregn.

- Der må ikke foregå en fugtophobning ved kondensation af fugt fra rumluften på indersiden af dæklagssystemet eller på grund af evt. indtrængt slagregn. Vandet skal væk igen, hvilket

kan ske ved fordampning og diffusion til det fri eller gennem muren i perioder med solindfald.

- Nødvendigheden af evt. brug af mekaniske eller elektroniske komponenter bør overvejes nøje. Dette gælder specielt, hvis de er placeret, så de er vanskeligt tilgængelige. Komponenterne skal kunne fungere vedligeholdelsesfrit i årevis.

- Rumluften bør ikke have mulighed for at cirkulere bag ved et transparent dæklag (via åbninger i facaden). Den støvholdige rumluft vil resultere i en tilsmudsning af dæklagets indvendige side. For at undgå en forringelse af transmittans og udseende vil der efter nogen tid være behov for en rengøring. Denne vil, specielt i tilfælde af et etagebyggeri, være vanskelig at udføre.

2.2. Trombe-vægge

2.2.1. Virkemåde

Der skelnes mellem ventilerede og uventilerede Trombe-vægge. Funktionen af de to typer solvægge er vist på figur 2.1 og figur 2.2.

Solstrålingen absorberes på murens udvendige overflade. En del af solvarmen mistes med det samme til det fri gennem det transparente dæklagssystem. Hvis der er tale om en uventileret Trombe-væg ledes den resterende del ind gennem murens udvendige overflade. For en ventileret Trombe-væg er der også mulighed for en varmeoverførsel til rumluften: Luften strømmer op gennem hulrummet mellem absorber og dæklagssystem, idet der er åbninger i muren øverst og nederst. Luftcirkulation skyldes naturlig konvektion, og den finder sted, når middeltemperaturen af luften i spalten er højere end middeltemperaturen af rumluften. For at hindre varmetab ved at rumluften strømmer ned gennem spalten og afkøles i perioder uden sol, anbringes der en form for kontraventil foran de øverste eller de nederste åbninger. Denne kan f.eks. udføres ved brug af en tynd plastfolie som vist i [4].

For ydervæggen gælder, at den bør have en lav isolans og en høj varmekapacitet, hvis der skal opnås en god udnyttelse af den absorberede solstråling. I tilfælde af en forholdsvis høj isolans (der kan f.eks. indgå et lag isolering i væggen) vil der kun blive transporteret en begrænset varmemængde fra absorberen til rummet ved varmeledning gennem væggen. Er der tale om en lav varmekapacitet (hvis væggen er tynd, eller hvis den er sammensat af materialer med lav varmefylde), vil varmen fra absorberen blive tilført rummet forholdsvis kort tid efter, at solindfaldet har fundet sted. Da rummet som regel stadig vil være opvarmet af solindfaldet gennem vinduerne (og evt. varme på grund af luftcirkulationen i Trombevæggen såfremt den er ventileret), bidrager solvæggen for ofte med et unødvendigt tilskud af overskudsvarme.

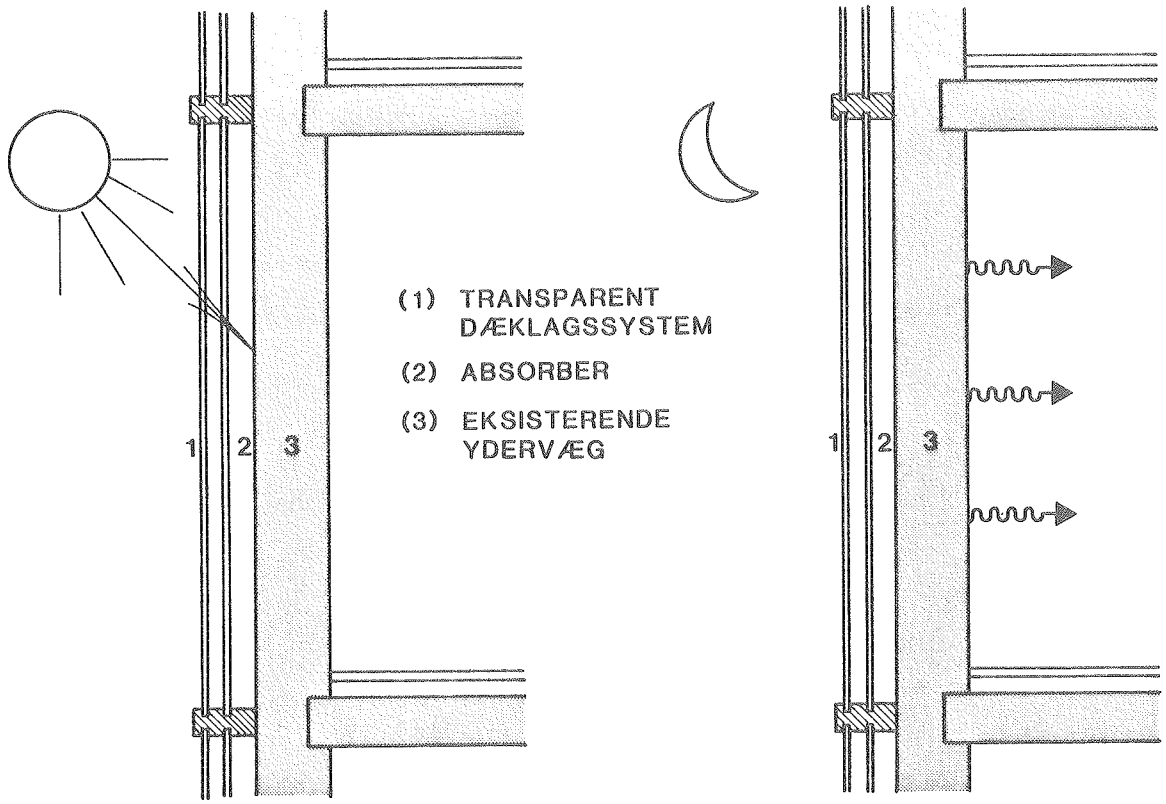


Fig. 2.1. Virkemåde af en uventileret Trombe-væg.

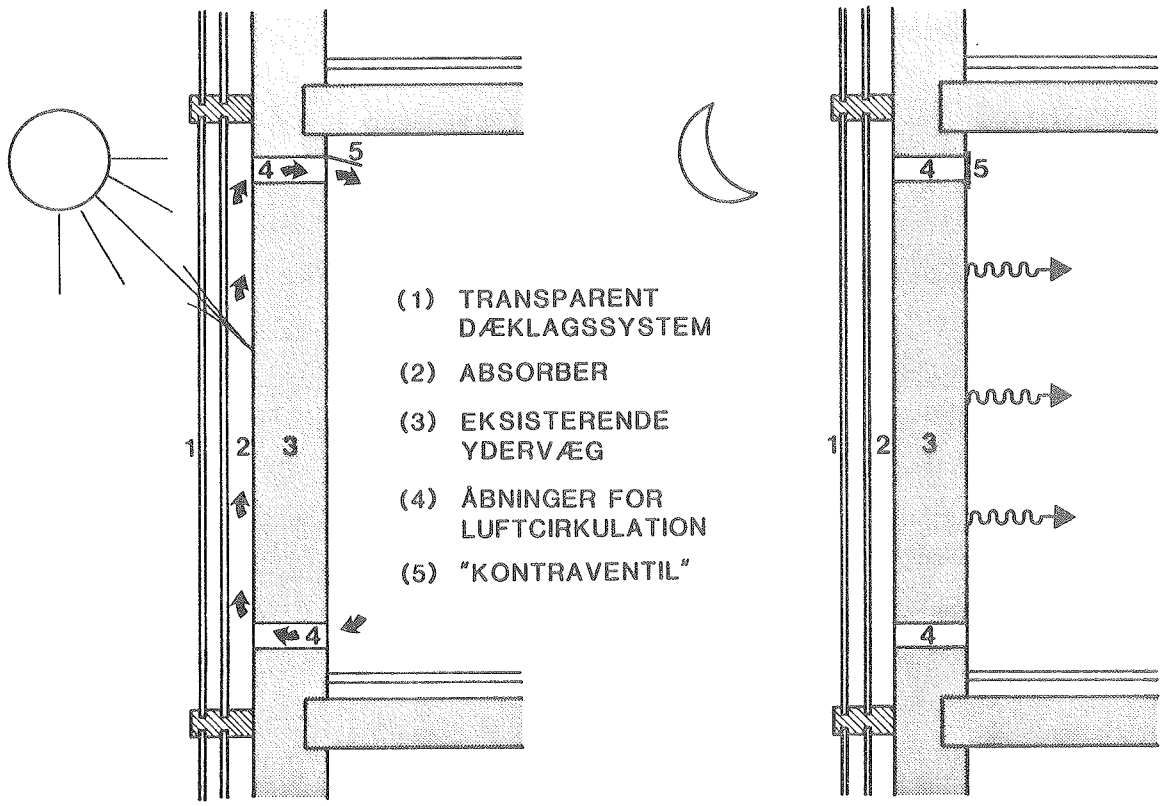


Fig. 2.2. Virkemåde af ventileret Trombe-væg.

Såfremt der er tale om et forholdsvis stort sydvendt vinduesareal, vil det som regel ikke kunne betale sig at udføre Trombe-væggen med ventilationshuller, idet varmetilførslen ved luftcirkulationen finder sted i solskinstimerne. Er der derimod tale om et lille vinduesareal vil man kunne opnå et større udbytte med en ventileret end med en uventileret Trombe-væg.

Under alle omstændigheder vil luftcirkulation i den almindelige ventilerede Trombe-vægvære forbundet med problemer i form af den tidligere nævnte tilsmudsning af den indvendige overflade af dæklagssystemet. Dette kan hindres ved at lade luftcirkulationen foregå bagved absorberen, som består af en tynd plade, der er opsat foran muren. Denne variant af den ventilerede Trombe-væg er vist på figur 2.3.

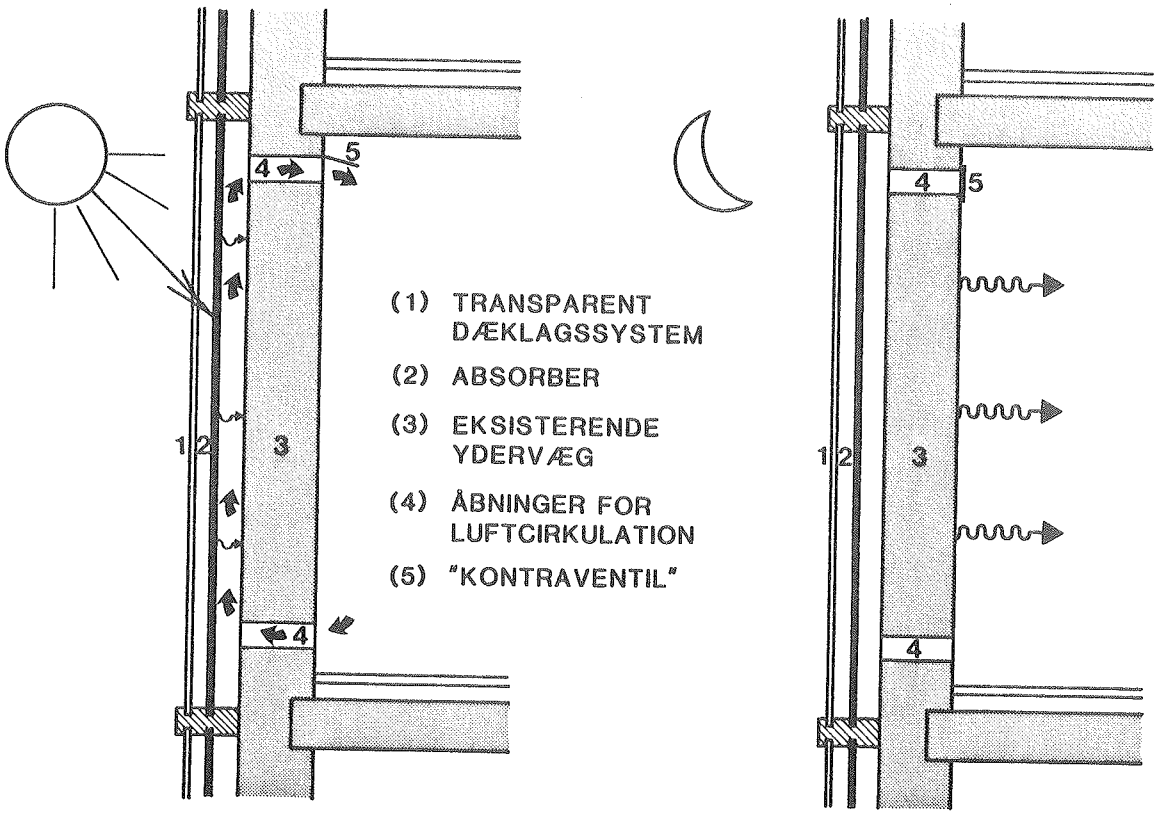


Fig. 2.3. Variant af den ventilerede Trombe-væg med luftcirkulation bag en absorberplade i stedet for bag dæklagssystemet.

2.2.2. Transparent isolering

Det er vigtigt, at det transparente dæklagssystem har en ret lav U-værdi. Dette er nødvendigt for at solvæggen kan opsamle så stor en del af den absorberede solvarme som muligt og for at hindre et for stort varmetab fra rummet i perioder uden sol. Der er mulighed for at benytte en række forskellige materialer, der kan fungere som "transparent isolering" ved indbygning i dæklagssystemet. Der er i det følgende kapitel præsenteret en række udformninger af dæklagssystemet, der umiddelbart virker lovende og realistiske.

I flere af dæklagssystemerne indgår transparente isolerende materialer, og disse er vist på fig. 2.4. Der er tale om følgende materialer:

Silica aerogel

Silica aerogel består af kiselsten (SiO_2) i en meget porøs struktur. Det fremstilles på monolistisk form af firmaet Airglass AB (Sverige) [5] og på granulatform af BASF (Vesttyskland) [6]. Varmeledningen og varmestrålingen gennem det næsten helt gennemsigtige materiale er meget lav.

Honeycombs

Ved anbringelsen af "honeycombs" i et lufthulrum opdeles dette i en hel masse små celler. Længden af cellerne svarer til afstanden mellem overfladerne på de to sider af hulrummet, mens højden er meget mindre end længden. Hermed opnås nærmest en eliminering af den konvektive varmeoverførsel mellem hulrummets to overflader. Samtidig begrænses varmeoverførslen ved infrarød stråling betydeligt. Honeycomb-væggene er fremstillet i plast. Med hensyn til udformningen af tværsnittet i retningen parallelt med overfladerne er der flere muligheder. I dette projekt er der set på honeycombs med rektangulært tværsnit fra firmaet Arel Energy Ltd. (Israel) [7].

Isoflex

Materialet Isoflex består af flere lag plastfolier med v-korrugeret tværsnit, der er lagt oven på hinanden. Hermed opdeles lufthulrummet i en hel masse mindre hulrum, og varmetransmissionen ved stråling og konvektion nedsættes en del i forhold til varmetransmissionen mellem det oprindelige hulrums to overflader. Materialet består af celluloseacetat, og det forhandles af firmaet Isoflex AB (Sverige) [8].

En lav U-værdi af dæklagssystemet kan også opnås ved brug af selektive overflader, der har en lav emittans for den langbølgede varmestråling:

Selektiv absorber

En selektiv absorber kan etableres ved at klæbe en selektiv folie uden på muroverfladen. En sådan folie fremstilles af Inco Selective Surfaces Ltd. (England) [9]. Der findes også selektive malinger på markedet, men disse skal anvendes uden på en metaloverflade for at opnå den lave emittans.

Lavemissionsbelægning på glas

Mange glasfabrikanter kan levere glas, der på den ene af siderne er forsynet med en lavemissionsbelægning. På grund af belægningen er der samtidig tale om en større eller mindre reduktion af glassets transmittans for solstråling, hvilket selvfølgelig er uønsket i forbindelse med solvægge. Der skelnes mellem "bløde" belægninger, der ikke kan tåle kontakt med fugt og derfor er anbragt mod et forseglet hulrum i en termorude, og "hårde" belægninger, der ikke behøver at være beskyttet på samme måde. Glas med bløde belægninger fremstilles f.eks. af Pilkington (England) [10] , mens glas med hårde belægninger fås f.eks. fra Glaverbel (Belgien) [11].

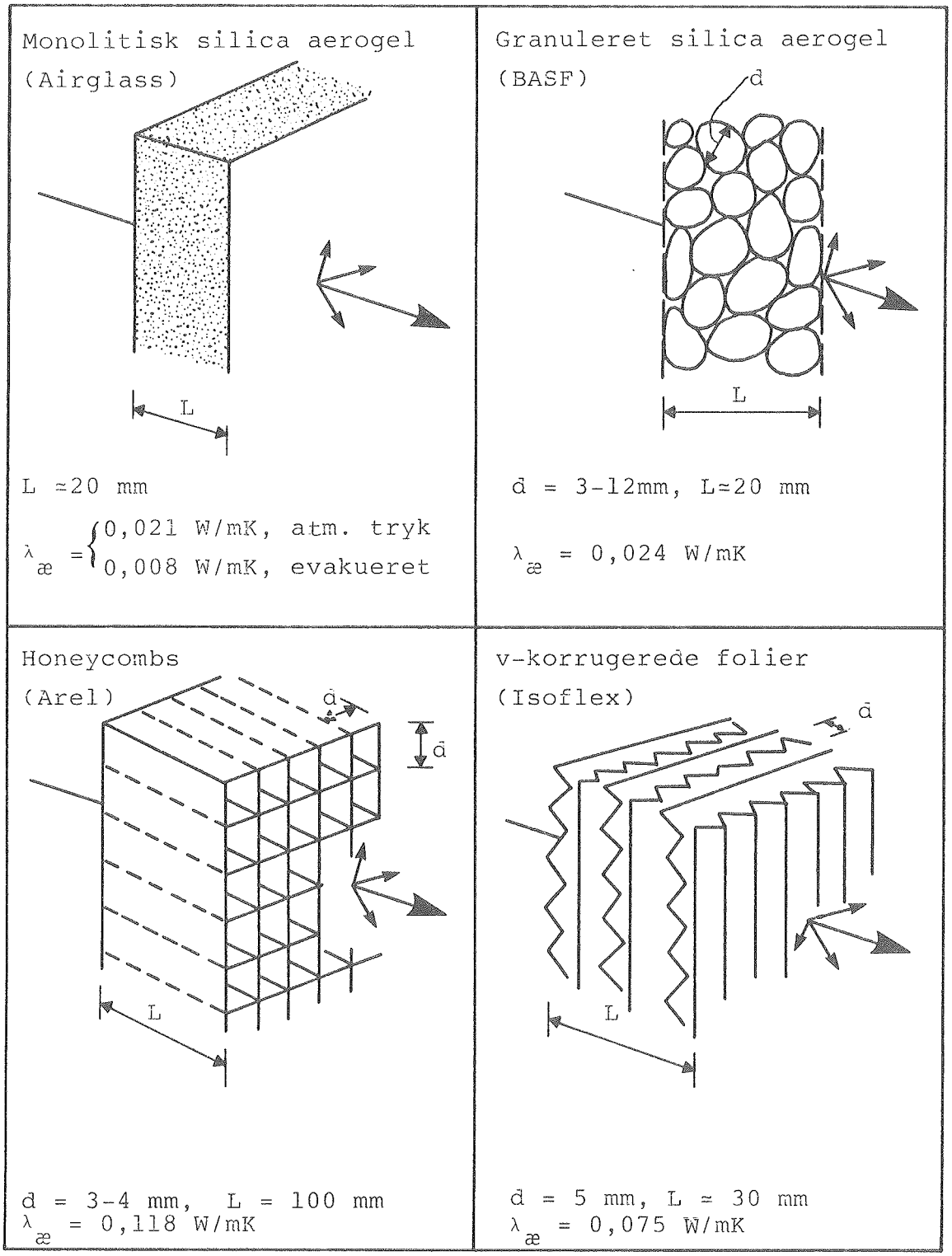


Fig. 2.4. Forskellige transparente isoleringsmaterialer, der er undersøgt i forbindelse med projektet. $\lambda_{æ}$ er materialets "ækvivalente" varmeledningsevne, svarende til forholdet mellem tykkelsen og isolansen.

Endelig kan man opnå en nedsættelse af dæklagssystemets U-værdi ved at forøge antallet af plane dæklag i form af glas, plastplader eller plastfolier. Der kan f.eks. benyttes:

Folier af Teflon

Med ét eller flere lag af Teflon-folie mellem to lag glas nedsættes varmeoverførslen ved stråling og konvektion. På grund af Teflons ret lave brydningsindex vil dæklagssystemets transmittans for solstråling være højere, end hvis der i stedet benyttes glas eller andre plastmaterialer. Da folien er delvis transparent for langbølget varmestråling, vil varmeoverførslen ved stråling dog ikke blive nedsat så meget, som hvis der f.eks. benyttes flere lag glas. Dette forhold kan forbedres betydeligt ved at benytte et lag glas med lavemissionsbelægning (foran laget/lagene af Teflon-folie) eller en selektiv absorber. Teflon fremstilles af firmaet Dupont (USA) [12].

2.2.3. Mobil-isolering

Som et alternativ til transparent isolering er anvendelsen af mobilisolering en anden måde, hvorpå der kan opnås et højt udbytte fra en Trombe-væg. Den mobile isolering giver en væsentlig nedsættelse af varmetabskoefficienten mellem absorberen og det udvendige dæklag, som blot består af et enkelt lag glas eller lign. Isoleringen kan for eksempel være i funktion fra solnedgang til solopgang, idet den aktiveres manuelt eller ved brug af en automatisk styring.

I [13] er der omtalt forsøg med en mobilisoleret uventileret Trombe-væg. I dette projekt har isoleringen form af ekspanderede polystyrenkugler, som kan transporteres til/fra hulrummet mellem absorber og dæklag, idet der benyttes et kanalsystem med en ventilator, en opsamlingstank til kuglerne, m.v.

En anden mulighed er at benytte blanke persienner eller et blankt rullegardin mellem absorber og dæklag. Der kan for eksempel være tale om et rullegardin, der kan rulles op eller ned ved brug

af en motor, der aktiveres ved en tids-styring. Idet gardinet er blankt på begge sider, vil der kunne opnås en pæn reduktion af varmetabskoefficienten uden for dagtimerne. Endvidere vil gardinet kunne give en effektiv solafskærmning i sommermånederne.

En meget lav varmetabskoefficient kan (i hvert fald i teorien) opnås med et system som det, der er vist på figur 2.5. De drejbare lameller består af PIR-skum. De har en reflekterende belægning, så en stor del af den solstråling, der rammer dem, kan blive reflekteret ind mod absorberen. Det viste system virker dog ikke umiddelbart særlig "realistisk", eftersom det er vanskeligt på forhånd at bedømme om de krav, der må stilles til holdbarhed af materialer og mekanik (jfr. afsnit 2.1.), kan overholdes. Det skal i øvrigt understreges, at den gode isoleringsværdi afhænger af, om der er en god tæt forbindelse mellem de lukkede lameller. Såfremt dette ikke er tilfældet, vil der blive tale om et uønsket stort varmetab, ved at der cirkulerer luft mellem absorber og dæklag gennem diverse spalter.

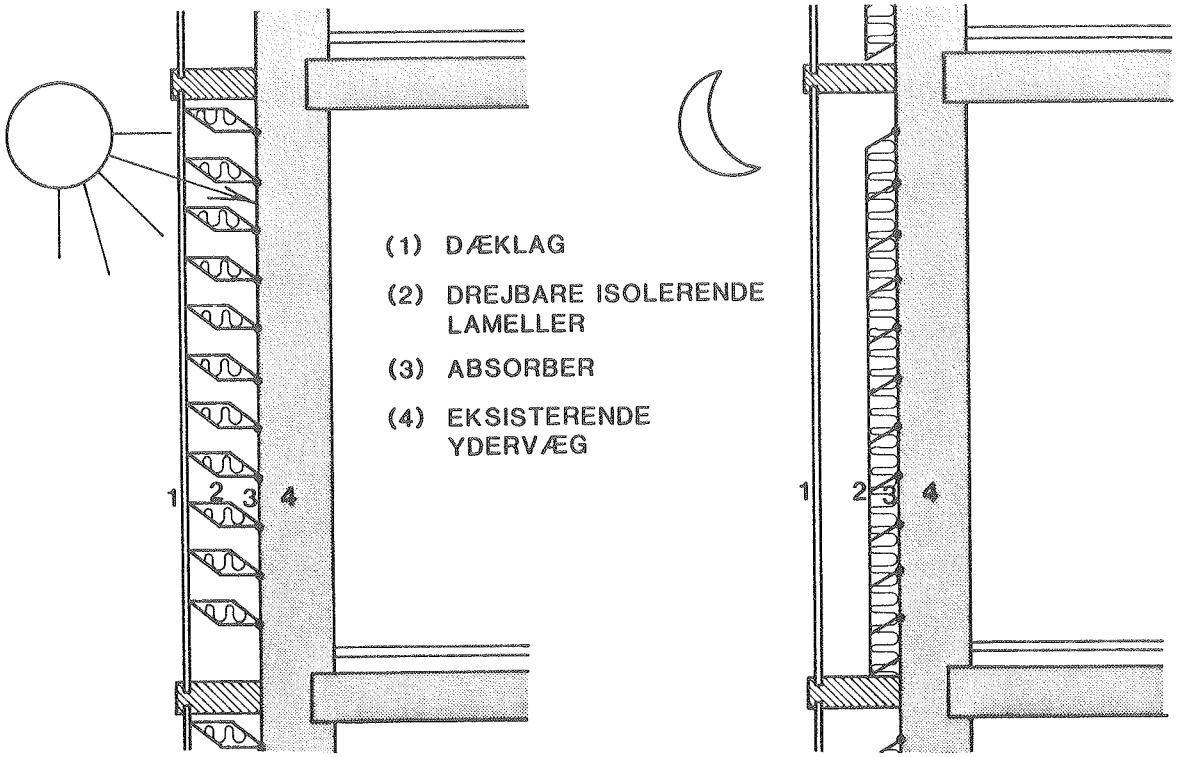


Fig. 2.5. System med mobilisolering mellem absorber og dæklag.

2.3. Solvæg til friskluftventilation

Det er muligt at benytte en solvæg til forvarmning af boligens ventilationsluft. Systemet fungerer som vist på figur 2.6. Solstrålingen absorberes på den udvendige overflade af den eksisterende mur. En del af solvarmen overføres til ventilationsluften, der strømmer op mellem absorberen og dæklagssystemet, idet hulrummet via åbninger har forbindelse til det fri og til det bagvedliggende rum. Den resterende del af solvarmen tabes dels til omgivelserne gennem dæklagssystemet, og den ledes dels ind gennem murens udvendige overflade.

Da der for denne solvæg ikke er noget ønske om, at der ledes solvarme gennem muren ind til rummet, anses det (i modsætning til Trombe-væggen) for at være en fordel, hvis der en høj isolans af væggen mellem absorberen og rummet. Dette kan opnås ved anbringelse af et lag mineraluldsisolering uden på den eksisterende mur, idet isoleringens udvendige overflade sortmales, så den kan fungere som absorber. Hvad angår varmetabet gennem væggen i perioder uden sol, bliver det hermed af knap så stor vigtighed, at dæklagssystemet har en lav varmetabskoefficient. Til gengæld er det en ulempe, at der med etableringen af mineraluldsisoleringen ikke er et varmeakkumulerende lag umiddelbart bag absorberen. Det er fordelagtigt, hvis den udvendige del af muren er opbygget af et materiale med høj varmekapacitet, idet der opnås en "udjævning" i afgivelsen af solvarmen fra absorber til ventilationsluft. I modsat fald vil varmeafgivelsen hovedsageligt finde sted samtidig med solindfaldet, hvormed der kan blive tale om for hyppige perioder med overopvarmning af rummene.

Det er muligt at opnå en virkelig god udnyttelse af varmen fra den opvarmede ventilationsluft ved at føre den gennem et varmelager, inden den opblandes med rumluften. Et sådant solvarmesystem er undersøgt i [14], idet der benyttes et betonhuldæk som varmelager. I forbindelse med det eksisterende byggeri kan man tænke sig, at der på tilsvarende vis benyttes en uisoleret hulmur som varmelager.

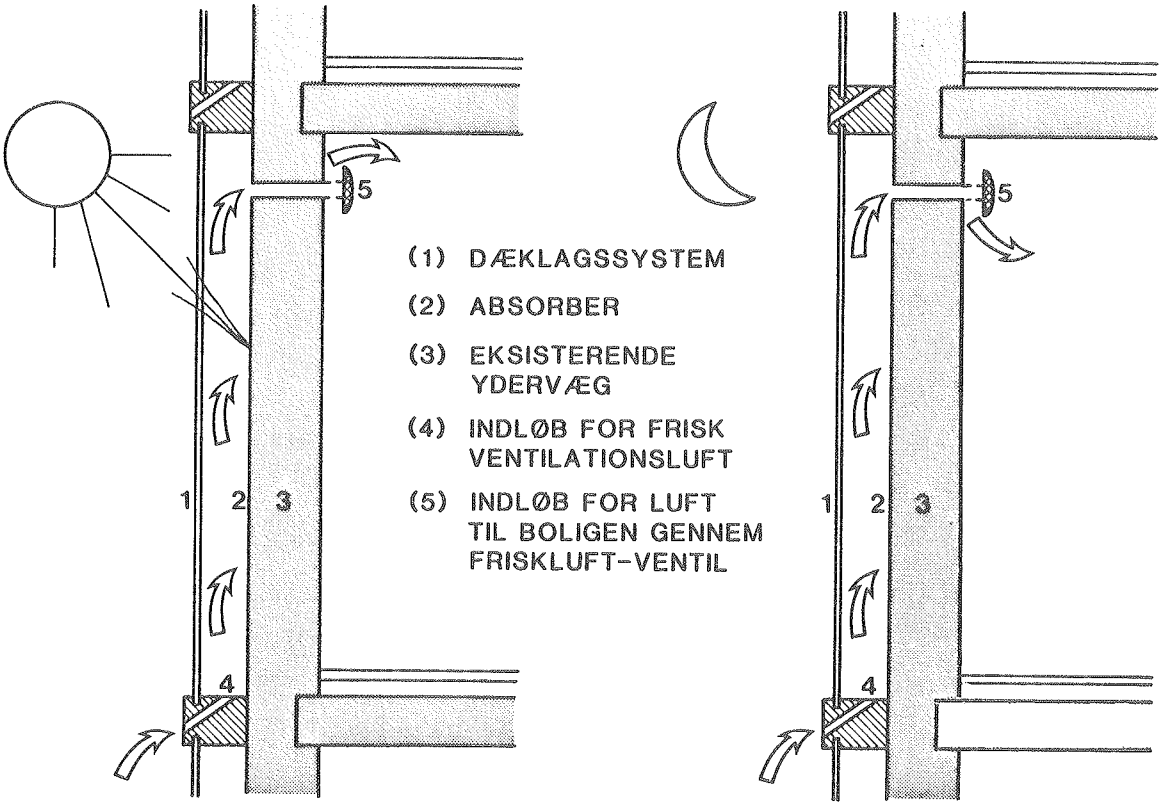


Fig. 2.6. Virkemåde af system med solvæg til opvarmning af den friske ventilationsluft.

Den friske luft tilføres øverst i rummet bag solvæggen gennem et passende antal friskluftventiler. Disse kan være udført som et cirkulært rør med justerbar dækplade på den indvendige side. Dækpladen giver mulighed for en manuel regulering af luftmængden. Samtidig sørger den for, at luftstrømmen spredes, så den løber langs med vægoverfladen fremfor, at den sendes direkte ud i rummet. Hermed mindskes risikoen for trækgener.

Udsugningen af luften fra boligen tænkes at ske centralt ved hjælp af en ventilator. Det er forudsat, at huset (f.eks. i forbindelse med renovering) er sat i så god stand, at den friske luft tilføres gennem solvæggen og ikke gennem diverse sprækker og utætheder andre steder i bygningen. Mellem de enkelte rum sker der en uhindret strøm af luften, f.eks. gennem de døråbninger der forbinder rummene.

Den friskluftmængde, som tilføres gennem solvæggen, dækker det normale behov for ventilation, d.v.s. den luftmængde, der er nødvendig for at opfylde almindelige krav til luftens kvalitet

med hensyn til lugt og krav til en rimelig lav fugtighed. Luftmængden svarer til et luftskifte på mellem 0,3 og 0,5 pr. time, idet det som omtalt i [15] vil variere alt efter tidspunktet på dagen og de pågældende beboeres krav. Dækplader på friskluftventilerne kan som nævnt benyttes til regulering. De justeres f.eks. for at begrænse lufttilførslen i perioder med et stort vindtryk på facaden, og de lukkes helt til om sommeren, hvor der foretrækkes uopvarmet frisk luft gennem vinduerne.

Det ekstreme behov for ventilation skyldes enten ønsket om at køle rumluften i perioder med for stort solindfald gennem vinduerne, eller det skyldes ønskes om ekstraordinær udluftning fra "våde" rum, rum med mange gæster eller lign. I disse tilfælde klares frisklufttilførslen på normal vis, d.v.s. ved åbning af vinduer.

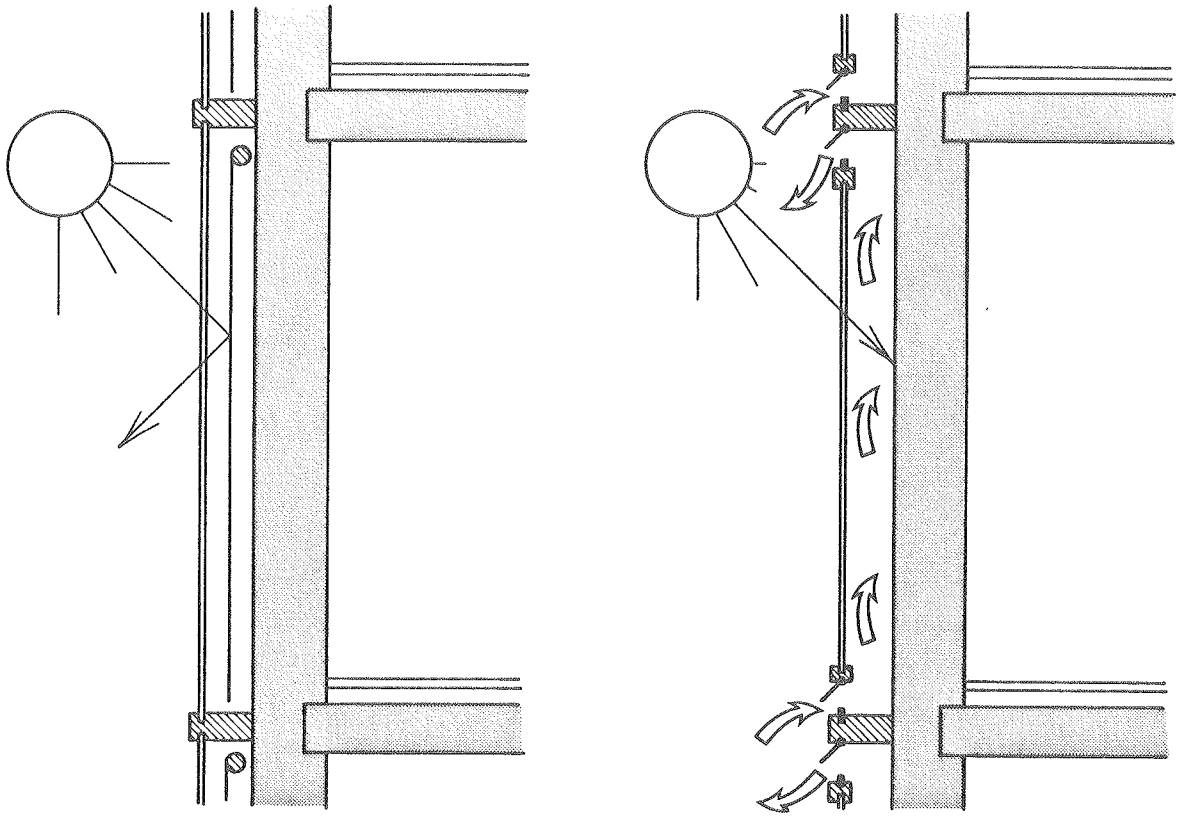
2.4. Hindring af overophedning af rum

Der kan benyttes to principielt forskellige foranstaltninger til begrænsning af den mængde overskudsvarme, som tilføres rummet fra solvæggen i sommerperioden. Der kan enten etableres en form for solafskærmning foran absorber eller dæklag, eller der kan tilvejebringes en bortventilering til det fri af luften mellem absorberen og det inderste dæklag. De to metoder er illustreret på figur 2.7.

Solafskærmningen kan etableres ved opsættelse af en form for persienne eller rullegardin i hulrummet mellem absorberen og dæklaget. Disse betjenes fra det bagvedliggende rum ved hjælp af snoretræk eller ved en motor. En sådan solafskærmning vil være den mest effektive foranstaltning til hindring af overophedning. Den vil samtidig være forholdsvis dyr at etablere, men såfremt den kan benyttes som mobilisolering i løbet af varmesæsonen, kan den ekstra omkostning blive opvejet af det forøgede udbytte fra solvæggen.

Der kan ventileres med udeluft, idet der skabes mulighed for luftgennemstrømning mellem absorberen og dæklaget gennem åbninger øverst og nederst i dæklagskonstruktionen. Luftstrømningen finder sted som følge af naturlig konvektion på samme måde som for den ventilerede Trombe-væg. Åbningerne øverst åbnes og lukkes ved hjælp af lemme eller ventiler, som kan betjenes indefra. Det er vigtigt,at der er sørget for en god tæt forbindelse, når ventilerne er lukket, så varmetab ved uønsket luftgennemstrømning kan undgås. Åbningerne nederst kan derimod godt være permanent åbne: I tilfælde af, at solvarmen ønskes udnyttet (og der ikke er ventilation), vil den varme luft mellem absorber og dæklag være lettere end den kølige luft nede ved åbningerne. Der er således ingen fare for, at varmetabet forøges væsentligt, ved at udeluften strømmer op i hulrummet i disse perioder. Det skal nævnes, at det under alle omstændigheder er en fordel med sådanne åbninger til det fri: De giver mulighed for det beskedne luftskifte til hulrummet, der er nødvendigt til

fjernelse af kondens, og de giver mulighed for bortledning af eventuelt indtrængt regnvand.



Figur 2.7. Overophedning på grund af varmeafgivelse fra solvæggen om sommeren kan f.eks. hindres ved brug af solafskærmning eller ved afkøling af absorberen med udeluft.

Der kan evt. benyttes rumluft i stedet for udeluft til ventilationen. I da fald er den nederste række åbninger ført ind gennem muren i stedet for ud gennem dæklagskonstruktionen. Denne løsning indebærer den fordel, at der samtidig kan ske en ventilation af det sydvendte rum, ved at der trækkes forholdsvis kølig luft til fra bygningens nordvendte rum. Med hensyn til risikoen for tilsmudsning af dæklagskonstruktionen med støv fra rumluften er løsningen dog ikke særlig hensigtmæssig. Den ønskede virkning er i øvrigt meget afhængig af vinden.

3. UNDERSØGELSE AF UDVALGTE KONSTRUKTIONER

I kapitlet er vist de udformninger af solvægge, der er undersøgt i projektet. De forskellige målte og teoretiske værdier for solvæggenes egenskaber er angivet.

3.1. Identifikation af egenskaber

Med henblik på beregning af varmestrømme og temperatursvingninger under forskellige realistiske klimaforhold er det vigtigt at kende en række karakteriserende egenskaber for solvæggene.

Med hensyn til den eksisterende ydervæg er der tale om tykkelse, varmeledningsevne, massefylde og varmefylde for de materialelag, som indgår i konstruktionen. Disse værdier fastsættes som angivet i de almindelige håndbøger (f.eks. [16]).

Med hensyn til de dele, som er etableret med henblik på udnyttelsen af solvarmen, er der tale om følgende egenskaber:

- Det effektive transmissionsabsorptionsprodukt for solstråling $(\tau\alpha)_e$.
- Varmetabskoefficienten U_L for varmetabet fra absorberen til det fri.
- Faktorerne F' og F", der benyttes i tilfælde af, at der sker en transport af solvarmen ved ventilation.

Betydningen af parametrene er som i [17]. For de solvægge, som er undersøgt i dette projekt, er parametrene i de fleste tilfælde fastsat udfra opgivelser i diverse referencer. For nogle enkelte konstruktioner er der endvidere foretaget forsøg i Laboratoriet for Varmeisolerings indendørs prøvestand for solvægge. I prøvestanden, som er beskrevet i [18] , er det muligt at opnå forhold med stationære varmestrømme, hvormed der kan foretages ret nøjagtige målinger.

På baggrund af arbejdet med opbygning af solvæggene til forsøgene er der skitseret et forslag til udformning af det rammesystem, der skal benyttes ved montering af solvæggenes dæklag på muroverfladen. Systemet er vist i appendix A1.

3.2. Udvalgte dæklagssystemer

3.2.1. Systemer med lav U-værdi

Der er foretaget en undersøgelse af nogle forskellige dæklagssystemer, som kan tænkes anvendt til uventilerede Trombe-vægge. Dæklagssystemerne er vist på figur 3.1 - 3.2. Der er tale om:

(A) To lag alm. glas foran en alm. matsort absorber.

(B) Et lag glas med lavemissionsbelægning foran en alm. matsort absorber.

(C) Et lag alm. glas foran en selektiv absorber.

(D) Et lag alm. glas foran to plane lag af Teflon-folie og en selektiv absorber.

(E) Isoflex (30 mm sv. til 6 lag) mellem et lag alm. glas og en alm. matsort absorber.

(F) Honeycombs (100 mm) mellem et lag alm. glas og en alm. matsort absorber.

(G) Granuleret silica aerogel (20 mm) mellem to lag alm. glas foran en alm. matsort absorber.

(H) Monolitisk silica aerogel (20 mm) mellem to lag alm. glas foran en alm. matsort absorber. Luften i aerogelen er evt. evakueret.

Dæklagssystemernes egenskaber vedr. soltransmission og varmetab er vist i tabel 3.1. $(\tau\alpha)_e$ er angivet for normalstråling og for diffus stråling. Værdien for U_L svarer til en forskel på 20^oC mellem absorberen og omgivelserne, idet omgivelsestemperaturen er ca. 10^oC. Der er regnet med en vindhastighed på 5 m/s. I den angivne værdi for U_L er der inkluderet randtab gennem de rammer, dæklagene er monteret i. Dette er sat til 0,2 W/m^2K, idet der refereres til absorberarealet.

Tabellen viser også egenskaberne for den helt simple konstruktion bestående af et enkelt alm. lag glas foran en alm. matsort

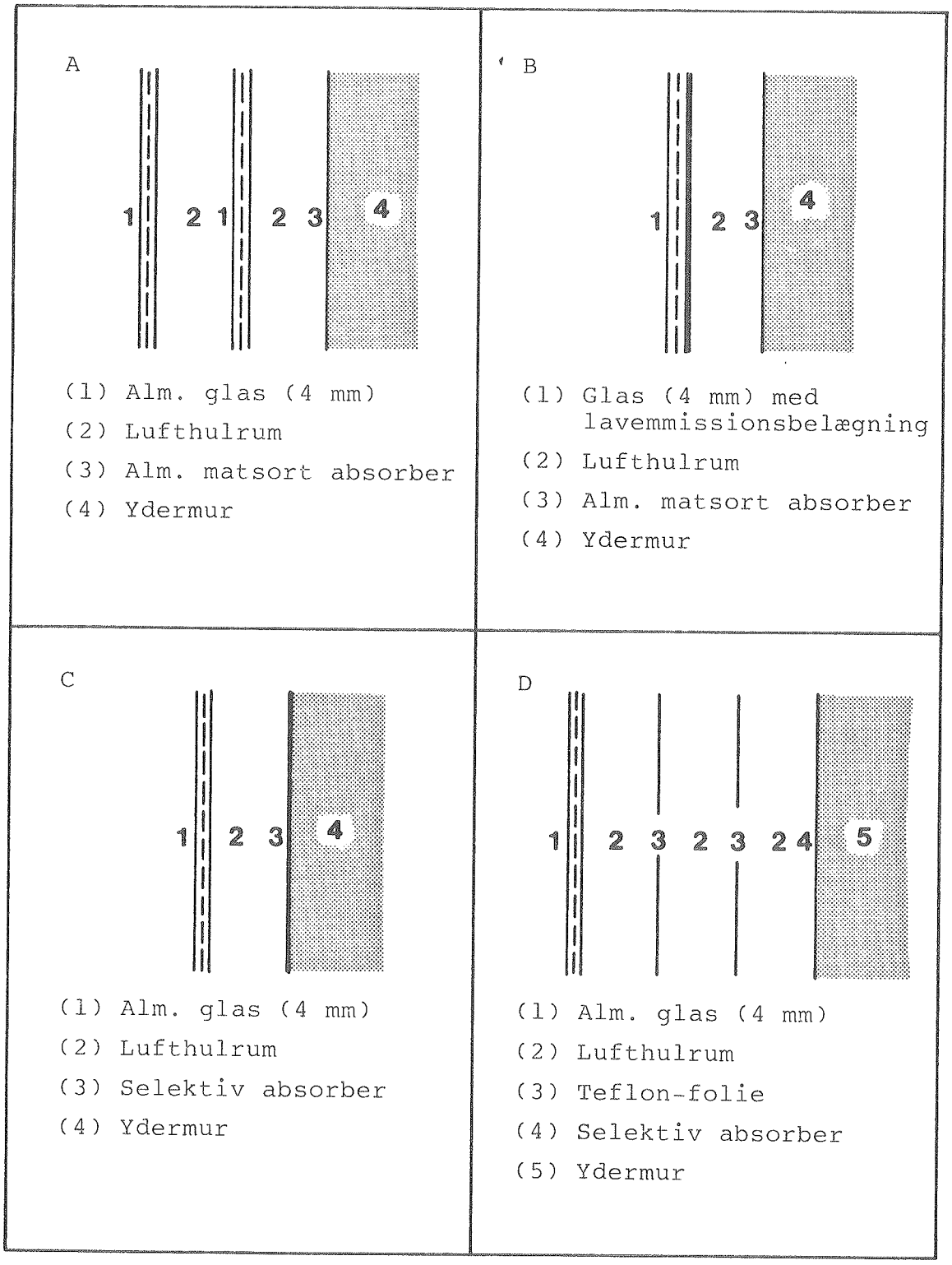
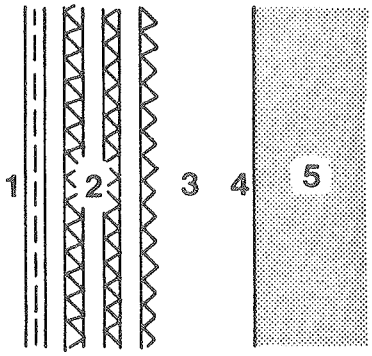


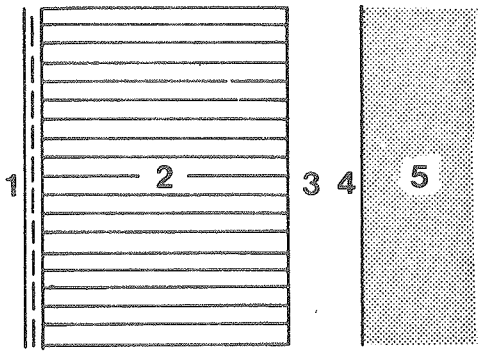
Fig. 3.1. Dæklagssystemer (A) - (D), der er undersøgt i projektet.

E



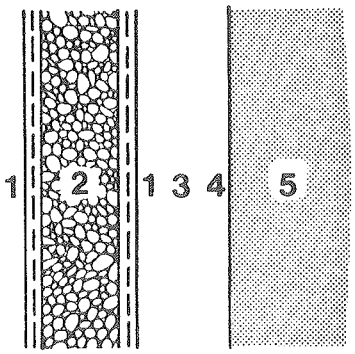
(1) Alm. glas (4 mm)
(2) Isoflex folie (6 lag, 30 mm)
(3) Lufthulrum
(4) Alm. matsort absorber
(5) Ydermur

F



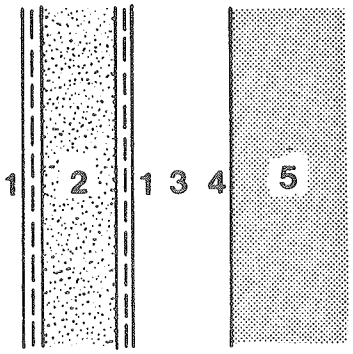
(1) Alm. glas (4 mm)
(2) Honeycombs (100 mm, tværsnit 3 x 4 mm)
(3) Lufthulrum
(4) Alm. matsort absorber
(5) Ydermur

G



(1) Alm. glas (4 mm)
(2) Granuleret silica aerogel (20 mm)
(3) Lufthulrum
(4) Alm. matsort absorber
(5) Ydermur

H



(1) Alm. glas (4 mm)
(2) Monolitisk silica aerogel (20 mm evt. evakueret)
(3) Lufthulrum
(4) Alm. matsort absorber
(5) Ydermur

Fig. 3.2. Dæklagssystemer (E) - (H), der er undersøgt i projektet.

absorber (I). Denne er medtaget som en "reference" for sammenligning af dæklagssystemernes egenskaber. Endvidere benyttes den i forbindelse med nogle af de øvrige solvægge.

Dæklagene af "alm. glas" har i alle tilfælde en tykkelse på 4 mm. Jernindholdet tænkes at svare til en ekstinktionskoefficient på 16 m^{-1} . Af sikkerhedsgrunde må det anbefales, at det yderste lag glas er hærdet. Glassets emittans for langbølget varmestråling er 0,88. For glasset med lavemissionsbelægning beregnes transmittansen på grundlag af opgivelser i [11]. Emittansen af overfladen med belægning sættes til 0,15.

For den almindelige matsorte absorber (f.eks. pejselak) er absorptansen for solstråling og emittansen for langbølget stråling 0,95. For den selektive absorber er absorptansen og emittansen henholdsvis 0,97 og 0,08 [9].

For dæklagssystemet med Isoflex er $(\tau\alpha)_e$ og U_L bestemt udfra [19] og udfra målinger på laboratoriet. Målingerne er beskrevet i appendix A2.

Egenskaberne for dæklagssystemet med Teflon-folie er beregnet i [18], og for dæklagssystemet med honeycombs er benyttet [20], [21].

Dæklagssystemerne med silica aerogel er beregnet som i [4]. Der er benyttet en "effektiv" ekstinktionskoefficient for spredning (og absorption) på 6 m^{-1} for den monolitiske type og 17 m^{-1} for den granulerede type (udfra resultater i [22]). Varmeledningsevnen er henholdsvis 0,021 W/mK og 0,024 W/mK, når luften ikke er evakueret [5], [6]. I tilfælde af evakuering er varmeledningsevnen 0,008 W/mK for den monolitiske silica aerogel [5].

	$(\tau\alpha)_e$		U_L
	normal stråling	diffus stråling	W/m^2K
(A) To lag glas	0,75	0,65	3,1
(B) Et lag glas med lavemissionsbelægn.	0,64	0,47	3,1
(C) Et lag glas, selektiv absorber	0,86	0,76	2,8
(D) Et lag glas, to lag Teflon-folie, selektiv absorber	0,77	0,64	1,2
(E) Et lag glas, Isoflex-folie (30 mm)	0,61	0,36	1,9
(F) Et lag glas, Honeycombs (100 mm)	0,77	0,52	1,2
(G) Granuleret silica aerogel (20 mm) mellem to lag glas	0,55	0,35	1,2
(H) Monolitisk silica aerogel (20 mm) mellem to lag glas (H1): ikke evak., (H2): evak.	0,68	0,55	(H1): 1,1 (H2): 0,6
(I) Et lag glas	0,84	0,74	5,7

Tabel 3.1. Egenskaber for de dæklagssystemer, der er undersøgt i projektet.

Tykkelsen af diverse lufthulrum er omkring 30 mm. Der tænkes at være mulighed for ventilering af hulrummet mellem absorber og inderste dæklag med udeluft i sommermånederne, så en overophedning af boligen kan undgås.

For dæklagssystemet (H) er det vigtigt, at der er tale om en effektiv forsegling mellem de to lag glas, eftersom silica aerogel på monolitisk form ikke kan tåle berøring med fugt. Da der kan forekomme en relativ stor termisk udvidelse af det inderste lag glas vil en almindelig termorudeforsegling ikke være holdbar. Såfremt luften i aerogelen evakueres, kan der opnås en særdeles lav værdi for U_L . I da fald stilles der naturligvis ekstra høje krav til forseglingen. (Det skal nævnes, at der i forbindelse med et igangværende projekt på Laboratoriet for Varmeisolering foretages forsøg med henblik på udvikling af en egnet forsegling).

For de øvrige dæklagssystemer fjernes evt. kondens bag det yderste lag glas ved, at der foregår en beskeden ventilering med udeluft gennem åbninger nederst i dæklagskonstruktionen.

3.2.2. System med mobilisolering

I beregningerne er der undersøgt en enkelt udformning af en solvæg med mobilisolering. Der er tale om det tidligere viste system (figur 2.7), hvor et blankt rullegardin virker som mobilisolering i varmesæsonen og solafskærmning i sommermånederne.

Dæklagssystemet er et alm. lag 4 mm glas foran en alm. matsort absorber. I perioderne med opsamling af solenergi er $(\tau\alpha)_e$ og U_L som angivet i tabel 3.1. Når mobilisolering er i brug opnås U_L = 1,7 W/m^{2}K, idet gardinet tænkes at være blankt på begge sider. Der er gjort den væsentlige forudsætning, at forbindelserne ved gardinets afslutning øverst og i siderne er så tætte, at der kan ses bort fra luftstrømninger mellem hulrummene foran og bagved gardinet.

3.3. Solvægge med ventilation

3.3.1. Ventileret Trombe-væg

Der er udført beregninger for den på figur 3.3 viste modificerede udgave af en ventileret Trombe-væg. Som dæklagssystem benyttes et enkelt lag alm. 4 mm glas foran en selektiv absorber. Dvs. $(\tau\alpha)_e$ og U_L er som angivet for dæklagssystemet (C) i tabel 3.1.

Absorberpladen tænkes at være en tynd plan metalplade, der er fastholdt og afstivet, så den kan udvide sig uden at bule ud. Pladens bagside er malet (dvs. den er "ikke-blank") for at der kan ske en rimelig god varmeoverførsel ved stråling fra absorberpladen til overfladen af den eksisterende mur. De to luftlag tænkes at være 30 mm tykke. Det samlede areal af åbningerne for luftcirkulation øverst og nederst i muren udgør 2% af absorberarealet. Der er installeret en "kontra-ventil", så luftcirkulationen er forhindret i perioder, hvor luften bag absorberpladen er koldere end rumluften. Endvidere er det muligt at lukke for lufttilførslen, så overophedning forhindres i sommermånederne. Der benyttes betegnelsen (J) for solvæggen.

Når der er luftcirkulation, kan effekten pr. m^2 absorber q_i fra absorberen til rumluften beskrives ved:

$$q_i = \frac{F' \cdot F'' \cdot U_L}{1-F' \cdot F''} \cdot (T_p - T_i)$$

hvor T_p er middelabsorbertemperaturen og T_i er temperaturen af rumluften.

En beregning giver $F' = 0,68$ og $F'' = 0,90$, idet der er regnet med en luftstrøm på 0,007 m^3/sm^2. Størrelsen af luftstrømmen vil variere med temperaturforskellen, og den benyttede værdi svarer til "typiske forhold". Dermed bliver varmeoverføringskoefficienten

$$U_{p-i} = \frac{F' \cdot F'' \cdot U_L}{1-F' \cdot F''} = 4,4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

3.3.3. Væg til opvarmning af den friske ventilationsluft

Solvæggens opbygning er som vist på figur 3.3, idet der som dæklagssystem benyttes et lag alm. 4 mm glas. Dette er anbragt foran et lag af 80 mm mineraluld facadebatts med praktisk varmeledningsevne 0,042 W/mK. Isoleringen er udvendigt forsynet med et lag maling, som giver en sort (ikke selektiv) overflade, samtidig med at den forhindrer mineraluldsfibrene i at løsrive sig. Hulrummet for frisklufttilførslen (mellem glas og absorber) er 80 mm tykt. Arealet af hullerne, der fører luften ind til rummet, udgør 0,1 % af absorberarealet. Solvæggen benævnes (K).

Dæklagssystemets $(\tau\alpha)_e$ er angivet i tabel 3.1. På grund af luftstrømmen får U_L en anden værdi end den, der er angivet i tabellen. Der beregnes i stedet U_L = 7,2 W/m^{2}K ved vindhastigheden 5 m/s.

Boligen tilføres dels en effekt på grund af luftskiftet og dels en effekt, der skyldes varmeledning fra absorberen gennem isolering og den eksisterende ydermur. Effekten pr. m^2 absorber kan som vist i appendix A2 beskrives ved

$$q_i = a \cdot (\tau\alpha)_e \cdot I - b \cdot (T_i - T_a)$$

hvor I er bestrålingsstyrken af solstrålingen på dæklaget og T_a er omgivelsestemperaturen. Koefficienterne a og b er bestemt ved

$$a = F' \cdot F'' + \frac{U_V \cdot (1-F' \cdot F'')^2}{U_V \cdot (1-F' \cdot F'') + U_L}$$

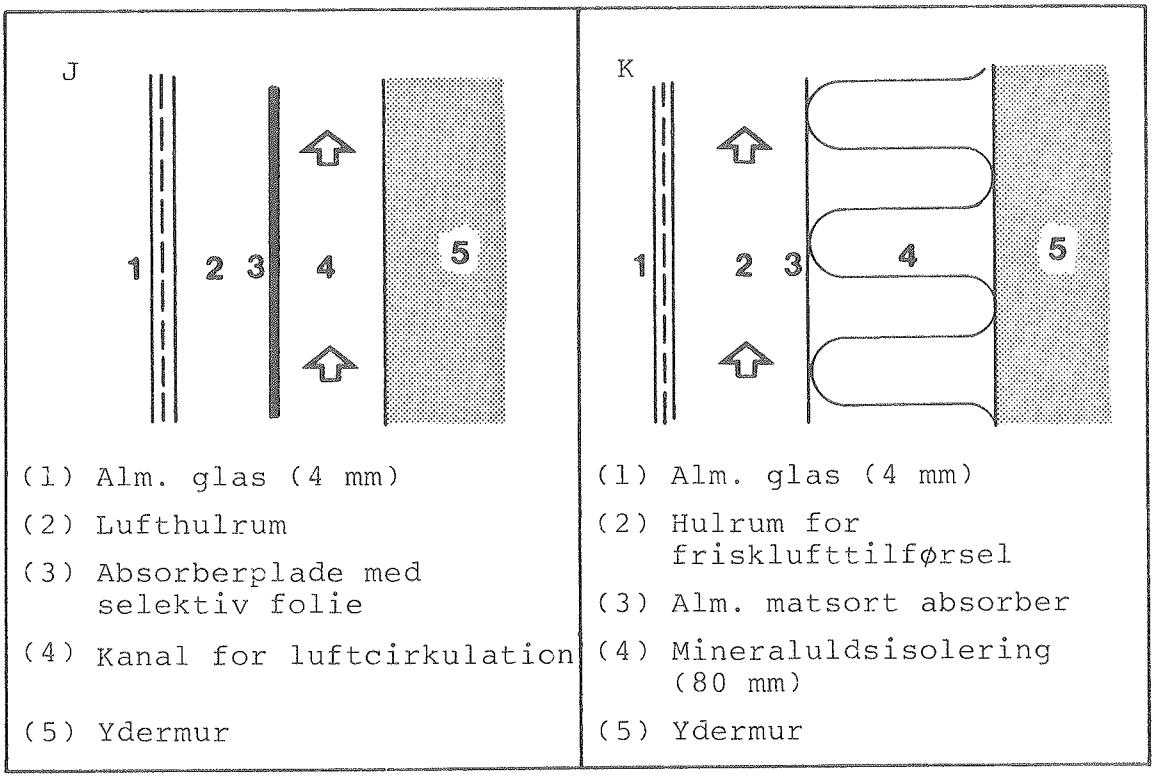
$$b = V \cdot \rho \cdot c_p + \frac{U_L \cdot U_V \cdot (1-F' \cdot F'')}{U_V \cdot (1-F' \cdot F'') + U_L}$$

Her er U_V varmetabskoefficienten for den del af væggen, der er mellem absorberen og det bagvedliggende rum. V er luftstrømmen pr. m^2 absorber, mens ρ og c_p er massefylde og varmefylde af luften.

Koefficienterne a og b er bestemt ved beregninger, som er underbygget med måleresultater, idet der blev udført forsøg med solvæggen. Målingerne er vist i appendix A2. I tabel 3.2 er værdierne for a og b angivet ved forskellige værdier af V, under forudsætning af at U_v = 0,40 W/m^{2}K .

V[m^3/sm^2]	F'	F"	a	b[W/m^{2}K]
0,002	0,57	0,51	0,33	2,6
0,004	0,57	0,70	0,42	5,1
0,008	0,58	0,81	0,49	9,9
0,016	0,59	0,89	0,55	19,5

Tabel 3.2. Værdier af koefficienterne F' , F", a og b ved forskellige værdier af V.



(1) Alm. glas (4 mm)
(2) Lufthulrum
(3) Absorberplade med selektiv folie
(4) Kanal for luftcirkulation
(5) Ydermur

(1) Alm. glas (4 mm)
(2) Hulrum for friskluftilførsel
(3) Alm. matsort absorber
(4) Mineraluldsisolering (80 mm)
(5) Ydermur

Figur 3.3. Opbygning af ventileret Trombe-væg (J) og solvæg til opvarmning af ventilationsluft (K).

3.3.3. Ventilering af uønsket solvarme

For Trombe-væggene med transparent isolering er det foreslået at modvirke en overophedning af boligen ved at sørge for, at lufthulrummet mellem absorber og dæklagssystem ventileres med udeluft. Det kan vises, at denne foranstaltning svarer til at dæklagssystemets varmetabskoefficient bliver forøget til

$$U_L' = \frac{2 \cdot U_L \cdot U_t}{(U_L + U_t) \cdot (1 - F' \cdot F'')}$$

hvor U_t er varmetabskoefficienten mellem den indvendige overflade af det inderste dæklag og omgivelserne. I tilfælde af, at der f.eks. benyttes dæklagssystemet med seks lag Isoflex-folie bag et lag glas haves U_t = 2,5 W/m^{2}K. Med en luftstrøm på 0,007 m^3/sm^2 og en afstand på 2,5 m mellem åbningerne for indløb og udløb fås F' = 0,75 og F" = 0,89, hvormed U_L' = 6,5 W/m^{2}K.

4. BEREGNINGER

Solvæggenes indflydelse på energiforbrug og temperaturforhold i en bygning er undersøgt ved hjælp af et EDB-program. Der er foretaget beregninger på årsbasis for de forskellige udformninger af solvægge i kombination med forskellige typiske eksisterende ydervægskonstruktioner.

4.1. EDB-model

Til simulering af varmestrømme, temperaturforhold m.v. for en typisk bygning i løbet af et "normalt" år, er der benyttet EDB-programmet SUNCODE [23] , [24]. I programmet benyttes udendørs klimadata fra det danske referenceår TRY [25].

Programmet SUNCODE er en "PC-omskrivning" af det detaljerede amerikanske "main frame" program SERIRES. Modellen er baseret på et termisk netværk, og ved beregningerne bestemmes diverse temperaturer time for time ved hjælp af en eksplicit metode.

Programmet er særligt velegnet til undersøgelse af bygninger med passiv solvarme, idet det er udformet, så der er mulighed for at foretage beregninger med glastilbygninger og solvægge. Bygningen opdeles i flere forskellige zoner, hvormed de forskellige rum behandles hver for sig i beregningerne. Den termiske masse i form af de forskellige bygningskonstruktioner bliver detaljeret beskrevet. Resultaterne fra beregninger med SUNCODE har vist sig at give udmærket overensstemmelse med måleresultater i forbindelse med andre projekter, udført på Laboratoriet for Varmeisolering [24], [26].

De muligheder, der på forhånd er givet for at udføre beregninger med solvægge, er dog begrænset til nogle få "standard-solvægge". Der er tale om ventilerede eller uventilerede Trombe-vægge, for hvilke dæklagssystemet er sammensat af identiske dæklag. Solvæggene med transparent isolering og friskluftventilation, kan derfor ikke umiddelbart beskrives af programmet. Endvidere forudsættes det i programmet, at diverse varmetabskoefficienter kan regnes at være uafhængige af temperaturforholdene. For en solvægs dæklagskonstruktion vil varmetabet ved konvektion i mange tilfælde stige betydeligt, når temperaturdifferensen mellem absorberen og det fri øges, og varmetabet ved stråling fra absorberen vil stige med en øget absorbertemperatur. Antagelsen vedrørende konstant varmetabskoefficient vil derfor i flere tilfælde være en forholdsvis grov simplifikation. For at være i stand til at regne på de aktuelle solvægge har det derfor været nødvendigt at indføre nogle forskellige tilnærmelser og "tricks". Disse er forklaret i appendix A3.

4.2. Karakterisering af eksisterende bygning

4.2.1. Udformning

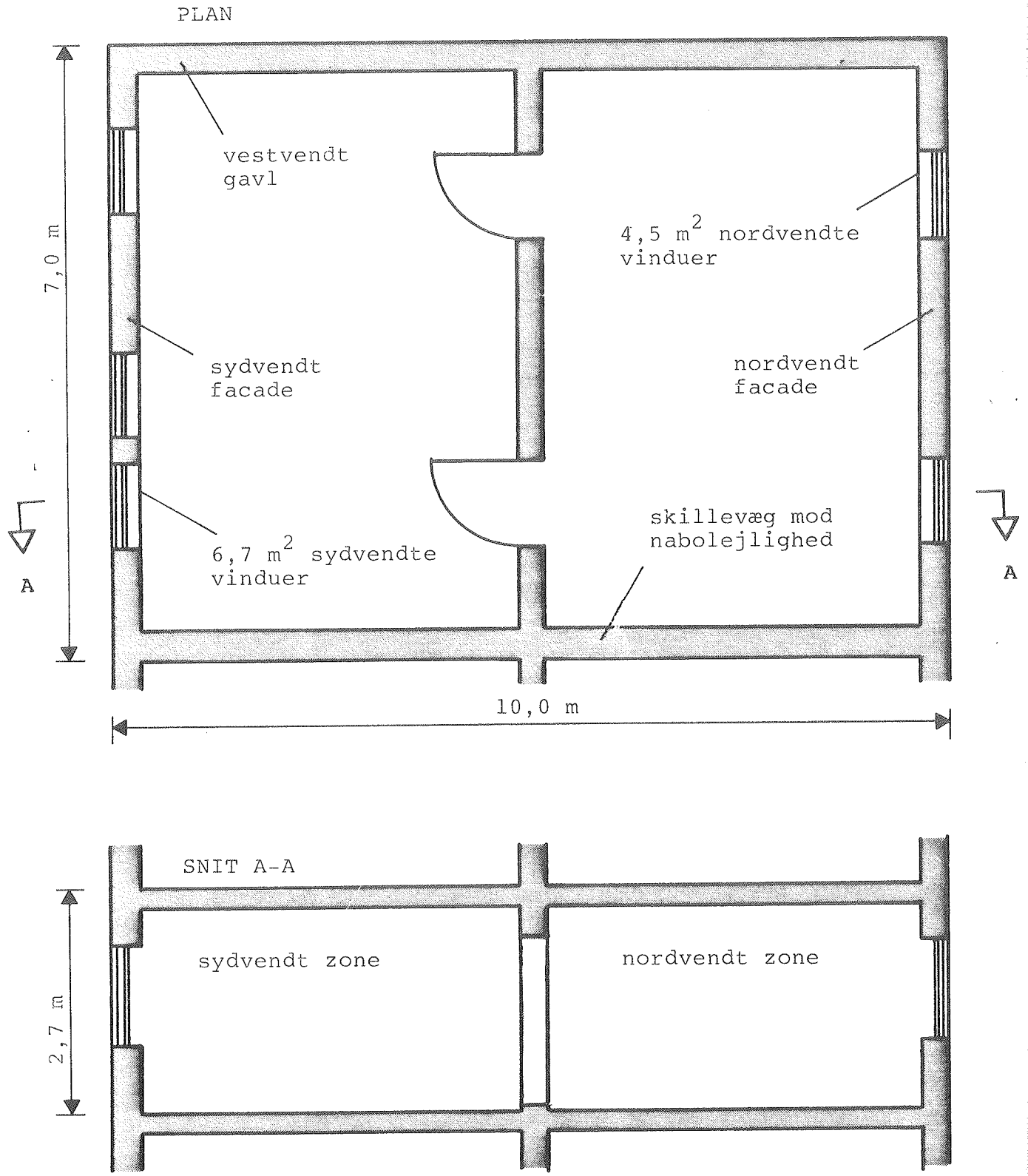
I de følgende beregninger er der betragtet en lejlighed i en etageejendom. Bruttoarealet af lejligheden er 70 m^2 , og bruttoetagehøjden er 2,7 m. Lejligheden begrænses af husets facader på 2 af siderne, af gavlen på den tredie side og af en nabolejlighed på den fjerde side. Ovenover og nedenunder er der tilsvarende lejligheder. Bygningen tænkes orienteret, så facaderne vender mod syd og mod nord. Med hensyn til solindfald gøres der den (optimistiske) forudsætning, at bygningen er fritliggende, dvs. der ses bort fra skyggevirkning af andre bygninger, træer m.v.

I EDB-modellen foretages en opdeling af lejligheden i to lige store zoner, den ene zone omfatter de sydvendte rum, og den anden omfatter de nordvendte rum. På figur 4.1 er vist den simplificerede lejligheds-plan, som er benyttet i modellen, samt et tværsnit af lejligheden.

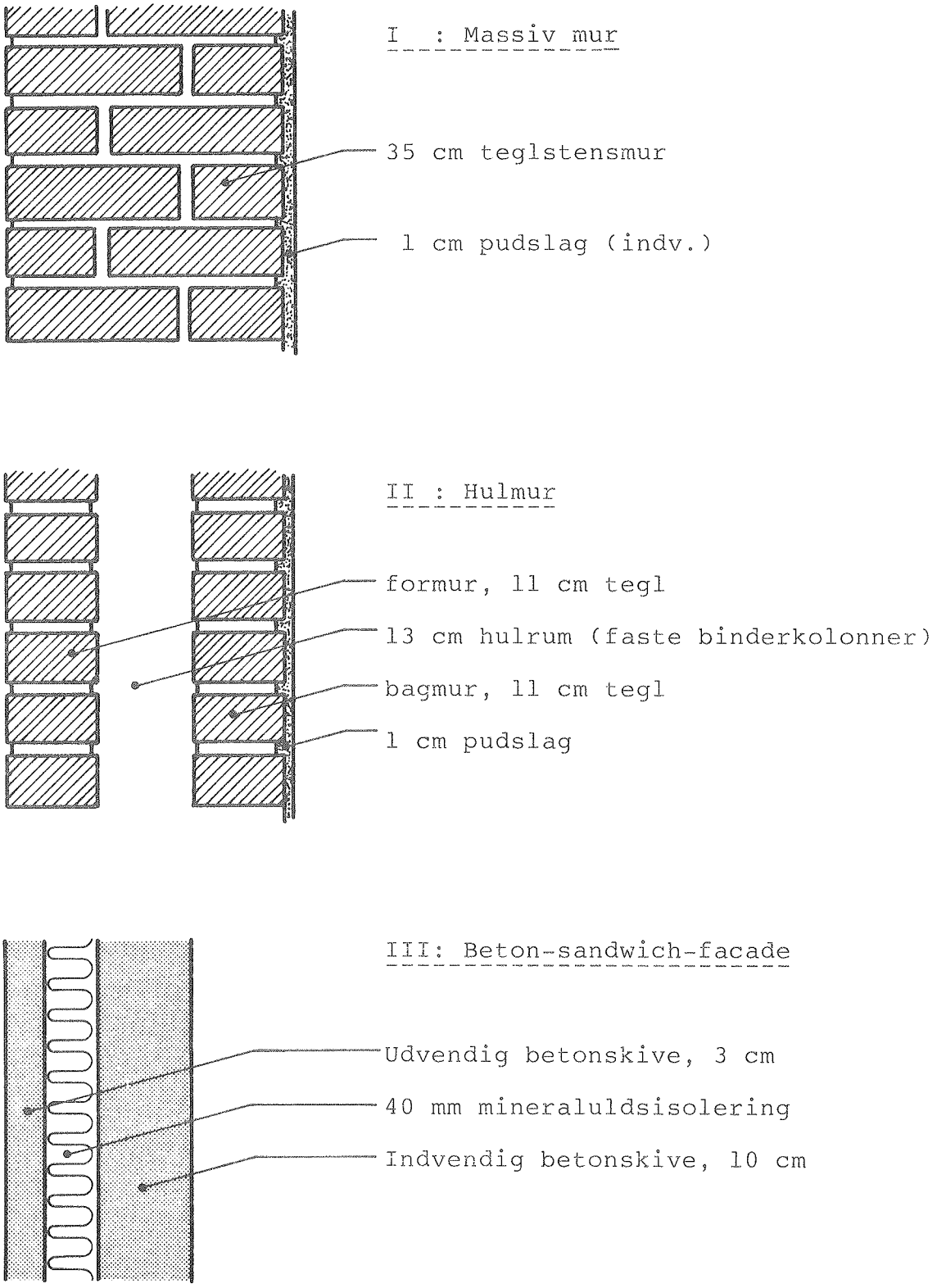
Lejligheden har et samlet vinduesareal på 11,2 m^2 , svarende til 16% af bruttoarealet. Heraf er 6,7 m^2 placeret i sydfacaden, og 4,5 m^2 er placeret i nordfacaden. Den transparente del af vinduet udgør 65% af arealet. Der er overalt benyttet to lag glas i vinduerne.

Med hensyn til bygningens konstruktioner er der undersøgt tre forskellige udformninger, svarende til typiske byggerier fra tre forskellige perioder. De benævnes "I" , "II" og "III" og er karakteriseret i det følgende. De tre tilsvarende ydervægkonstruktioner er vist på figur 4.2.

(I) Der er tale om en ejendom, der er opført omkring århundredeskiftet. Huset har oprindelig været del af en tæt karre-bebyggelse, men efter en omfattende sanering af kvarteret tænkes der at være skabt så meget "luft" omkring bygningen, at én af facaderne eller gavlene er gunstigt beliggende med hensyn til udnyttelse af sol-



Figur 4.1. Plan og tværsnit af lejlighed, svarende til beskrivelsen i EDB-programmet.



Figur 4.2. De tre ydervægkonstruktioner, der er undersøgt i forbindelse med anvendelse af solvægge.

strålingen. Der, hvor solvæggen tænkes placeret, består ydervæggen af en 1½ stens massiv teglmur. Indvendige vægge er helstens teglmure. Etageadskillelser er træbjælkelag med gulv- og forskallingsbrædder.

(II) Der betragtes en boligblok fra 30'erne eller 40'erne. Solvæggens dæklag etableres foran en hulmur med to vanger i ½-stens tykkelse. Der er fuldt udmurede partier omkring vinduer og etageadskillelser og i form af faste binderkolonner, svarende til omkring 30% af murens areal. Indvendige vægge og etageadskillelser er som ovenfor.

(III) Der er tale om et beton-byggeri fra 50'erne eller 60'erne. Facaden er en sandwich-konstruktion med en 30 mm tyk udvendig skive, et 40 mm tykt lag mineraluldsisolering og en 100 mm tyk indvendig skive. Diverse indvendige vægge er 150 mm tykke. Etageadskillelserne består af huldæk med strøer og trægulv.

Det transparente areal og absorberarealet af den solvæg, der etableres i den sydvendte facade, forudsættes at være 7 m^2 . Det svarer til 10% af lejlighedens bruttoareal.

4.2.2. Forhold vedr. energiforbruget

Rummenes absorptans for solstråling gennem vinduerne bestemmes som angivet i [17] . Halvdelen af den absorberede stråling tænkes tilført møbler og lign., og på grund af genstandenes lave varmekapacitet og store overfladeareal afgives varmen umiddelbart efter til rumluften. Den anden halvdel tilføres lejlighedens termiske masse i form af diverse vægge og etageadskillelser.

Mellem den sydvendte og den nordvendte zone sker der en varmeudveksling ved transmission gennem skillevæggen og på grund af stråling og luftstrømning gennem døråbninger. Varmeoverføringskoefficienten for den konvektive transport gennem døråbningerne er beregnet på grundlag af [27].

Den tilførte mængde gratisvarme fra beboerne, belysning m.v. andrager 9,1 kWh/døgn (svarende til 130 Wh/døgn pr. m^2 af bruttoarealet).

Lejligheden opvarmes af et radiatorsystem, når rumlufttemperaturen er nede på 20°C om dagen og 17°C om natten, idet natsænkningen er i funktion mellem kl. 10 om aftenen og kl. 6 om morgenen. Der ventileres med udeluft, hvis rumlufttemperaturen når op på 24°C (forudsat at udeluften er køligere end rumluften).

I tabel 4.1 er vist den samlede varmetabskoefficient fra rumluften til udeluften for de tre lejligheder I, II og III, i tilfælde af, at der ikke benyttes nogen solvæg. Der er benyttet U-værdierne 1,49 W/m^2K for den massive mur, 1,41 W/m^2K for hulmuren og 0,87 W/m^2K for betonsandwich-facaden. Med hensyn til boligens ventilationstab ved infiltration af udeluft er der regnet med en luftskiftekoefficient på 0,4 pr. time.

lejlighed	Samlet varmetabskoeffic.	Samlet varmetabskoefficient pr. m^2 bruttoareal
I	127 W/K	2,1 W/K m^2
II	122 "	2,0 "
III	94 "	1,5 "

Tabel 4.1. Varmetabskoefficienter for de tre lejligheder I, II og III.

I tabel 4.2 er angivet det beregnede årlige energiforbrug til rumopvarmning for de tre boliger i tilfælde af, at der ikke benyttes nogen solvæg. De energibesparelser ved brug af solvægge, som er beregnet i det følgende fås som forskellen mellem energiforbrugene Q og Q_o til rumopvarmning for lejlighederne med og uden solvæg.

Lejlighed	Q_o	Q_o'
I	6.355 kWh/år	91 kWh/år m^2
II	6.014 "	86 "
III	4.095 "	59 "

Tabel 4.2. Det årlige energiforbrug til rumopvarmning Q_o og energiforbruget pr. m^2 bruttoareal Q_o' for de tre lejligheder, idet der ikke er benyttet nogen solvæg.

Ved beregningerne med solvægge angives solvæggenes årlige udbytte q_u, hvilket er den årlige energibesparelse delt med solvæggens absorberareal. D.v.s.

$$q_u = \frac{Q_o - Q}{A_p}$$

hvor absorberarealet A_p normalt er 7 m^2.

Endvidere angives den relative energibesparelse R, som er defineret ved

$$R = \frac{Q_o - Q}{Q_o}$$

4.3. Beregninger for solvægge uden ventilation

4.3.1. Sammenhæng mellem dæklagssystemets egenskaber og udbyttet

For solvægge er det vigtigt, at dæklaget har både en høj transmittans og en god isolans. Oftest er det imidlertid sådan, at en forøget transmittans sker på bekostning af en forringet isolans og omvendt. For at få en fornemmelse af sammenhængen mellem de to parametre og den energibesparelse der kan opnås, er foretaget en lang række beregninger for forskellige kombinationer af dæklagets effektive transmissions-absorptionsprodukt, $(\tau\alpha)_e$, og varmetabskoefficienten, U_L. Beregningerne er gennemført for en solvæg placeret i lejlighedstype I.

Som udgangspunkt er benyttet en solvæg med et dæklag bestående af 1 lag 4 mm tykt alm. glas og en alm. sort absorber (absorptans = 0,95). For en indfaldsvinkel på 0^o fås $(\tau\alpha)_e = 0,84$. Ved beregningerne for de forskellige fiktive dæklag korrigeres transmittansen, så dæklaget får $(\tau\alpha)_e$ = henholdsvis 0,40; 0,50; ....0,90. Den benyttede korrektionsfaktor er den samme for alle indfaldsvinkler.

U_L for dæklaget varieres i intervallet 0,2 - 6,5 W/m^2K. Hermed er alle de typer dæklag, der kan tænkes at forekomme i praksis, inkluderet.

For de forskellige kombinationer af $(\tau\alpha)_e$ og U_L er sammenhængen med det årlige udbytte pr. m^2 absorber, q_u, vist på figur 4.3.

Fra beregningerne vist senere i dette afsnit haves, at en traditionel efterisolering med 80 mm mineraluld giver en besparelse på omkring 75 kWh/m^2. Det fremgår af figuren, at der kan opnås en lige så stor besparelse, når der benyttes dæklag med en forholdsvis høj $(\tau\alpha)_e$, hvilket er tilfældet for næsten alle de dæklagssystemer, der betragtes her.

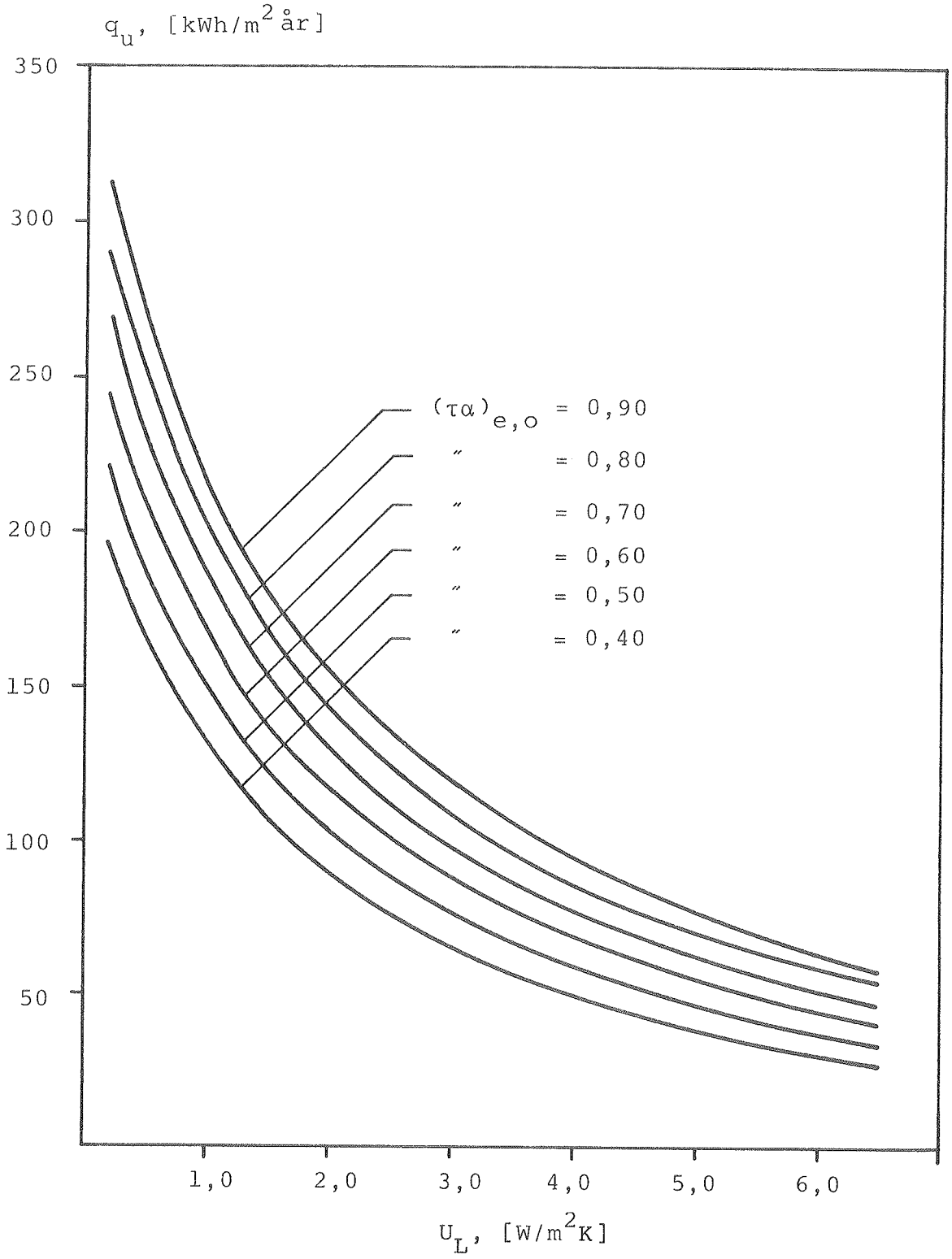


Fig. 4.3. Årligt udbytte pr. m^2 absorber for forskellige kombinationer af $(\tau\alpha)_{e,o}$ og U_L.

4.3.2. Udbytte for forskellige lejlighedstyper og dæklagssystemer

I det følgende undersøges hvor stort et udbytte, der kan opnås ved at montere de tidligere beskrevne dæklagssystemer på en sydvendt facade i hver af de 3 lejlighedstyper. Alle solvægge har et absorberareal på 7 m^2. Resultaterne fra beregningerne er angivet i tabel 4.3, 4.4 og 4.5. Med hensyn til betegnelserne for dæklagssystemerne refereres til afsnit 3.1.1.

Af de 3 tabeller fremgår, at der er stor forskel på udbyttet afhængigt af, hvilket dæklagssystem der anvendes. Det ses, at der kan opnås et udbytte på over 200 kWh/m^2 ved anvendelse af silica aerogel i dæklagssystemet.

Det ses også, at den relative besparelse stort set er ens for alle 3 lejlighedstyper. Derimod er der stor forskel på de absolutte besparelser afhængig af, hvilken lejlighed der betragtes. Udbyttet for lejlighedstype I er bedst, fordi den eksisterende ydervæg har en god varmekapacitet og en høj U-værdi. For lejlighedstype II er der tale om et noget lavere udbytte, da hulmuren har en ringere varmekapacitet end den massive mur. Med betonelementet i lejlighedstype III er udbyttet væsentligt lavere, hvilket skyldes, at isoleringslaget i elementet giver en forholdsvis lav U-værdi og dermed en begrænset varmetransport fra absorberen til boligen.

dæklag	Q [kWh/år]	q_u [kWh/m^{2}år]	R %
A	5547	115	13
B	5761	85	9
C	5503	122	13
D	5100	179	20
E	5589	110	12
F	5176	168	19
G	5412	135	15
H1	5162	170	19
H2	4878	211	23
I	5903	65	7

Tabel 4.3. Energiforbrug, udbytte og relativ besparelse for solvægge anvendt i lejlighedstype I.

dæklag	Q [kWh/år]	q_u [kWh/m^{2}år]	R %
A	5366	92	11
B	5474	76	9
C	5229	111	13
D	4833	168	20
E	5306	100	12
F	4900	158	18
G	5132	125	15
H1	4891	160	19
H2	4612	200	23
I	5611	57	7

Tabel 4.4. Energiforbrug, udbytte og relativ besparelse for solvægge anvendt i lejlighedstype II.

dæklag	Q [kWh/år]	q_u [kWh/m^{2}år]	R %
A	3731	52	9
B	3800	42	7
C	3642	65	11
D	3349	107	18
E	3692	58	10
F	3402	99	17
G	3566	76	13
H1	3388	101	17
H2	3149	135	23
I	3877	31	5

Tabel 4.5. Energiforbrug, udbytte og relativ besparelse for solvægge anvendt i lejlighedstype III.

4.3.3. Mobil isolering foran solvæg

I kraft af den ringe isolering af en solvæg med et enkelt lag glas som dæklag, haves i nattetimerne et relativt stort transmissionstab. Dette kan reduceres ved brug af en mobil isolering, der udenfor fyringssæsonen desuden kan virke som solafskærmning.

I beregningerne forudsættes, at den mobile isolering består af et rullegardin, der er blankt på begge sider. Gardinet rulles op, når den sydvendte solvæg udsættes for solstråling, dvs. fra ca. 1 time efter solopgang til ca. 1 time før solnedgang. Den mobile isolerings betydning fremgår af figur 4.4, hvor en sammenligning med 2 andre typer solvægge (6 lag Isoflex + 1 lag glas, kun 1 lag alm. glas, begge uden mobil isolering) er foretaget for alle 3 typer lejligheder.

Det ses i alle 3 tilfælde, at der er betydelig forskel på, om der benyttes mobil isolering eller ej. Det årlige udbytte med mobil isolering udgør 94 kWh/m^2 for lejlighedstype I, hvilket er 29 kWh/m^2 mere end udbyttet for ét lag glas alene.

Af figuren ses desuden, at den mobile isolering anbragt foran 1 lag glas ikke giver nær så gode resultater som dæklaget opbygget af 6 lag Isoflex og 1 lag glas.

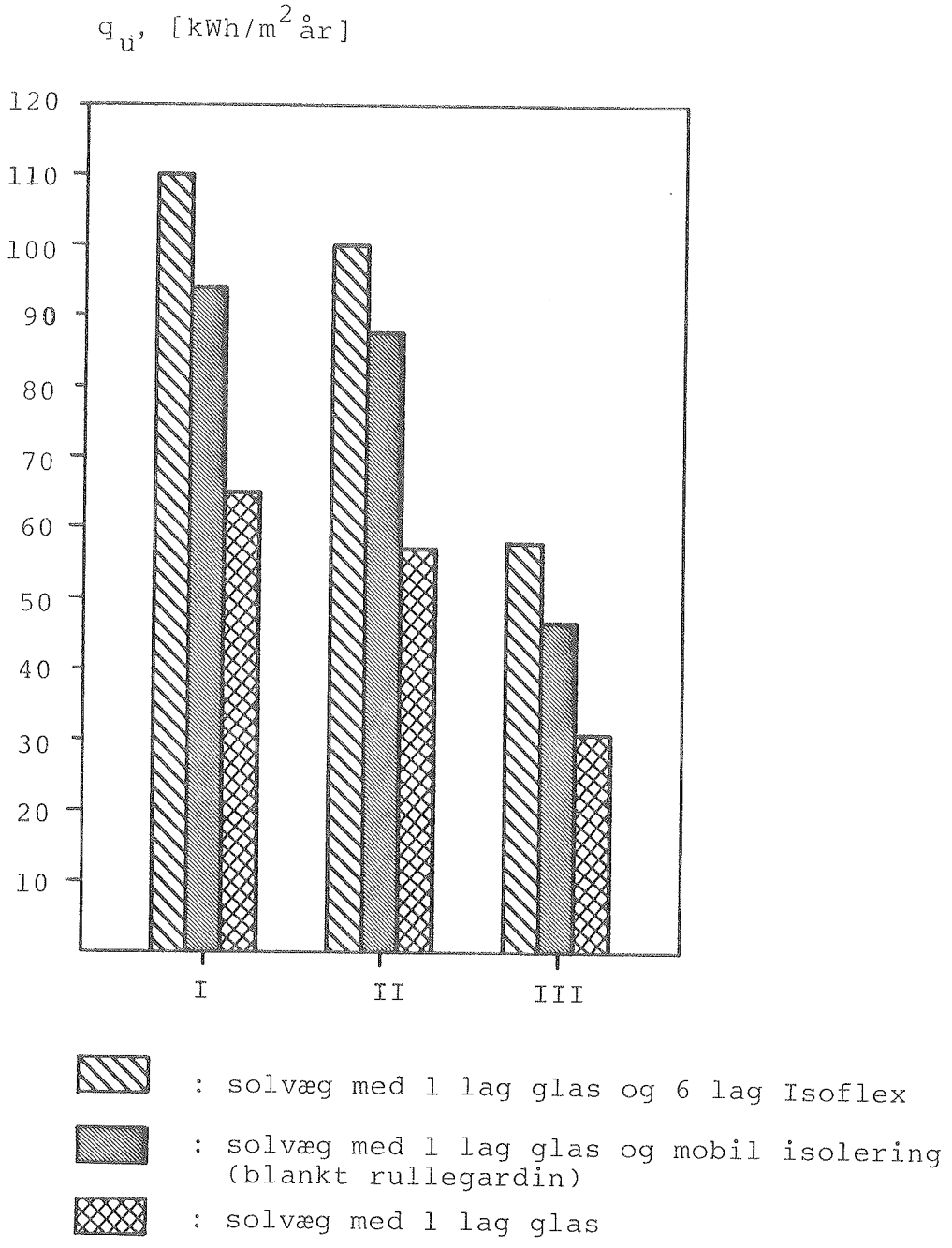


Fig. 4.4. Udbytte for 3 forskellige dæklag placeret i alle 3 lejlighedstyper.

4.3.4. Udnyttelse af solindfald

Energiforbrug med og uden solvæg

For at illustrere fordelingen af udbyttet over året er energibehovet pr. måned for lejlighedstype I med og uden solvæg vist i figur 4.5. Solvæggens dæklag er 1 lag alm. glas og 6 lag Isoflex. Det ses, at besparelsen er jævnt fordelt over hovedparten af fyringssæsonen.

"Udnyttelsesgrad"

Solvæggens evne til at udnytte solindstrålingen, I, på det lodrette sydvendte plan er illustreret i figur 4.6. Der er benyttet et dæklagssystem af typen 1 lag alm. glas og 6 lag Isoflex.

Det ses, at der i vintermånederne er tale om ganske høje udnyttelsesgrader (op til 54 %). Det skal understreges, at udnyttelsesgraden ikke repræsenterer en egentlig effektivitet for solvæggens transmission af solenergi. En stor del af udbyttet kan henføres til reduktionen af varmetabet gennem den almindelige massive ydermur, som solvæggen erstatter.

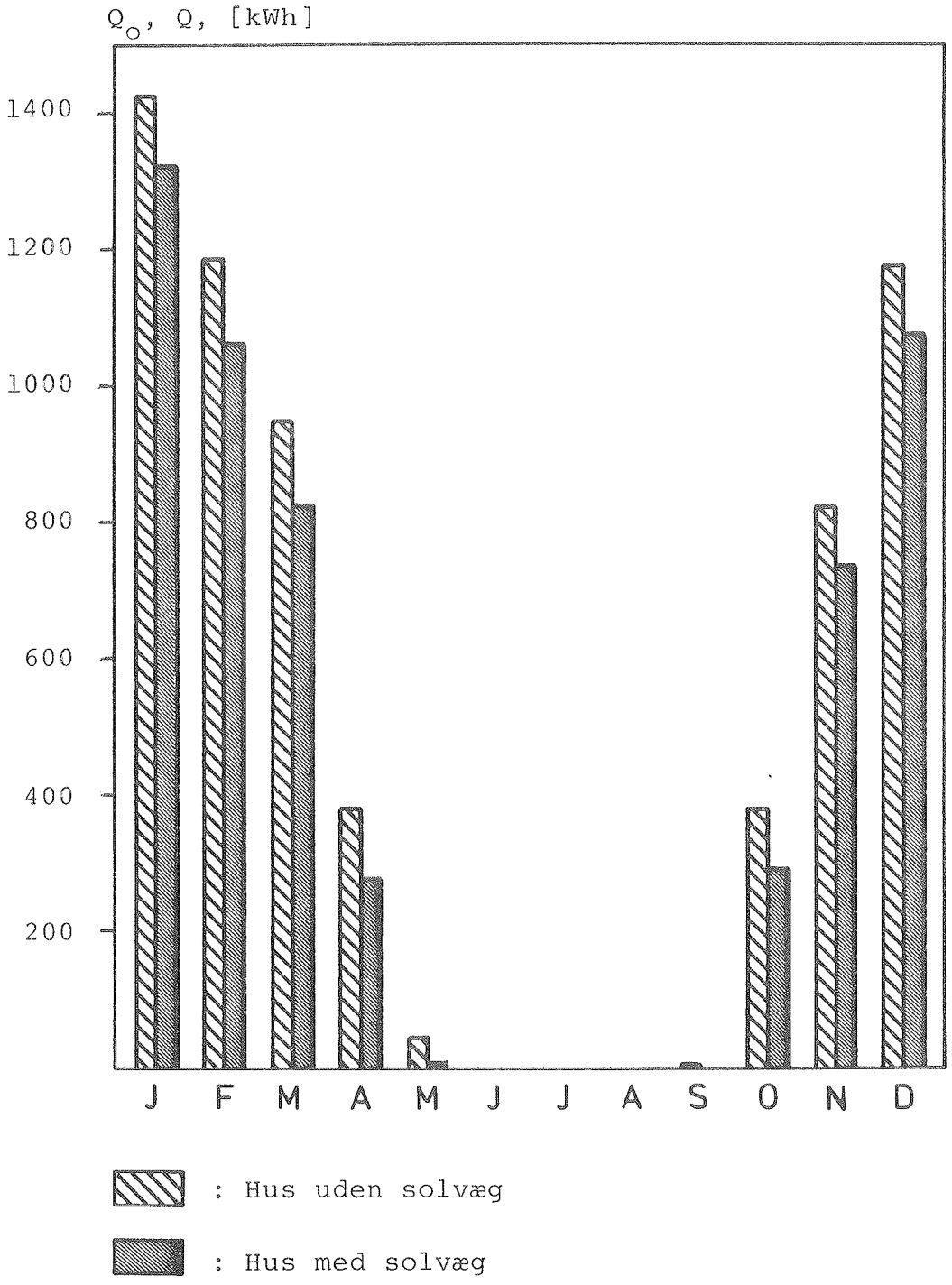


Fig. 4.5. Energiforbrug, Q og Q_o, til rumopvarmning for lejlighedstype I^o med og uden solvæg.

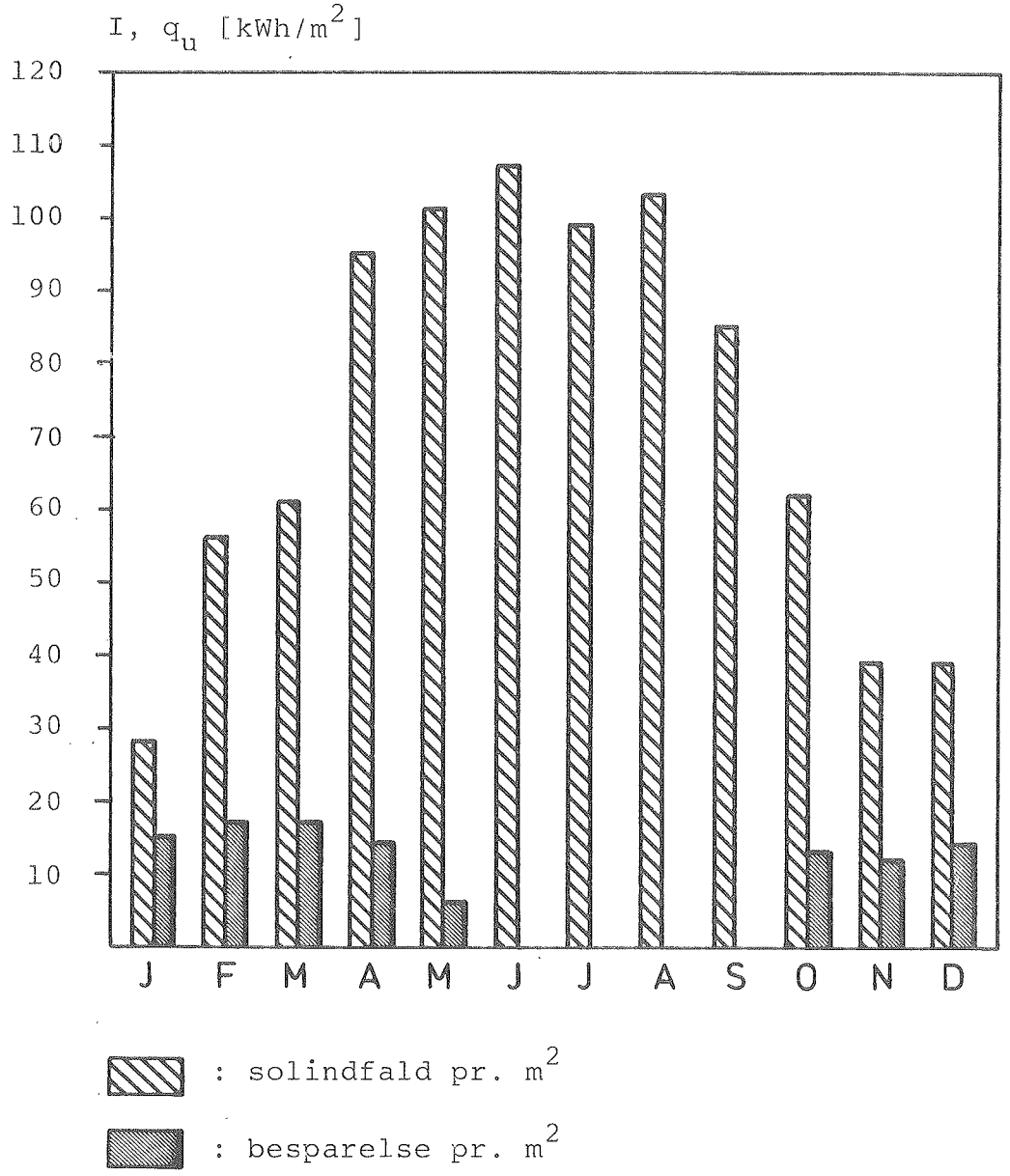


Fig. 4.6. Solindstråling på det lodrette sydvendte plan og udbytte for solvæg placeret i sydvendt facade i lejlighedstype I.

4.3.5. Traditionel efterisolering

Som alternativ til solvæggene kan der foretages en udvendig efterisolering af ydervægge og gavle med 80 mm mineraluld med en praktisk varmeledningsevne på 0,042 W/mK. For de 3 typer lejligheder ændres ydervæggenes U-værdier fra henholdsvis U_I = 1,49 W/m^{2}K, U_{II} = 1,41 W/m^{2}K, U_{III} = 0,87 W/m^{2}K til henholdsvis U_I = 0,39 W/m^{2}K, U_{II} = 0,38 W/m^{2}K, U_{III} = 0,33 W/m^{2}K.

Beregninger viser, se figur 4.7, at der ved efterisolering opnås besparelser på henholdsvis 76, 69 og 36 kWh/m^2. Sammenlignes med de besparelser, der opnås ved brug af en solvæg opbygget af 6 lag Isoflex og 1 lag glas, ses at besparelsen for solvæggen er henholdsvis 43, 46 og 61 % større end for den udvendige isolering.

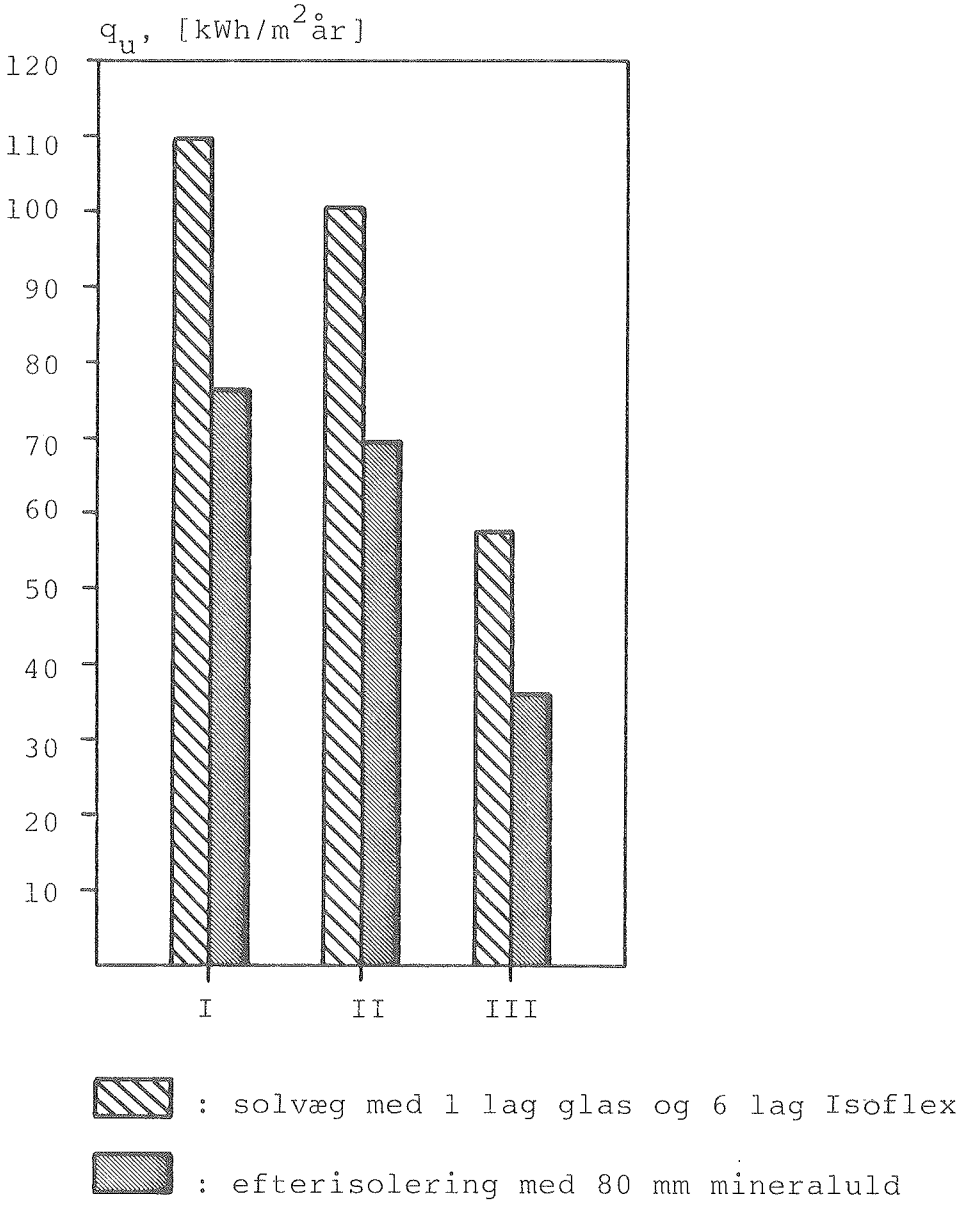


Fig. 4.7. Udbytte fra solvæg og besparelse ved efterisolering for alle 3 lejligheder.

4.4. Udbytte fra solvægge med ventilation

Der er foretaget beregninger af det årlige udbytte for de to udformninger af ventilerede solvægge (J) og (K), som er vist i afsnit 3.2. Der er som i det foregående anvendt et sydvendt absorberareal på 7 m^2.

4.4.1. Ventileret Trombe-væg

Resultaterne fra beregningerne er vist i tabel 4.6. Det ses, at der er tale om en væsentlig forøgelse af energibesparelserne i forhold til besparelserne med den i afsnit 4.3.2 undersøgte uventilerede solvæg med selektiv absorber (C). Udbyttet forøges i alle tilfælde med omkring 60 kWh/m^2 . Den relative forøgelse af udbyttet er størst for betonfacaden, hvor energitilskuddet ved varmeledning gennem væggen er ret beskedent på grund af isoleringslaget.

Den høje værdi for udbyttet fra den ventilerede solvæg hænger sammen med, at det transparente sydvendte vinduesareal er relativ beskedent. I sammenligning med den uventilerede solvæg med selektiv absorber er der endvidere tale om en noget lavere U-værdi mellem den udvendige muroverflade og det fri i perioderne uden ventilation, idet der er et ekstra isolerende hulrum foran muren.

Det skal nævnes, at de opnåede resultater er baseret på den antagelse, at kontraventilerne lukker ordentligt tæt, så uønsket luftcirkulation i sol-løse perioder forhindres.

lejlighed	Q [kWh/år]	q_u [kWh/m^2 år]	R %
I	5107	178	20
II	4834	169	20
III	3191	129	22

Tabel 4.6. Energiforbrug, udbytte og relativ besparelse for den ventilerede Trombe-væg (J).

4.4.2. Væg til opvarmning af den friske ventilationsluft

Resultaterne fra beregningerne med denne solvæg er vist i tabel 4.7. En del af de opnåede besparelser kan henføres til efterisoleringen med de 80 mm mineraluld. Ved sammenligning med beregningerne i afsnit 4.3.5 ses, at den årlige energibesparelse for solvæggen med friskluftventilation er ca. 90 kWh/m^2 højere end energibesparelsen, hvis der udelukkende foretages en efterisolering. Et overslag giver, at denne forskel i energibesparelse er næsten lige så høj som den, der kan opnås med et anlæg til varmegenvinding fra ventilationsluften.

Der er regnet med en luftskiftekoefficient på 0,4 pr. time for det mekaniske luftskifte. Man kunne forestille sig, at der kunne opnås en større energibesparelse, hvis luftskiftekoefficienten forøges efter etableringen af solvæggen, idet solvæggens effektivitet ved solvarmeopsamlingen forbedres, når luftstrømmen forøges. Dette er imidlertid ikke tilfældet, da det ekstra udbytte for solvæggen altid vil være mindre end det ekstra energiforbrug til dækning af det forøgede ventilationstab. Dette forhold er konstateret i [14], og det blev bekræftet ved beregningerne under dette projekt. Hvis luftskiftet f.eks. fordobles efter etableringen af solvæggen er der således overhovedet ikke tale om nogen energibesparelse.

lejlighed	Q [kWh/år]	q_u [kWh/m^{2}år]	R %
I	5171	169	19
II	4883	162	19
III	3271	118	20

Tabel 4.7. Energiforbrug, udnytte og relativ besparelse for solvæggen med friskluftventilation (K).

4.5. Parametervariationer

For at bedømme solvæggenes generelle anvendelighed er det nødvendigt at undersøge betydningen af en række af de parametre, der beskriver solvæggen og bygningen. En række interessante parametervariationer er beskrevet nedenfor.

Ved flere af beregningerne er der benyttet solvæggen med Isoflex. Det tidligere beregnede udnytte for denne væg er hverken specielt højt eller lavt, hvorfor den anses for at være "repræsentativ". Endvidere er der tale om et materiale, som det allerede på nuværende tidspunkt er realistisk at anvende.

Analyserne er i alle tilfælde udført for lejlighedstype I. I nogle tilfælde er der udført beregninger for alle 3 lejligheder.

Parametervariationerne er delt i 3 sektioner, der beskriver hver sin type variationer:

Variationer vedr. solvæggen

a) Anvendelse af jernfrit glas.

b) Forskellige tykkelser af Isoflex.

c) Forskellige tykkelser af Airglass.

d) Forskellige solvægarealer.

Bygningsorientering og skyggevirkning

e) Solvæg i sydvendt gavl.

f) Forskellige orienteringer af hus og dermed solvægge.

g) Skyggevirkning fra omkringliggende huse.

Temperatursvingninger

h) Risiko for overtemperaturer i lejlighed.

i) Risiko for nedbrydning af mur gennem undersøgelse af maksimale absorbertemperaturer.

4.5.1. Parameterændringer vedr. solvæggen

Anvendelse af jernfrit glas

Da jernfrit glas har en bedre transmission af solstråling (ringere absorption) end almindeligt glas, er det relevant også at undersøge effekten heraf. Sammenligningen foretages med 2 typer dæklag, begge med 6 lag Isoflex og 1 lag glas, der enten er jernfrit eller almindeligt glas.

Beregninger viser, at der ved anvendelse af jernfrit glas blot opnås et forøget udbytte på 4 kWh/m^{2}år ~ 3 % .

Det kan således kun betale sig at benytte jernfrit glas, hvis det kan skaffes til samme pris som almindeligt glas.

Isoflex, optimal dæklagstykkelse

Der er hidtil benyttet 6 lag Isoflex svarende til en tykkelse på 30 mm og dermed en relativt ringe isolans. Det er interessant at undersøge udformninger, der har en større isolans og dermed også en mindre transmittans. De øvrige udformninger er med henholdsvis 4, 8 og 10 lag Isoflex.

Resultaterne i nedenstående tabel 4.8 viser sammenhængen mellem antallet af lag Isoflex og det udbytte, der kan opnås.

Antal lag Isoflex	Q [kWh/år]	q_u [kWh/m^{2}år]	R [%]
4 ~ 20 mm	5664	100	11
6 ~ 30 mm	5589	110	12
8 ~ 40 mm	5562	113	12
10 ~ 50 mm	5574	112	12

Tabel 4.8. Energiforbrug, udbytte og relativ besparelse for forskellige tykkelser af Isoflex i solvæg anbragt i sydfacade i lejlighedstype I.

Det ses af tabellen, at der ikke er nævneværdig forskel på, om der benyttes 6, 8 eller 10 lag Isoflex. Det optimale antal er således 6 lag Isoflex, da dette giver den enkleste og billigste solvæg.

Airglass, optimal dæklagstykkelse

En interessant dæklagskonstruktion er Airglass anbragt mellem 2 lag glas. Denne type dæklag har gode optiske og varmetransmissionsmæssige egenskaber, hvorfor den er aktuel ved udformning af et dæklagssystem, som giver optimalt udbytte. Det er i den forbindelse relevant at bestemme den dæklagstykkelse, der giver det største udbytte. Dette er undersøgt for 5 tykkelser, nemlig 10, 20, 30, 40 og 50 mm Airglass.

Beregningerne er udført med jernfrit glas, og alle de betragtede solvægge er placeret i lejlighedstype I. Endvidere er der benyttet evakueret Airglass for at få så god en isolans som muligt. Randtab fra solvæggen sættes, under forudsætning af omhyggelig isolering og tætning til 0,1 W/K pr. m^2 absorber. Resultaterne er vist i tabel 4.9.

Tykkelse af Airglass [mm]	Q [kWh/år]	q_u [kWh/m^2år]	R [%]
10	4894	209	23
20	4753	229	25
30	4746	230	25
40	4771	226	25
50	4833	218	24

Tabel 4.9. Sammenhæng mellem tykkelsen af evakueret Airglass, og det udbytte der opnås ved sydvendt solvæg placeret i lejlighedstype I.

Af tabellen fremgår, at det største udbytte opnås for en tykkelse på 30 mm, men også at der kun er ringe forskel på udbyttet for de forskellige tykkelser. For tykkelser større end 30 mm medfører den forringede transmittans et fald i udbyttet.

Hvilken tykkelse (mellem 10 og 30 mm) der skal anvendes, må således afhænge af fremstillingsprisen.

Isoflex, solvægareal

Det er endvidere blevet undersøgt, hvorvidt det kan betale sig at benytte store eller små absorberarealer ved at sammenholde udbyttet pr. m^2 absorber med absorberens størrelse. Dæklagssystemet er 6 lag Isoflex og 1 lag alm. glas placeret i lejlighedstype I. Resultatet fremgår af tabel 4.10.

absorber-areal [m^2]	q_u [kWh/m^2år]	R [%]
5,0	112	9
7,0	110	12
10,0	107	17
12,6	106	21

Tabel 4.10. Absorberareal, udbytte og relativ besparelse for sydvendt solvæg placeret i lejlighedstype I.

Det ses, at udbyttet pr. m^2 stort set er uafhængigt af, hvor stor en solvæg der anvendes. Der er derfor mulighed for at opnå en ret stor relativ besparelse ved at benytte et stort solvægareal.

Det svage fald i udbyttet for voksende absorberarealer skyldes en mindre effektiv udnyttelse af de store absorberarealer i månederne april, maj og september.

Ventilerede solvægge, solvægareal

Sammenhængen mellem udbyttet og det samlede absorberareal for de to ventilerede solvægge (J) og (K) er vist i tabel 4.11. Beregningerne er foretaget for lejlighedstype I.

Det skal bemærkes, at den ventilerede luftmængde pr. m^2 absorber er konstant i beregningerne med (J), medens det for solvæg (K) er den samlede luftmængde for hele arealet, der er konstant.

Det ses, at der i modsætning til de ovenstående resultater for den uventilerede solvæg er tale om en markant formindskelse af udbyttet, når absorberarealet forøges. Dette skyldes, at varmetilførslen ved ventilationen finder sted samtidig med, at der er solindfald gennem vinduerne. I forårs- og efterårsmånederne vil den forøgede varmetilførsel derfor i højere grad have karakter af overskudsvarme.

solvæg	absorberareal [m^2]	q_u [kWh/m^2år]	R %
J	5	198	16
	7	178	20
	10	160	25
K	5	180	14
	7	169	19
	10	156	25

Tabel 4.11. Absorberareal, udbytte og relativ besparelse for ventilerede solvægge anvendt i lejlighedstype I.

4.5.2. Bygningsorientering og skyggevirkning

Solvæg i sydvendt gavl

Udover en placering i sydvendte facader kan solvæggene også placeres i sydvendte gavle. Såfremt bygningens gavl vender mod syd og facaderne mod øst og vest vil husets energiforbrug øges i forbindelse med det reducerede solindfald gennem vinduerne. Der er udført en beregning for solvæggen placeret i den sydvendte gavl på lejlighedstype I.

Med 7 m^2 solvæg (6 lag Isoflex, 1 lag glas) opnås stadig en god relativ besparelse, nemlig ca. 11 % . Det årlige udbytte fra solvæggen udgør 103 kWh/m^2, hvilket er 5 % mindre end for det hus, hvor solvæggen er placeret i facaden.

Ændret orientering af bygning

Betydningen af husets og dermed solvæggens orientering er bestemt ved en sammenligning af 5 forskellige "rotationer" af lejlighedstype I. Solvæggen er stadig opbygget af 6 lag Isoflex og 1 lag alm. glas og placeret i den "sydvendte" facade. De 5 solvægsorienteringer er øst (-90^o), sydøst (-45^o), syd (0^o), sydvest (45^o) og vest (90^o). Udbyttet pr. m^2 absorber er for de 5 orienteringer vist i figur 4.8.

Det ses, at udbyttet, som det må forventes, varierer stærkt med orienteringen. Den største besparelse opnås for en sydvendt solvæg. For en øst- eller vestvendt solvæg opnås en besparelse svarende til en traditionel efterisolering (74-76 kWh/m^2).

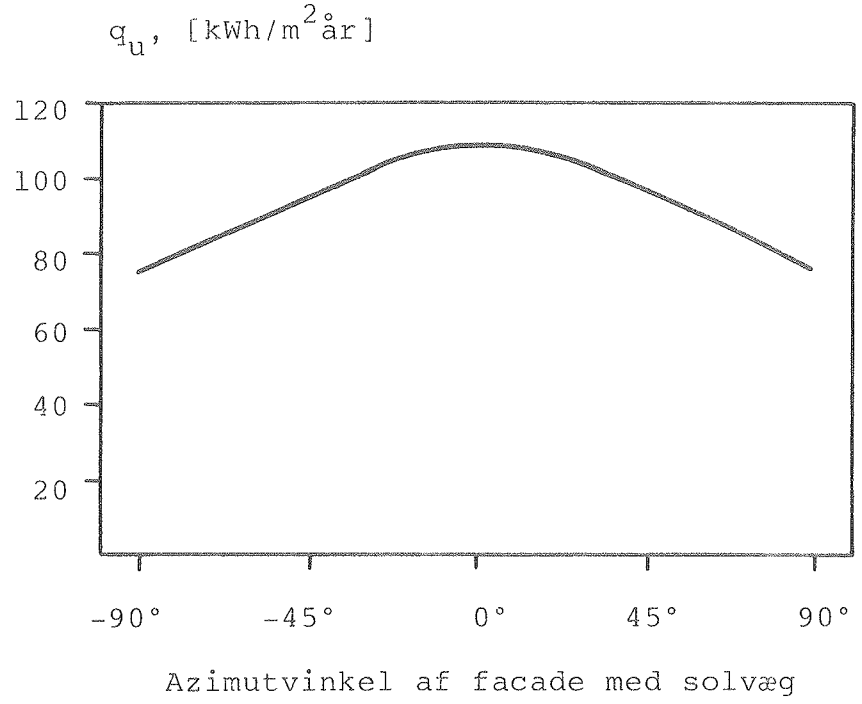


Fig. 4.8. Sammenhæng mellem solvægsorientering og det udbytte der opnås ved anvendelse i lejlighedstype I.

Skyggevirkning fra omkringliggende huse

Hvis solvægge skal anvendes ved renovering af eksisterende byggeri, vil der ofte være tale om en skyggeeffekt fra omkringliggende huse.

Dette vil reducere solindfaldet både på vinduer og solvægge, hvorfor energiforbruget vil øges. Hvor stort et udbytte, der vil opnås, er undersøgt for 4 forskellige skyggevirkninger svarende til en horisontafskæring på henholdsvis 0^o, 15^o, 30^o og 45^o. Der er benyttet en solvæg med 6 lag Isoflex og 1 lag alm. glas placeret i lejlighedstype I. Resultatet er vist i figur 4.9.

Af figuren ses, at der sker en større reduktion af udbyttet, hvis der er tale om store vinkler. For 30^o og 45^o svarer udbyttet til, hvad der opnås ved en udvendig efterisolering med 80 mm mineraluld. For vinkler større end 45^o sker en meget ringe

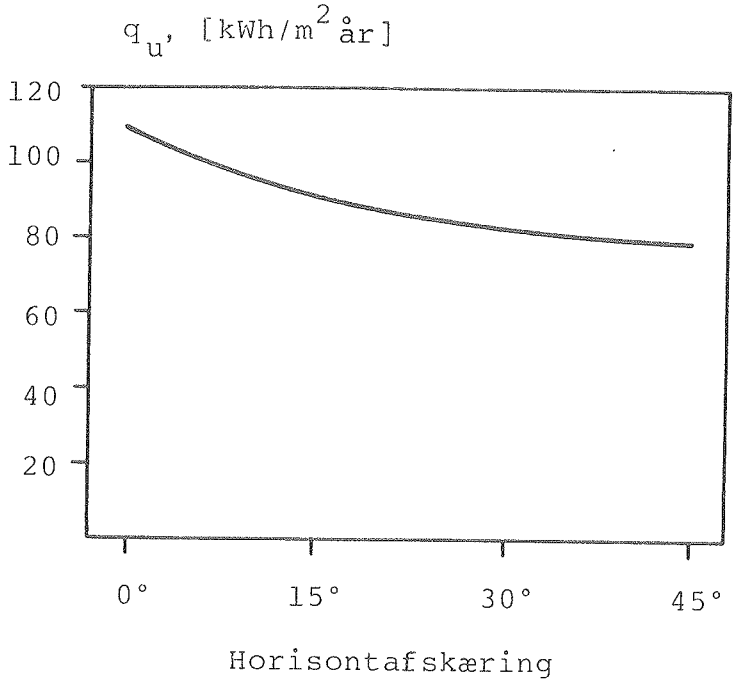


Fig. 4.9. Horisontafskæringens betydning for udbyttet fra solvæg placeret i syd-vendt facade.

reduktion af udbyttet, da den diffuse stråling her udgør størsteparten af den indfaldende solstråling. For små vinkler (< 30^{o}) er der således stadig tale om større besparelser end ved efterisolering med 80 mm mineraluld.

4.5.3. Temperatursvingninger

Sikring af termisk komfort

Det er undersøgt, hvorvidt solvæggen giver anledning til så megen overskudsvarme, at det i sommermånederne bliver problematisk at bortventilere den varme indeluft til sikring af termisk komfort. En sådan ventilation sker ved åbning af vinduer, og luftskiftekoefficienten sættes til 3,0 pr. time, når indetemperaturen overstiger 24 ^{o}C. Indelufttemperaturen i den sydvendte zone er sammenlignet for lejligheder med og uden solvæg. Ved beregningerne benyttes solvæggen med 6 lag Isoflex og 1 lag alm. glas anbragt på sydfacaden i lejlighedstype I.

Af figur 4.10 ses, at det på en varm og solrig sommerdag (her den 7. og 8. juni i referenceåret,[25]) i næsten hele døgnet er nødvendigt at ventilere for overtemperaturer.

Det fremgår imidlertid også, at der er ringe forskel på rumlufttemperaturen ved beregningerne med og uden solvæg. Den maksimale temperaturforskel er 0,5 ^{o}C. Nærmere analyser viser, at denne forskel, hvis det ønskes, kan reduceres til 0,1 ^{o}C ved at udforme solvæggen, således at der, som tidligere beskrevet, mellem absorber og dæklagssystem ventileres med udeluft.

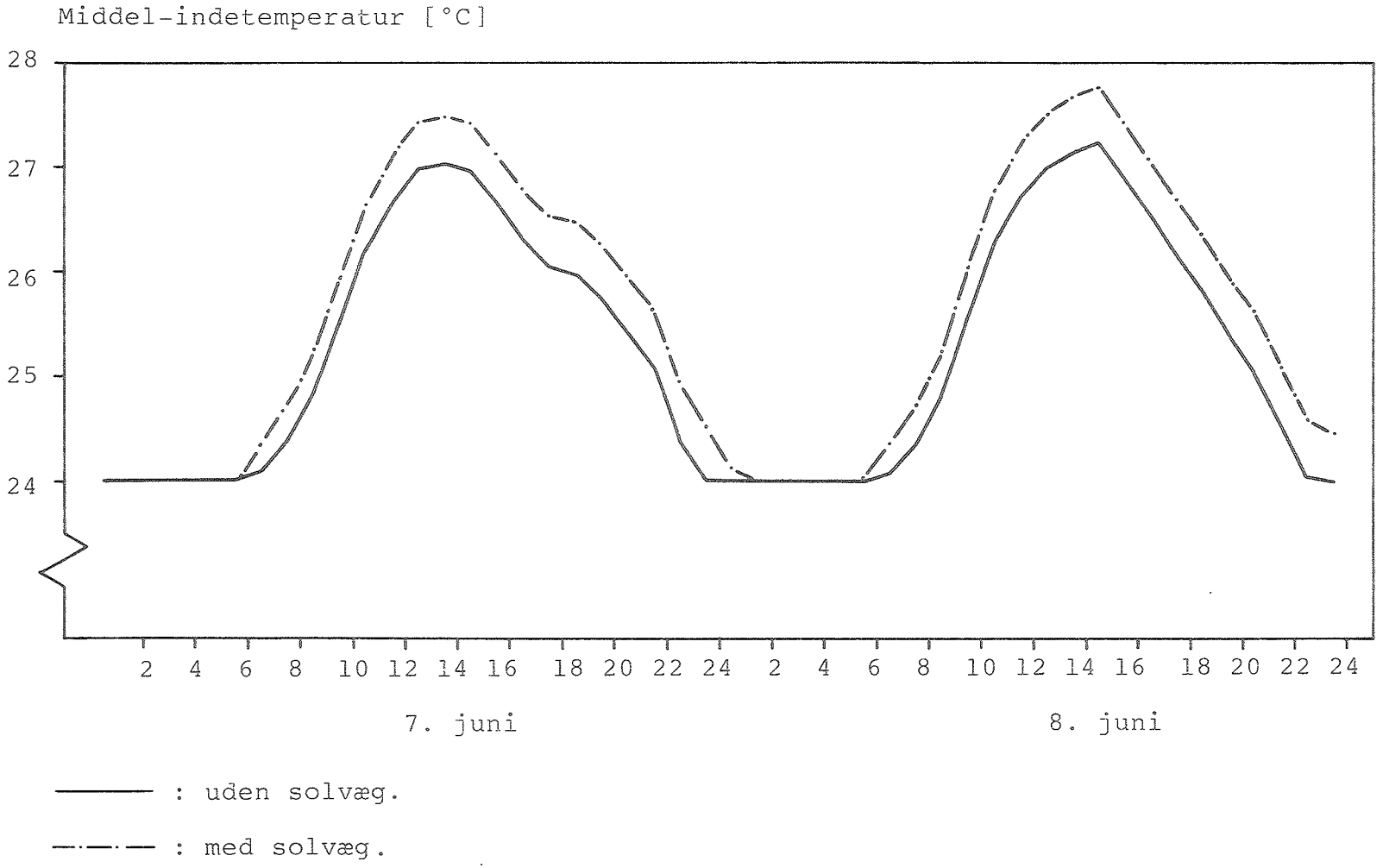


Fig. 4.10. Middelindetemperatur på en varm sommerdag for lejlighedstype I med og uden solvæg.

Maksimale absorbertemperaturer

For at vurdere hvor store krav der stilles til temperaturbestandigheden af dæklag, absorber og den eksisterende ydermur, er absorbertemperaturen på en særlig varm dag beregnet. En sådan varm dag er ifølge [25] d. 7/6. Beregningerne er foretaget for solvæggen med 6 lag Isoflex og 1 lag alm. glas. Resultatet er vist i figur 4.11.

Det fremgår af figuren, at den maksimale absorbertemperatur bliver 63,9 ^{o}C, og den maksimale temperatursvingning 30,8 ^{o}C.

For de forskellige materialer, der indgår i solvæggen, vil der ikke være nogen fare for nedbrydning på grund af for høje temperaturer. For den eksisterende mur kan der være tale om svind/svelnings-fænomener og deraf følgende krybning, hvilket man ved opbygning af solvæggen bør være opmærksom på.

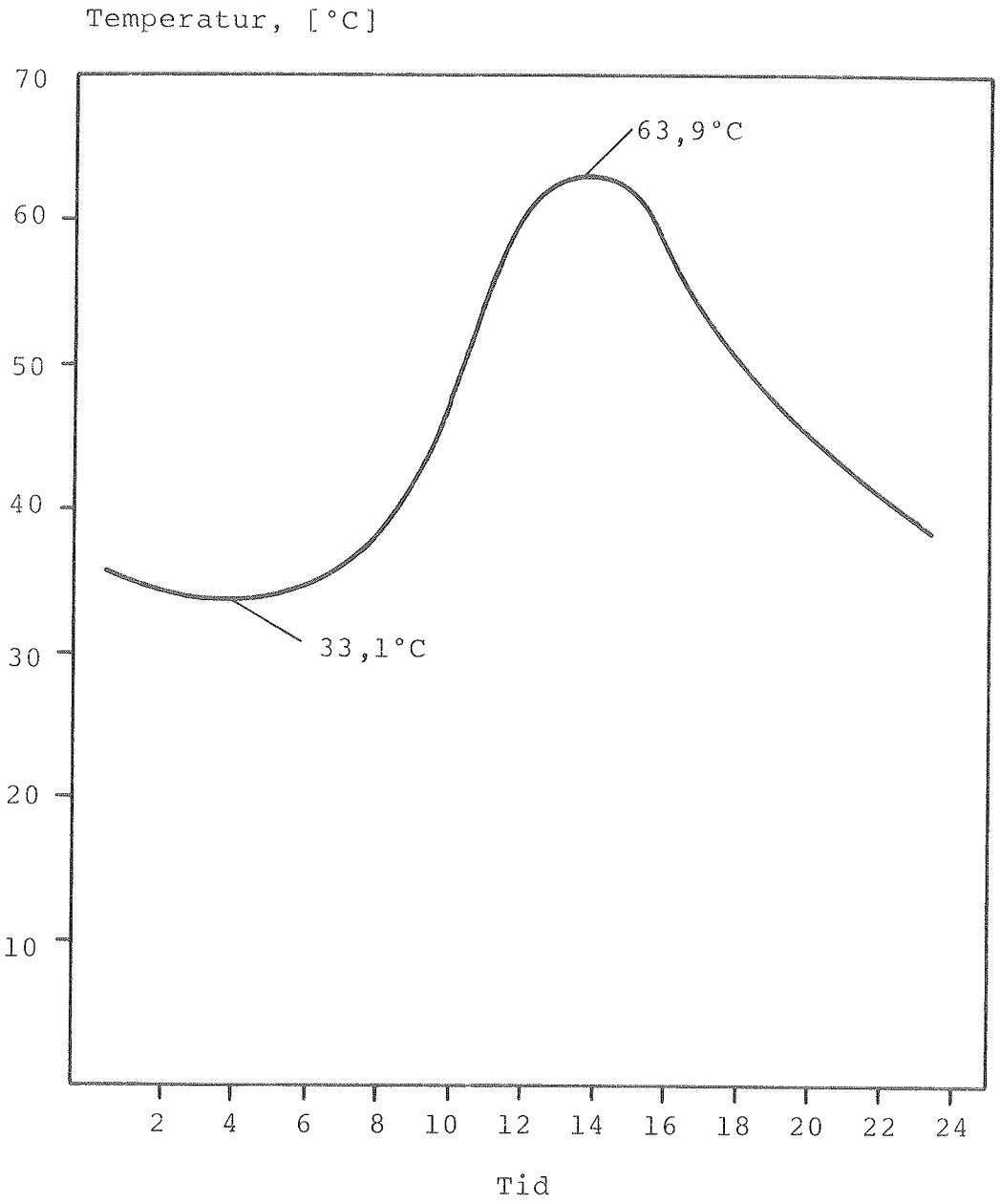


Fig. 4.11. Absorbertemperaturer på en varm sommerdag for solvæg placeret i sydvendt facade.

5. ØKONOMISK VURDERING

Det er tidligere vist, at der i forhold til en traditionel efterisolering er en energimæssig gevinst ved brug af solvægge i forbindelse med renovering af etagebyggeri. For at vurdere om det også er økonomisk rentabelt, er investering og besparelser for henholdsvis solvægge og efterisolering sammenlignet ved hjælp af nu-værdimetoden, [28].

5.1. Metode og forudsætninger

Nu-værdimetoden udtrykker resultatet af et investeringsprojekt i den kr-værdi, som er gældende på investeringstidspunktet (nu--værdien). Ved vurdering af en række forskellige solvægge svarer den største nu-værdi til den mest rentable investering, uanset dennes størrelse. En investering er kun lønsom, hvis nu-værdien er positiv. Metoden er baseret på en række skøn over udviklingen af rente på banklån, inflation, energipriser, skat etc. i løbet af en længere årrække.

Alle investeringer betragtes med en økonomisk levetid på 20 år, lånerenten antages at være 15%, skat af renteindtægter/udgifter at andrage 50 % , inflationen sættes til 5 % , energiprisstigningen er enten lig inflationen, eller 5 % højere svarende til en energiprisstigningstakst på 10 % . Lejlighederne betragtes som opvarmet enten ved hjælp af oliefyret centralvarme med en virkningsgrad på 0,85, eller ved hjælp af el-varme. El-varme kan kun forventes at være aktuel i lejlighedstype I (massiv teglmur), hvor den har erstattet opvarmning med petroleumsovn. Olieprisen sættes til 325 kr/MWh, hvorved der opnås en besparelse på 325/0,85 = 383 kr/MWh. Prisen for el-varme sættes til 775 kr/MWh. Begge priser er fundet i [29].

Investeringsbeløbet for de forskellige solvægge er sammensat af materialeudgifter og udgifter til stillads og arbejdsløn. Den herved beregnede investering reduceres med 30 % svarende til statstilskud til projekter for udnyttelse af passiv solvarme.

For alm. 4 mm glas sættes prisen, afhængigt af om der benyttes 1 eller 2 lag glas, til henholdsvis 270 kr/m^2 og 390 kr/m^2, idet det forudsættes, at det yderste lag glas er hærdet. Materialeudgifter til ramme, tætningslister, forsegling, maling etc. sættes, afhængigt af om der benyttes 1 eller 2 lag glas, til henholdsvis 190 kr/m^2 og 230 kr/m^2. For de øvrige komponenter sættes priserne ifølge forhandleroplysninger til:

selektiv folie	=	170 kr/m^2
ét lag hærdet glas med lavemissionsbelægning	=	305 "
Honeycombs	=	415 "
Isoflex, 6 lag ~ 30 mm	=	150 "
Teflon folie	=	50 "
kontraventiler, inkl. etablering	=	400 "
mineraluld, inkl. lægter, beslag etc.	=	110 "

For henholdsvis granuleret, monolitisk og evakueret monolitisk silica aerogel er fremstillingspriserne endnu så usikre, at det i stedet er beregnet, hvor stor prisen på hvert af de 3 produkter inkl. glas og forsegling må være, for at investeringen bliver lønsom. Alle de opgivne materialepriser er inkl. moms og mængderabat, der udgør 15%, med mindre forhandleren benytter en anden rabatordning.

Udgifter til arbejdsløn og stillads udgør, afhængigt af hvor meget arbejde den enkelte konstruktion kræver, mellem 650 kr/m^2 og 700 kr/m^2, begge inkl. moms.

5.2. Solvæggenes rentabilitet

For hver solvæg eller efterisolering foretages følgende 6 vurderinger af investeringen:

(i) Solvæg eller efterisolering anvendt i lejlighedstype I, oliefyret centralvarme, energiprisstigningstakst på 5 %.

(ii) Solvæg eller efterisolering anvendt i lejlighedstype I, el-varme, energiprisstigningstakst på 5 %.

(iii) Solvæg eller efterisolering anvendt i lejlighedstype I, oliefyret centralvarme, energiprisstigningstakst på 10 % .

(iv) Solvæg eller efterisolering anvendt i lejlighedstype I, el-varme, energiprisstigningstakst på 10 % .

(v) Solvæg eller efterisolering anvendt i lejlighedstype II, oliefyret centralvarme, energiprisstigningstakst på 10 % .

(vi) Solvæg eller efterisolering anvendt i lejlighedstype III, oliefyret centralvarme, energiprisstigningstakst på 10 % .

Udover en beregning af nu-værdien beregnes også, hvor lang tid der vil gå, inden den betragtede investering giver overskud, eller, i tilfælde af negativ nu-værdi, hvor lang økonomisk levetid der er nødvendig, for at investeringen bliver rentabel.

For alle solvægge gælder, at det i kap. 4.3.2 beregnede udbytte er reduceret med 15%, svarende til en horisontafskæring på 15^{o}. En sådan horisontafskæring skønnes at være typisk for etagebyggeri i områder med byfornyelse. Beregningsresultater er opstillet i tabel 5.1 - 5.12.

Nu-værdiberegningerne viser, at der ved renovering af etagebyggeri opnås betydeligt større nu-værdier ved at bruge solvægge end ved traditionel efterisolering. Det ses også, at det i alle tilfældene er de samme solvægge, der giver størst nu-værdi. Der er især 4 typer solvægge, der bør fremhæves som særligt anvendelige, nemlig typerne (D), (J), (F) og (K) i nævnte rækkefølge. Det er således de solvægge med størst udbytte, der giver bedst rentabilitet.

Under de givne forudsætninger ses, at det hverken i tilfælde (i) eller tilfælde (vi) kan betale sig at benytte solvægge, endsige at efterisolere. Med hensyn til tilfælde (i) gælder imidlertid, at den fastsatte energiprisstigningstakst på 5 % er meget lav; en yderligere stigning på blot 5 % (tilfælde (iii)) gør det særdeles attraktivt at anvende solvægge. For tilfælde (vi) gælder desuden, at der fra den benyttede investering kan trækkes de ekstraudgifter til materialer og arbejdsløn, der knytter sig til selve betonrenoveringen.

Ved renovering af betonfacader i etagebyggeri er det ofte korrosion af armeringsjernene, der er årsag til de største skader/udgifter. En sådan korrosion kan ikke forløbe, hvis den relative luftfugtighed i betonen er mindre end 65 % ,[30]. Når der sker en inddækning af betonen, f.eks. ved opsætning af solvægge, udsættes denne ikke længere for slagregn, og da betonens temperatur samtidig hæves betydeligt, må det forventes, at den relative luftfugtighed er noget mindre end 65 % . Ved brug af solvægge kan der således opnås en væsentlig reduktion af udgifterne i forbindelse med betonrenoveringen, forudsat korrosionen ikke er så fremskreden, at der er fare for betonsprængning, nedstyrtning o.lign.

Såfremt udgifterne til en forestående betonrenovering kan spares, og disse modregnes i solvæggens anlægspris, bliver der tale om kortere tilbagebetalingstid og større nu-værdi, hvorfor det i mange tilfælde bliver lønsomt også at anvende solvægge ved renovering af betonbyggeri fra 60'erne.

Af tabellerne fremgår desuden, at en anvendelse af silica aerogel, hvad enten det er granuleret, monolitisk eller evakueret monolitisk, i de fleste tilfælde forekommer lovende. Under de givne forudsætninger ses, at dæklag med silica aerogel må koste helt op til 4155 kr/m^2, inkl. 2 lag hærdet glas og forsegling, hvilket er langt mere end den pris silica aerogel-ruder må forventes at blive solgt til. Det skal også bemærkes, at nogle af de beregnede maksimale priser er så små, at det ikke kan lade sig gøre at fremstille aerogel-ruderne, så de giver positive nu-værdier. Dette gælder specielt for silica aerogel-ruder anvendt i tilfælde (i) og (vi).

solvæg	anlægspris [kr/m^2]	udbytte [kWh/m^{2}år]	nu-værdi [kr/m^2]	tilbagebetalingstid [år]
A	890	98	-400	36
B	800	72	-370	50
C	930	104	-305	35
D	1000	152	- 85	23
E	880	94	-320	38
F	1130	143	-270	29
I	780	55	-450	95
J	1210	151	-305	30
K	1170	144	-305	30
efter-isolering	760	65	-305	42

Tabel 5.1. Nu-værdi og tilbagebetalingstid for solvægge og efterisolering anvendt i lejlighedstype I, oliefyret centralvarme, energiprisstigning på 5 % .

solvæg	G	H1	H2
pris [kr/m^2]	0	315	605

Tabel 5.2. Maksimale priser for forskellige aerogelruder anvendt i lejlighedstype I, oliefyret centralvarme, energiprisstigning på 5 % .

solvæg	anlægspris [kr/m^2]	udbytte [kWh/m^{2}år]	nu-værdi [kr/m^2]	tilbagebetalingstid [år]
A	890	98	300	14
B	800	72	75	18
C	930	105	335	14
D	1000	152	845	10
E	880	94	260	15
F	1130	143	605	12
I	780	55	-110	25
J	1210	151	625	12
K	1170	144	580	12
efter-isolering	760	65	165	16

Tabel 5.3. Nu-værdi og tilbagebetalingstid for solvægge og efterisolering anvendt i lejlighedstype I, el-varme, energiprisstigning på 5 % .

solvæg	G	H1	H2
pris [kr/m^2]	1065	1585	2175

Tabel 5.4. Maksimale priser for forskellige aerogelruder anvendt i lejlighedstype I, el-varme, energiprisstigning på 5 % .

solvæg	anlægspris [kr/m^2]	udbytte [kWh/m^{2}år]	nu-værdi [kr/m^2]	tilbagebetalingstid [år]
A	890	98	75	19
B	800	72	-95	22
C	930	105	95	19
D	1000	152	495	14
E	880	94	45	19
F	1130	143	275	17
I	780	55	-235	26
J	1210	151	275	17
K	1170	144	245	17
efter-isolering	760	65	-15	20

Tabel 5.5. Nu-værdi og tilbagebetalingstid for solvægge og efterisolering anvendt i lejlighedstype I, oliefyret centralvarme, energiprisstigning på 10 % .

solvæg	G	H1	H2
pris [kr/m^2]	685	1105	1585

Tabel 5.6. Maksimale priser for forskellige aerogelruder anvendt i lejlighedstype I, oliefyret centralvarme, energiprisstigning på 10 % .

solvæg	anlægspris [kr/m^2]	udbytte [kWh/m^{2}år]	nu-værdi [kr/m^2]	tilbagebetalingstid [år]
A	890	98	1060	10
B	800	72	635	12
C	930	105	1140	10
D	1000	152	2025	8
E	880	94	990	11
F	1130	143	1715	9
I	780	55	315	15
J	1210	151	1795	9
K	1170	144	1695	9
efter-isolering	760	65	750	11

Tabel 5.7. Nu-værdi og tilbagebetalingstid for solvægge og efterisolering anvendt i lejlighedstype I, el-varme, energiprisstigning på 10 % .

solvæg	G	H1	H2
pris [kr/m^2]	2340	3190	4155

Tabel 5.8. Maksimale priser for forskellige aerogelruder anvendt i lejlighedstype I, el-varme, energiprisstigning på 10 % .

solvæg	anlægspris [kr/m^2]	udbytte [kWh/m^{2}år]	nu-værdi [kr/m^2]	tilbagebetalingstid [år]
A	890	78	-130	23
B	800	65	-160	24
C	930	94	-5	20
D	1000	143	405	15
E	880	85	-45	21
F	1130	134	190	18
I	780	48	-310	29
J	1210	143	205	18
K	1170	138	185	18
efter-isolering	760	59	-80	22

Tabel 5.9. Nu-værdi og tilbagebetalingstid for solvægge og efterisolering anvendt i lejlighedstype II, oliefyret centralvarme, energiprisstigning på 10 % .

solvæg	G	H1	H2
pris [kr/m^2]	555	975	1455

Tabel 5.10. Maksimale priser for forskellige aerogelruder anvendt i lejlighedstype II, oliefyret centralvarme, energiprisstigning på 10 % .

solvæg	anlægspris [kr/m^2]	udbytte [kWh/m^2år]	nu-værdi [kr/m^2]	tilbagebetalingstid [år]
A	890	44	-455	34
B	800	36	-445	37
C	930	55	-390	30
D	1000	91	-105	22
E	880	49	-400	32
F	1130	84	-305	26
I	780	65	-525	45
J	1210	110	-130	22
K	1170	100	-245	24
efter-isolering	760	31	-405	35

Tabel 5.11. Nu-værdi og tilbagebetalingstid for solvægge og efterisolering anvendt i lejlighedstype III, oliefyret centralvarme, energiprisstigning på 10 % .

solvæg	G	H1	H2
pris [kr/m^2]	0	275	685

Tabel 5.12. Maksimale priser for forskellige aerogelruder anvendt i lejlighedstype III, oliefyret centralvarme, energiprisstigning på 10 % .

6. KONKLUSION

Projektets resultater viser, at der er gode muligheder for at opnå betydelige energibesparelser ved anvendelse af solvægge i den eksisterende boligmasse. Forudsat, at betingelserne vedrørende facadens orientering og skyggeforhold er nogenlunde gunstige, vil der kunne opnås betydeligt højere besparelser end ved en traditionel efterisolering.

Det kan i mange tilfælde anbefales, at solvæggen udføres som en simpel uventileret Trombe-væg med en godt isolerende transparent dæklagskonstruktion. Der kan for eksempel benyttes en lav-emissions belægning på glas eller absorber. Beregningerne viste, at en selektiv absorber vil give de største besparelser af de to muligheder, da belægningen på det betragtede glas absorberer en del solstråling, hvormed der er tale om en reduceret soltransmittans. Der kan opnås specielt gode resultater med transparente isoleringsmaterialer. De største besparelser fås således, når der indgår et lag af monolitisk silica aerogel i dæklagssystemet. For de transparente isoleringsmaterialer gælder, at der findes en optimal tykkelse, som giver det størst mulige udbytte. En forøgelse af tykkelsen udover den optimale værdi vil ganske vist give en forbedret isoleringsevne, men samtidig vil dæklagets soltransmittans blive for ringe. Den optimale tykkelse af såvel produktet Isoflex som evakueret monolitisk silica aerogel ligger på omkring 30 mm.

Såfremt der i forvejen indgår et isolerende lag i ydervæggen, bør solvæggen udføres med ventilationshuller, så der kan ske en transport (ved naturlig konvektion) af solvarmen fra absorberen til det bagvedliggende rum. For en sådan ventileret Trombe-væg savnes dog en nærmere undersøgelse af, hvordan ventilerne skal udformes, så luftcirkulationen hindres i perioder uden sol. Beregningerne viser endvidere, at der kan opnås pæne energibesparelser ved brug af solvægge, der virker som opvarmningskilde for den friske ventilationsluft.

Beregningerne af de rumtemperaturer, som vil forekomme om sommeren, viste at solvæggen ikke nødvendigvis vil give væsentlige problemer. Den forøgelse af rumtemperaturen, solvæggen giver anledning til på en typisk sommerdag, vil i følge beregningerne kun være omkring 0,5 ^{o}C. At temperaturen ikke bliver højere, hænger sammen med, at murens gode varmeakkumuleringsevne giver en udjævnet varmeafgivelse fra solvæggen. Det er forudsat, at det er muligt at opnå en luftskiftekoefficient på 3 pr. time ved ventilation af rummet med udeluft. Såfremt denne forudsætning ikke er opfyldt, eller hvis der benyttes et specielt effektivt dæklagssystem, et stort solvæg-areal eller i tilfælde af, at huset i øvrigt er bedre isoleret, kan der godt være problemer med overophedning. Dette bør undersøges i forbindelse med overvejelserne om etablering af solvæggen i det enkelte konkrete tilfælde. Det skal nævnes, at der i alle tilfælde kan være tale om en forringet termisk komfort ved ophold umiddelbart bag solvæggen om sommeren på grund af udveksling af strålevarme. På den anden side vil der tilsvarende være tale om en forbedring af komfort-forholdene bag solvæggen om vinteren.

De økonomiske beregninger viser, at det i mange tilfælde vil være rentabelt at etablere solvægge, såfremt der ses på foranstaltningens nu-værdi over en 20-årig periode. Særligt gunstige forhold opnås, når der er tale om uisolerede massive ydervægge, og når der benyttes el-varme som hovedopvarmningskilde. For en beton-sandwich-facade kan de økonomiske forhold blive gunstige, hvis omkostningerne til en almindelig facaderenovering, der ellers ville være påkrævet, inddrages i regnestykket. Det lader i øvrigt til, at de solvægge, som giver de største energibesparelser, også giver den bedste økonomi. - D.v.s. det kan godt betale sig at betale de ekstra omkostninger til et transparent isolerende materiale eller lign.

Det skal til slut nævnes, at det her beskrevne projekt er en smule "én-øjet", idet anvendelse af solvægge ikke er betragtet

i sammenhæng med andre energibesparende foranstaltninger. Ved den konkrete facaderenovering kan det f.eks. tænkes at være fordelagtigt at anvende solvægge i kombination med glastilbygninger ved eventuelle altaner. Det er også sandsynligt, at det vil være fordelagtigt med en kombination af solvægge og almindelig efterisolering på facadearealer, der er henholdsvis mere eller mindre velbeliggende med hensyn til solindstråling.

REFERENCER

[1] "Byejendom med passiv solvarme". T. Skøtt. Vedvarende Energi 71, 1985.

[2] "Passiv solvarme i eksisterende etagebyggeri". U. Falck, D. Henriksen, T. Lergård, E. Nielsen. OVE's forlag, 1985.

[3] "Beregning af temperaturforhold og energiforbrug i Vesterbo". J.E. Christensen. Rapport nr. 85-16. Laboratoriet for Varmeisolering, 1985.

[4] "To forslag til udformning af solvægge. En undersøgelse baseret på indendørs målinger". C. Paludan-Müller. Energiministeriets solvarmeprogram, rapport nr. 42. Meddelelse nr. 186. Laboratoriet for Varmeisolering, 1987.

[5] "Airglass". Brochure fra Airglass AB.

[6] "Aerogels - a new class of materials". M. Mielke, B. Wolff. Transparent Insulation Materials for Passive Solar Energy Utilisation. Proceedings of the 1st International Workshop held in Freiburg, FRG on 27-28 November 1986. The Franklin Company Consultants Ltd., 1987.

[7] "Thermode. Thermal diode systems". Brochure fra Arel Energy Ltd., 1987.

[8] "Där ljuset går in går värmen ut". Brochure fra Isoflex AB.

[9] "The best under the sun". Brochure fra Inco Selective Surfaces Ltd., 1984.

[10] "Kappa Energi Klar". Brochure fra Pilkington, 1987.

[11] "Low emissivity glass with a hard coating". Brochure fra Glaverbel.

[12] "Teflon PFA". Brochure fra Dupont.

[13] "Solvægge. Målt og beregnet". L.Olsen. Meddelelse nr. 167. Laboratoriet for Varmeisolering, 1985.

[14] "Simple air collectors for preheating fresh air". J.L.M. Hensen, M.H. de Wit. First E.C. Conference on Solar Heating. Proceedings of the international conference held at Amsterdam, April-30 May 4, 1984. D. Reidel Publishing Company, 1984.

[15] "Fresh air in houses". B.D. Allessandro. Progressive Builder, No. 7, 1987.

[16] "Dansk Ingeniørforenings regler for beregning af bygningers varmetab". DS 418. Teknisk Forlag, 1986.

[17] "Solar engineering of thermal processes". J.A. Duffie, W.A. Beckman. John Wiley & Sons, 1980.

[18] "Undersøgelse af solvægge ved hjælp af en indendørs forsøgsopstilling". C. Paludan-Müller. Meddelelse nr. 179. Laboratoriet for Varmeisolering, 1987.

[19] "Bestämning av värmetekniska egenskaper för Isoflex". J. Isberg. Chalmars Tekniska Högskola , 1985.

[20] "Flat plate collector for process heat with honeycomb cover - An alternative to vacuum tube collectors". M. Rommel, V. Wittwer. Advances in solar energy technology. Pergamon Press, 1988.

[21] "Transparent insulation systems composed different materials". A. Pflüger, W. Platzer, V. Wittwer. Advances in solar energy technology. Pergamon Press, 1988.

[22] "Solar transmission of transparent insulation materials". W.J. Platzer. Solar Energy Materials, No. 16, 1987.

[23] "SUNCODE-PC. A programme user's manual". M.J. De La Hunt. Ecotope, 1985.

[24] "EDB-programmer til beregning af passiv solvarme". J.E. Christensen. Meddelelse nr. 185. Laboratoriet for Varmeisolering, 1987.

[25] "Vejrdata for VVS og Energi. Dansk referenceår TRY". B. Andersen m.fl. Statens Byggeforskningsinstitut, 1982.

[26] "Performance of passive solar houses in Ladakh, India". C. Paludan-Müller. Rapport nr. 88-5. Laboratoriet for Varmeisolering, 1988.

[27] "Inter-zone convective heat transfer in buildings: a review". S.A. Barakat. Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 109, 1987.

[28] "Økonomisk vurdering af energibesparende foranstaltninger". K. Johnsen, M. Kvetny, H.S. Andersen. SBI-anvisning 132. Statens Byggeforskningsinstitut, 1982.

[29] "Energipriser, solenergi og graddage". VVS 9, 1988.

[30] "Metallære for bygningsingeniører". E. Hagemann , A. Nielsen. Polyteknisk Forlag, 1975.

APPENDIX

A1. Opbygning af dæklagssystem

På figur A.1 - A.2 er vist forskellige konstruktionsdetaljer i forbindelse med et forslag til et dæklagssystem, der er anbragt uden på en eksisterende teglstensmur. Solvæggen er uventileret, og dæklagssystemet består af et lag glas og seks lag Isoflex-folie. Der er benyttet et rammesystem bestående af almindelige aluminiumssprosser, som bl.a. benyttes til drivhuskonstruktioner.

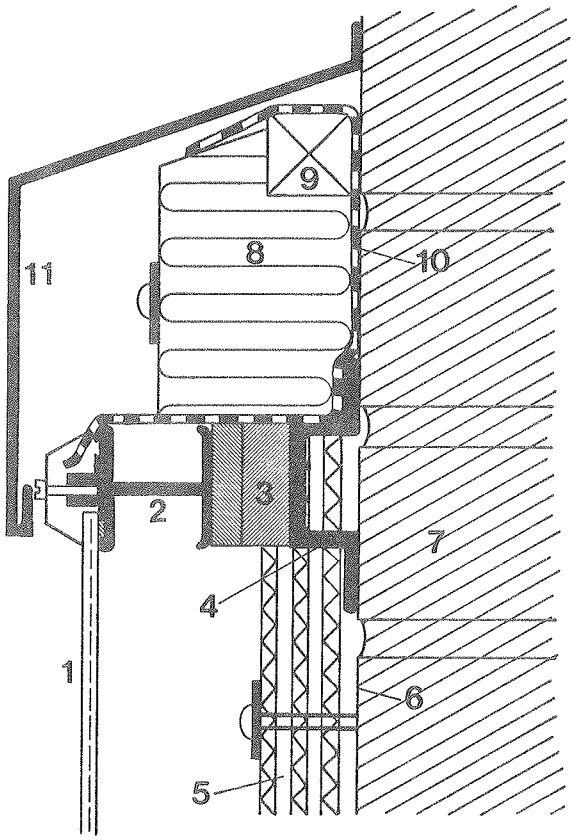
Der skal knyttes følgende kommentarer til detaljerne og til arbejdsgangen ved opbygningen af solvæggen:

Dimensionerne svarer til, at der er vandrette sprosser pr 2,70 m og lodrette sprosser pr 0,75 m. Solvæggens transparente areal består dermed af felter på knap 2 m^2.

Til at starte med fastgøres de viste beslag til muren pr ca. 0,5 m ved brug af ekspansionsbolte. På beslagene er i forvejen anbragt de bolte, der benyttes til montering af alu-sprosserne. Mellem beslag og sprosser anbringes to på hinanden liggende kiler. Boltehullerne gennem kilerne er udformet, så der er mulighed for at forskyde kilerne i forhold til hinanden i retningen langs med sprosserne. Hermed kan sprosserne bringes til at ligge i det samme lodrette plan. Endvidere er der i boltehullerne i sprossernes inderste flange mulighed for at justere profilernes beliggenhed i planet, så de mødes korrekt i hjørnerne ved de allerede monterede sprosser.

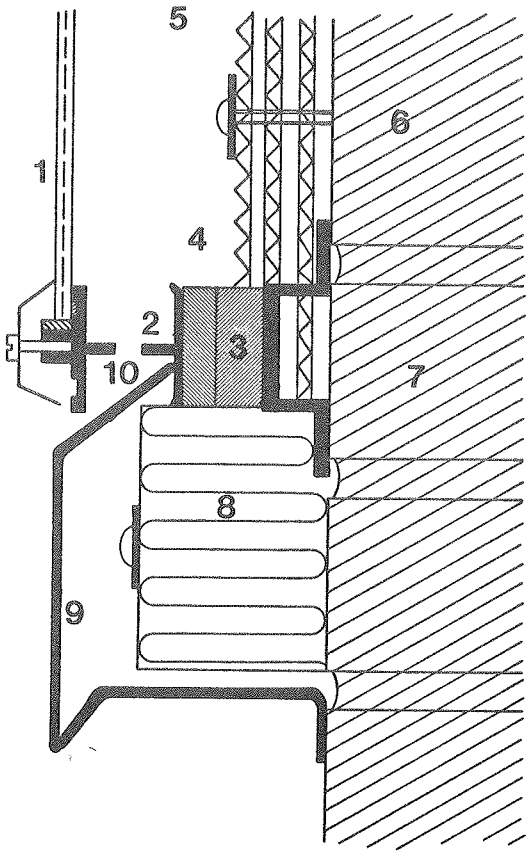
Udover at kilerne giver mulighed for den nævnte opretning af sprossernes beliggenhed, sørger de for en kuldebro-afbrydelse mellem muren og sprosserne.

Laget af Isoflex-folie anbringes direkte uden på muren, idet det skubbes ind bagved sprosserne. Der er i forvejen skåret ud i folien ud for kilerne. Isoflex'ens fastgørelse til muren foretages med skruer, (der er anbragt plucks i muren og en skive mellem folien og skruehovedet). Det skal nævnes, at der hermed ikke



Lodret snit øverst i solvæg

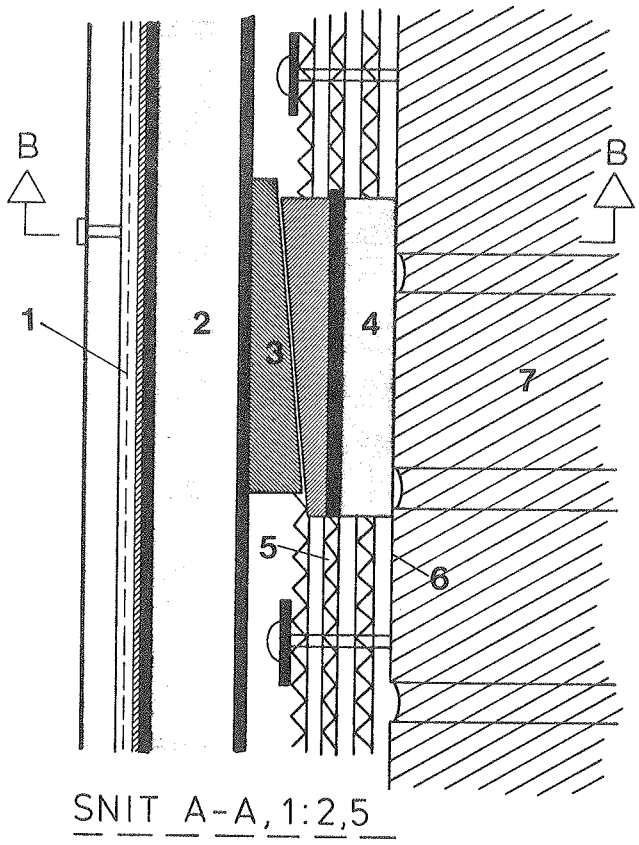
(1) Glas
(2) Sprosseprofil
(3) Plastkiler
(4) Beslag
(5) Isoflexfolie (6 lag)
(6) Absorber
(7) Eksisterende mur
(8) Isolering
(9) Træliste
(10) Plastfolie
(11) Inddækning



Lodret snit nederst i solvæg

(1) Glas
(2) Sprosseprofil
(3) Plastkile
(4) Beslag
(5) Isoflexfolie (6 lag)
(6) Absorber
(7) Eksisterende mur
(8) Isolering
(9) Inddækning
(10) Huller til svag ventilation og dræning

Fig. A.1. Detaljer vedr. opbygning af solvæg: Afslutning øverst og nederst.



SNIT A-A, 1:2,5

Lodret snit i lodret sprosse

(1) Glas

(2) Sprosseprofil

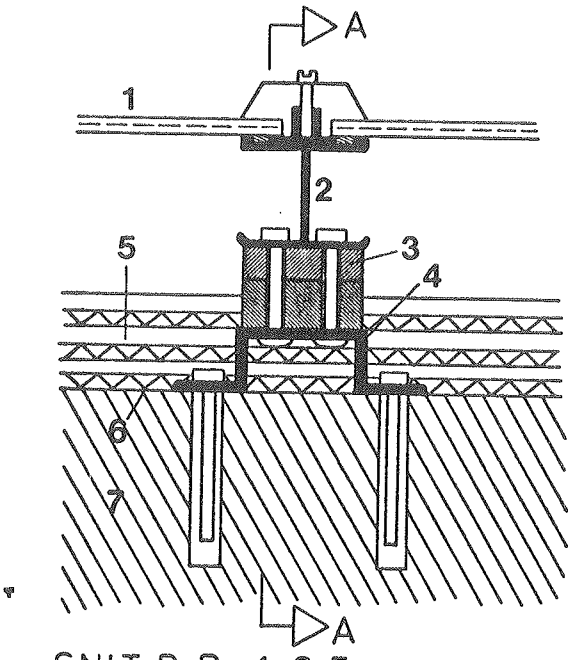
(3) Plastkiler

(4) Beslag

(5) Isoflexfolie (6 lag)

(6) Absorber

(7) Eksisterende mur



SNIT B-B, 1:2,5

Vandret snit i lodret sprosse

(1) Glas

(2) Sprosseprofil

(3) Plastkiler

(4) Beslag

(5) Isoflexfolie (6 lag)

(6) Absorber

(7) Eksisterende mur

Fig. A.2. Detaljer vedr. opbygning af solvæg: Fastgørelse af dæklag

er skabt mulighed for fjernelse af solvarmen i sommermånederne ved at ventilere med udeluft foran absorberen. Bereqninger i kapitel 4 viser på den anden side, at denne ventilation ikke altid er så nødvendig, som man kunne tro.

For at hindre gennemstrømning af udeluft gennem hulrummene mellem folie-lagene (med deraf følgende forøget varmetab) anbringes ved solvæggens afslutning øverst og langs siderne en plastfolie, som sikrer en tæt forbindelse mellem mur og sprosse. Folien er klemt mellem muren og en træliste, idet en udspartling giver en glat overflade ud for fuger og andre ujævnheder. Folien beskytter i øvrigt trælisten mod fugt fra muren.

Herefter monteres det udvendige lag glas. Der anbringes endvidere en randisolering langs solvæggen til begrænsning af varmetabet fra muren til det fri. Isoleringen og den øvrige konstruktion beskyttes til slut med en inddækning.

Fugt, der kondenserer på glasset, fjernes ved, at der i kroppen på de vandrette sprosser er boret huller, som giver mulighed for en svag ventilation med udeluften. Samtidig tjener hullerne til dræning af vand udefra, som på trods af inddækningen skulle være trængt ind bag glasset.

A2. Indendørs forsøg med solvægge

I det følgende er der givet en beskrivelse af målingerne, som blev foretaget på to af de solvægge, der er undersøgt i projektet. Endvidere er angivet de ligninger, som danner baggrund for den teoretiske beskrivelse af solvæggen med friskluft-ventilation. (Med hensyn til betydningen af de forskellige symboler henvises til kapitel 3. Diverse varmestrømme regnes pr. m^2 absorber).

Solvæg med Isoflex

Der blev foretaget målinger for et dæklagssystem med ti lag Isoflex-folie mellem et lag glas og en alm. matsort absorber. Konstruktionen er altså ikke helt identisk med system (E) i tabel 3.1, der har seks lag af folien. Det blev indledningsvis i projektet skønnet, at det var en fordel af have den ekstra lave værdi for U_L , der opnås med de mange lag. Under de senere EDB-simuleringer af solvæggenes udbytte viste det sig, at den forøgelse af U_L, man får ved at vælge seks lag fremfor ti lag, modsvares af en forbedret soltransmittans. Dermed kan det ikke svare sig at forøge antallet af lag fra seks til ti .

På figur A.3 er solvæggen fotograferet efter opbygningen i den indendørs prøvestand. Figur A.4 viser et hjørne af væggen med aluminiumssprosse og Isoflex-folien bag glasset.

Der blev foretaget en måling af dæklagssystemets U-værdi (under forhold uden solstråling) ved en absorbertemperatur på 19 ^oC og en glastemperatur på 3 ^oC. Med en udvendig isolans på 0,04 m^2K/W gav forsøgsresultaterne

$$U_L = 1,40 \ W/m^2K$$

hvilket stemmer godt overens med de oplysninger, som er givet i [19].

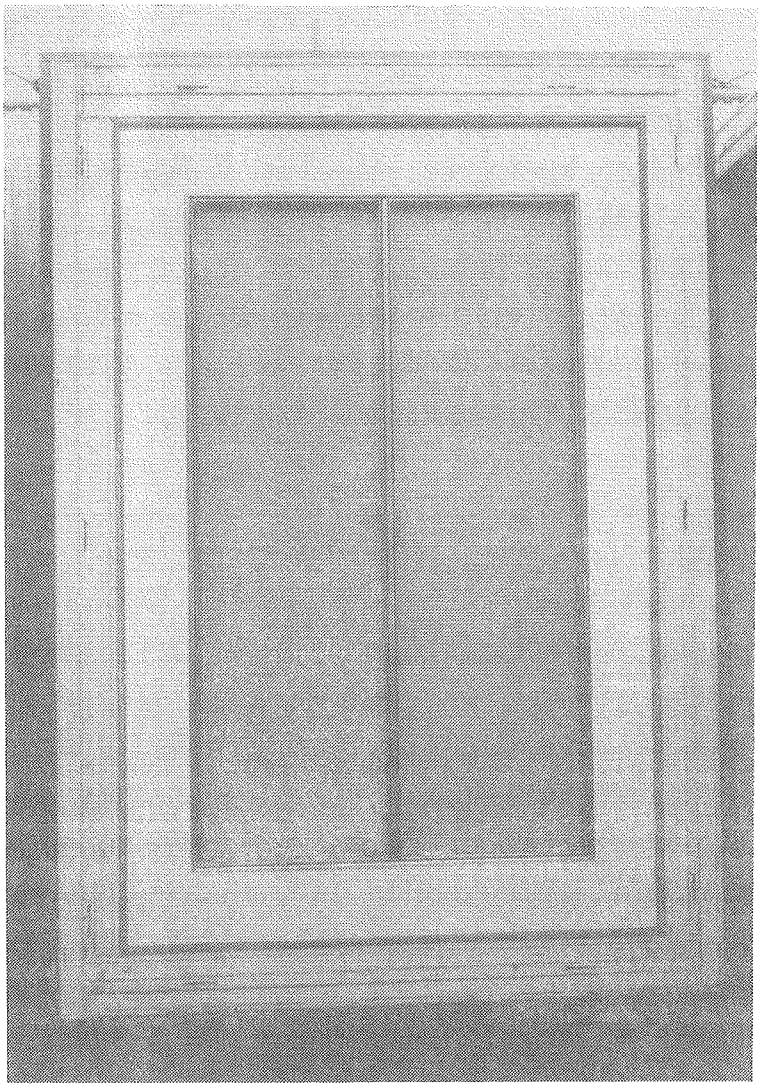
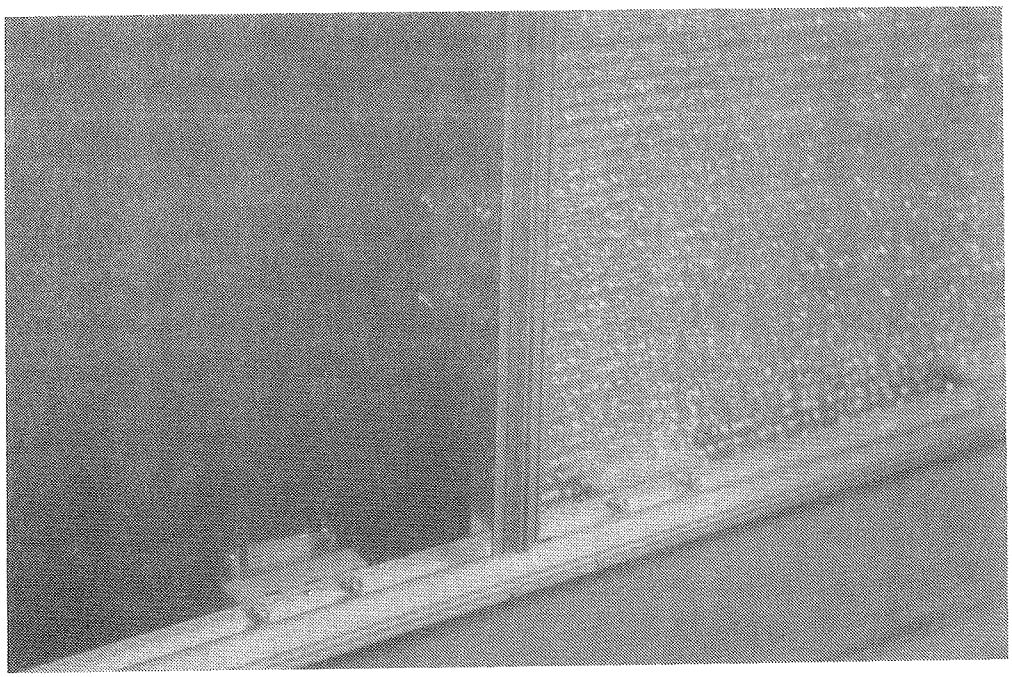


Fig. A.3. (t.v.)
Måling på solvæg med Isoflex i indendørs prøvestand.

Fig. A.4. (nedenfor)
Opbygning af solvæggen med Isoflex. (T.v. for midtersprossen er Isoflexen endnu ikke monteret).



Endvidere blev der udført målinger af transmittansen τ for små prøver med 4, 6, 8 og 10 lag Isoflex-folie. Resultaterne er vist i tabel A.1.

Antal lag	4	6	8	10
τ, normal stråling	0,68	0,64	0,58	0,52
τ, diffus stråling	0,44	0,38	0,32	0,26

Tabel A.1. Måling af transmittansen for Isoflex-folie.

Endelig blev der foretaget målinger af solvæggens effektivitet η for udnyttelsen af solstråling ved små indfaldsvinkler (0-30°). Effektiviteten kan udtrykkes som

$$\eta = (\tau\alpha)_e - U_L \cdot (T_p-T_a)/I$$

På figur A.5 er de målte værdier for η afbildet som funktion af $(T_p-T_a)/I$. På figuren er også vist den kurve for η, der kan tegnes på grundlag af målingen af U_L og den $(\tau\alpha)_e$, der kan beregnes udfra målingen af τ. For $T_p-T_a = 0$ er der tale om en forholdsvis stor afvigelse på 0,06 mellem kurven og den målte værdi for η, men størstedelen af afvigelsen kan forklares med måleubestemtheden. Den gode overensstemmelse ved de højere værdier af $(T_p-T_a)/I$ tyder på, at det er forsvarligt at benytte den målte værdi for U_L under forhold, hvor der er solstråling og højere værdier af T_p-T_a end ved målingen.

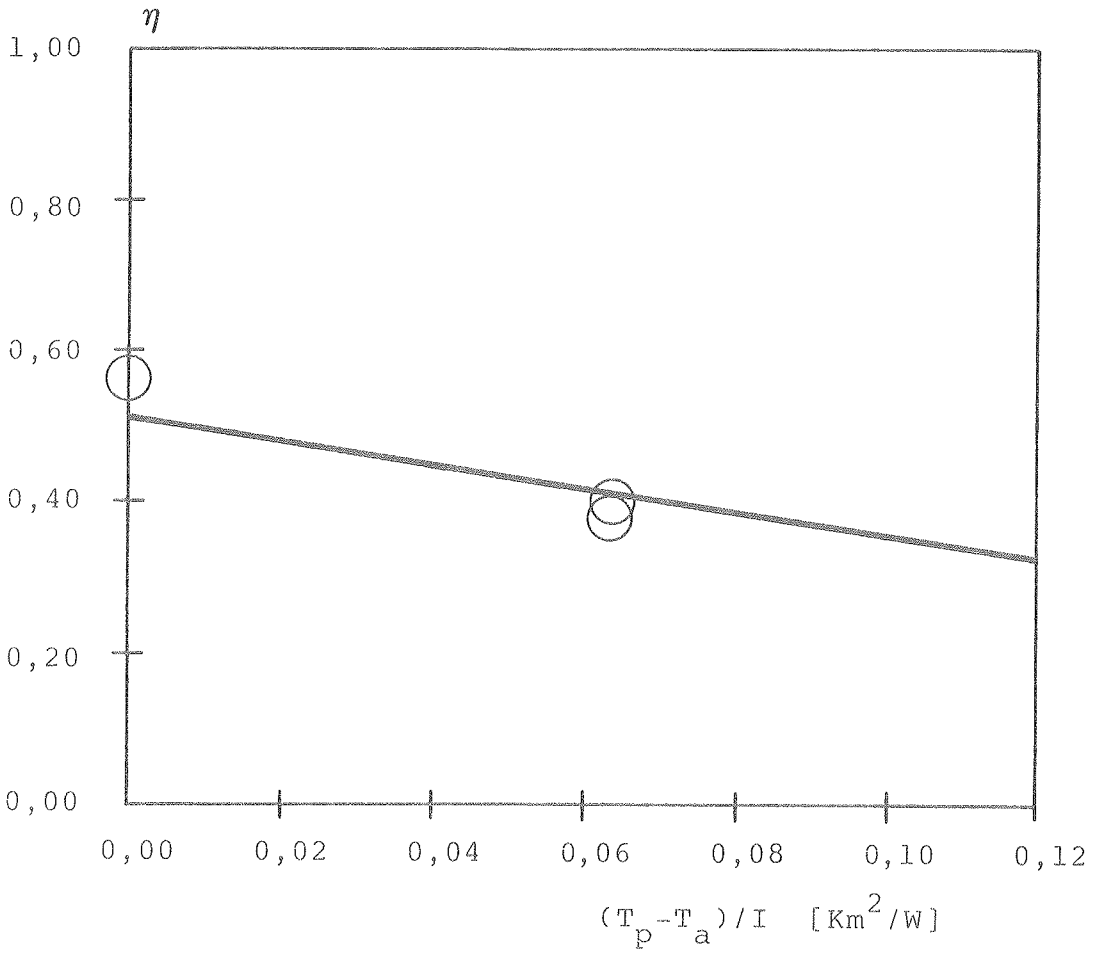


Fig. A.5. Dæklagssystemets effektivitet ved små indfaldsvinkler, bestemt ved separate målinger af U_L og $(\tau\alpha)_e$ (kurven) og udfra samlet måling (punkterne).

Solvæg til friskluftventilation, teoretisk beskrivelse

Der er benyttet følgende ligninger som udgangspunkt for beskrivelsen af solvæggen med friskluftventilation.

Solvæggens absorber tilføres effekten $S = I \cdot (\tau\alpha)_e$. Varmetabet q_L fra absorberen til det fri er

$$q_L = U_L \cdot (T_p - T_a)$$

Den effekt q_v, der transporteres fra absorberen og ind gennem væggen, regnes tilnærmelsesvis som stationær. Effekten kan da beskrives ved

$$q_v = U_v \cdot (T_P - T_i)$$

På grund af q_v's relativt lave værdi kan der tilnærmelsesvis regnes med, at den er konstant på hele absorberarealet. I da fald kan den effekt, som overføres fra absorberen til den friske ventilationsluft, udtrykkes ved

$$q_f = F' \cdot F'' \cdot (S - q_v)$$

Endvidere haves

$$S = q_L + q_v + q_f$$

Ved indsættelse af udtrykkene for q_L, q_v og q_f i denne ligning fås

$$T_p = \frac{S \cdot (1 - F' \cdot F'') + U_v \cdot (1 - F' \cdot F'') \cdot T_i + U_L \cdot T_a}{U_v \cdot (1 - F' \cdot F'') + U_L}$$

Den (netto) effekt, der tilføres det bagvedliggende rum på grund af luftskiftet og ved transmission gennem solvæggen kan skrives

$$q_i = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{fo} - T_i) + q_v$$

hvor T_{fo} er temperaturen af den luft, der strømmer fra solvæggen og ind i rummet. Udtrykket omskrives til

$$q_i = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{fo} - T_a) - V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_i - T_a) + q_v$$

Det første led på højre side er lig med q_f, d.v.s.

$$q_i = F' \cdot F'' \cdot (S - q_v) - V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_i - T_a) + q_v$$

Ved brug af de anførte udtryk for q_v, T_p og S fås

$$q_i = \left[F' \cdot F'' + \frac{U_v \cdot (1 - F' \cdot F'')^2}{U_v \cdot (1 - F' \cdot F'') + U_L} \right] \cdot (\tau\alpha)_e \cdot I - \left[V \cdot \rho \cdot c_p + \frac{U_L \cdot U_v \cdot (1 - F' \cdot F'')}{U_v \cdot (1 - F' \cdot F'') + U_L} \right] \cdot (T_i - T_a)$$

Såfremt der ses bort fra varmestrømmen ved transmission gennem væggen (d.v.s. $q_v \simeq 0$), er solvæggens effektivitet med hensyn

til udnyttelse af den indfaldende solstråling til opvarmning af ventilationsluften:

$$\eta = F' \cdot F'' \cdot (\tau\alpha)_e$$

Hvis der i stedet ses på den samlede virkning af solvæggens og luftskiftets indflydelse på rummets energiforbrug, er der tale om følgende effektivitet

$$\eta = F' \cdot F'' \cdot (\tau\alpha)_e - V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_i - T_a)/I$$

Solvæg til friskluftventilation, målinger

Der blev foretaget forsøg med en solvæg til friskluftventilation. Opbygningen af solvæggen svarede til beskrivelsen i afsnit 3.3.2. Figur A.6 viser solvæggen efter opbygningen i prøvestanden.

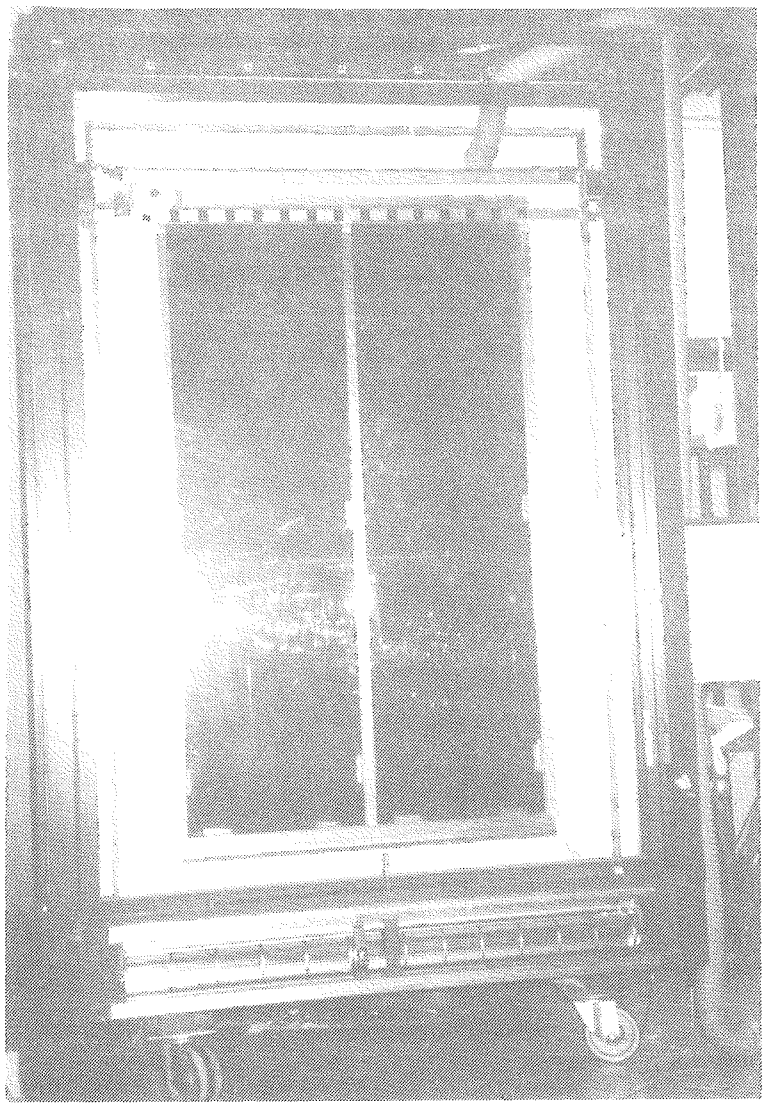
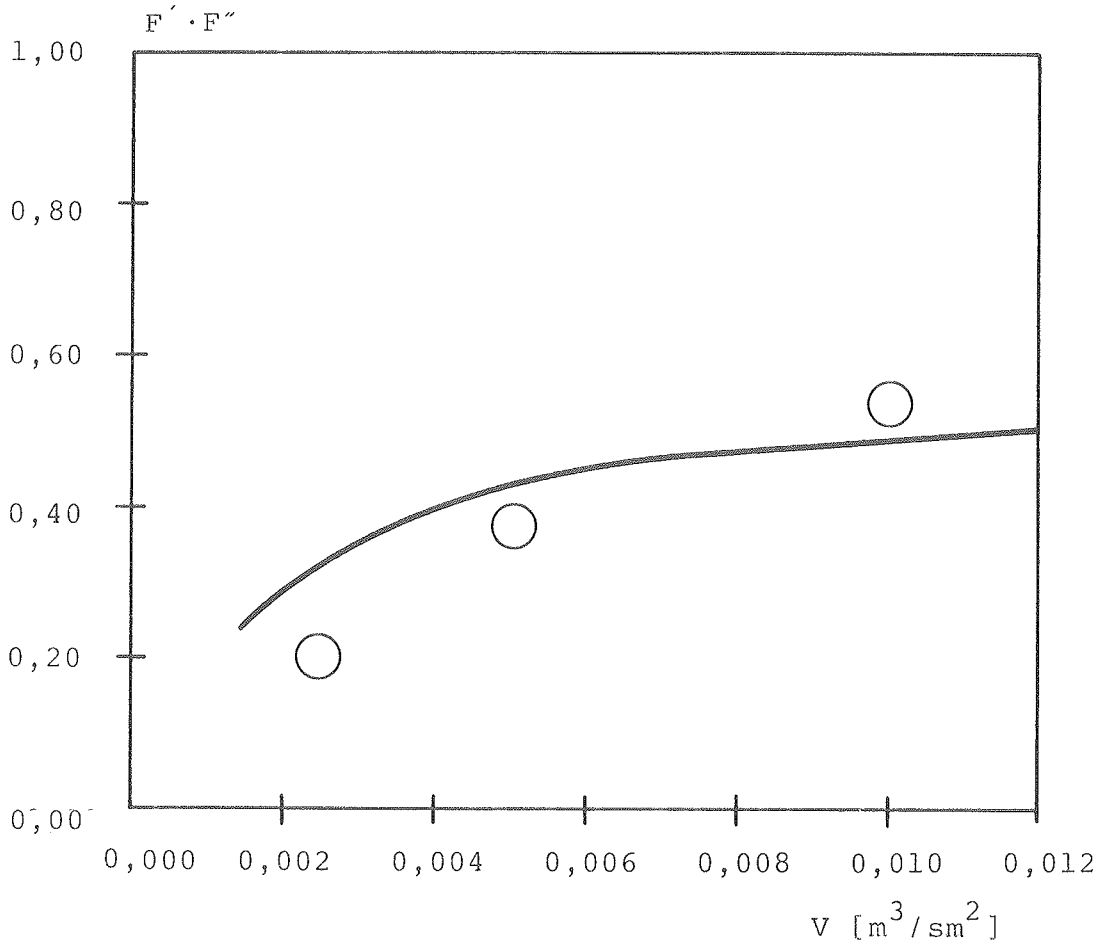


Fig. A.6.

Målinger på solvæg til friskluftventilation.

Der blev foretaget en bestemmelse af F'·F" udfra målinger af I, q_i, V, T_i og T_a samt kendte (eller estimerede) værdier for de øvrige parametre i udtrykket for q_i. Der blev udført målinger ved forskellige værdier af V.

På figur A.7 er afbildet de målte og de teoretisk bestemte værdier for F'·F". Afvigelsen mellem målte og teoretiske værdier skyldes dels måleubestemtheden og dels de usikre forudsætninger, der er gjort ved bestemmelsen af de konvektive varmeovergangstal, som indgår i den teoretiske værdi for F'.



Figur A.7. Målte og teoretiske værdier (henholdsvis punkterne og kurven) for F'·F".

A3. Beskrivelse af solvægge i EDB-model

I SUNCODE-manualen [23] er forklaret, hvordan programmets algoritmer er udformet. Herunder er det forklaret, hvordan programmet udfører beregninger for de simple "traditionelle" opbygninger af solvægge. I det følgende er nævnt de generelle tilnærmelser, der gøres ved programmets solvæg-beskrivelse. Endvidere er omtalt de "tricks", som er gjort i forbindelse med undersøgelsen af de mere specielle solvægge i dette projekt. Betydningen af de benyttede symboler er som i kapitel 3.

I programmet er det ikke muligt at angive nogen sammenhæng mellem U_L og temperaturforskellen T_p-T_a, på trods af at der ofte vil være tale om en betydelig forøgelse af U_L, når temperaturforskellen øges. Når der er solindfald om dagen, vil man typisk have en forskel på mellem 20 ^oC og 40 ^oC. I situationer med varmetab gennem væggen om natten i varmesæsonen vil forskellen typisk være mellem 5 ^oC og 20 ^oC. I dette projekt er de benyttede værdier for solvæggenes U_L beregnet ved 20 ^oC. Dette fører altså til, at den benyttede værdi for U_L som regel vil være lidt for lav i dagtimerne og lidt for høj om natten.

Ved beregning af transmittansen for et dæklagssystem, forudsættes det i programmet, at systemet er sammensat af et vist antal identiske simple dæklag. Dette er ikke tilfældet for de fleste af de undersøgte systemer, d.v.s. systemerne med transparent isolering, Teflon-folie og glas med lavemissionsbelægning. For disse mere avancerede dæklagssystemer er der i dette projekt valgt at indlæse egenskaberne for et enkelt lag alm. glas, samtidig med at der specificeres en reduktionsfaktor f, som bevirker, at den beregnede transmittans får en passende reduktion. Den indlæste f er bestemt udfra følgende udtryk

$$f = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{(\tau\alpha)^1_{e,n}}{(\tau\alpha)^o_{e,n}} + \frac{(\tau\alpha)^1_{e,d}}{(\tau\alpha)^o_{e,d}} \right]$$

hvor indicerne 1, 0, n og d angiver, at der er tale om de korrekte værdier for henholdsvis det aktuelle utraditionelle dæklagssystem, dæklagssystemet med ét lag alm. glas, solstråling

med normal-indfald og diffus solstråling. Programmets tilnærmede beregning af $(\tau\alpha)_e$ for dæklagssystemet vil generelt give lidt for lave værdier ved små indfaldsvinkler og lidt for høje værdier ved store indfaldsvinkler (og diffus stråling).

Den modificerede udgave af en ventileret Trombe-væg, som er undersøgt i projektet, kan ikke umiddelbart beskrives i programmets inddata for solvægge. I stedet er det nødvendigt at definere tre nye zoner, svarende til: (a) hulrummet mellem absorber og glas, (b) det ventilerede hulrum bag absorberen og (c) luften bag solvæggen. Varmetabet gennem dæklaget beskrives som om, der var tale om et vindue mellem zone (a) og det fri. Varmetransporten ved luftcirkulation mellem zone (b) og (c) beskrives ved at definere en "pseudo-ventilator", som giver det ønskede luftskifte, når luften i (b) er varmere end luften i (c). Zone (c) er en "pseudo-zone" uden varmeanlæg eller mulighed for køling af luften, og der er en "∞-god" varmetransport mellem (c) og den almindelige sydvendte zone. (Zone (c) er udelukkende indført for at kunne overvinde nogle restriktioner i programmets algoritme, der ellers ville umuliggøre den nævnte beskrivelse af luftcirkulationen ved indførelse af en ventilator).

Solvæggen til friskluftventilation beskrives også ved hjælp af en analogi. På udtrykket for effekten fra solvæggen:

$$q_i = a \cdot (\tau\alpha)_e \cdot I - b \cdot (T_i - T_a)$$

ses, at solvæggens indvirken på boligens varmebalance svarer til, at der i stedet var tale om et "pseudo-vindue" i den sydvendte zone. Det har transmittansen $a \cdot (\tau\alpha)_e/\alpha_r$, hvor α_r er absorptansen for den sydvendte zone, og U-værdien er b. Væggen kan således beskrives ved at opstille inddata for et sådant "vindue".

A4. Solvarmeforskning under Energiministeriet.

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 Christophersen, afd.leder, civilingeniør, Statens Byggeforskningsinstitut
Vagn Korsgaard, professor, civilingeniør, 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 programmérbar lommeregnemaskine. 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 solfangere 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 måliner på 10 m^2 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 idé-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 og Laboratoriet for Varmeisolering, 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/idébog. 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 - demonstration. 1 års målinger på et 18 m^2 solvarmeanlæg 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.

43. Konvektionsdreven hydrofil solfanger. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, oktober 1987.

45. Små konkurrencedygtige solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, februar 1988.

46. Solvarmeanlæg og plast. Brugsvandsanlæg. Teknologisk Institut, juli 1988.

Varmelagerprogrammet (LfV)

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 enfamiliehuses 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. Enfamiliehuse 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. Varmeovergang 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.