

Udvikling af solvægge til nybyggeri

Olaf Bruun Jørgensen



MEDDELELSE NR. 239. DECEMBER 1992
LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

FORORD

Denne rapport beskriver, hvorledes solvægge til nybyggeri kan udformes, så de udgør et attraktivt alternativ til højisolerede ydervægge i fremtidigt boligbyggeri. Projektet er finansieret af Energiministeriet og er en del af forskningsområdet: "Energianvendelse i bygninger" under Energiministeriets forskningsprogram EFP-89. Projektets journal-nr. hos SBI er 1213/89 - 5.

En tidlig del af projektets resultater har været præsenteret ved: "Fourth International Workshop on Transparent Insulation Technology", 28 - 30 Maj 1991, Birmingham, England, i artiklen: "Solar walls for highly insulated housing in northern climates". Denne artikel findes i appendiks A.1.

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

Olaf Bruun Jørgensen, civilingeniør.

Svend Aage Svendsen, lektor, civilingeniør, Ph.D.

Martin Dandanell, maskinarbejder.

Knud Otto Jurnow Nielsen, maskinarbejder.

Michael Ramskov, maskinarbejder.

Christina Dipo Zimmermann, kontorassistent.

Heidi Jensen, kontorelev.

INDHOLDSFORTEGNELSE

1. INDLEDNING	1
1.1 Baggrund	1
1.2 Formål	1
2. NYBYGGERI I DANMARK	5
2.1 Nybyggeriets udvikling	5
2.2 Energi- og komfortmæssige krav til fremtidigt boligbyggeri	7
3. KARAKTERISERING AF HØJISOLEREDE BOLIGER I FREMTIDIGT BYGGERI	9
3.1 Boligtyper	9
3.2 Klimaskærmen	9
3.3 Varmegenvindingsanlæg	10
3.4 Energiforbrug	10
4. BEREKNINGER OG FORUDSÆTNINGER	13
4.1 Beregningsmodel	13
4.2 Beregningsforudsætninger	13
5. DIMENSIONERING AF SOLVÆGGE TIL NYBYGGERI	15
5.1 Solvægstyper	15
5.2 Uventilerede solvægge	15
5.2.1 Systembeskrivelse	15
5.2.2 Dæklagssystemer	15
5.2.3 Bagmure	19
5.2.4 Temperaturreguleringssystemer	20
5.3 Vurdering af forskellige udformninger af uventilerede solvægge	20
5.3.1 Energibesparelser	20
5.3.2 Termisk komfort	23
5.3.3 Optimal udformning af uventileret solvæg	31
5.4 Venterede solvægge	34
5.4.1 Systembeskrivelse	34
5.4.2 Dæklagssystemer	35
5.4.3 Bagmure	35
5.4.4 Temperaturreguleringssystemer	35
5.5 Vurdering af forskellige udformninger af ventilerede solvægge	35
5.5.1 Energibesparelser	36
5.5.2 Termisk komfort	39
5.5.3 Optimal udformning af ventileret solvæg	50

6. EKSPERIMENTEL UNDERSØGELSE	53
6.1 Forsøgsopstilling	53
6.2 Måleresultater	53
6.3 Sammenligning med beregninger	54
7. KONKLUSION	55
REFERENCER	57
APPENDIX	59
A.1 Artikel fra: TI ₅ - Fourth International Workshop on Transparent Insulation Technology, 28 - 30 May 1991, Birmingham, England.	61
A.2. Beskrivelse af solvægge i EDB-model	65

1. INDLEDNING

1.1 Baggrund

Ved projektering af nybyggeri er det for boligbyggeriets vedkommende ikke længere tilstrækkeligt blot at begrænse energiforbruget til rumopvarmning. Virkningen af et meget højt forbrug af fossilt brændsel ("drivhuseffekten") gør det nødvendigt at forsøge at dække energibehovet med alternative energiformer, så vidt det er muligt. En metode hertil er at udnytte den passive solvarme f.eks. ved anvendelse af solvægge.

Laboratoriet for Varmeisolering har i de seneste år deltaget i flere forskningsprojekter vedrørende udvikling af solvægge anvendt i ældre boligbyggeri, [1], [2]. Hovedresultatet af projekterne har været, at en energirenovering af ældre boligbyggeri med fordel kan udføres ved anvendelse af uventilerede solvægge. Disse projekter følges nu op af flere fuldskaforfølg, hvor forskellige uventilerede solvægge afprøves i praksis. I Helsingør gennemføres et projekt finansieret af Energiministeriets forskningsprogram (EFP-90), hvor ca. 80 m² ydermur i et ældre 3-etagers boligbyggeri inddækkes med solvægge (figur 1.1). På Østerbro monteres solvægge på et ældre rækkehus i beboerforeningen "VIBEKEVANG" (figur 1.2). Dette projekt er finansieret af Teknologirådet i 1989. Begge projekter drejer sig således om anvendelsen af solvægge i ældre boligbyggeri. Ved udvikling af solvægge til nybyggeri er der imidlertid flere områder, hvor erfaringerne fra de tidligere projekter vedrørende uventilerede solvægge vil være til stor nytte. Herudover vil det være interessant at undersøge mulighederne for også at anvende forskellige former for ventilerede solvægge i nybyggeri.

I løbet af 1980'erne er hovedparten, godt 70%, af nyt boligbyggeri i Danmark udført som parcel- og rækkehuse, [3]. Disse er normalt fritliggende, hvorfor solindfaldet er så stort, [4], at det vil være muligt at udnytte den passive solvarme vha. solvægge.

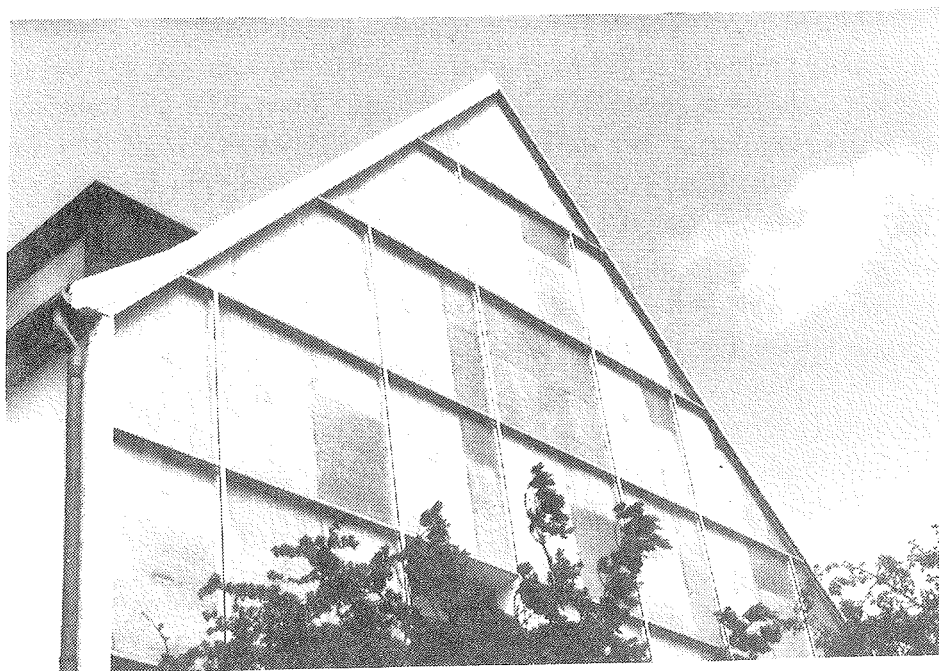
1.2 Formål

For at solvægge skal kunne anvendes i nybyggeri er minimumskravet, at energiforbruget i en bolig, der forsynes med solvægge, bliver mindre end en prismæssigt tilsvarende anvendelse af mineraluld. Herudover er det fordelagtigt, hvis solvæggen i længere perioder (forår og efterår) vil kunne medvirke til opvarmning af boligen og dermed, i modsætning til mineralulds-konstruktioner, bevirke en forkortelse af fyringssæsonen og dermed yderligere en reduktion af forbruget af fossilt brændsel.

For fremtidigt byggeri vil der ifølge "Energi 2000", [5], ske en skærpelse af bygningsreglementet, så energiforbruget til rumopvarmning reduceres med op mod 50%. Dette indebærer, at ydervægge i fremtidigt byggeri udføres som højisolerede konstruktioner. Hvis solvægge skal være lige så attraktive som disse ydervægge, skal der i solvæggene anvendes effektive transparente isoleringsmaterialer, hvilket vil medvirke til at fordyre de forskellige former for solvægge. Ved anvendelse af solvægge i nybyggeri er der imidlertid gode muligheder for at opnå besparelser på anlægsprisen, idet den ydre og ofte dyreste del af muren, f.eks. skalmuren, kan undværes. An-

vendelsen af solvægge med højisolerende dæklagssystemer indebærer imidlertid en risiko for, at der i perioder kan forekomme så høje indelufttemperaturer, at der vil være tale om termisk diskomfort.

Det er derfor projektets mål at udvikle højeffektive solvægge, der kan anvendes i nybyggeri, fortrinsvis i lave boliger. Solvæggene skal kunne benyttes i hovedparten af husets ydervægge (syd, øst og vest-facader). Solvæggene skal derfor udformes, så de nedsætter transmissionstabet i vintermånederne væsentligt og tilfører huset varme i forårs- og efterårsmånederne. Dette gøres ved at benytte transparente isoleringsmaterialer samt ved at udføre solvæggenes bagmure, så disse giver en god varmelagringskapacitet. Varmetransporten kan desuden forbedres og kontrolleres ved at indbygge kanaler for naturlig cirkulation af luft. Herudover skal perioder med overtemperaturer, samt forskellige systemer til reduktion heraf, vurderes, således at omfanget af termisk diskomfort begrænses mest muligt.



Figur 1.1 Solvægge på Peder Skramsvej, Helsingør.



Figur 1.2 Solvægge i bebyggelsen "Vibekevang", Østerbro, København.

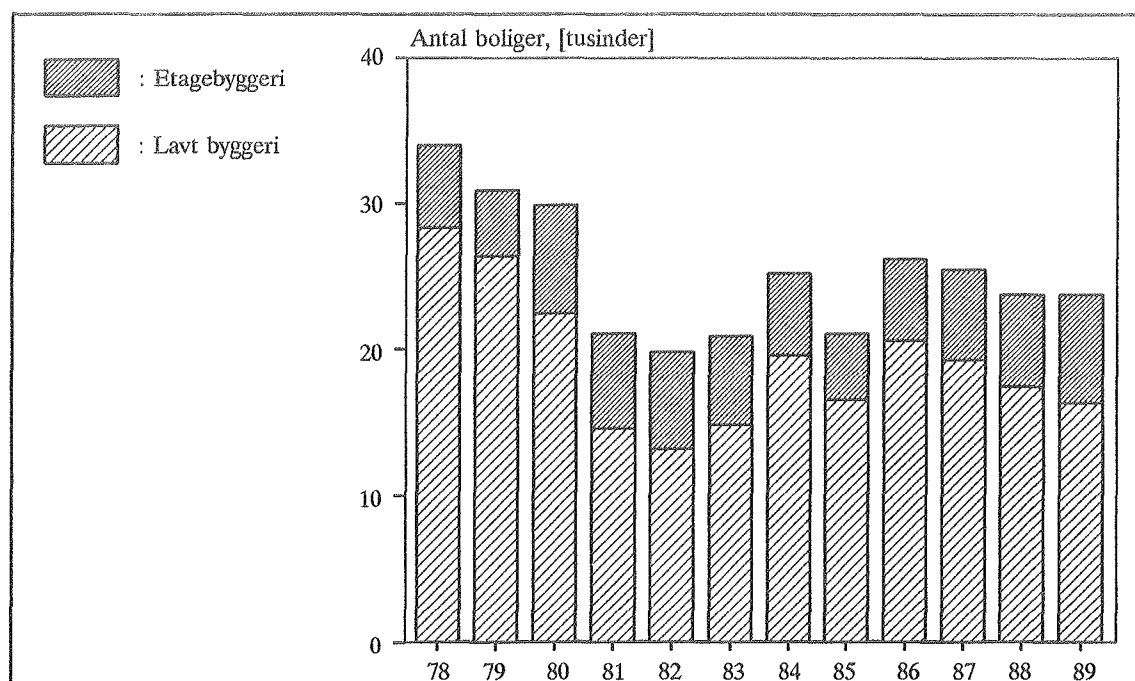
2. NYBYGGERI I DANMARK

For at vurdere anvendelsen af solvægge i nybyggeriet i Danmark er det nødvendigt at analysere i hvor stort omfang, det vil være realistisk at benytte solvægge. Dette indebærer bla. en beskrivelse af udviklingen indenfor de forskellige former for nybyggeri.

2.1 Nybyggeriets udvikling

Boliger

Hvis solvægge skal kunne anvendes i boligbyggeriet, er det en forudsætning, at de omkringliggende bygninger ikke vil reducere solindfaldet på boligens ydervægge. Dette kræver, at boligerne udformes som lavt byggeri. For boligers vedkommende har nybyggeriet i de senere år udviklet sig som vist i figur 2.1, [3].

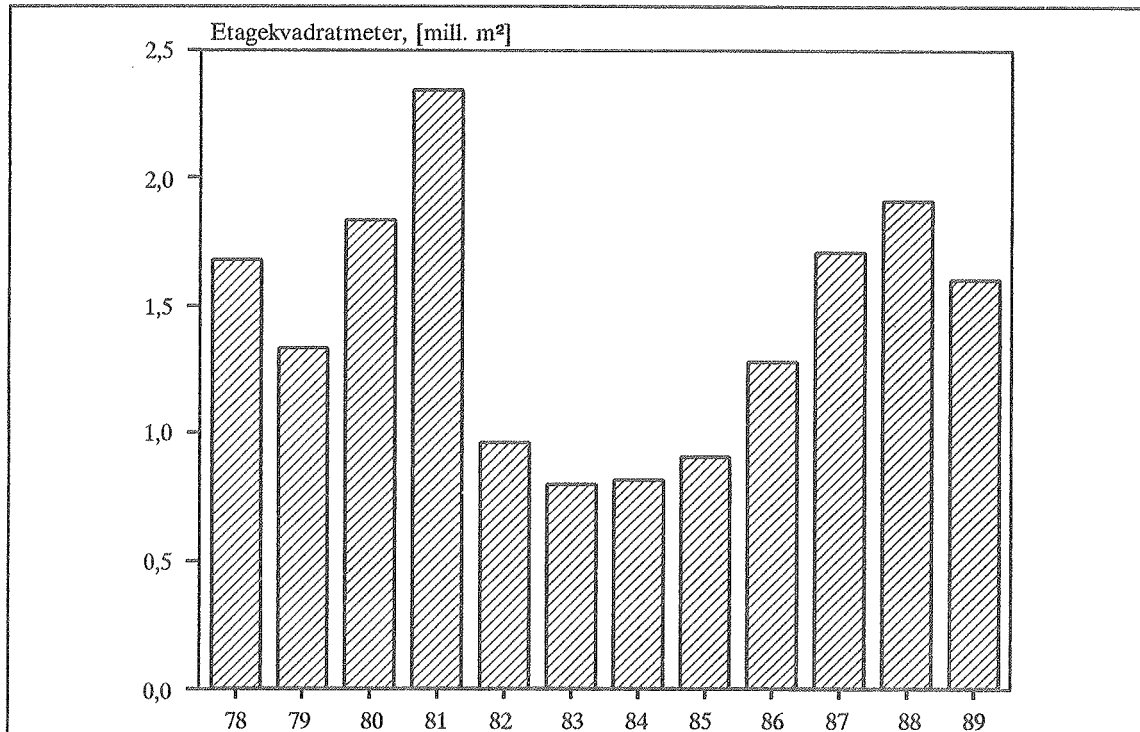


Figur 2.1 Antallet af nyopførte boliger pr. år i perioden 1978 - 1989.

Det samlede antal boliger i Danmark er ca. 2,2 millioner. I løbet af 80'erne er nybyggeriet faldet til et niveau, hvor der årligt opføres mellem 20.000 og 30.000 boliger svarende til blot 1% af den samlede boligmasse. Af figur 2.1 ses, at godt 70% af nybyggeriet, der udgør ca. 2,5 millioner etage-kvadratmeter, kan karakteriseres som lavt byggeri. Fortsætter denne udvikling, er der således, forudsat at nybyggeriet ikke stagnerer fuldstændigt, et stort potentiale for anvendelsen af solvægge i nyt boligbyggeri.

Kontor og administration

For kontor- og administrationsbyggeri har nybyggeriet udviklet sig som vist i figur 2.2, [3].



Figur 2.2 Antal etagekvadratmeter for nyopført kontor- og administrationsbyggeri i perioden 1978 - 1989.

Kontor- og administrationsbyggeriet i Danmark udgør ca. 60 millioner m². I 80'erne er der således årligt opført ca. 2% af den totale mængde kontor- og administrationsbyggeri, svarende til ca. 1,2 millioner etage-kvadratmeter. Fortsætter denne udvikling, ser det umiddelbart ud til, at der også her er et stort potentiale for anvendelsen af solvægge. I kontor- og administrationsbyggeri udgør udgifterne til rumopvarmning imidlertid kun en mindre del af det samlede energibehov, hvorimod der ofte er tale om et kølebehov. Dette skyldes især, at disse byggerier primært benyttes i dagtimerne, hvor en betydelig del af effektbehovet dækkes af gratisvarmebidraget fra solindfald, personer, EDB-udstyr, etc. Anvendelsen af solvægge i kontor- og administrationsbyggeri er derfor ikke vurderet i dette projekt. Det skal dog bemærkes, at da hovedparten af energibehovet til rumopvarmning i kontor- og administrationsbyggeri skyldes ventilationstab, kan det være interessant at anvende ventilerede solvægge til forvarmning af ventilationsluften.

Industri

For industrien gælder, at det ofte er et problem at komme af med den varme, der afgives fra produktionsudstyret, hvorfor der i industrielt byggeri kun sjældent er behov for at begrænse energiforbruget til rumopvarmning. I visse tilfælde kan det dog være aktuelt at benytte solvægge. For sådanne anvendelser henvises til [6], hvor en stor forsøgshal forsynes med uventilerede solvægge.

2.2 Energi- og komfortmæssige krav til fremtidigt boligbyggeri

For fremtidigt boligbyggeri skærpes bygningsreglementet, således at energiforbruget til rumopvarmning kan reduceres betydeligt. I [5] sigtes mod en reduktion af energiforbruget til rumopvarmning på 50% inden år 2000. Fremtidens boligbyggeri vil derfor være højisoleret byggeri. Hermed vil ventilationstabet udgøre en betragtelig del af husenes varmetab. En betydelig reduktion af energiforbruget til rumopvarmning kan imidlertid opnås ved at forsyne fremtidigt boligbyggeri med ventilationsanlæg med varmegenvinding. Herudover kan opnås en stor reduktion af energiforbruget ved anvendelse af højisolerende vinduer. Allerede i dag findes vinduer med en varmetransmissionskoefficient, der er mindre end halvdelen af, hvad der kræves i det nuværende bygningsreglement. For den resterende del af klimaskærmen vil en halvering af varmetransmissionskoefficienten imidlertid være meget dyr og medføre en betydelig forøgelse af klimaskærmens tykkelse (f.eks. forøges en isoleret hulmur fra ca. 35 cm til ca. 60 cm). En mere realistisk reduktion for denne del af klimaskærmen vil være at reducere varmetransmissionskoefficienten med 25 %. I [10] er foreslået reduktioner, der kan resultere i et bygningsreglement i 1993, hvor den gennemsnitlige reduktion af varmetransmissionskoefficienterne er ca. 30%

Anvendelsen af ventilationsanlæg vil desuden medvirke til at opfylde de krav, der må stilles til det termiske indeklima i fremtidens boligbyggeri. Disse vil f.eks. være krav om, at overtemperaturer i perioder med stærkt solindfald begrænses mest muligt, ligesom risikoen for kold nedfaldsluft ved vinduer og ydervægge fjernes.

3. KARAKTERISERING AF HØJISOLEREDE BOLIGER I FREMTIDIGT BYGGERI

3.1 Boligtyper

I dette projekt er kun foretaget vurderinger af solvægge placeret i lavt boligbyggeri. De forskellige boligtyper er beskrevet nedenfor. Det er forudsat, at boliger i de nærmeste år vil være af samme størrelse, som de har været i 80'erne. For alle boligtyper forventes, at de omgivende bygninger og beplantninger udføres på en sådan måde, at skyggeeffekten herfra kan beskrives ved en horisontafskæring på maksimalt 15°. Alle de nedenfor beskrevne boligtyper kan derfor betragtes som fritliggende.

Enfamiliehuse

I de følgende analyser er benyttet enfamiliehuse (boligtype 1) med et boligareal på ca. 160 m². Husene er udformet som rektangulære ét-plans huse inddelt i 4 zoner. Zonerne udgør hver sit "hjørne" af huset. Der forekommer varmetab gennem alle boligens begrænsningsflader.

Række-, kæde- og dobbelthuse

Etagearealet i de undersøgte række-, kæde- og dobbelthuse (boligtype 2) er ca. 90 m². Husene beskrives som rektangulære ét-plans huse inddelt i 2 zoner. Zonerne er nord- og sydvendte. Boligerne afgrænses i "siderne" af tilsvarende boliger, hvorfor der kun forekommer varmetab gennem de nord- og sydvendte facader samt gulve og lofter.

Ved vurderingen af de forskellige typer solvægge placeres disse i tilsvarende boliger, idet den højisolerede ydervæg i forskelligt omfang erstattes af solvægge.

3.2 Klimaskærmen

For alle de undersøgte boliger udføres de forskellige dele af klimaskærmen som beskrevet nedenfor.

Ydervægge

Ved anvendelse af solvægge i forbindelse med renovering af ældre boliger varierer mængden af mineraluld, anvendt til en udvendig efterisolering, typisk mellem 75 og 100 mm, [1] og [2]. Samtidig gælder, at solvæggene bevirker et lavere energiforbrug end efterisoleringen. I forbindelse med nybyggeri vil solvæggene imidlertid skulle "konkurrere" med ydervægge med større mængder mineraluld.

For en tung ydervæg udført i overensstemmelse med bygningsreglementet, [8], er varmetransmissionskoefficienten 0,35 W/m²K. For nybyggeri vil det være realistisk at reducere denne værdi med ca. 25%. En teglstensmur med 150 mm mineraluld har en U-værdi på 0,23 W/m²K. Denne benyttes som ydermur i reference-husene samt i de ydermure i "solvægs-husene", der ikke opføres med solvægge.

Vinduer

I nybyggeri må det forventes, at der i vinduerne benyttes ruder med en varmetransmissionskoefficient, der er betydeligt lavere, end den i [8] anførte. For vinduer gælder, at udviklingen af sådanne højisolerende ruder stiller store krav til ramme-karmkonstruktionerne, for at kuldebroeffekten fra disse kan undgås. På Laboratoriet for Varmeisolering udføres et projekt, støttet af Teknologirådet, hvorunder der skal udvikles karmkonstruktioner, der har samme varmetransmissionskoefficient som de lavenergiruder, der netop er kommet på markedet. I dette projekt benyttes derfor lavenergivinduer med en U-værdi på $1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ i både referencehusene og de huse, der forsynes med solvægge.

Resterende klimaskærm

For den resterende del af klimaskærmen benyttes, som for de tunge ydervægge, U-værdier, der er reduceret med 25 - 30% i forhold til de i [8] angivne.

3.3 Varmegenvindingsanlæg

Anvendelsen af ventilationsanlæg med varmegenvinding vil, hvis de udformes korrekt, kunne reducere varmetabet ved ventilation med 40 - 50 %, afhængig af varmevekslerens effektivitet. Det specifikke varmetab ved ventilation kan således bestemmes svarende til et regningsmæssigt luftskifte på 0,3 gange i timen, [9]. I sommerhalvåret vil der ikke være noget opvarmningsbehov, hvorfor ventilationsanlægget kan udføres med et "by-pass" om varmeveksleren. I de senere simuleringer benyttes derfor et regningsmæssigt luftskifte i fyringssæsonen på 0,3 gange i timen, mens der udenfor fyringssæsonen regnes med et luftskifte på 0,5 gange i timen.

3.4 Energiforbrug

For de forskellige dele af klimaskærmen er i de følgende analyser benyttet U-værdier som angivet i tabel 3.1. I tabellen er desuden angivet de i "Bygningsreglement for småhuse" (BR-S 85), [7], fastsatte U-værdier. Den i [5] varslede skærpelse af isoleringsstandarder fra 1993 (her benævnt "BR - 93"), vil resultere i nogle U-værdier, der i praksis vil være som angivet i tabel 3.1, [10].

Bygningsdel	U-værdier, [$\text{W/m}^2\text{K}$]			Bolittype 1 Areal, [m^2]	Bolittype 2 Areal, [m^2]
	BR-S 85	"BR - 93"	Simuleret		
Ydervægge	0,35	0,30	0,23	136,6	41,4
Terrændæk	0,30	0,20	0,19	167,2	120,0
Tag	0,20	0,15-0,20	0,15	167,2	120,0
Vinduer	2,90	2,00	1,60	23,9	17,7
Døre	2,00		1,50	3,3	3,0

Tabel 3.1 Varmetransmissionskoefficienter og -arealer for de i projektet undersøgte referenceboliger.

I tabel 3.2 er for de 2 boligtyper angivet den samlede varmetabskoefficient, U_T , den samlede varmetabskoefficient pr. m^2 boligareal, U_T , energiforbruget til rumopvarmning, Q_U , samt energiforbruget til rumopvarmning pr. m^2 boligareal, Q_U . Den samlede varmetabskoefficient indeholder både transmissions- og ventilationstab. Energiforbruget er beregnet som beskrevet i kap. 4.2.

Boligtype	U_T [W/K]	U_T [W/Km ²]	Q_U [kWh/år]	Q_U [kWh/m ² år]
Énfamilieboliger	175	1,0	7750	46
Række-, kæde og dobbelthuse	115	1,0	4040	34

Tabel 3.2 Samlet varmetabskoefficient, U_T , samlet varmetabskoefficient pr. m^2 boligareal, U_T , energiforbruget til rumopvarmning, Q_U , samt energiforbruget til rumopvarmning pr. m^2 boligareal, Q_U .

4. BEREKNINGER OG FORUDSÆTNINGER

Ved vurderingen af solvæggens betydning for bebyggelsens energiforbrug og temperaturforhold er benyttet et EDB-program. Beregningerne er foretaget på årsbasis og omfatter 5 forskellige typer solvægge, samt forskellige former for udvendig efterisolering anvendt i en række forskellige kombinationer i den aktuelle bebyggelse.

4.1 Beregningsmodel

Det anvendte EDB-program, "SUNCODE", [11], simulerer varmestrømme, temperaturforhold, etc., i løbet af et "normalår". I programmet benyttes udendørs klimadata fra det danske referenceår TRY, [12]. "SUNCODE" er en PC-version af det detaljerede amerikanske "main frame" program "SERIRES", og er baseret på et termisk netværk, hvor diverse temperaturer bestemmes time for time ved en explicit metode.

Programmet er særlig velegnet til undersøgelse af bygninger, der udnytter passiv solvarme, idet det er udformet, så der er mulighed for at foretage beregninger med glasbygninger og solvægge. Bygningen opdeles i zoner, hvorved de forskellige rum i beregningerne behandles hver for sig, idet der regnes med varmeudveksling zonerne imellem. 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 ved Laboratoriet for Varmeisolering, [13], [14], [15] og [16].

De muligheder, der på forhånd er givet, for at udføre beregninger med solvægge, er dog begrænset til nogle få "standard-solvægge". Der er her tale om ventilerede eller uventilerede Trombevægge, for hvilke dæklagssystemet er sammensat af identiske dæklag af glas eller plast. Solvægge med mere avancerede former for transparent isolering kan derfor ikke umiddelbart beskrives af programmet. Endvidere forudsættes det i programmet, at diverse varmetabskoefficienter er uafhængige af temperaturforholdene. For en solvægs dæklagskonstruktion vil varmetabet ved konvektion i mange tilfælde stige betydeligt, når temperaturdifferensen mellem absorberen og omgivelserne øges, og varmetabet ved stråling fra absorberen vil stige med øget absorbertemperatur. For solvægge med transparent isolering vil disse temperaturforskelle være særlig udtalte. Antagelsen vedrørende konstant varmetabskoefficient vil således 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 visse tilnærmelser og "tricks", der er nærmere beskrevet i appendix A.2.

4.2 Beregningsforudsætninger

Som grundlag for vurderingen af anvendelsen af solvægge udføres en termisk simulering af bygningen, hvorfor det er nødvendigt med en detaljeret beskrivelse af alle væsentlige termiske belastninger på huset. Dette inkluderer en beskrivelse af husets gratisvarmetilskud samt udnyttelsen heraf. Som hovedregel er fulgt anvisninger givet i [17]. Gratisvarmetilskud til bebyggelsen udgøres af solindfald, personvarme, el-forbrug, varmetilskud fra varmt vand, etc.

Boligens absorptans for solindfald gennem vinduer bestemmes som angivet i [18]. Ifølge [17] kan ca. 25% af den absorberede solstråling betragtes som tilført møbler o. lign.; og pga. disses meget lave varmekapacitet og store overfladeareal afgives varmen umiddelbart efter til rumluften. De resterende 75% overføres til boligens termiske masse.

Den konvektive varmeudveksling gennem døråbninger mellem "varme" og "kolde" zoner er beregnet som beskrevet i [19].

Det interne gratisvarmebidrag fra personer, el-forbrug, varmetilskud fra varmt vand, etc. bestemmes som beskrevet i [9], idet det gennemsnitlige antal beboere fremgår af [3]. Den tilførte mængde gratisvarme udgør således ca. 16 kWh/døgn for énfamiliehuse og 15 kWh/døgn for række-, kæde- og dobbelthuse, svarende til et bidrag på hhv. 96 og 125 Wh/døgn pr. m² beboet areal.

Boligerne opvarmes af et radiatorsystem således, at en rumlufttemperatur på 20°C sikres fra kl. 6.00 om morgenen til kl. 22.00 om aftenen. Der benyttes natsenkning, således at temperaturen i nattetimerne kan falde til 16°C. Der ventileres med udeluft, hvis rumlufttemperaturen, i perioder med risiko for overtemperaturer, overstiger 24°C. Udenfor fyringssæsonen ventileres desuden i nattetimerne, hvis rumlufttemperaturen overstiger 18°C. I begge tilfælde sker ventilationen kun, hvis udeluften er køligere end rumluften. Ventilationen sker ved åbning af vinduer og døre og simuleres med et luftskifte på 5,0 pr. time.

I de efterfølgende beregninger omtales både samlede og "normerede" energiforbrug og besparelser. De samlede energibesparelser, Q_B , bestemmes som forskellen mellem energiforbruget uden, Q_U , og energiforbruget med, Q_M , solvægge. Det normerede energiforbrug med eller uden solvægge, Q_M eller Q_U , udtrykker energiforbruget pr. m² boligareal, A_{bolig} , ligesom den normerede energibesparelse, q_b , udtrykker besparelsen pr. m² absorber, A_{abs} . Dvs.:

$$Q_U = \frac{Q_U}{A_{\text{bolig}}} \quad Q_M = \frac{Q_M}{A_{\text{bolig}}} \quad q_b = \frac{Q_U - Q_M}{A_{\text{abs}}}$$

Endvidere angives den relative energibesparelse, R , der er defineret ved :

$$R = \frac{Q_U - Q_M}{Q_U}$$

5. DIMENSIONERING AF SOLVÆGGE TIL NYBYGGERI

I dette kapitel formuleres forskellige udformninger af solvægge, der vil kunne opfylde de energi- og komfortmæssige krav til fremtidens boligbyggeri. Nærværende rapport indeholder kun en vurdering af solvægge anvendt i parcelhuse, idet anvendelsen af solvægge i række- og kædehuse principielt giver tilsvarende resultater.

5.1 Solvægstyper

Der skelnes mellem uventilerede og ventilerede solvægge. I figur 5.1 og 5.2 er vist den principielle udformning og virkemåde af disse.

Principperne for at udnytte solstrålingen til rumopvarmning vha. solvægge er enkle: Solvægge består af en ydermur, der er beskyttet mod vejrliget af en eller anden form for transparent isolering (oftest blot et eller flere lag glas). Herved tillades transmission af den energirige kortbølgede solstråling, samtidig med at varmetabet fra muren (reflekteret langbølget varmestråling) reduceres. Den opsamlede solvarme kan enten ledes ind i det bagvedliggende rum ved varmeledning gennem den "tunge" ydermur (uventilerede solvægge), eller den kan ventileres ind i rummet eller til et lager, hvorfra varmen kan hentes, når der er brug for den.

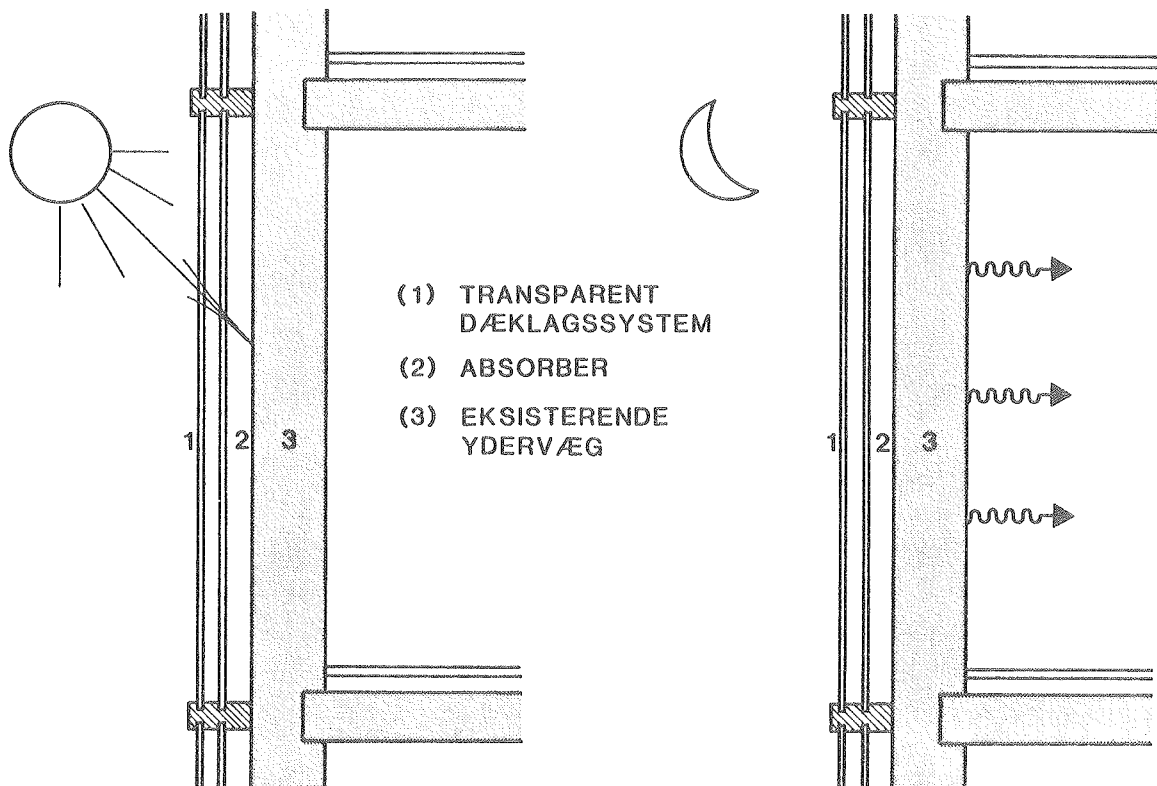
5.2 Uventilerede solvægge

5.2.1 Systembeskrivelse

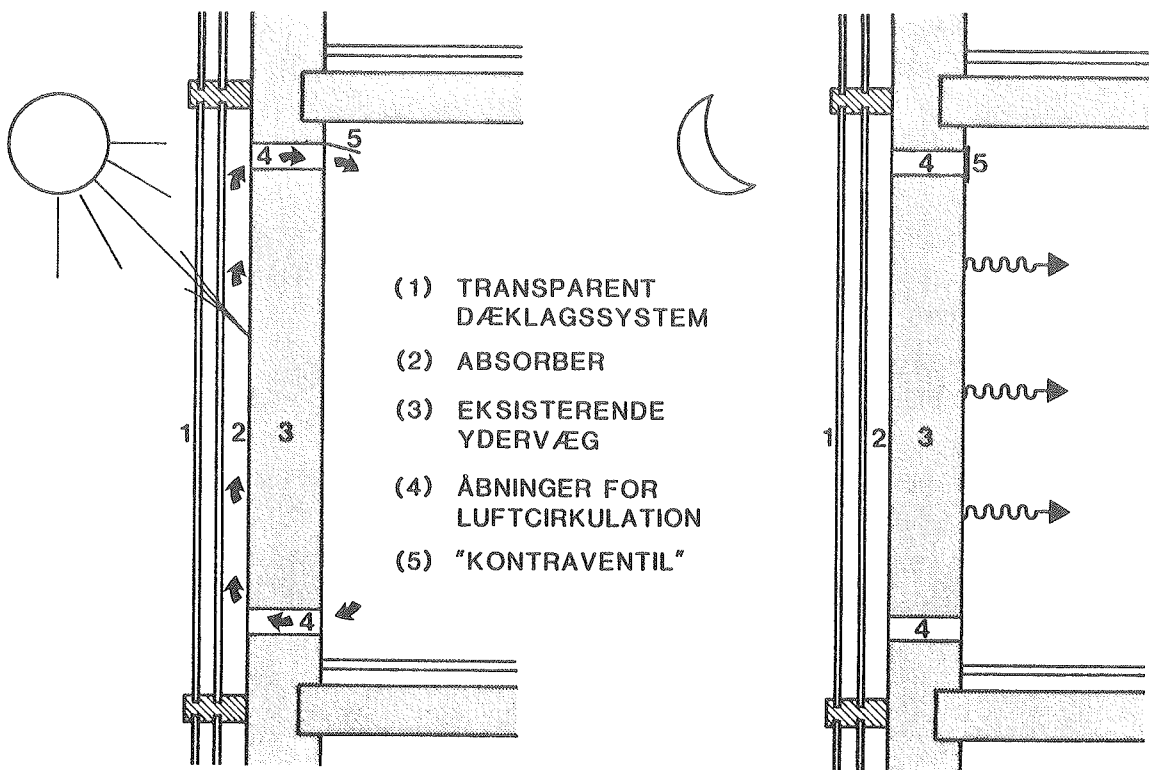
I det følgende er vurderet to typer uventilerede solvægge. Type U-I er en traditionel uventileret solvæg med en tung bagmur, mens type U-II er forsynet med et isoleret hulrum på indersiden af den tunge bagmur. Den varme luft i dette hulrum ventileres i fyringssæsonen ind til opholds-zonen ved naturlig ventilation gennem åbninger i top og bund. Udenfor fyringssæsonen samt i nattetimerne lukkes disse åbninger manuelt, hvorved både risikoen for overtemperaturer om sommeren og varmetabet i nattetimerne reduceres. De to typer solvægge er vist i figur 5.3 og 5.4. I vurderingen er undersøgt, hvilke dæklagssystemer, bagmure og metoder til reduktion af overtemperaturer der vil være optimale for uventilerede solvægge.

5.2.2 Dæklagssystemer

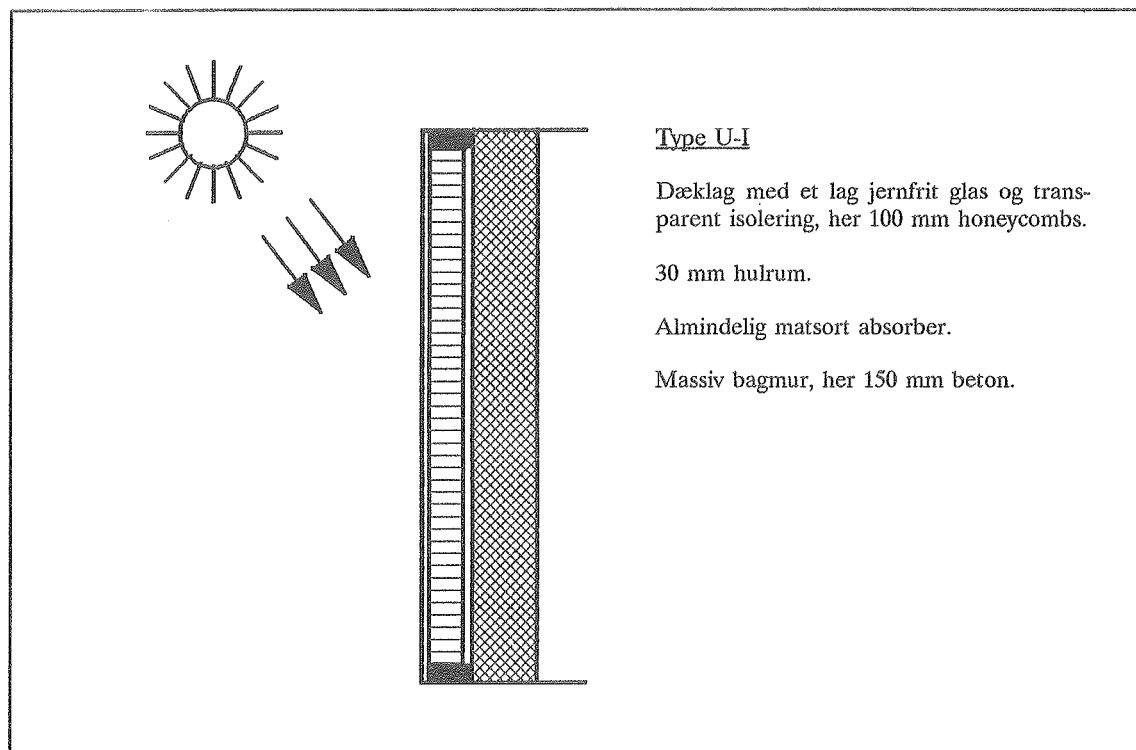
For at solvæggen kan opsamle og udnytte så stor en del af solstrålingen som muligt, er det vigtigt, at dæklagssystemet både har en høj soltransmittans og en lav varmetransmissionskoefficient. Dette opnås ved anvendelse af højisolierende ruder eller transparente isoleringsmaterialer. De undersøgte typer transparent isolering er beskrevet detaljeret i [1] og [20]. Af [1] fremgår, at især solvægskonstruktioner med honeycombs er interessante ved udformning af højeffektive solvægge. I dette projekt er derfor bl.a. vurderet en række forskellige typer honeycombs. De undersøgte dæklagssystemer er beskrevet i tabel 5.1.



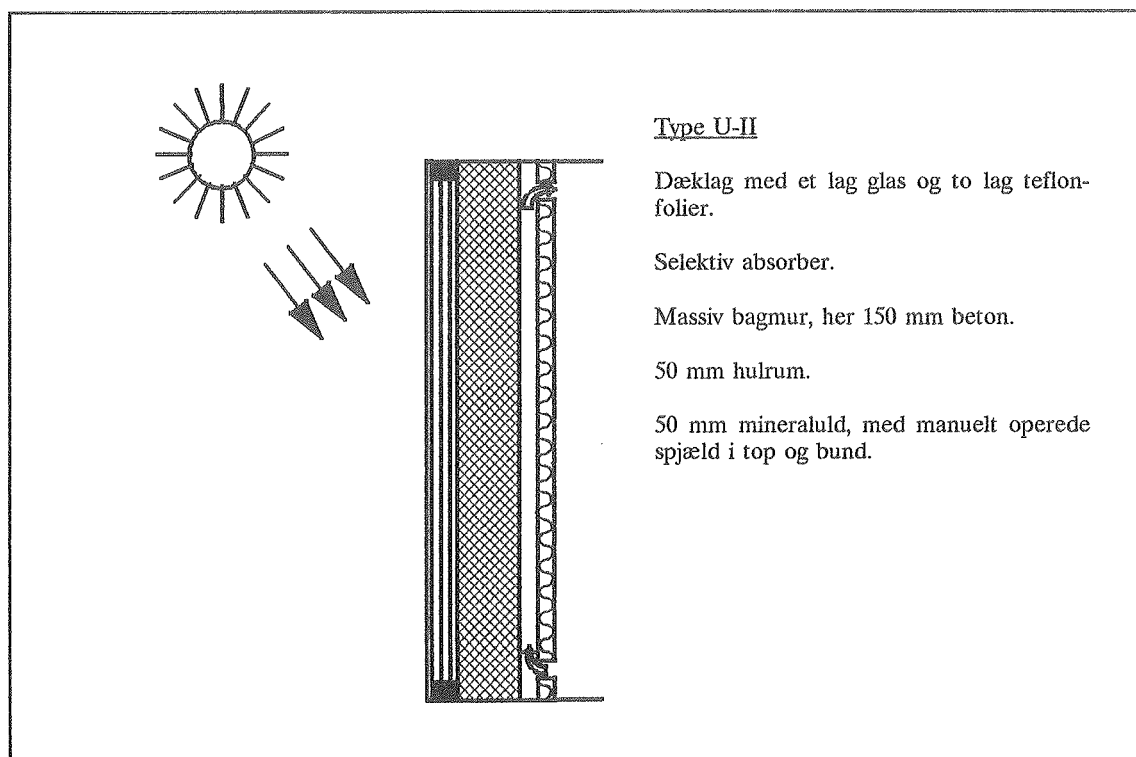
Figur 5.1 Principskitse af uventileret solvæg.



Figur 5.2 Principskitse af ventileret solvæg.



Figur 5.3 Opbygning af den uventilerede solvæg af type U-I der er undersøgt i dette projekt.



Figur 5.4 Opbygning af den uventilerede solvæg af type U-II der er undersøgt i dette projekt.

Varmetransmissionskoefficienten, U_L , og det effektive transmittans-absorptans produkt, $(\tau\alpha)_e$, for direkte og diffus solstråling for dæklagssystemerne er angivet i tabel 5.2. Værdierne for U_L er bestemt ved en forskel på 20°C mellem absorberen og omgivelserne, idet omgivelsestemperaturen er ca. 10°C. Der er regnet med en vindhastighed på 5 m/s. I de angivne værdier for U_L er inkluderet randtab fra de rammesystemer, dæklagene er monteret i. Disse er sat til mellem 0,2 og 0,3 W/K pr. m² absorberareal afhængig af, hvilke dæklagssystemer der er tale om. De angivne produktnavne refererer til produktbeskrivelserne i [20], [21] og [22].

Dæklag	Opbygning
A1	100 mm honeycombs (Arel) mellem et lag jernfrit glas og en alm. matsort absorber.
A2	50 mm honeycombs (Arel) mellem et lag jernfrit glas og en alm. matsort absorber.
B	30 mm Isoflex mellem et lag jernfrit glas og en alm. matsort absorber.
C	20 mm evakueret monolitisk silica aerogel (Airglass) mellem 2 lag jernfrit glas og en alm. matsort absorber.
D	Højisolerende 3-lags rude fra Pilkington (Kappa Turbo, [21]) og en alm. matsort absorber.
E	Højisolerende 3-lags rude fra LBL, [22], og en alm. matsort absorber.
F1A	100 mm honeycombs (Okalux, Kapipane HW) mellem et lag jernfrit glas og en alm. matsort absorber.
F1B	50 mm honeycombs (Okalux, Kapipane HW) mellem et lag jernfrit glas og en alm. matsort absorber.
F2A	100 mm honeycombs (Okalux, Kapipane 7N) mellem et lag jernfrit glas og en alm. matsort absorber.
F2B	50 mm honeycombs (Okalux, Kapipane 7N) mellem et lag jernfrit glas og en alm. matsort absorber.
G	100 mm honeycombs (Kaiser Bautechnik, TWD) mellem et lag jernfrit glas og en alm. matsort absorber.
H1	Et lag alm. glas foran to plane lag af teflon-folie og en selektiv absorber.

Tabel 5.1 Beskrivelse af de undersøgte dæklagssystemer til uventilerede solvægge.

Dæklag	U_L [W/m ² K]	$(\tau\alpha)_e$	
		direkte stråling	diffus stråling
A1	1,1	0,90	0,64
A2	1,7	0,90	0,72
B	1,9	0,64	0,56
C	0,6	0,70	0,59
D	1,1	0,52	-
E	1,1	0,65	-
F1A	1,0	0,90	0,66
F1B	1,6	0,90	0,70
F2A	1,1	0,81	0,60
F2B	1,8	0,81	0,65
G	1,0	0,90	0,64
H1	1,2	0,81	0,66

Tabel 5.2 Varmetransmissionskoefficienten, U_L , og det effektive transmittans-absorptans produkt, $(\tau\alpha)_e$, for de undersøgte dæklagssystemer til uventilerede solvægge.

5.2.3 Bagmure

Det er væsentligt for uventilerede solvægges evne til at udnytte solstrålingen, at de er i stand til at "gemme" solenergien. Dette sker i væggenes bagmur, der skal fungere som varmelager. Et sådant varmelager skal have en stor varmekapacitet (tyngde), samtidig med at det skal være billigt og let at håndtere. Lageret kan både være en homogen og en "hybrid" konstruktion. I det følgende er vurderet de i tabel 5.3 beskrevne konstruktioner. I vurderingen af de forskellige lagermaterialer benyttes materialedata fra [23], [24] og [25]. Udover at virke som lager er det nødvendigt, at bagmurene er tilstrækkeligt stærke til at kunne fungere som bærende ydervægge, hvilket stiller krav til murenes minimumstykkelser.

Bagmur	Opbygning
A	Massiv betonmur i varierende tykkelser (150 - 350 mm).
B	Massiv teglstensmur i varierende tykkelser (110 - 330 mm).
C	Massiv letbetonmur i varierende tykkelser (150 - 350 mm).
D	Massiv gasbetonmur i varierende tykkelser (150 - 350 mm).
E	En "betonkasse" fyldt ud med sand. Tykkelse 350 mm.
F	En ståltank fyldt med vand. Tykkelse 350 mm.
G	En konstruktion af beton iblandet store mængder jern. Tykkelse 350 mm.

Tabel 5.3 Opbygning af de undersøgte bagmure i uventilerede solvægge.

5.2.4 Temperaturreguleringssystemer

For at solvæggene ikke skal resultere i termisk diskomfort, er det i perioder med kraftig solstråling vigtigt, at solvæggene ikke afgiver så meget varme, at indelufttemperaturerne bliver uacceptabelt høje. Enkle metoder til at reducere risikoen for overtemperaturer er beskrevet i tabel 5.4 nedenfor. I dette projekt er ikke vurderet forskellige automatiske temperaturreguleringssystemer, da disse kan have en ringe driftssikkerhed og samtidig vil medvirke til at fordyre solvægskonstruktionerne væsentligt i forhold til de mere simple og "faste" systemer.

System	Metode
A	Fast indstillede vandrette udhæng på hhv. 0,5 m og 1,0 m (A1, A2). Benyttes hele året.
B	Fastmonterede udvendige sæsonskyggegardiner (B1). Benyttes kun i sommerperioden.
C	Ventilation med udeluft mellem absorber og dæklagssystem (C1). Benyttes kun i sommerperioden.
D	Indvendig isolering af bagmur med hhv. 25 og 50 mm mineraluld (D1, D2). Benyttes hele året.

Tabel 5.4 Enkle metoder til at reducere risikoen for overtemperaturer ved anvendelse af uventilerede solvægge.

5.3 Vurdering af forskellige udformninger af uventilerede solvægge

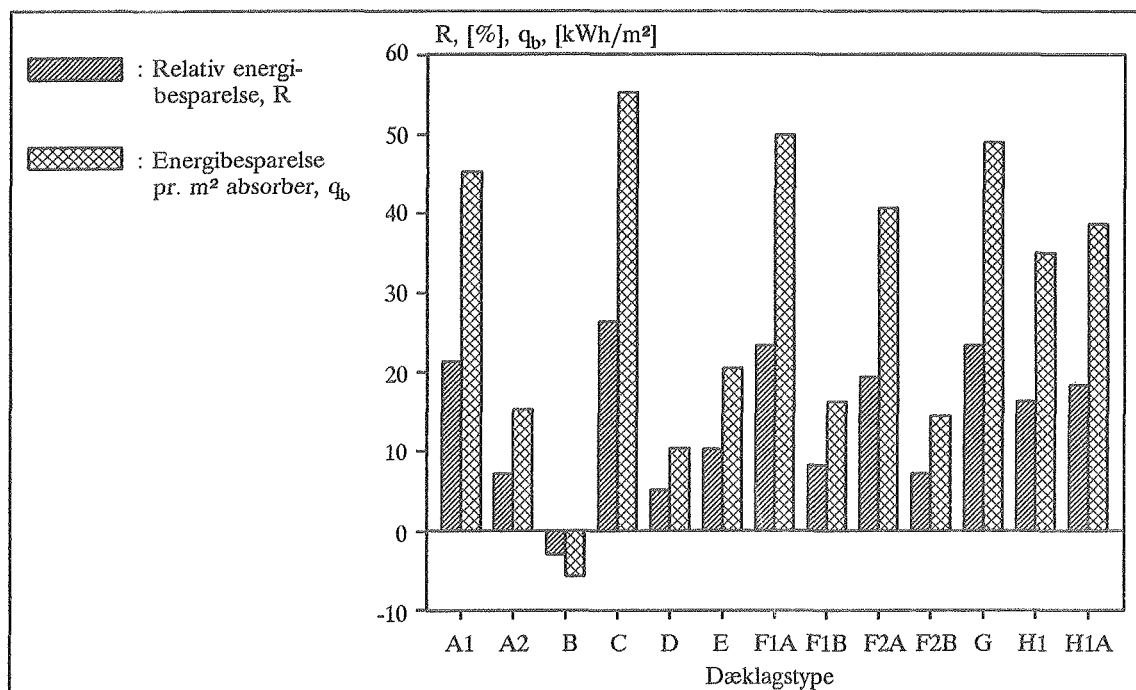
Nedenfor er bestemt, hvordan de forskellige udformninger af uventilerede solvægge vil påvirke de mulige energibesparelser og den termiske komfort. Ved vurderingen er benyttet 36,7 m² solvægge placeret i en sydvendt facade i et typisk parcelhus.

5.3.1 Energibesparelser

Dæklagssystemer

De forskellige dæklagssystemer er vurderet med en bagmur af 150 mm massiv beton (bagmur type A). I figur 5.5 er vist de relative energibesparelser, R , samt de opnåede energibesparelser pr. m² solvæg, q_b , i forhold til reference-huset, der er isoleret med 150 mm mineraluld. Dæklagene H1 og H1A er ens men refererer til anvendelser i hhv. solvægstype U-I og II.

Af figuren fremgår ikke overraskende, at et dæklag med Airglass (type C) bevirker de største besparelser. Det ses desuden, at de forskellige konstruktioner med 100 mm honeycombs (type A1, F1A, F2A og G) giver stort set lige store energibesparelser. Endelig ses, at det noget billigere dæklag med to teflon-folier også medfører ganske store besparelser, både når solvægstype U-I og U-II anvendes (H1 og H1A). Det er derimod ikke særlig fordelagtigt at benytte højisolierende 3-lags ruder (type D og E) som dæklagssystem i solvægge, både fordi besparelserne er små, og fordi ruderne er temmelig dyre. Konstruktioner med 50 mm honeycomb eller 30 mm Isoflex (type A2, B, F1B og F2B) vil ikke være interessante i fremtidigt boligbyggeri.



Figur 5.5 Energibesparelser pr. m² solvæg, q_b, og relative energibesparelser, R, for forskellige dæklagssystemer til uventilerede solvægge.

Bagmure

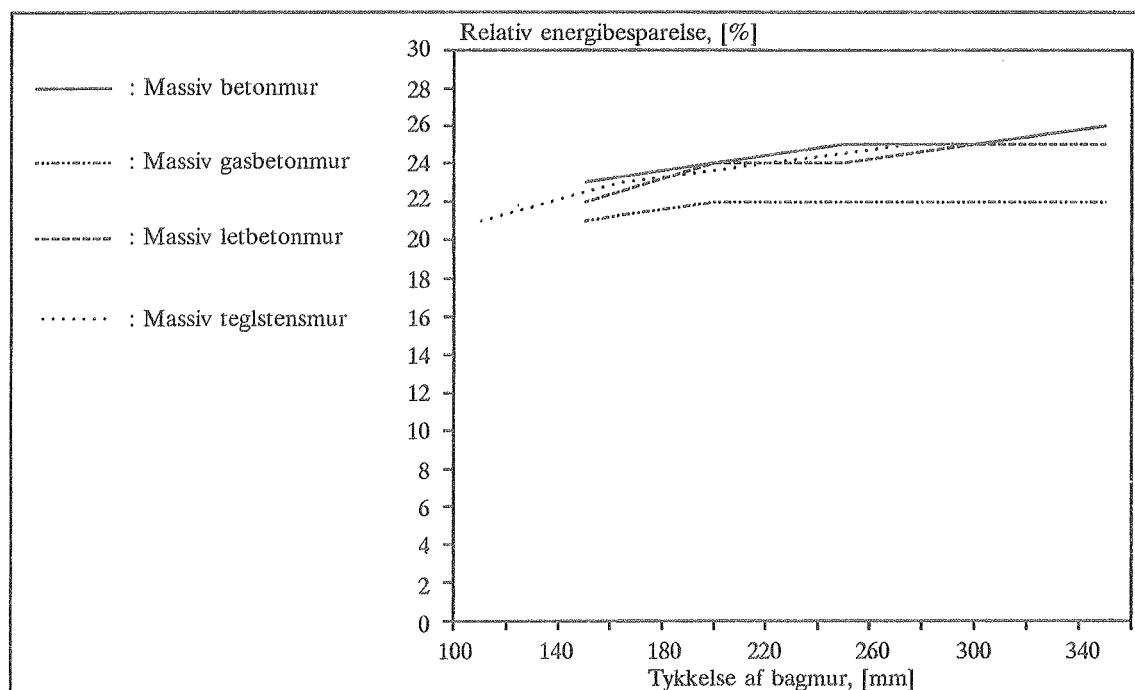
De i kap. 5.3.2 omtalte bagmure er vurderet ved anvendelse af et dæklag med 100 mm honeycombs. Et repræsentativt dæklag for højtydende honeycomb-strukturer er type G, hvorfor dette er benyttet i beregningerne.

I figur 5.6 på næste side er vist, hvordan den relative energibesparelse ændres ved forskellige tykkelser af de massive bagmurskonstruktioner (type A, B, C og D). Af figuren fremgår, at der ikke opnås væsentlige besparelser ved en forøgelse af lagertykkelsen, der oven i købet vil fordyre solvæggen, både hvad angår materialer og montage.

For de forskellige "hybride" bagmurskonstruktioner opnås følgende besparelser:

E = 1915 kWh/år ≈ 25%, F = 2005 kWh/år ≈ 26% og G = 1940 kWh/år ≈ 25%. De hybride konstruktioner bevirker således ikke besparelser, der er større end de mere simple massive konstruktioner. Da hybride bagmure desuden vil være væsentligt dyrere end massive bagmure, vil sådanne konstruktioner ikke være interessante, med mindre de vil bevirke, at risikoen for termisk diskomfort i form af overtemperaturer i varme solrige perioder elimineres. Dette er undersøgt i kap. 5.3.2.

Hvad angår energibesparelser kontra pris fremgår af ovenstående, at en bagmur opbygget af 150 mm beton (type A) vil være optimal.



Figur 5.6 Relative energibesparelser, R, for forskellige massive bagmurskonstruktioner til uventilerede solvægge.

Temperaturreguleringssystemer

Som for lagersystemerne er også de forskellige metoder til reduktion af overtemperaturer vurderet med et dæklag af honeycombs (type G). Som bagmur er benyttet 150 mm beton (bagmur type A). I tabel 5.5 er vist, hvorledes de forskellige temperaturreguleringssystemer påvirker energiforbruget og de mulige energibesparelser. I tabellen er desuden vist, hvordan forholdene er uden anvendelse af temperaturreguleringssystem (i tabel 5.5 angivet som Uden).

System	Energiforbrug [kWh/år]	Energibesparelse		
		[kWh/år]	[%]	[kWh/m ² år]
A1	6050	1700	22	46
A2	6140	1605	21	44
B1	5995	1755	23	48
C1	6140	1610	21	44
D1	6000	1750	23	48
D2	6115	1635	21	45
Uden	5975	1775	23	48

Tabel 5.5 Energiforbrug og -besparelser ved anvendelse af forskellige temperaturreguleringssystemer i uventilerede solvægge.

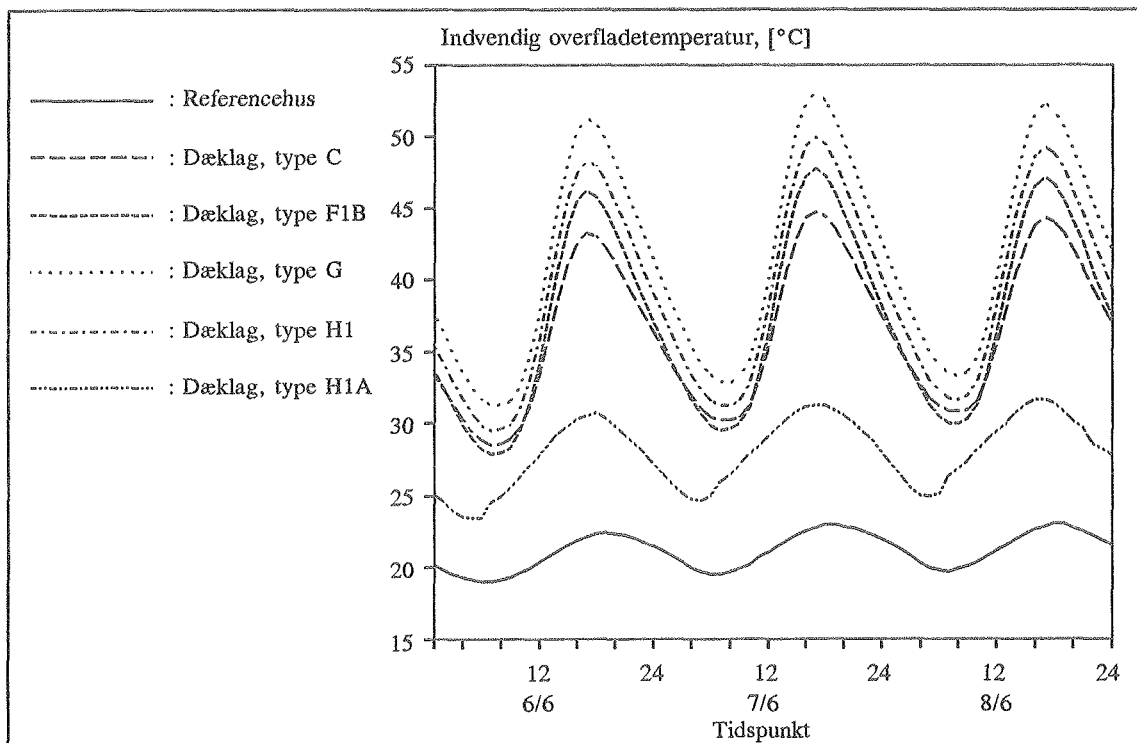
Af tabel 5.5 fremgår, at der ikke er stor forskel på de mulige energibesparelser ved anvendelse af de forskellige temperaturreguleringsystemer. Afgørende for hvilket system, der bør anvendes, er derfor, i hvor høj grad overtemperaturer undgås. Dette er vurderet i kap. 5.3.2.

5.3.2 Termisk komfort

Risikoen for termisk diskomfort i form af overtemperaturer er vurderet ved at sammenligne rumluft- og overfladetemperaturer for de forskellige udformninger af solvægge. Sammenligningen er foretaget i perioden 6/6 - 8/6, der ifølge [12] er en særlig varm og solrig periode.

Dæklagssystemer

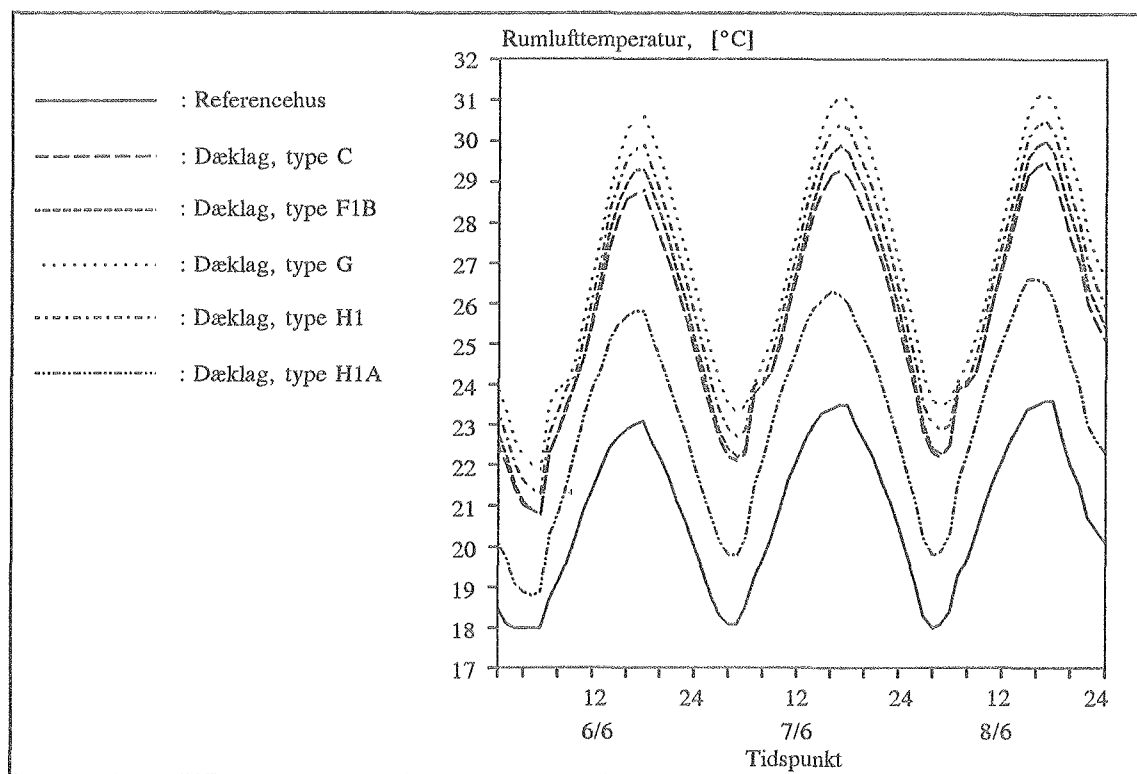
De forskellige dæklagssystemer er vurderet med en bagmur af 150 mm massiv beton (bagmur type A). I figur 5.7 er vist den indvendige overfladetemperatur i et sydvendt rum, når dette forsynes med solvægge med forskellige typer dæklag. Endvidere er vist den indvendige overfladetemperatur i et sydvendt rum i referencehuset. I figur 5.8 er vist de tilsvarende rumlufttemperaturer.



Figur 5.7 Indvendige overfladetemperaturer i et sydvendt rum med uventilerede solvægge med forskellige typer dæklag samt den indvendige overfladetemperatur i et sydvendt rum i referencehuset.

Af figur 5.7 fremgår, at der ved anvendelse af uventilerede solvægge med dæklag med transparent isolering vil være tale om særdeles høje indvendige overfladetemperaturer, uanset hvilken type dæklag, der benyttes ($\Delta T = 20 - 30$ °C). Det ses desuden, at solvæggen med

isolering på bagmuren (type H1A) resulterer i lavere indvendige overfladetemperaturer end de øvrige solvægge ($\Delta T = 5 - 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$).



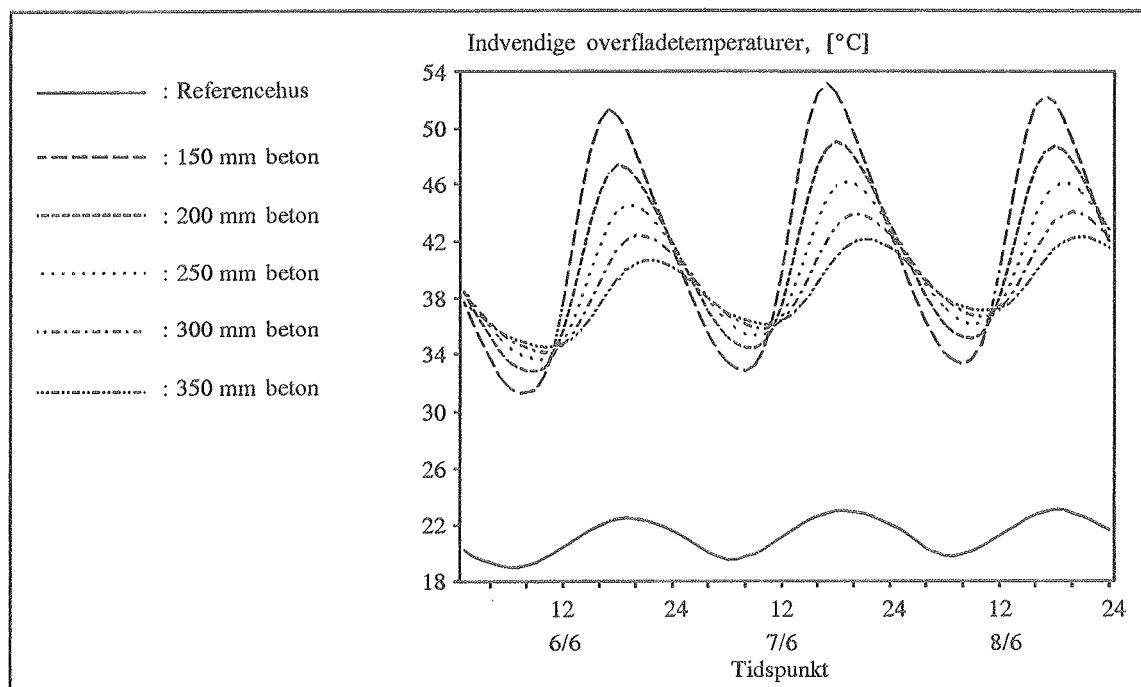
Figur 5.8 Rumlufttemperaturer i et sydvendt rum med uventilerede solvægge med forskellige typer dæklag samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.

Af figur 5.8 ses, at der om sommeren vil være tale om uacceptabelt høje rumlufttemperaturer, uanset hvilken type solvæg der benyttes ($\Delta T = 3 - 9 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Det ses desuden, at solvæggen med isolering på bagmuren (type H1) resulterer i lavere rumlufttemperaturer end de øvrige solvægge ($\Delta T = 2 - 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

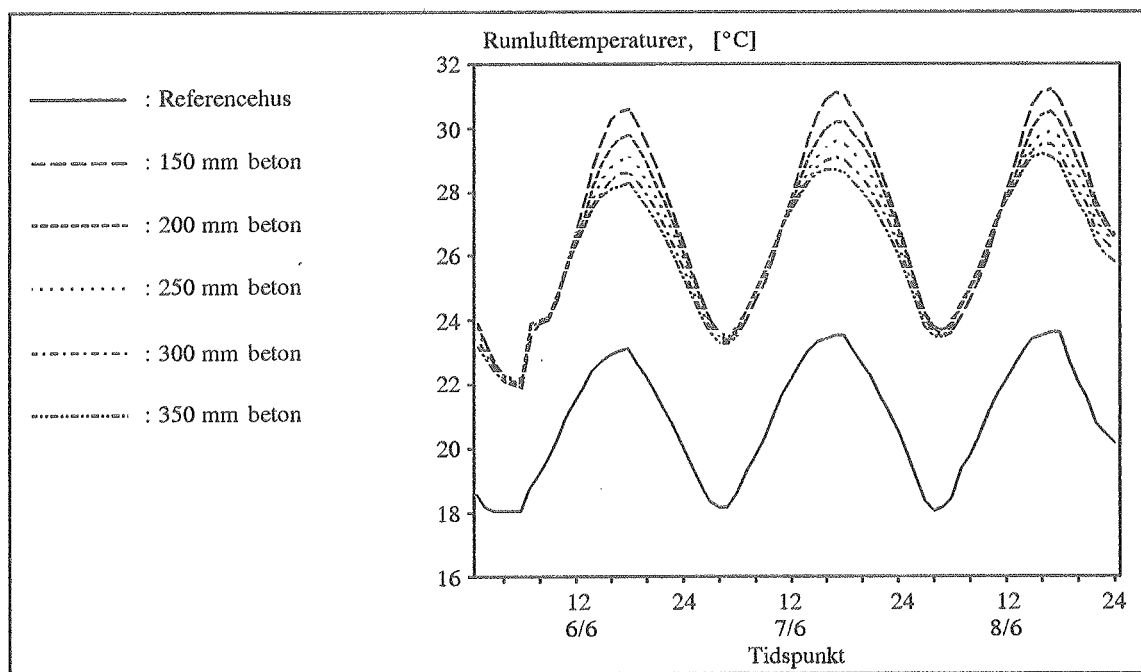
Uanset hvilken type dæklag der benyttes, må det således konkluderes, at der ved anvendelse af transparent isolerede uventilerede solvægge i nybyggeri vil være behov for en eller anden form for temperaturreguleringssystem. Dette kan f.eks. ske i form af lagring af overskudsvarmen i solvæggens bagmur. Effekten heraf er undersøgt nedenfor.

Bagmure

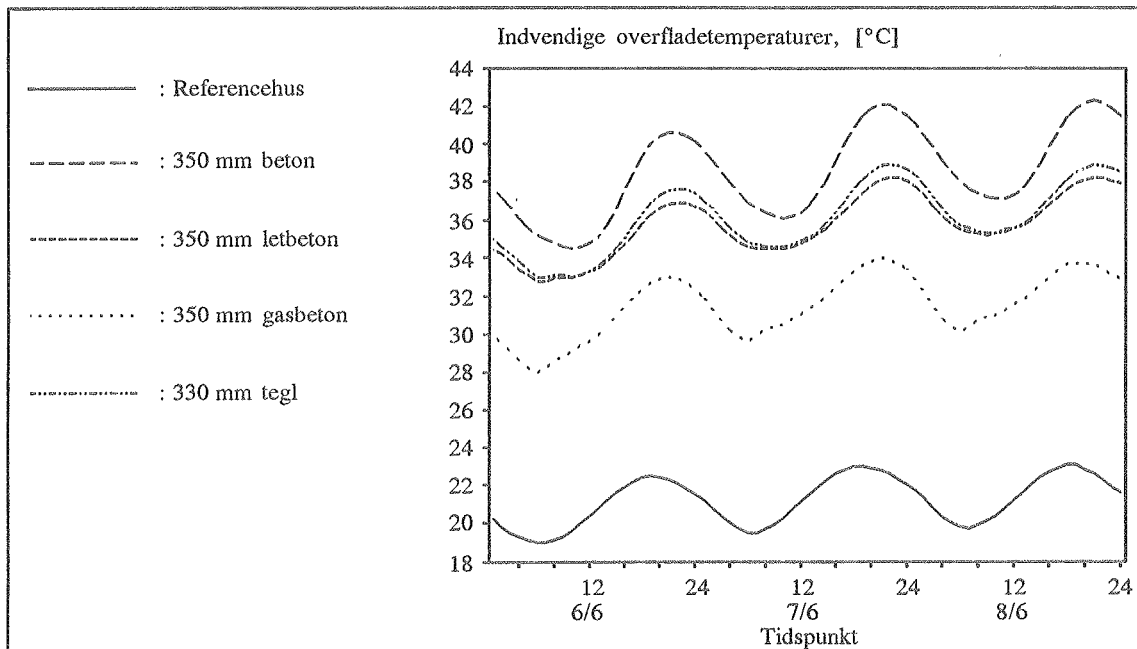
Lagersystemerne er vurderet med dæklag med 100 mm honey-combs (type G). I figur 5.9 - 5.14 er vist de indvendige overfladetemperaturer og rumlufttemperaturer i et sydvendt rum, når dette forsynes med solvægge med forskellige typer bagmure. I figurerne er desuden vist de tilsvarende temperaturer i et sydvendt rum i referencehuset.



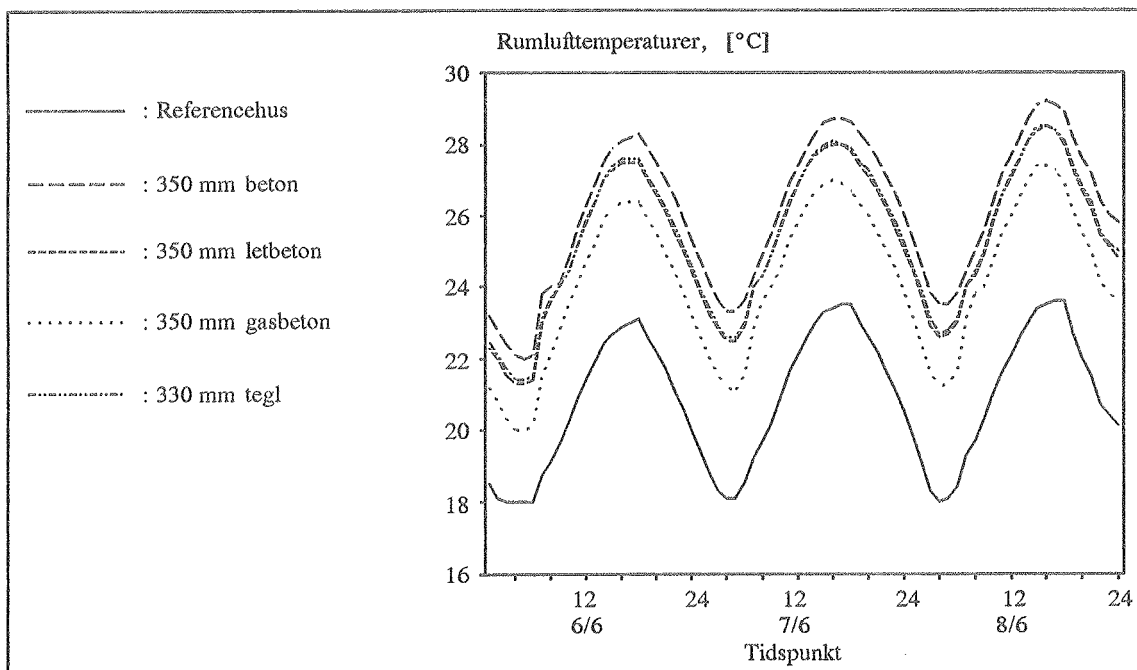
Figur 5.9 Indvendige overfladetemperaturer i et sydvendt rum med en uventileret solvæg med en bagmur opbygget af mellem 150 og 350 mm beton, samt den indvendige overfladetemperatur i et sydvendt rum i referencehuset.



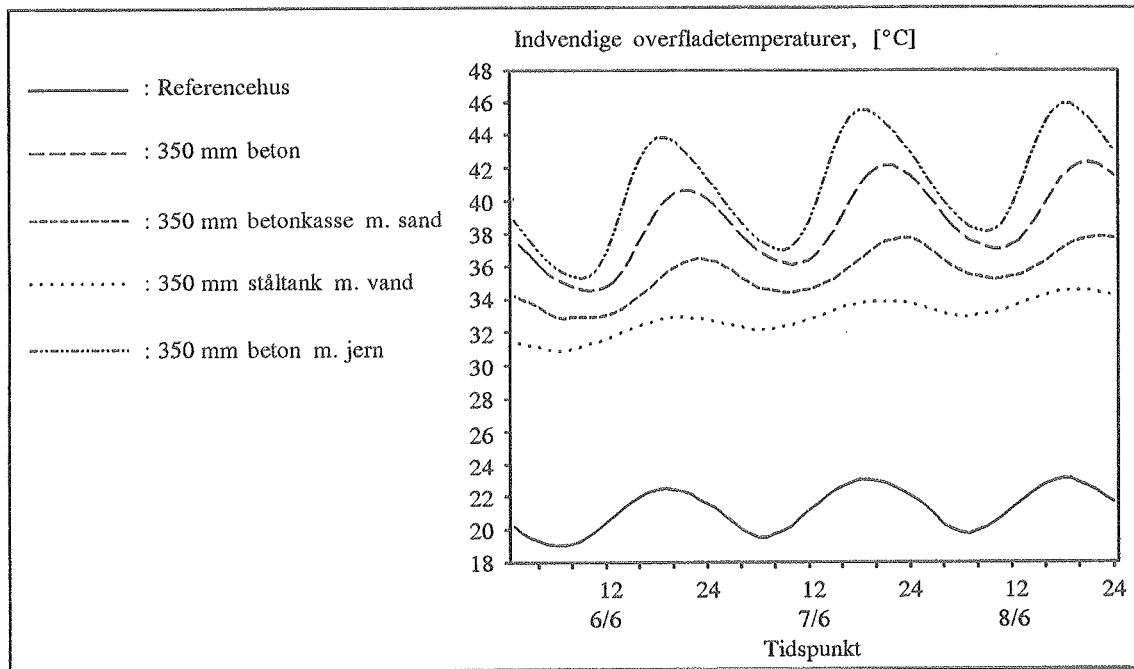
Figur 5.10 Rumlufthtemperaturer i et sydvendt rum med en uventileret solvæg med en bagmur opbygget af mellem 150 og 350 mm beton, samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.



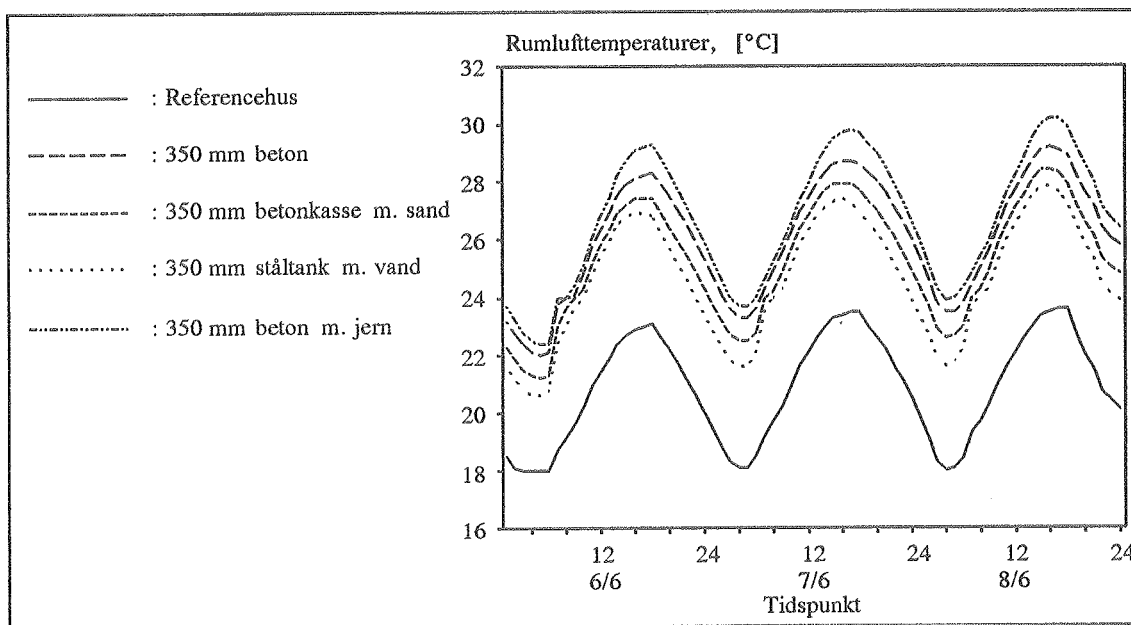
Figur 5.11 Indvendige overfladetemperaturer i et sydvendt rum med en uventileret solvæg med en bagmur opbygget af hhv. 350 mm beton, letbeton eller gasbeton eller 330 mm tegl, samt den indvendige overfladetemperatur i et sydvendt rum i referencehuset.



Figur 5.12 Rumlufttemperaturer i et sydvendt rum med en uventileret solvæg med en bagmur opbygget af hhv. 350 mm beton, letbeton eller gasbeton eller 330 mm tegl, samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.



Figur 5.13 Indvendige overfladetemperaturer i et sydvendt rum med en uventileret solvæg med en bagmur opbygget af 350 mm beton eller forskellige hybrider med sand, vand eller jern, samt den indvendige overfladetemperatur i et sydvendt rum i referencehuset.



Figur 5.14 Rumløfttemperaturer med en bagmur opbygget af 350 mm beton eller forskellige hybrider med sand, vand eller jern, samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.

Af figur 5.9 til 5.14 fremgår, at jo større termisk masse, der findes i bagmuren, jo mindre bliver generne i form af overtemperaturer. Det ses imidlertid også, at selv ved anvendelse af 350 mm beton eller forskellige tunge hybride bagmure er det stadig nødvendigt med en eller anden form for temperaturreguleringsystem for at sikre termisk komfort i sommerperioden. Effektiviteten af forskellige deciderede temperaturreguleringsystemer er undersøgt nedenfor.

Temperaturreguleringsystemer

De forskellige metoder til reduktion af overtemperaturer er vurderet med en bagmur med 150 mm beton, da anvendelsen af meget tykke bagmure ikke giver tilstrækkeligt store reduktioner af overflade- og rumlufttemperaturerne. Som dæklag er benyttet 100 mm honeycombs (type G). I figur 5.15 - 5.18 er vist de indvendige overfladetemperaturer og rumlufttemperaturerne i et sydvendt rum, når dette forsynes med solvægge med forskellige temperaturreguleringsystemer. I figurene er desuden vist de tilsvarende temperaturer i et sydvendt rum i referencehuset.

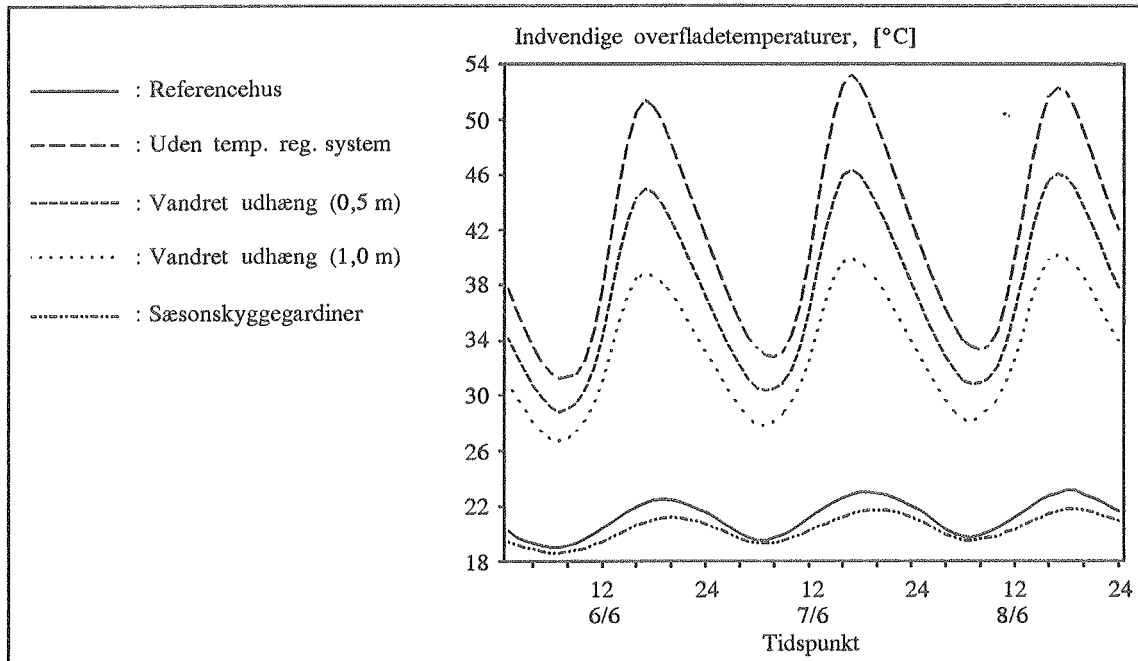
Af figur 5.15 og 5.16 ses, at vandrette udhæng på hhv. 0,5 m og 1,0 m medfører en reduktion af overtemperaturerne på ca. 25 og 50%.

Det ses desuden, at anvendelsen af sæsonskyggegardiner medfører, at der ikke forekommer overtemperaturer.

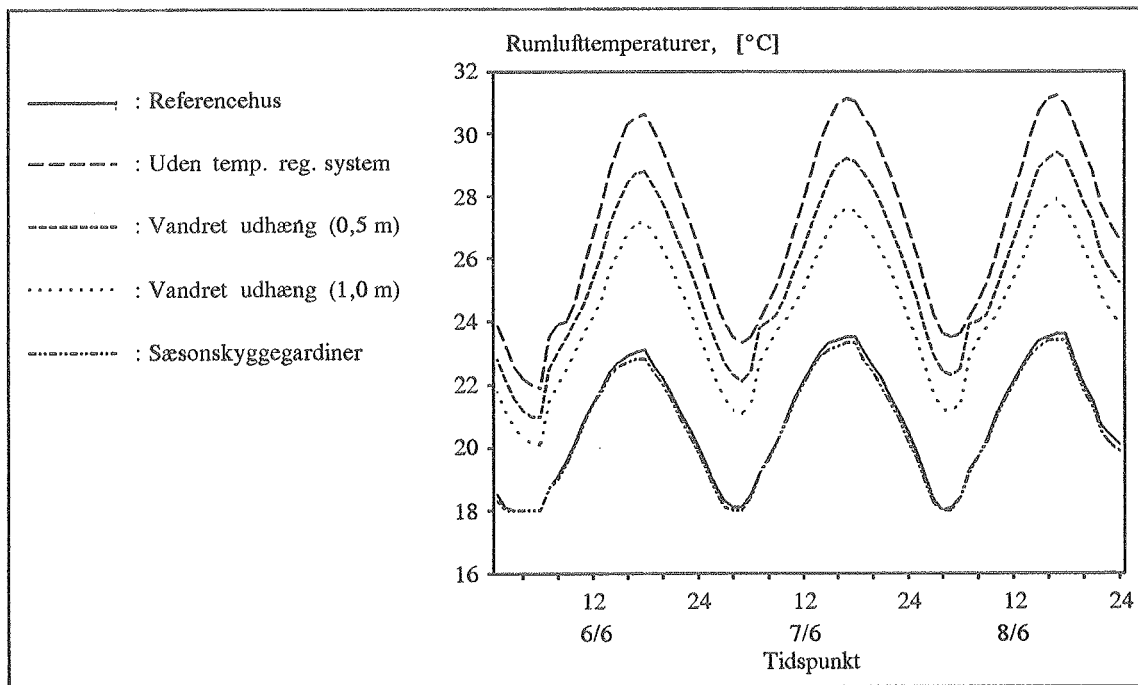
Figur 5.17 og 5.18 viser, at en ventilation med udeluft mellem absorber og dæklag praktisk talt ikke vil betyde nogen reduktion af overtemperaturerne. Dette skyldes, at den udeluft, der ventileres med, ikke er kold nok, da ventilationen sker i særligt varme og solrige perioder.

En indvendig efterisolering med hhv. 25 mm og 50 mm mineraluld medfører en reduktion af overtemperaturerne på ca. 40% og 60%. Et temperaturreguleringsystem med en indvendig efterisolering med 50 mm mineraluld er principielt indbygget i den type U-II solvæg, der er beskrevet i kap. 5.2.1.

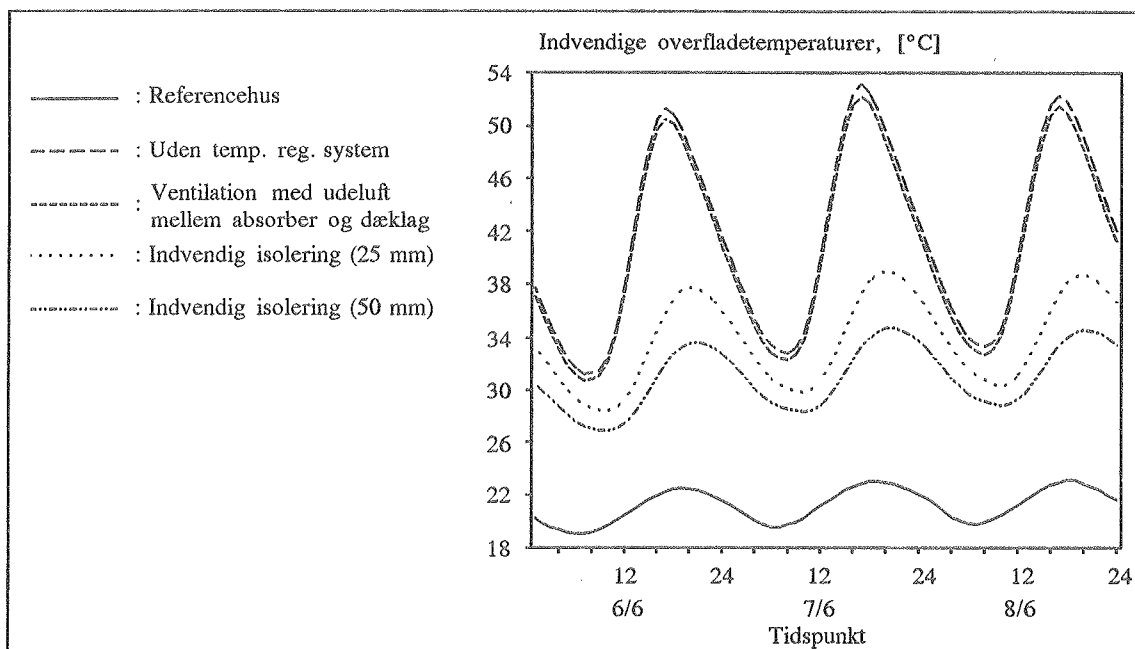
Af ovenstående fremgår, at det er muligt at konstruere simple temperaturreguleringsystemer til uventilerede solvægge, der ikke eller kun i kortere tidsrum i særligt varme og solrige perioder vil medføre termisk diskomfort i form af overtemperaturer.



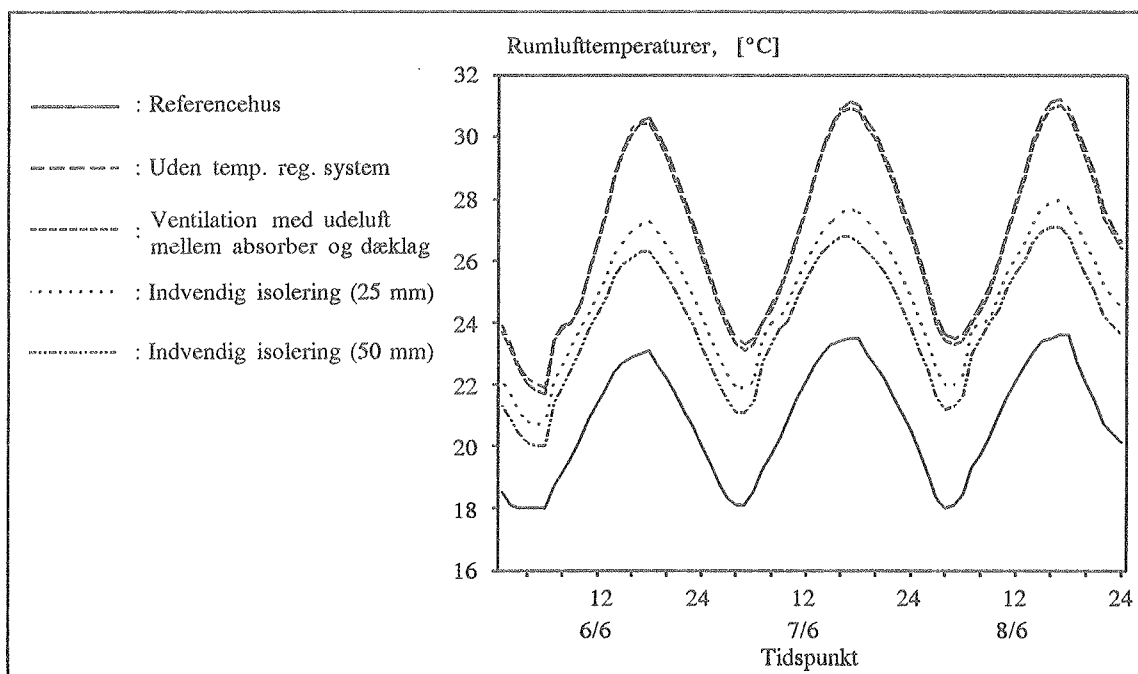
Figur 5.15 Indvendige overfladetemperaturer i et sydvendt rum med en uventileret solvæg med og uden temperaturreguleringssystemer: Vandret udhæng (0,5 og 1,0 m) og sæsonskyggegardiner, samt den indvendige overfladetemperatur i et sydvendt rum i referencehuset.



Figur 5.16 Rumløfttemperaturer i et sydvendt rum med en uventileret solvæg med og uden temperaturreguleringssystemer: Vandret udhæng (0,5 og 1,0 m) og sæsonskyggegardiner, samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.



Figur 5.17 Indvendige overfladetemperaturer i et sydvendt rum med en uventileret solvæg med og uden temperaturreguleringsystemer: Ventilation med udeluft mellem dæklag og absorber og indvendig isolering med mineraluld (25 og 50 mm), samt den indvendige overfladetemperatur i et sydvendt rum i referencehuset.



Figur 5.18 Rumløfttemperaturer i et sydvendt rum med en uventileret solvæg med og uden temperaturreguleringsystemer: Ventilation med udeluft mellem dæklag og absorber og indvendig isolering med mineraluld (25 og 50 mm), samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.

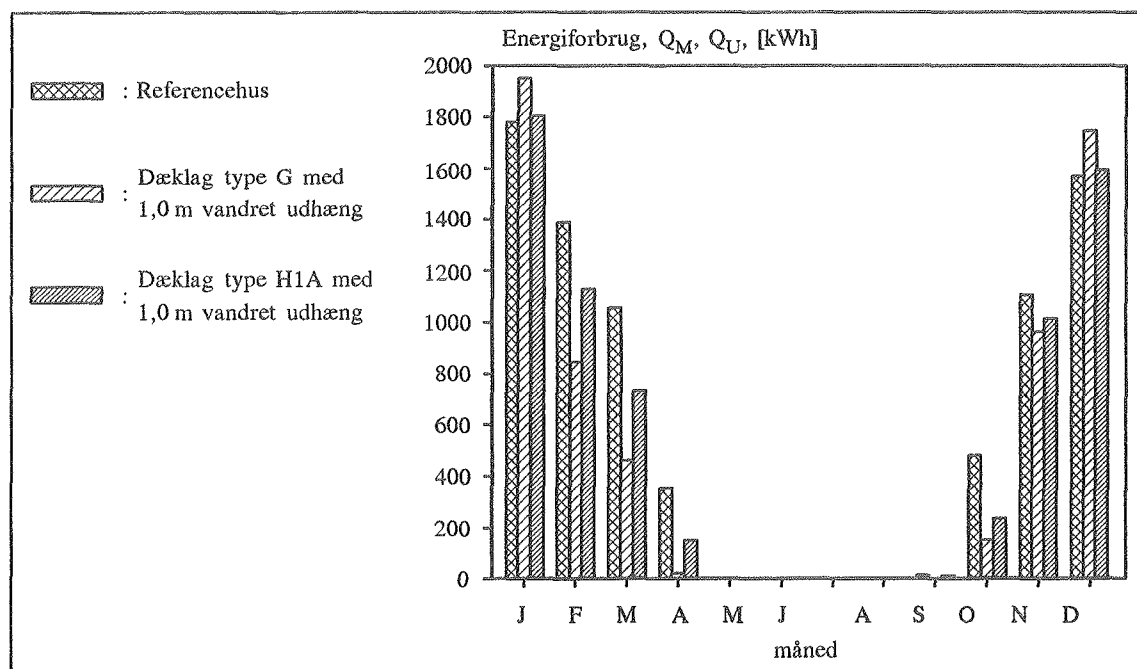
5.3.3 Optimal udformning af uventileret solvæg

På baggrund af de gennemførte analyser er nedenfor beskrevet 2 energi- og komfortmæssigt optimale uventilerede solvægge: Type U-I og type U-II. Solvæggens funktion og principielle udformning er beskrevet og vist i hhv. kap. 5.2.1 og figur 5.3 og 5.4, idet begge solvæggene desuden er forsynet med udvendige vandrette udhæng på 1,0 m. Der er ikke anbefalet de tidligere omtalte sæsonskyggegardiner, da opsætning og nedtagning af disse kun kan forventes at blive udført af særligt idealistiske og energibevidste brugere, ligesom automatiske sæsonskyggegardiner endnu ikke er tilstrækkeligt driftssikre og billige til, at de vil være aktuelle. Det skal dog erindres, at anvendelsen af sæsonskyggegardiner vil fjerne risikoen for termisk diskomfort i form af overtemperaturer. Begge solvægge har en bagmur af 150 mm beton. Type U-I har et dæklag opbygget af 1 lag jernfrit hærdet glas, 100 mm honeycombs og en almindelig matsort absorber. Type U-II har et dæklag opbygget af 1 lag jernfrit hærdet glas, 2 lag teflon folier og en selektiv absorber. I forhold til referencehuset udgør den relative energibesparelse, R , og den årlige energibesparelse pr. kvadratmeter solvæg, q_b , henholdsvis:

$$R_{U-I} = 21\%, \quad q_{b,U-I} = 43,8 \text{ kWh/m}^2\text{år}, \quad R_{U-II} = 14\%, \quad q_{b,U-II} = 30,3 \text{ kWh/m}^2\text{år}$$

For de to typer solvægge reducerer anvendelsen af et vandret udhæng effektiviteten af solvæggene med hhv. 2 og 4%.

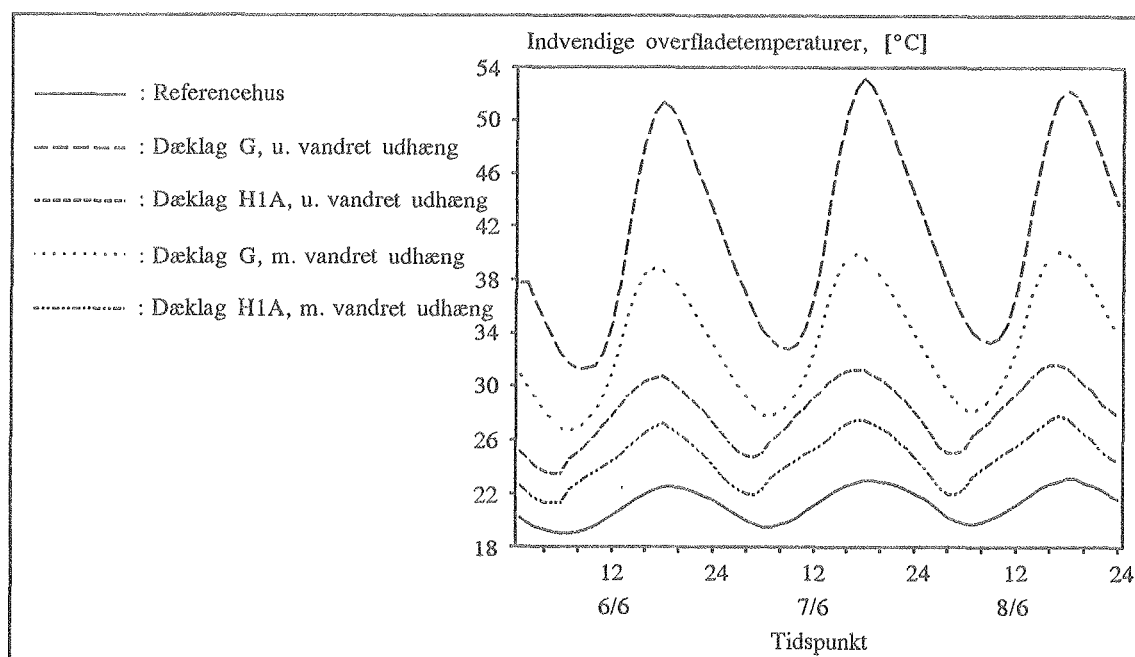
Energiforbruget til rumopvarmning pr. måned for de 2 typer solvægge samt referencehuset er vist i figur 5.19.



Figur 5.19 Energiforbrug til rumopvarmning med uventilerede solvægge med et vandret udhæng på 1,0 m; dæklag: 100 mm honeycombs (type G) eller to lag teflon folier og selektiv absorber (type H1A), bagmur: 150 mm beton med eller uden 50 mm indvendig isolering, samt energiforbruget til rumopvarmning i referencehuset.

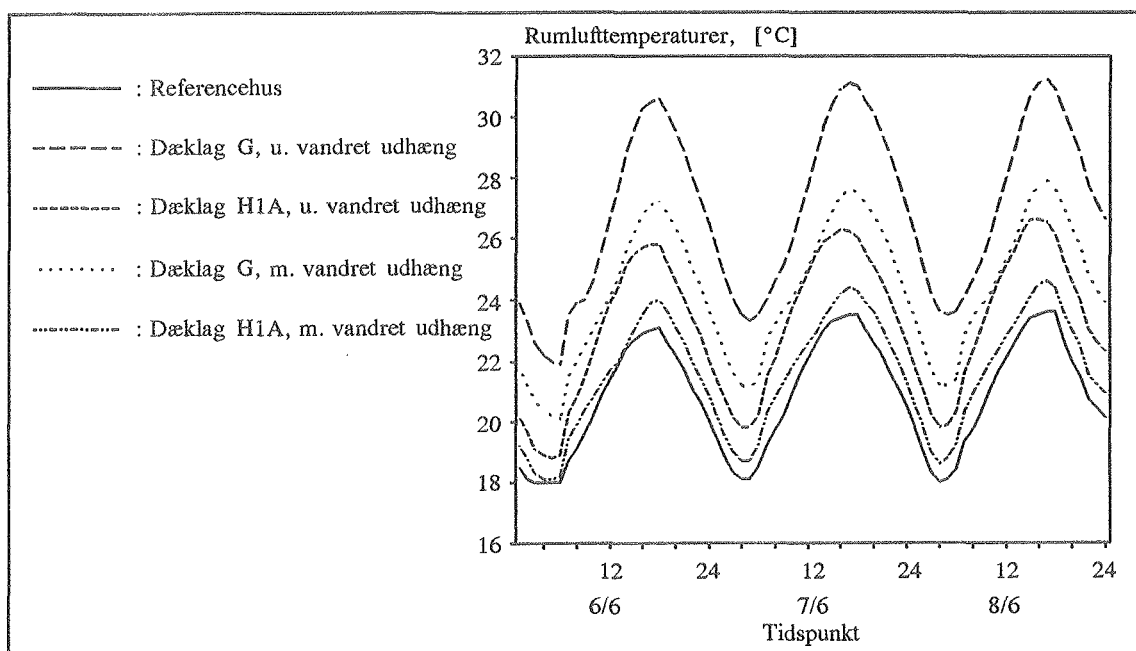
Af figur 5.19 fremgår, at der ved anvendelse af uventilerede solvægge kan opnås en reduktion af fyringssæsonen på 1-2 måneder (april og oktober) afhængigt af, hvilken af de 2 typer solvægge der benyttes.

Det termiske indeklima kan vurderes vha. figur 5.20 og 5.21, hvori er vist hhv. de indvendige overfladetemperaturer og rumlufttemperaturerne i et sydvendt rum, når dette er forsynet med en af de 2 typer solvægge uden eller med et vandret udhæng på 1,0 m. I figurerne er desuden vist de tilsvarende temperaturer i referencehuset.



Figur 5.20 Indvendige overfladetemperaturer i et sydvendt rum med uventilerede solvægge uden eller med et vandret udhæng på 1,0 m; dæklag: 100 mm honeycombs (type G) eller to lag teflon folier og selektiv absorber (type H1A), bagmur: 150 mm beton med eller uden 50 mm indvendig isolering, samt de indvendige overfladetemperaturer i et sydvendt rum i referencehuset.

Det fremgår af figur 5.20, at der sker betydelige reduktioner af de indvendige overfladetemperaturer ved anvendelse af vandrette udhæng. Solvæggen af type U-I vil dog stadig resultere i indvendige overfladetemperaturer, der i kortere perioder vil medføre termisk diskomfort i form af overtemperaturer ($\Delta T = 8 - 16^\circ\text{C}$) for personer, der opholder sig i umiddelbar nærhed af solvæggens inderside. For solvæggen af type U-II vil de tilsvarende overtemperaturer i umiddelbar nærhed af solvæggens inderside blot være ca. 5°C .



Figur 5.21 Rumløfttemperaturer i et sydvendt rum med uventilerede solvægge uden eller med et vandret udhæng på 1,0 m; dæklag: 100 mm honeycombs (type G) eller to lag teflon folier og selektiv absorber (type H1A), bagmur: 150 mm beton med eller uden 50 mm indvendig isolering, samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.

Anvendelsen af solvæggen af type U-I medfører, at rumlufttemperaturerne i kortere perioder bliver 2 - 5°C højere end rumlufttemperaturerne i referencehuset. For solvæggen af type U-II bliver de tilsvarende rumlufttemperaturer blot 1°C højere end rumlufttemperaturerne i referencehuset.

Anvendelsen af solvægge af type U-I og U-II vil således kun medføre termisk diskomfort i kortere særligt varme og solrige perioder. Da solvæggene samtidig bevirker en betydelig reduktion af energiforbruget til rumopvarmning, vil de kunne udgøre et attraktivt alternativ til traditionelle højisolerede ydervægskonstruktioner i fremtidens boligbyggeri.

5.4 Ventilerede solvægge

5.4.1 Systembeskrivelse

I det følgende er vurderet tre typer ventilerede solvægge. Den eneste forskel på de tre typer er, hvorvidt den opvarmede luft tilføres direkte til opholdszonen, eller om luften gemmes i et lager til senere brug. Selve solvæggen er en traditionel ventileret solvæg med en bagmur opbygget af et bærende stålskelet, imellem hvilket der er isoleret med 150 mm mineraluld. Stålskelettet er på ydersiden beklædt med en temperaturbestandig fiberbaseret plade (navilit el. lign.). På indersiden er beklædt med to gipsplader, imellem hvilke der er placeret en dampspærre.

I type V-I tilføres den opvarmede luft direkte til opholdszonen ved naturlig ventilation gennem åbninger i top og bund. Udenfor fyringssæsonen, i nattetimerne samt i særligt varme og solrige perioder i fyringssæsonen lukkes disse åbninger manuelt, hvorved både varmetabet i nattetimerne og risikoen for overtemperaturer reduceres. Energiforbruget til rumopvarmning i det nye referencehus er 6790 kWh/år.

I type V-II lagres den opvarmede luft i huldæk i bygningskonstruktionen, hvorefter den tilføres opholdszonen, når der er behov for opvarmning af denne. For at kunne lagre varmen i huldæk i terrændækkonstruktionen, må disse isoleres mod jorden. Isoleringen er udført med 150 mm lecanødder over og under 200 mm Sundolitt dæk-plader. Solvæggene af type V-II er således vurderet i forhold til det oprindelige referencehus samt et referencehus isoleret lige så effektivt som terrændækkonstruktionen i huse med solvægge af type V-II. Energiforbruget til rumopvarmning i det nye referencehus er 6720 kWh/år.

I type V-III lagres den opvarmede luft i et stenlager under huset, hvorefter luften tilføres opholdszonen, når der er behov for opvarmning af denne. For at kunne udnytte den lagrede varme i stenlageret, er dette isoleret mod jorden. Isoleringen under stenlageret er udført med 150 mm lecanødder over og under 200 mm Sundolitt dæk-plader. Fundamentet er indvendigt isoleret med 125 mm trykfast mineraluld og udvendigt med 75 mm Sundolitt dræn-plader. Solvæggene af type V-III er således vurderet i forhold til det oprindelige referencehus samt et referencehus, hvor terrændækkonstruktionen er isoleret lige så effektivt som stenlageret i huse med solvægge af type V-III.

5.4.2 Dæklagssystemer

I vurderingen af attraktive dæklagssystemer er benyttet flere af de dæklagssystemer, der også er benyttet i de uventilerede solvægge, nemlig type A2, C, E, G og H1. Herudover er benyttet to simplere dæklagssystemer, nemlig hhv. et (type 1) eller to (type 2) lag hærdet jernfrit glas. De termiske og optiske egenskaber for disse to typer dæklag er:

$$\begin{array}{lll} \text{Type 1:} & U_L = 6.0 \text{ W/m}^2\text{K}, & (\tau\alpha)_{e,\text{dir}} = 0,84, \quad (\tau\alpha)_{e,\text{dif}} = 0,74 \\ \text{Type 2:} & U_L = 3.1 \text{ W/m}^2\text{K}, & (\tau\alpha)_{e,\text{dir}} = 0,75, \quad (\tau\alpha)_{e,\text{dif}} = 0,65 \end{array}$$

5.4.3 Bagmure

Udover en højisoleret bagmur med 150 mm mineraluld er vurderet effekten af at udføre bagmurene som type A, B, C og D i de uventilerede solvægge.

5.4.4 Temperaturreguleringssystemer

Som temperaturreguleringssystemer er benyttet flere af de i de uventilerede solvægge benyttede systemer, nemlig type A2, B og D2.

5.5 Vurdering af forskellige udformninger af ventilerede solvægge

I det følgende er vurderet, hvordan de forskellige udformninger af ventilerede solvægge vil påvirke de mulige energibesparelser og den termiske komfort. I analysen er som for de uventilerede solvægge benyttet 36,7 m² solvægge placeret i en sydvendt facade i et typisk parcelhus. Energibesparelserne er alle relateret til energiforbruget referencehuset.

5.5.1 Energibesparelser

Dæklagssystemer

Dæklagssystemerne er vurderet for alle tre typer ventilerede solvægge. Udformningen af de forskellige typer dæklag (A2, C, E, G og H1 samt 1 og 2) er beskrevet i kap. 5.2.2 og kap. 5.4.2. Som bagmur er benyttet en højisoleret konstruktion med 150 mm mineraluld. I tabel 5.6 er anført energiforbruget til rumopvarmning, Q_M , de relative energibesparelser, R , samt energibesparelserne pr. m^2 solvæg, q_b , for de tre typer solvægge. For solvæggene type V-II og V-III er sammenlignet med både det oprindelige referencehus og det i kap. 5.4.1 beskrevne nye referencehus.

Solvægstype	Dæklagstype	Energiforbrug Q_M , [kWh/år]	Energibesparelse	
			R , [%]	q_b , [kWh/ m^2]
V-I	1	7265	6	13
	2	6865	11	24
	A2	6210	20	42
	C	5965	23	49
	E	6485	16	34
	G	5800	25	53
	H1	6060	22	46
V-II	1	6540	16 - 4	33 - 8
	2	6230	20 - 8	41 - 17
	A2	5490	29 - 19	61 - 40
	C	4995	36 - 26	75 - 56
	E	5395	30 - 21	64 - 43
	G	4910	37 - 28	77 - 59
	H1	5240	32 - 23	68 - 48
V-III	1	5880	24 - 13	51 - 23
	2	5225	33 - 22	69 - 41
	A2	4380	43 - 35	92 - 64
	C	4315	44 - 36	94 - 66
	E	4920	36 - 27	77 - 49
	G	3995	48 - 41	102 - 74
	H1	4270	45 - 36	95 - 67

Tabel 5.6 Energiforbrug til rumopvarmning, Q_M , relative energibesparelser, R , samt energibesparelser pr. m^2 solvæg, q_b , for forskellige dæklagssystemer til ventilerede solvægge (type V-I, V-II og V-III).

For alle 3 typer ventilerede solvægge ses, at der opnås de største besparelser med et dæklag med 100 mm honeycombs (type G). Det ses desuden, at det for solvæggene af type V-II og V-III er muligt at opnå betydelige reduktioner af energiforbruget til rumopvarmning i forhold til det oprindelige referencehus, idet energiforbruget kan reduceres til hhv. 37 og 48%.

Bagmure

De forskellige bagmure er vurderet for alle tre typer ventilerede solvægge. Udformningen af de forskellige typer bagmure (A, B, C og D) er beskrevet i kap. 5.2.3. Som dæklag er anvendt 100 mm honeycombs (type G). Energiforbruget til rumopvarmning, Q_M , de relative energibesparelser, R , samt energibesparelserne pr. m^2 solvæg for de tre typer solvægge er anført i tabel 5.7.

Solvægstype	Bagmur	Energiforbrug Q_M , [kWh/år]	Energibesparelse	
			R , [%]	q_b , [kWh/ m^2 år]
V-I	150 mm mineraluld	5800	25	53
	A	6050	22	46
	B	6005	23	48
	C	6100	21	45
	D	6080	22	46
V-II	150 mm mineraluld	4910	37 - 28	77 - 51
	A	5190	33 - 24	70 - 44
	B	5125	34 - 25	72 - 45
	C	5120	34 - 25	72 - 46
	D	5175	33 - 24	70 - 44
V-III	150 mm mineraluld	3995	48 - 41	102 - 74
	A	4940	36 - 27	77 - 49
	B	4760	39 - 29	82 - 54
	C	4510	42 - 33	88 - 60
	D	4805	38 - 29	80 - 52

Tabel 5.7 Energiforbrug til rumopvarmning, Q_M , relative energibesparelser, R , samt energibesparelser pr. m^2 solvæg, q_b , for forskellige bagmure i ventilerede solvægge (type V-I, V-II og V-III).

Af tabel 5.7 fremgår, at alle de undersøgte bagmure vil bevirke lidt mindre besparelser end bagmuren opbygget af et stålskelet isoleret med 150 mm mineraluld, idet energibesparelserne reduceres med op til hhv. 4, 4 og 8%. Hvorvidt disse bagmure alligevel vil være interessante, afhænger af, i hvor høj grad de er i stand til at begrænse risikoen for termisk diskomfort i form af overtemperaturer. Dette er undersøgt i kap. 5.5.2.

Temperaturreguleringsystemer

De forskellige temperaturreguleringsystemer er vurderet for alle tre typer ventilerede solvægge. Udformningen af de forskellige typer temperaturreguleringsystemer (A2, B og D2) er beskrevet i kap. 5.2.4. Som dæklag er anvendt 100 mm honeycombs (type G). Som bagmur er benyttet en højisoleret konstruktion med 150 mm mineraluld. Energiforbruget til rumopvarmning, Q_M , de relative energibesparelser, R , samt energibesparelserne pr. m^2 solvæg for de tre typer solvægge er anført i tabel 5.8. I tabellen er desuden vist, hvordan forholdene er uden anvendelse af temperaturreguleringsystem (i tabel 5.8 angivet som Uden).

Solvægstype	Temperatur-reguleringsystem	Energiforbrug Q_M , [kWh/år]	Energibesparelse	
			R , [%]	q_b , [kWh/ m^2 år]
V-I	Uden	5800	25	53
	A2	5935	23	49
	B	5810	25	53
	D2	5645	27	57
V-II	Uden	4910	37 - 28	77 - 51
	A2	5140	34 - 24	71 - 45
	B	4915	37 - 28	77 - 51
	D2	4855	37 - 29	79 - 53
V-III	Uden	3995	48 - 41	102 - 74
	A2	4205	46 - 37	97 - 69
	B	3400	48 - 41	102 - 74
	D2	3930	49 - 42	104 - 76

Tabel 5.8 Energiforbrug til rumopvarmning, Q_M , relative energibesparelser, R , samt energibesparelser pr. m^2 solvæg, q_b , for forskellige temperaturreguleringsystemer i ventilerede solvægge (type V-I, V-II og V-III).

Anvendelsen af et vandret udhæng på 1,0 m (type A2) bevirker en reduktion af energibesparelserne for de 3 typer ventilerede solvægge på hhv. 2, 4 og 4%.

Anvendelsen af sæsonskyggegardiner påvirker ikke energiforbruget til rumopvarmning, idet disse kun anvendes udenfor fyringssæsonen.

En indvendig isolering med 50 mm mineraluld ses at forøge energibesparelserne for de 3 typer ventilerede solvægge på hhv. 2, 1 og 1%.

Som for bagmurene gælder, at anvendelsen af temperaturreguleringsystemerne afhænger af, i hvor høj grad de er i stand til at begrænse risikoen for termisk diskomfort i form af overtemperaturer. Dette er undersøgt i kap. 5.5.2.

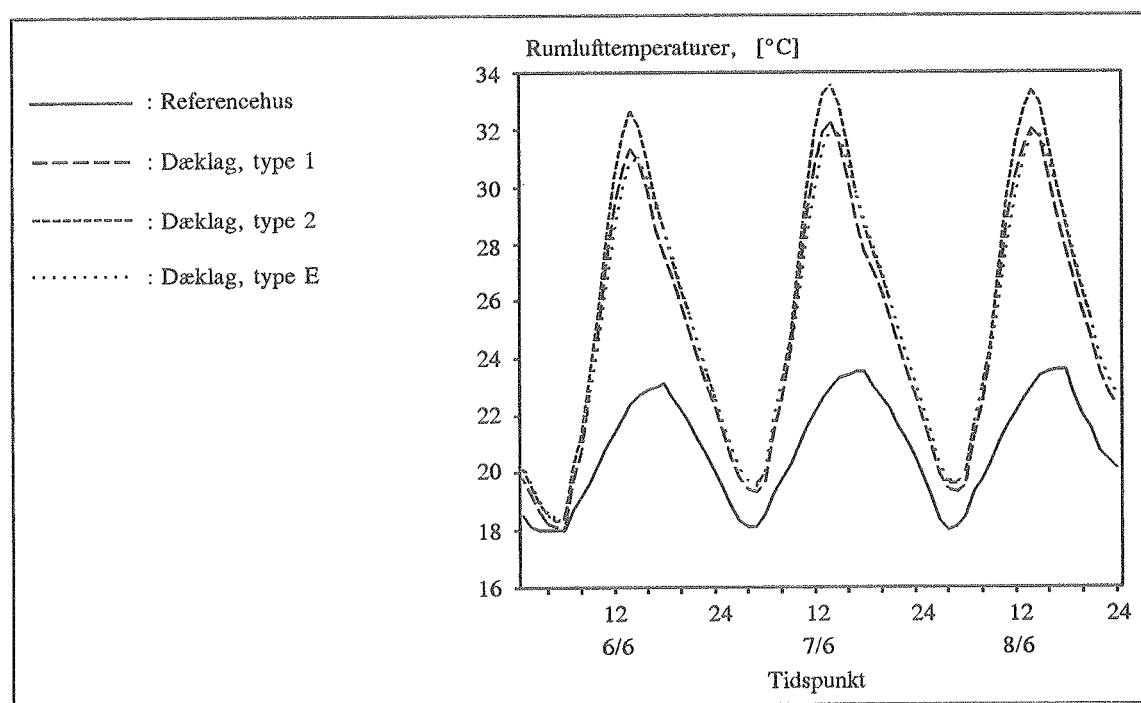
5.5.2 Termisk komfort

Risikoen for termisk diskomfort i form af overtemperaturer er vurderet ved at sammenligne rumluft- og overfladetemperaturer for de forskellige udformninger af solvægge. Sammenligningen er foretaget i perioden 24/4 - 26/4 samt 6/6 - 8/6, der ifølge [12] begge er særligt varme og solrige perioder.

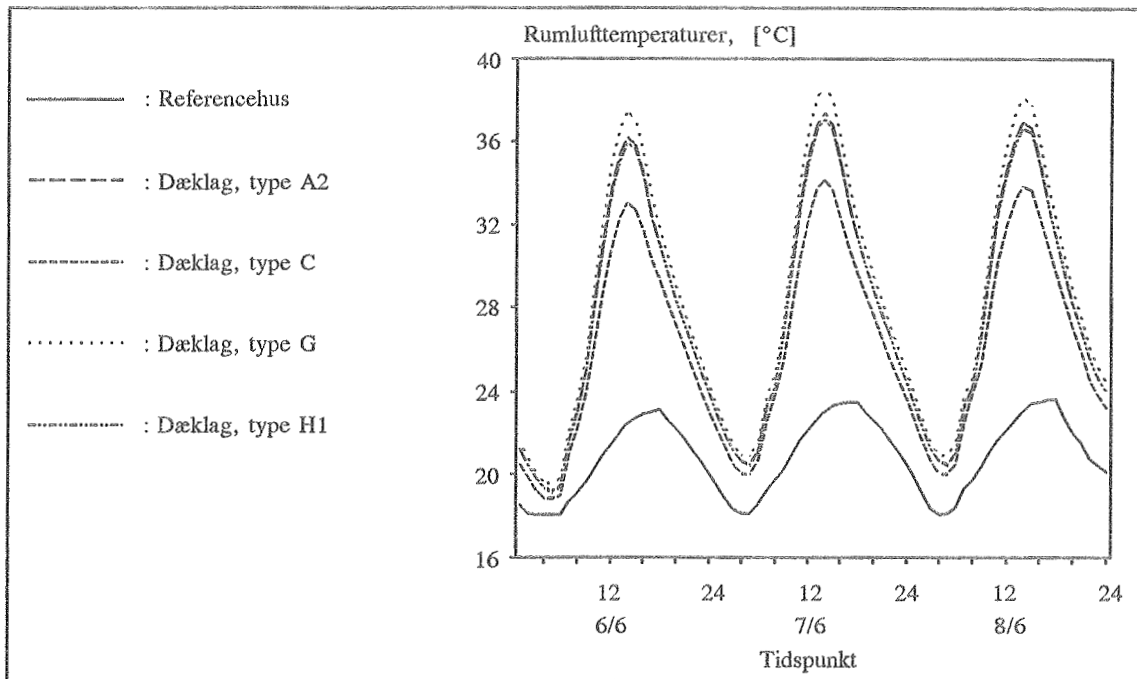
Dæklagssystemer

Dæklagssystemerne er vurderet for alle tre typer ventilerede solvægge. Som bagmur er benyttet en højisoleret konstruktion med 150 mm mineraluld. I figur 5.22 - 5.29 er vist rumlufttemperaturerne samt for type V-II temperaturerne på oversiden af gulvet i et sydvendt rum, når dette forsynes med ventilerede solvægge af type V-I, V-II og V-III med forskellige typer dæklag. Endvidere er vist de tilsvarende temperaturer i de respektive referencehuse.

Solvæg type V-I



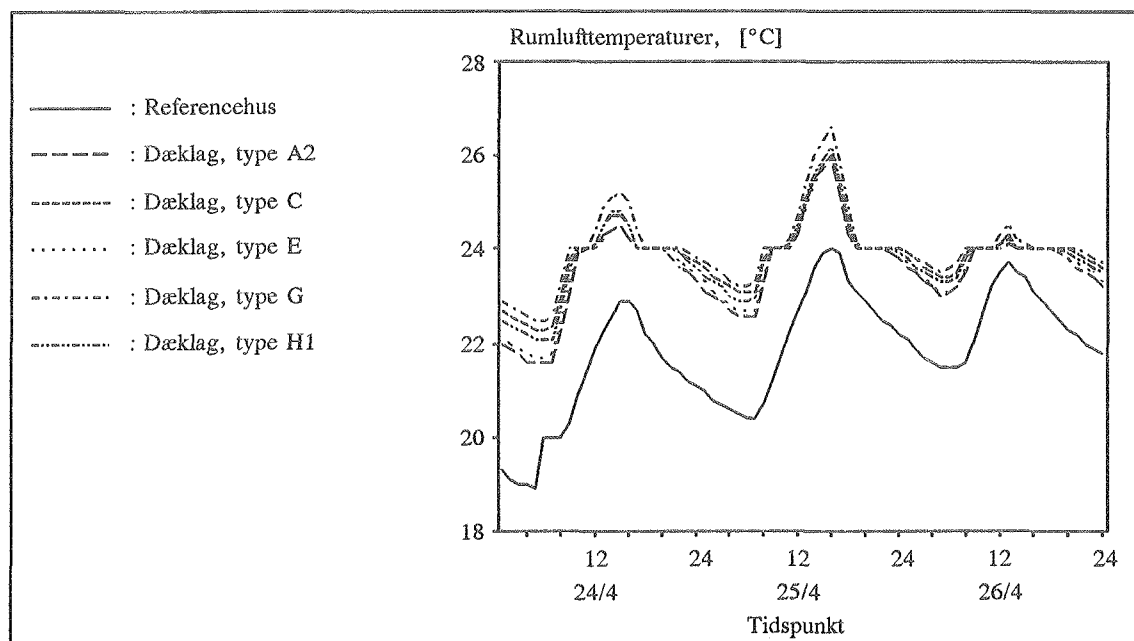
Figur 5.22 Rumløfttemperaturer fra 6/6 til 8/6 i et sydvendt rum med ventilerede solvægge (type V-I) med forskellige typer dæklag (1, 2 og E) samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.



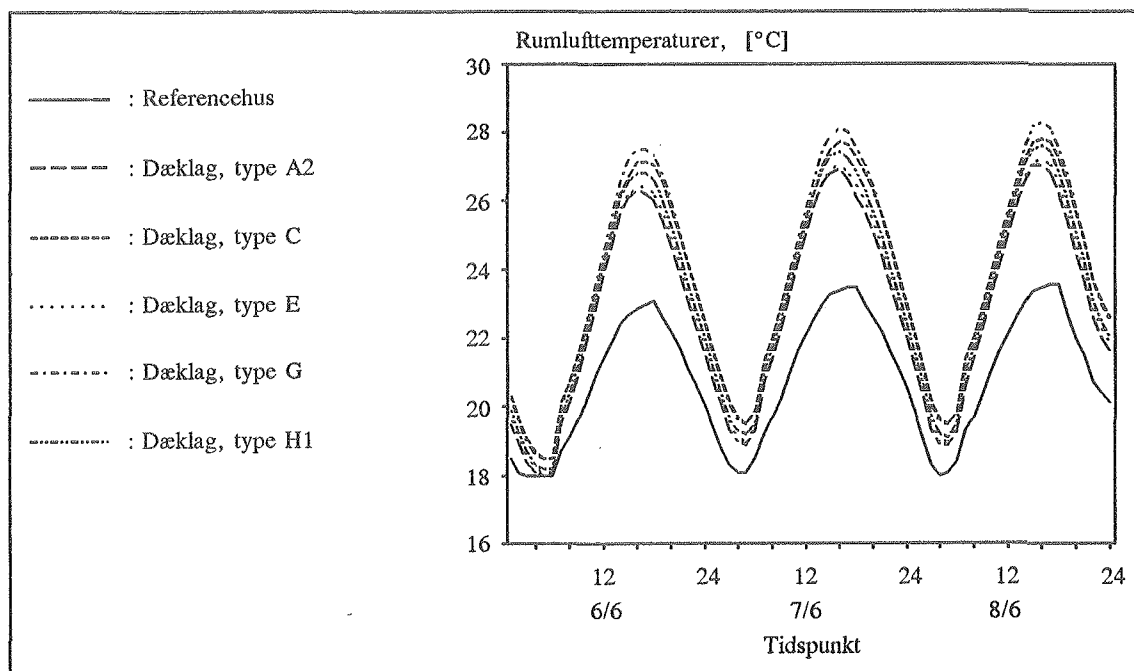
Figur 5.23 Rumløfttemperaturer fra 6/6 til 8/6 i et sydvendt rum med ventilerede solvægge (type V-I) med forskellige typer dæklag (A2, C, G og H1) samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.

Af figur 5.22 og 5.23 fremgår, at ligegyldigt hvilken type dæklag der anvendes i ventilerede solvægge af type V-I, vil der i sommerperioden blive så varmt, at det vil være nødvendigt med en eller anden form for temperaturreguleringsystem for at sikre den termiske komfort i varme solrige perioder.

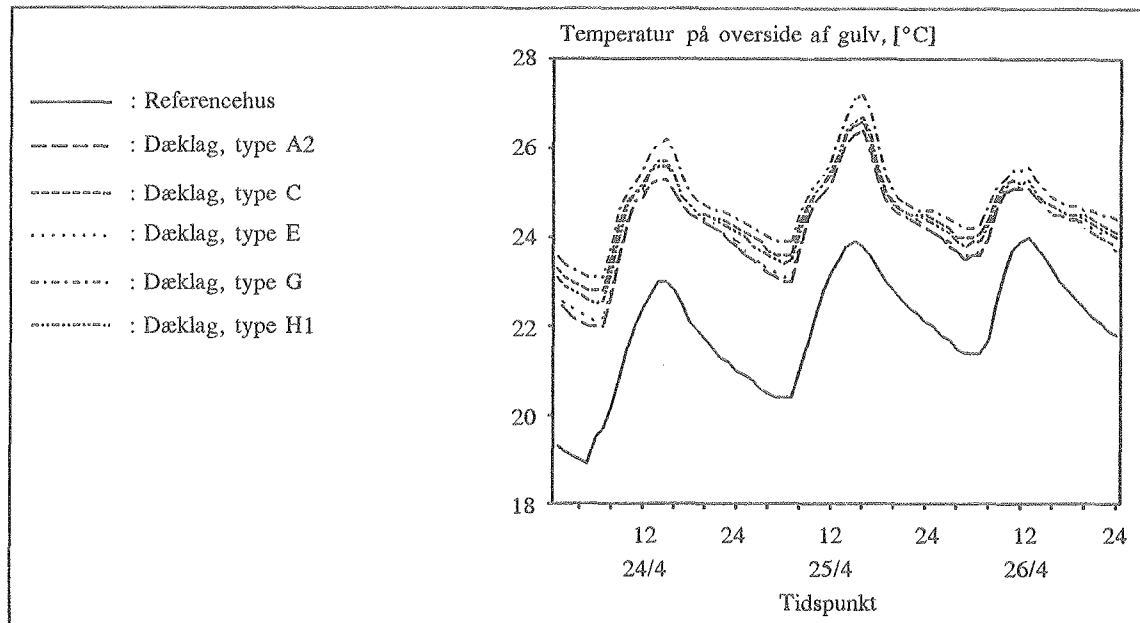
Solvæg type V-II



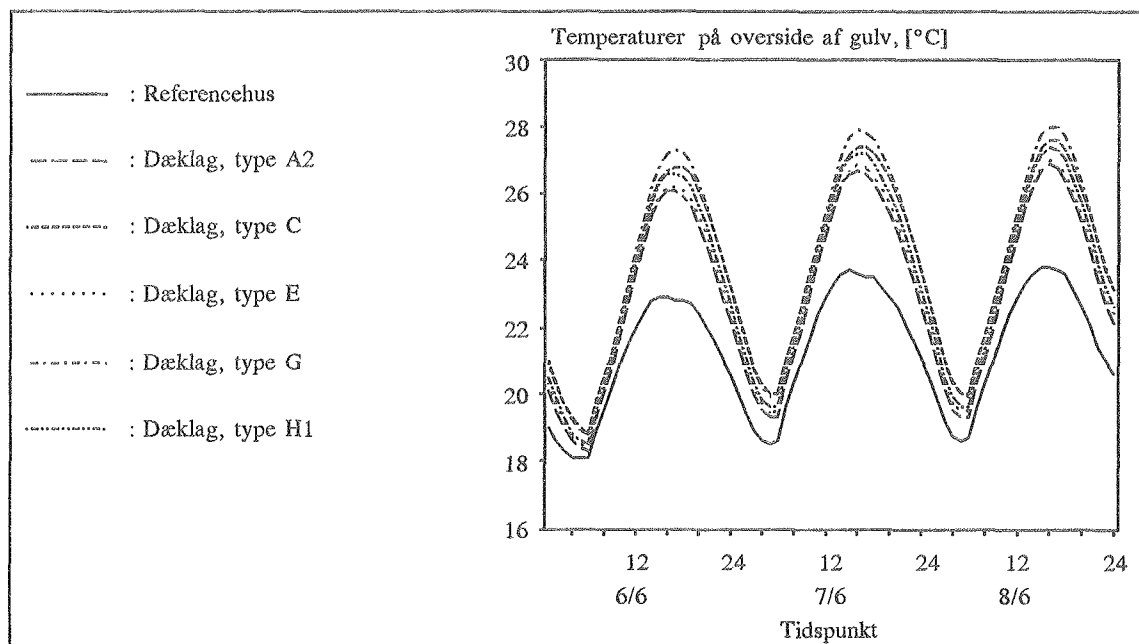
Figur 5.24 Rumlufttemperaturer fra 24/4 til 26/4 i et sydvendt rum med ventilerede solvægge (type V-II) med forskellige typer dæklag (A2, C, E, G og H1) samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.



Figur 5.25 Rumlufttemperaturer fra 6/6 til 8/6 i et sydvendt rum med ventilerede solvægge (type V-II) med forskellige typer dæklag (A2, C, E, G og H1) samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.



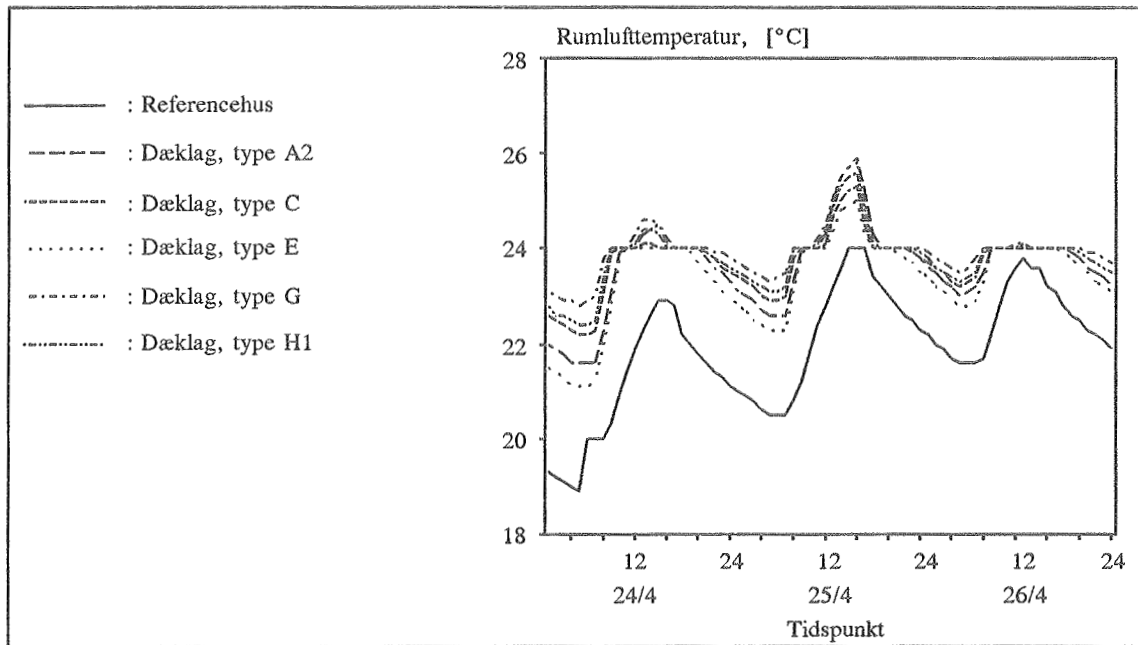
Figur 5.26 Temperaturer på overside af gulv fra 24/4 til 26/4 i et sydvendt rum med ventilerede solvægge (type V-II) med forskellige typer dæklag (A2, C, E, G og H1) samt gulvtemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.



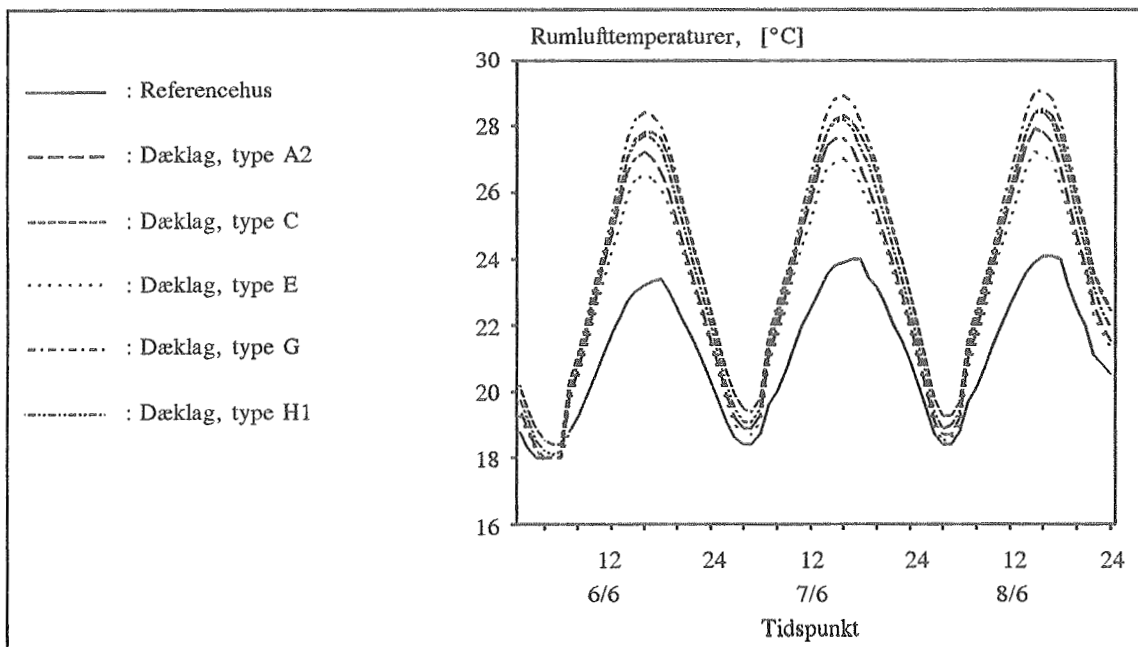
Figur 5.27 Temperaturer på overside af gulv fra 6/6 til 8/6 i et sydvendt rum med ventilerede solvægge (type V-II) med forskellige typer dæklag (A2, C, E, G og H1) samt gulvtemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.

Af figur 5.24 - 5.27 fremgår både pga. rumlufttemperaturen og temperaturen på oversiden af gulvet, at det også for ventilerede solvægge af type V-II vil være nødvendigt med en eller anden form for temperaturreguleringsystem for at sikre den termiske komfort i varme solrige perioder, ligegyldigt hvilken type dæklagssystem der anvendes.

Solvæg type V-III



Figur 5.28 Rumløfttemperaturer fra 24/4 til 26/4 i et sydvendt rum med ventilerede solvægge (type V-III) med forskellige typer dæklag (A2, C, E, G og H1) samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.



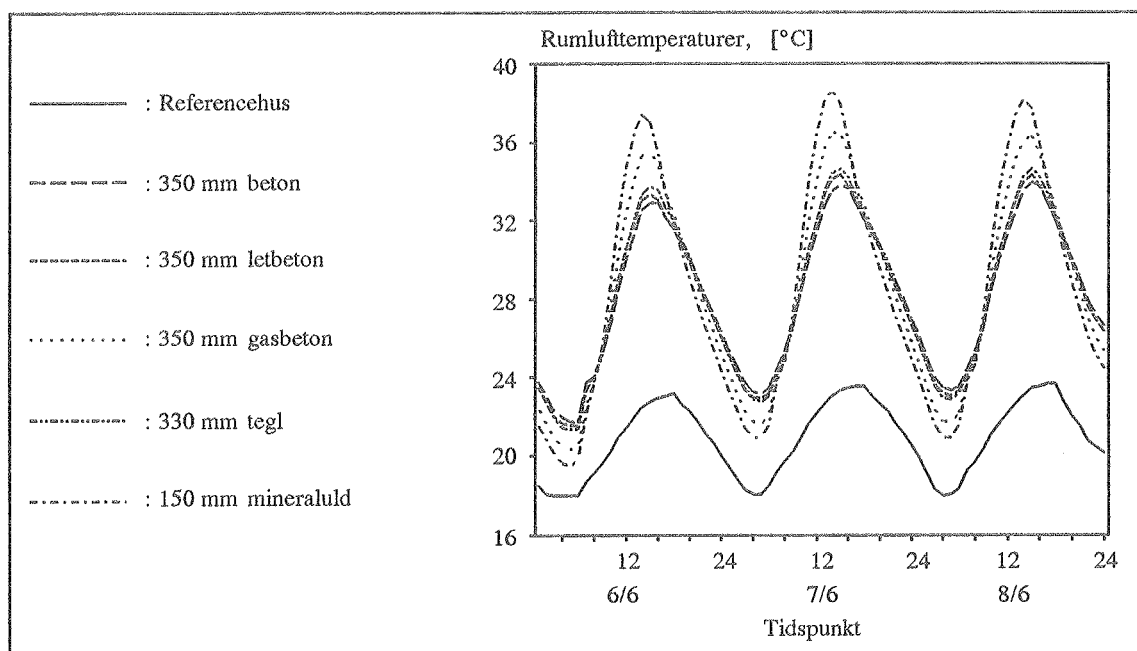
Figur 5.29 Rumløfttemperaturer fra 6/6 til 8/6 i et sydvendt rum med ventilerede solvægge (type V-III) med forskellige typer dæklag (A2, C, E, G og H1) samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.

For ventilerede solvægge af type V-III fremgår det af figur 5.28 og 5.29, at der ikke er lige så stort et behov for temperaturreguleringssystemer som for de øvrige typer ventilerede solvægge. Der vil dog stadig være behov for i særligt varme og solrige perioder at anvende en eller anden form for temperaturreguleringssystemer, ligegyldigt hvilken type dæklagssystem der anvendes.

Bagmure

De forskellige bagmure er vurderet med dæklag med 100 mm honey-combs (type G). I figur 5.30 er vist rumlufttemperaturerne i et sydvendt rum, når dette forsynes med ventilerede solvægge af type V-I med forskellige typer bagmure. I figuren er desuden vist de tilsvarende temperaturer i et sydvendt rum i referencehuset.

Solvæg type V-I



Figur 5.30 Rumlufttemperaturer i et sydvendt rum med ventilerede solvægge (type V-I) med forskellige typer bagmure (150 mm mineraluld, A, B, C og D) samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.

Solvæg type V-II og type V-III

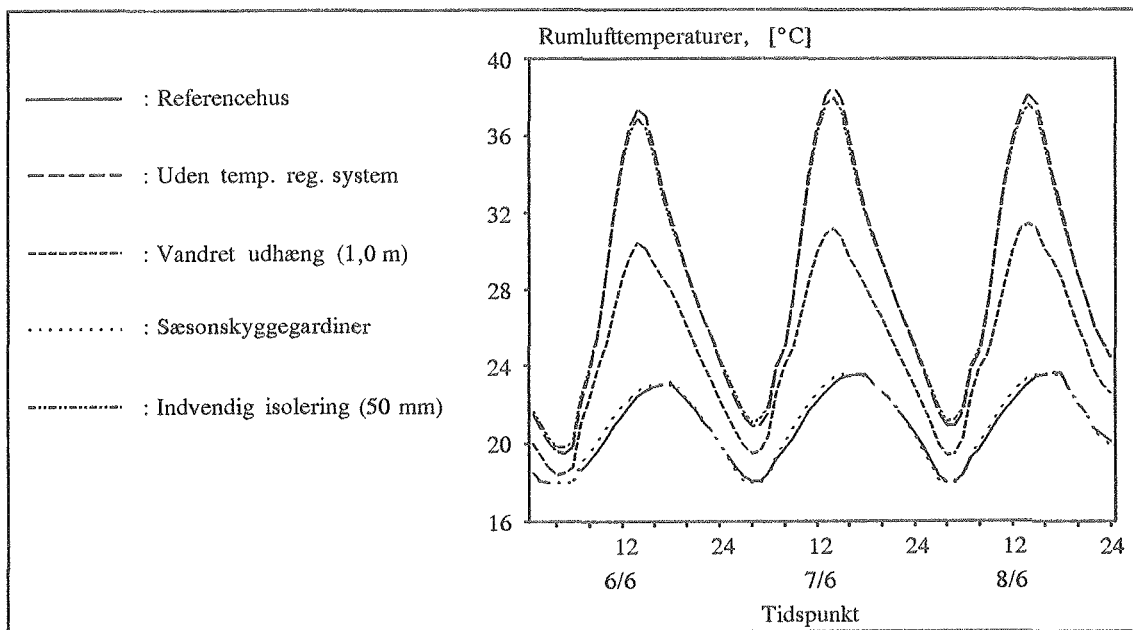
De forskellige typer bagmure resulterer alle i rumluft- eller indvendige overfladetemperaturer, der i solrige perioder i både april og juni, dvs. perioder med og uden ventilation gennem solvæggen, er højere end de tilsvarende temperaturer for en bagmur isoleret med 150 mm mineraluld.

Af ovenstående fremgår således, at det ikke vil være interessant at anvende bagmure med stor termisk kapacitet i de forskellige ventilerede solvægge

Temperaturreguleringsystemer

De forskellige metoder til reduktion af overtemperaturer er vurderet med en bagmur med 150 mm beton, da anvendelsen af meget tykke bagmure ikke giver tilstrækkeligt store reduktioner af overflade- og rumlufttemperaturerne. Som dæklag er benyttet 100 mm honeycombs (type G). I figur 5.31 - 5.37 er vist rumlufttemperaturerne og de indvendige overfladetemperaturer i et sydvendt rum, når dette forsynes med solvægge af type V-I, V-II og V-III med forskellige temperaturreguleringsystemer. I figurerne er desuden vist de tilsvarende temperaturer i et sydvendt rum i de respektive referencehuse. I figur 5.32, 5.34 og 5.36 ses ikke nogen effekt af at anvende et temperaturreguleringsystem med sæsonskyggegardiner, da disse kun er i brug udenfor fyringssæsonen, dvs. fra d. 16/5 til d. 14/9.

Solvæg type V-I

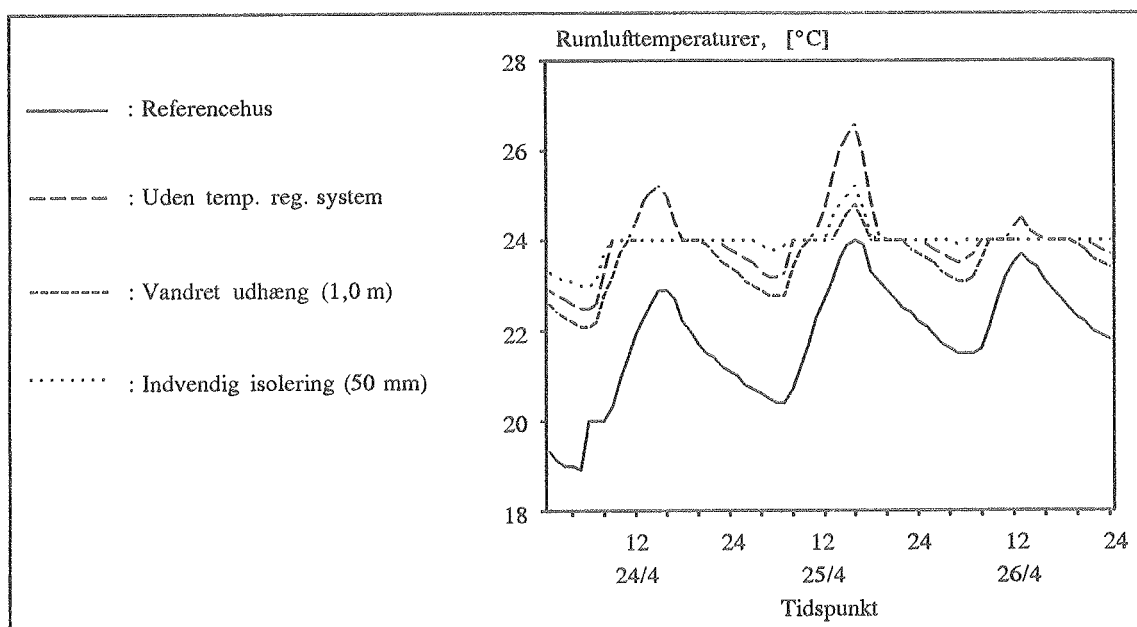


Figur 5.31 Rumlufttemperaturer i et sydvendt rum med ventilerede solvægge (type V-I) med forskellige temperaturreguleringsystemer (A2, B og D2) samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.

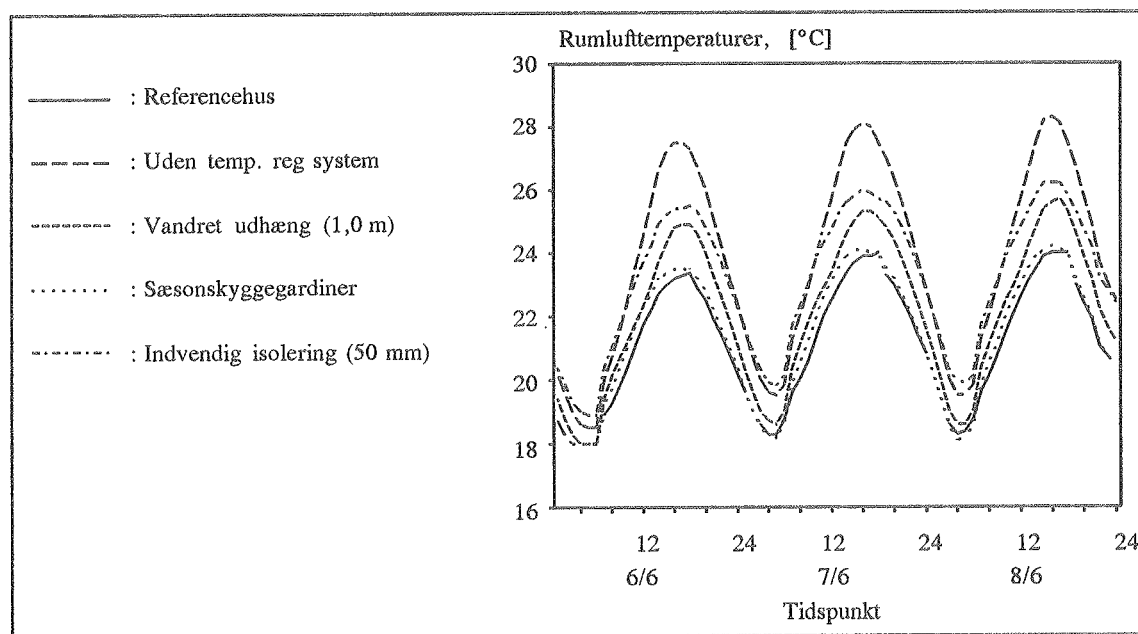
Af ovenstående fremgår, at de eneste temperaturreguleringsystemer, der ikke vil give anledning til termisk diskomfort ved anvendelsen af en ventileret solvæg af type V-I er sæsonskyggegardiner.

Anvendelsen af ventilerede solvægge type V-I vil således først være aktuel, når sæsonskyggegardiner er gjort billigere og mere holdbare, end det er tilfældet i dag.

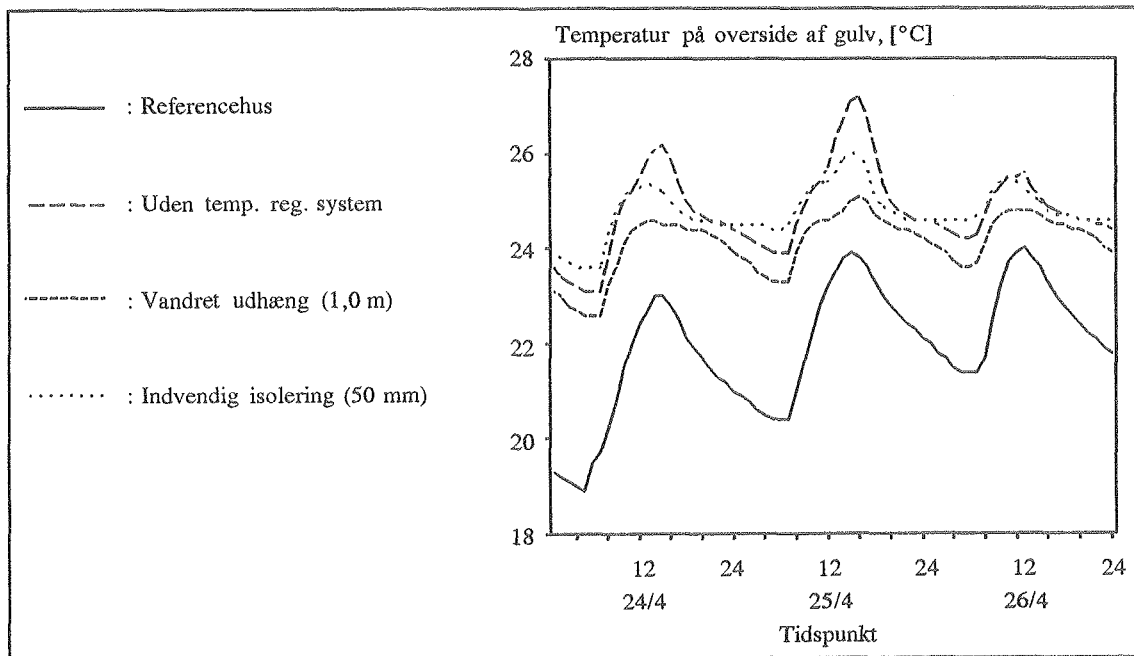
Solvæg type V-II



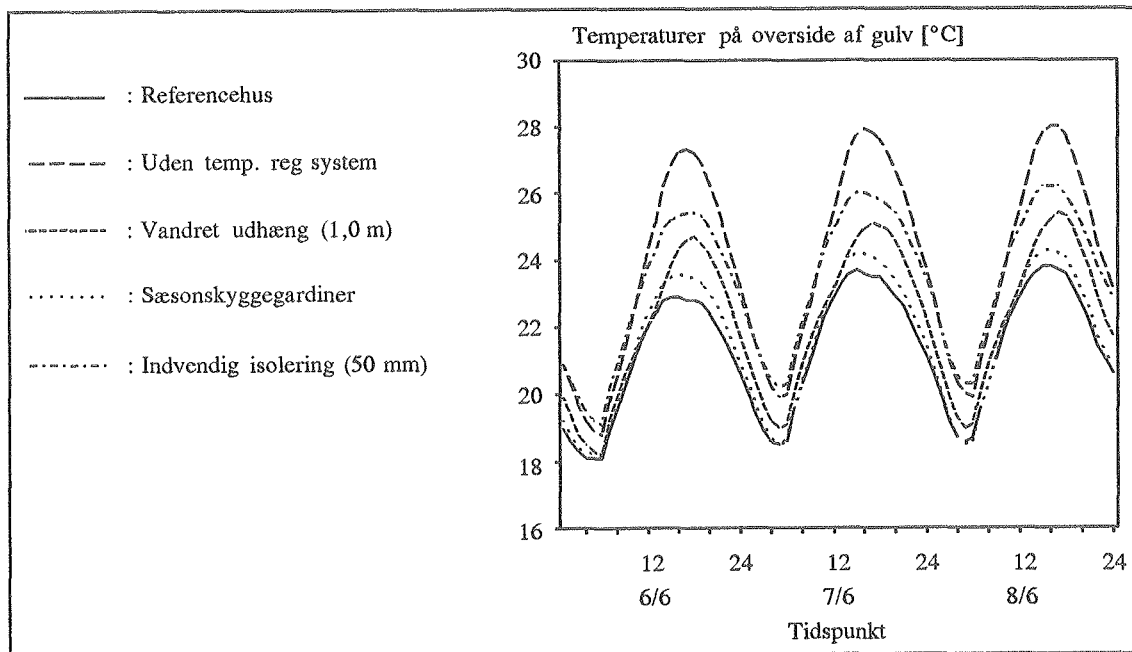
Figur 5.32 Rumlufttemperaturer fra 24/4 til 26/4 i et sydvendt rum med ventilerede solvægge (type V-II) uden og med temperaturreguleringssystemer: Vandret udhæng (1,0 m) og indvendig isolering (50 mm mineraluld), samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.



Figur 5.33 Rumlufttemperaturer fra 6/6 til 8/6 i et sydvendt rum med ventilerede solvægge (type V-II) uden og med temperaturreguleringssystemer: Vandret udhæng (1,0 m), sæsonskyggegardiner og indvendig isolering (50 mm mineraluld), samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.



Figur 5.34 Temperaturer på overside af gulv fra 24/4 til 26/4 i et sydvendt rum med ventilerede solvægge (type V-II) uden og med temperaturreguleringsystemer: Vandret udhæng (1,0 m) og indvendig isolering (50 mm mineraluld), samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.

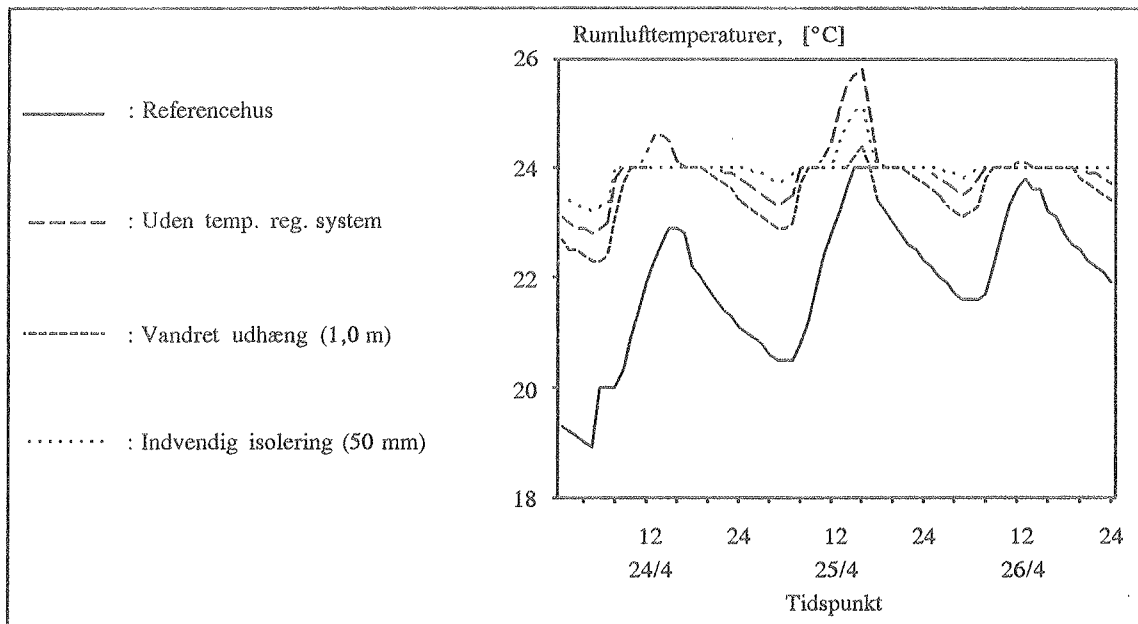


Figur 5.35 Temperaturer på overside af gulv fra 6/6 til 8/6 i et sydvendt rum med ventilerede solvægge (type V-II) uden og med temperaturreguleringsystemer: Vandret udhæng (1,0 m), sæsonskyggegardiner og indvendig isolering (50 mm mineraluld), samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.

For ventilerede solvægge af type V-II fremgår det af figur 5.32 - 5.35, at de eneste temperaturreguleringsystemer, der vil sikre mod termisk diskomfort i sommerperioden er sæsonskyggegardiner

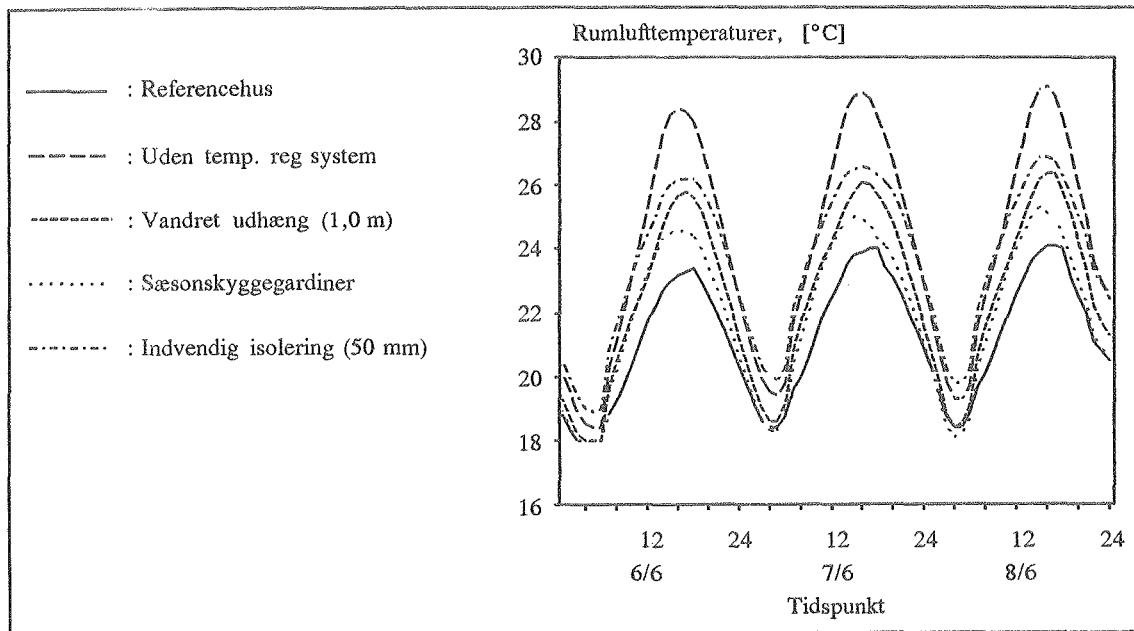
ner. Det skal dog bemærkes, at også et vandret udhæng på 1,0 m vil være en realistisk mulighed for at begrænse risikoen for termisk diskomfort, da anvendelsen heraf reducerer overtemperaturerne i dagtimerne til mellem ca. 1 og 3 °C.

Solvæg type V-III



Figur 5.36 Rumlufttemperaturer fra 24/4 til 26/4 i et sydvendt rum med ventilerede solvægge (type V-III) uden og med temperaturreguleringsystemer: Vandret udhæng (1,0 m) og indvendig isolering (50 mm mineraluld), samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.

Af figur 5.36 ovenfor og figur 5.37 på næste side fremgår, som for ventilerede solvægge af type V-II, at de eneste temperaturreguleringsystemer, der for ventilerede solvægge af type V-III vil sikre mod termisk diskomfort i sommerperioden, er sæsonskygggardiner. Det skal dog bemærkes, at også et vandret udhæng på 1,0 m vil være en realistisk mulighed for at begrænse risikoen for termisk diskomfort, da anvendelsen heraf reducerer overtemperaturerne i dagtimerne til mellem ca. 1 og 3 °C.



Figur 5.37 Rumlufttemperaturer fra 6/6 til 8/6 i et sydvendt rum med ventilerede solvægge (type V-III) uden og med temperaturreguleringsystemer: Vandret udhæng (1,0 m), sæsonskyggegardiner og indvendig isolering (50 mm mineraluld), samt rumlufttemperaturen i et sydvendt rum i referencehuset.

5.5.3 Optimal udformning af ventileret solvæg

På baggrund af de gennemførte analyser er nedenfor beskrevet 2 energi- og komfortmæssigt optimale ventilerede solvægge: Type V-II og type V-III. Solvæggenes funktion og principielle udformning er beskrevet kap. 5.4.1, idet alle solvæggene desuden er forsynet med udvendige vandrette udhæng på 1,0 m. Der er ikke anbefalet de tidligere omtalte sæsonskyggegardiner, da opsætning og nedtagning af disse kun kan forventes at blive udført af særligt idealistiske og energibevidste brugere, ligesom automatiske sæsonskyggegardiner endnu ikke er tilstrækkeligt driftssikre og billige til, at de vil være aktuelle. Det skal dog erindres, at anvendelsen af sæsonskyggegardiner vil fjerne risikoen for termisk diskomfort i form af overtemperaturer. Alle solvæggene har en bagmur opbygget af et bærende stålskelet, imellem hvilket der er isoleret med 150 mm mineraluld. Alle solvæggene har et dæklag opbygget af 1 lag jernfrit hærdet glas, 100 mm honeycombs og en almindelig matsort absorber. I forhold til referencehuset, idet der for solvæggene af type V-II og V-III er sammenlignet med begge de tidligere omtalte referencehuse, udgør den relative energibesparelse, R , og den årlige energibesparelse pr. kvadratmeter solvæg, q_b , henholdsvis:

$$R_{V-II,o} = 34\%, \quad R_{V-II,n} = 24\%, \quad q_{b,V-II,o} = 71 \text{ kWh/m}^2\text{år}, \quad q_{b,V-II,n} = 45 \text{ kWh/m}^2\text{år},$$

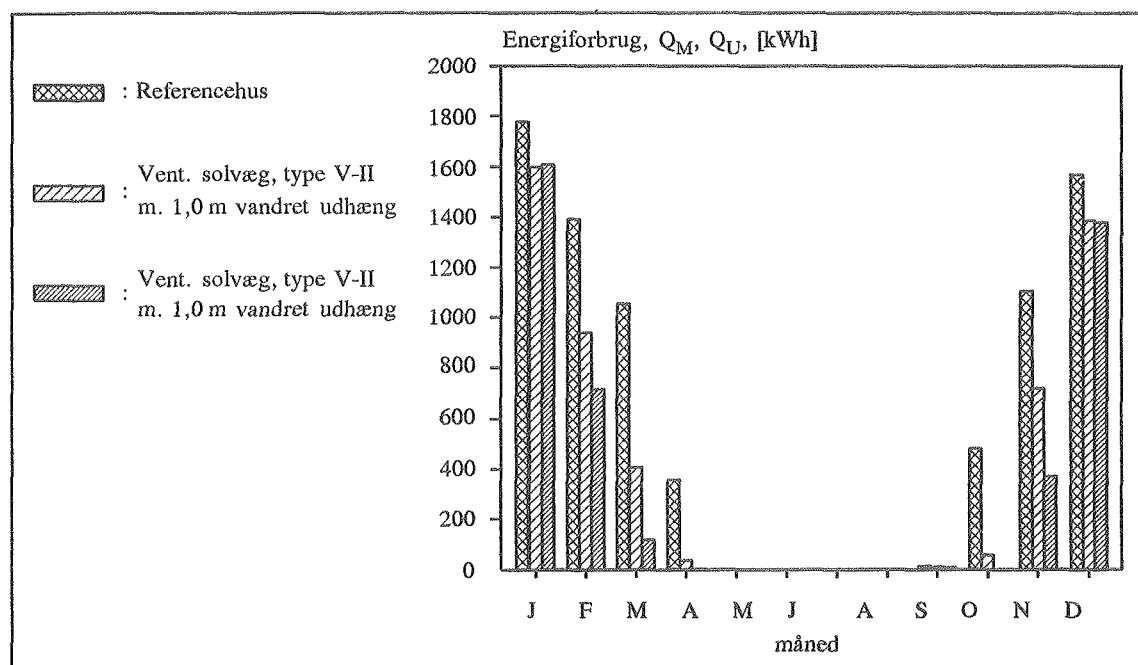
$$R_{V-III,o} = 46\%, \quad R_{V-III,n} = 37\%, \quad q_{b,V-III,o} = 97 \text{ kWh/m}^2\text{år}, \quad q_{b,V-III,n} = 69 \text{ kWh/m}^2\text{år},$$

Idet indices o og n refererer til hhv. det oprindelige referencehus og det nye referencehus, der er isoleret som terrændæk- eller gulvkonstruktionen for det enkelte solvægssystem.

For de to typer solvægge reducerer anvendelsen af et vandret udhæng effektiviteten af solvæggene med 4 %.

Energiforbruget til rumopvarmning pr. måned for de 2 typer solvægge samt det oprindelige referencehus er vist i figur 5.38.

Af figur 5.38 fremgår, at der ved anvendelse af ventilerede solvægge af type V-II og V-III kan opnås en reduktion af fyringssæsonen på 2-3 måneder (marts, april og oktober) afhængigt af, hvilken af de 2 typer ventilerede solvægge der benyttes.



Figur 5.19 Energiforbrug til rumopvarmning med ventilerede solvægge (type V-II og V-III) med et vandret udhæng på 1,0 m. Dæklag: 100 mm honeycombs (type G). Bagmur: 150 mm mineraluld mellem et stålskelet, samt energiforbruget til rumopvarmning i det oprindelige referencehus.

6. EKSPERIMENTEL UNDERSØGELSE

Der er kun udført laboratorieforsøg for den uventilerede solvæg. Disse har koncentreret sig om at bestemme varmetransporten gennem en uventileret solvæg af type U-II samt U-værdien for dæklaget i perioder uden solpåvirkning, dvs. i nattetimerne.

6.1 Forsøgsopstilling

Måling af varmetransport og U-værdi foretages vha. af det i [26] beskrevne forsøgsprogram, KV2, idet solvæggen placeres i en isoleret ramme mellem en kold og en varm kasse, i hvilke temperaturforholdene kan kontrolleres vha. indbyggede køle- og varmeelementer. Denne forsøgsopstilling er beskrevet detaljeret i [27].

Varmetabet gennem solvæggen, når denne placeres mellem den varme og den kolde kasse, kan bestemmes af nedenstående udtryk, idet notationen svarer til den i [26] anvendte:

$$QV = QEL + QVP - QT - Q7,$$

hvor

QEL : Tilført effekt fra elradiator i den varme kasse.

QVP : Tilført effekt fra pumper, motorer og ventilatorer.

QT : Varmetab til omgivelserne (LfV's forsøgshal).

Q7 : Varmetab gennem isoleret ramme omkring solvæg mellem varm og kold kasse.

QV : Varmetab gennem solvæg mellem varm og kold kasse.

Den tilførte effekt fra elradiatoren i den varme kasse skyldes, at der under forsøget søges fastholdt en temperatur på 20 °C i den varme kasse. Den tilførte effekt afhænger således af temperaturen i den kolde kasse samt temperaturen i hallen omkring forsøgsopstillingen.

Effektafgivelsen fra pumper, motorer og ventilatorer afhænger af den påtrykte spænding på disse. Effektafgivelsen for det enkelte forsøg beregnes af det anvendte edb-program, KV2.

Varmetabskoefficienten for den varme kasse er i [27] bestemt eksperimentelt til 4,3 W/K.

Den isolerede ramme omkring solvæggen mellem den varme og den kolde kasse er opbygget, så den har en beregnet U-værdi på 1,16 W/m²K.

6.2 Måleresultater

Efter en startperiode, i løbet af hvilken "forsøgsopstillingen er blevet stabil", således at der kan foretages målinger med stationære temperaturforhold, er målt følgende værdier for de forskellige varmestrømme og temperaturforhold:

$$Q_{EL} = 30,0 \text{ W}, \quad Q_{VP} = 7,8 \text{ W}.$$

$$T_{\text{varm kasse}} = 22,2 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad T_{\text{kold kasse}} = 7,6 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad T_{\text{hal}} = 21,8 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad T_{\text{absorber}} = 12,8 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Temperaturen på indersiden af glasset i dæklagskonstruktionen er målt til 8,4 °C. Herved kan varmetabet fra den varme kasse til omgivelserne og fra den varme kasse til den kolde kasse bestemmes til hhv.:

$$Q_T = 4,3 \text{ W/K} \times (T_{\text{varm kasse}} - T_{\text{hal}}) = 4,3 \text{ W/K} \times (22,2 \text{ }^{\circ}\text{C} - 21,8 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 1,7 \text{ W}$$

$$Q_7 = 1,16 \text{ W/K} \times (T_{\text{varm kasse}} - T_{\text{kold kasse}}) = 1,16 \text{ W/K} \times (22,2 \text{ }^{\circ}\text{C} - 7,6 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 16,9 \text{ W}$$

Varmetabet gennem solvægskonstruktionen bliver således:

$$Q_V = (30,0 + 7,8 - 1,72 - 16,936) \text{ W} = 19 \text{ W}$$

Varmestrømmen pr. m² solvæg bliver så:

$$q_v = Q_V / A_{\text{solvæg}} = 19,144 / (1,094 \times 2,414) = 7 \text{ W/m}^2$$

Benyttes absorbertemperaturen og temperaturen i den kolde kasse, kan dæklagets U-værdi bestemmes til:

$$U_{\text{dæklag}} = q_v / (T_{\text{absorber}} - T_{\text{kold kasse}}) = 7,249 \text{ W/K} / (12,8 \text{ }^{\circ}\text{C} - 7,6 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

6.3 Sammenligning med beregninger

I beregningerne er benyttet en U-værdi på 1,2 W/m²K. Der er imidlertid en række forhold, der medfører en stor usikkerhed i forbindelse med ovennævnte forsøg. I forsøget er der tale om forholdsvis små varmestrømme, hvorfor en større unøjagtighed på en af disse kan have stor betydning. Dette er bl.a. tilfældet mht. varmetabet mellem den varme kasse og omgivelserne, idet det ikke har været muligt at opnå samme tæthed mellem kasserne, som den tæthed, der er opnået i de forsøg, der er gennemført i [27].

Herudover er den benyttede U-værdi for den isolerede ramme omkring solvæggen mellem den varme og den kolde kasse baseret på en simplificeret model, der benyttes ved vurdering af inhomogene konstruktioner i forbindelse med beregning af bygningers energiforbrug. Metoden er beskrevet i [28] og benytter kun et tilnærmet udtryk for vurdering af kuldebroeffekten i inhomogene konstruktioner. Da denne varmestrøm udgør hovedparten af varmetabet fra den varme kasse, vil selv en mindre unøjagtighed have stor indflydelse på den for dæklaget beregnede U-værdi. Forskellen mellem den i simuleringerne benyttede U-værdi og den fra ovennævnte forsøg bestemte U-værdi på ca. 14 % må derfor siges at være acceptabel.

7. KONKLUSION

Der er ingen tvivl om, at fremtidigt boligbyggeri i Danmark vil blive udført som, selv efter dagens danske standard, særdeles højisolerede konstruktioner. Det første skridt i den retning er det nye bygningsreglement, som forventes udgivet i løbet af 1993. Dette sigter på at nedbringe bygningers energiforbrug til rumopvarmning væsentligt, idet det bliver muligt, i endnu højere grad end det er tilfældet i dag, at indregne udnyttelsen af solenergi til rumopvarmning. Der kan således være et større incitament til at tænke utraditionelt ved udformning af boligers klimaskærm og varme anlæg, f.eks. gennem anvendelse af uventilerede eller ventilerede solvægge.

Ved gennemførelsen af dette projekt har det vist sig at være muligt at designe både uventilerede og ventilerede solvægssystemer til fremtidigt boligbyggeri, der udgør et energimæssigt attraktivt alternativ til traditionelt højisoleret byggeri.

Anvendelsen af uventilerede solvægge vil kunne reducere energiforbruget til rumopvarmning et traditionelt højisoleret parcelhus med op mod mellem 14 og 21%. Desuden kan fyringssæsonen forkortes med 1-2 måneder. For de 2 foreslåede typer uventilerede solvægge har det vist sig, at der i kortere perioder kan være risiko for termisk diskomfort i form af overtemperaturer. En forventet fremtidig udvikling af driftssikre og billige sæsonskyggegardiner ventes at kunne fjerne denne risiko.

Anvendelsen af ventilerede solvægge vil kunne reducere energiforbruget til rumopvarmning et traditionelt højisoleret parcelhus med op mod mellem 34 og 46%. Desuden kan fyringssæsonen forkortes med 2-3 måneder. For de 2 foreslåede typer ventilerede solvægge har det vist sig, at der i kortere perioder kan være risiko for termisk diskomfort i form af overtemperaturer. En forventet fremtidig udvikling af driftssikre og billige sæsonskyggegardiner ventes at kunne fjerne denne risiko.

Det skal bemærkes, at risikoen for termisk diskomfort for de ventilerede solvægge er noget mindre end for de uventilerede solvægge. Dette gælder især for type V-III, hvor solvæggen er kombineret med et stenlager.

For at give en samlet vurdering af solvægges rentabilitet er det nødvendigt at udføre en omfattende økonomisk vurdering af omkostningerne ved at lade solvæggene indgå som en del af klimaskærmen i stedet for at udføre klimaskærmen som i traditionelt byggeri. Erfaringer fra tidligere projekter ved renovering af facader vha. uventilerede solvægge, [2] og [15], har vist, at det, da solvæggene endnu ikke er et markedsmodent produkt herhjemme, er særdeles vanskeligt at give et realistisk bud på, hvad det koster at konstruere og etablere solvægge både i forbindelse med renovering og nybyggeri. Der er derfor ikke udført nogen økonomisk vurdering i dette projekt.

REFERENCER

- [1] "Solvægge i den eksisterende boligmasse". C. Paludan-Müller, O.B. Jørgensen. Energiministeriets solvarmeforskningsprogram, rapport nr. 47. Meddelelse nr. 193, LfV, DTH, 1988.
- [2] "Energirenovring af ældre boligblok med hovedvægt på udnyttelse af transparent isoleringmateriale". O.B. Jørgensen, C. Schmidt. Meddelelse nr. 212, LfV, DTH, 1990.
- [3] "Statistisk årbog, 1978 - 1990". Danmarks Statistik, 1978 - 1990.
- [4] "Survey of the existing building stock to assess the passive solar potential". O. Olesen. Meddelelse nr. 203, LfV, DTH, 1990.
- [5] "Energi 2000. Handlingsplan for en bæredygtig udvikling". Energiministeriet 1990.
- [6] "Demonstration of transparent insulation at the CTC (crew training complex for space flights)". B. Weidlich, A. Kerschberger, A. Lohr. Transparent Insulation Technology for Solar Energy Conversion. Proceedings of the 3rd International Workshop held in Freiburg, September 18-19, 1989. The Franklin Company Consultants Ltd., 1989.
- [7] "Bygningsreglement for småhuse", (BR-S 85). Publikation nr. 75. Byggestyrelsen, 1985.
- [8] "Bygningsreglement, 1982", (BR 82). Publikation nr. 54. Byggestyrelsen, 1982.
- [9] "Beregning af energiforbrug i småhuse". A. Nielsen, K. Johnsen. SBI-rapport 148, Statens Byggeforskningsinstitut, 1984.
- [10] "Bygningsisolering i 1990'erne". Michael Petersen, Glasuld a/s. VVS danvak, nr. 15 - '90.
- [11] "SUNCODE - PC". T. Wheeling, L. Palmiter. Ecotope Group, Seattle, WA, 1985.
- [12] "Vejrdata for VVS og Energi. Dansk referenceår TRY". B. Andersen m.fl. SBI-rapport 135, Statens Byggeforskningsinstitut, 1982.
- [13] "EDB-programmer til beregning af passiv solvarme". J.E. Christensen. Meddelelse nr. 185, LfV, DTH, 1985.
- [14] "Performance of passive solar houses in Ladakh, India". C. Paludan-Müller. Report no. 88-5, LfV, DTH, 1988.
- [15] "Solvægge i "VIBEKEVANG" - Energirenovring". O. Frydensberg, Kooperativ Byggeindustri A/S, O.B. Jørgensen. Rapport nr. 92-32, Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, 1992.

- [16] "Uventilerede solvægge i ældre boligblok - Fuldskalaforsøg. En vurdering af energibesparelser og termisk komfort". P. Fritzel, O.B. Jørgensen. Meddelelse nr. 241, LfV, DTH, 1993.
- [17] "SUNCODE-PC. A program user's manual". M.J. De La Hunt. Ecotope, 1985.
- [18] "Solar engineering of thermal processes". J.A. Duffie, W.A. Beckman, by John Wiley & Sons, 1980.
- [19] "Inter-zone convective heat transfer in buildings: a review". S.A. Barakat. Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 109, 1987.
- [20] "Systemstudie die lichtdurchlässige Wärmedämmung", A. Lohr, B. Weidlich, A. Kerschberger. Assmann Ingenieurgesellschaft mbh, Baroper Strasse 237, 4600 Dortmund, FRG.
- [21] Notat fra Carl Axel Lorentzen, Pilkington, til Jørgen M. Schultz, LfV, februar 1990.
- [22] "The LBL three-pane krypton window", J. Fricke. Transparent Insulation Technology for Solar Energy Conversion. Proceedings of the 3rd International Workshop held in Freiburg, September 18-19, 1989. The Franklin Company Consultants Ltd., 1989.
- [23] "Theory and Problems of Heat Transfer", Donald R. Pitts, Leighton E. Siss. Schaum's Outline Series, McGraw-Hill Book Company, 1977.
- [24] "Danvak, grundbog", H.E. Hansen, P. Kjerulf-Jensen, O.B. Stampe, 1987.
- [25] "Dansk ingeniørforenings regler for beregning af bygnings varmetab", DS 418. Teknisk Forlag, 1986.
- [32] "Silica aerogel-ruder i den danske boligmasse - En vurdering af energibesparelsepotentialet". O.B. Jørgensen. Meddelelse nr. 208, LfV, DTH, 1989.
- [26] "Programmer til måling og styring ved forsøg med indendørs prøvestand for solvægge". C. Paludan-Müller. Rapport nr. 87-22, Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, 1987.
- [27] "Undersøgelse af solvægge ved hjælp af en indendørs forsøgsopstilling". C. Paludan-Müller. Meddelelse nr. 179. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, 1987.
- [28] "Dansk ingeniørforenings regler for beregning af bygnings varmetab". DS 418. Teknisk forlag, 1986.

APPENDIX

A.1 Artikel fra: TI₅ - Fourth International Workshop on Transparent Insulation Technology, 28 - 30 May 1991, Birmingham, England.

Solar walls for highly insulated housing in northern climates.

Olaf Bruun Jørgensen. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark
Building 118, DK-2800 Lyngby, Denmark

Abstract

In this project favourable designs for solar walls for future housing in northern climates have been evaluated. Highly efficient solar walls may be very expensive but when they are replacing the exterior and often more expensive part of the traditional outer walls the solar walls may be more cost-effective than simple highly insulated exterior walls.

This investigation is based on measured and theoretical 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 for space heating and on the indoor thermal comfort.

Different types of unvented and vented solar walls have been designed, several having better energy balances throughout the heating season than a cavity wall insulated with 150 mm of opaque insulation material (U-value of 0.23 W/m²K).

1. Demands to the use of energy and the thermal comfort for future housing

In Denmark the demands of the building regulations will be increased within a few years. On the basis of the Brundtland-report, the Ministry of Energy has planned, [1], that the consumption of energy for space heating shall be decreased by 50% before the year 2000. As a first step a set of rules for the heat loss coefficient for the thermal envelope has been suggested, ["BR - 93"]. These values as well as the actual ones, ["BR-S 85"], are shown in table 1. In this project buildings with solar walls have been compared to a highly insulated reference building. The heat loss coefficients for the reference building are also shown in table 1, ["simulated"].

Table 1. U-values of the thermal envelope for the actual, ["BR-S 85"], and future, ["BR - 93"], housing in Denmark plus U-values for the reference house, ["simulated"].

Part of building	U-values, [W/m ² K]		
	"BR-S 85"	"BR - 93"	"Simulated"
Outer walls	0.35	0.30	0.23
Floors	0.30	0.20	0.19
Roofs	0.20	0.15 - 0.20	0.15
Windows	2.90	2.00	1.60
Doors	2.00	2.00	1.50

Besides decreasing the U-values for future housing it will be advantageous to use mechanical heat recovering ventilation systems. Such systems will decrease the energy consumption and improve the thermal comfort.

The overall heat loss coefficient, U_T , the overall heat loss coefficient pr. m² floor area, U_T , the energy consumption for space heating, Q_U , and the energy consumption for space heating pr. m² floor area, Q_U , for a larger future Danish single family house of approx. 165 m² should therefore be as shown in table 2. The values shown in table 2 are used for estimating the efficiency of the investigated solar walls.

Table 2. The overall heat loss coefficient, U_T , the overall heat loss coefficient pr. m^2 floor area, U_{Tf} , the energy consumption for space heating, Q_U , and the energy consumption for space heating pr. m^2 floor area, Q_{Uf} , for a larger future Danish single family house of approx. $165 m^2$.

Building type	U_T , [W/K]	U_{Tf} , [W/ m^2 K]	Q_U , [kWh/year]	Q_{Uf} , [kWh/ m^2 year]
Single family house	174.6	1.04	7748	46.3

2. Calculations

Simulations of heat flows, temperature conditions, etc. for a whole a year have been made with the simulation program "SUNCODE", [2]. Outdoor climate data from the Danish Test Reference Year, "TRY", [3], has been used for the simulations. Due to limitations of "SUNCODE", it has been necessary to use some approximations, when calculating the solar transmittance and the U-value of the cover systems. By describing the cover system as a number of homogeneous transparent layers, equivalent values of the effective transmittance-absorptance product, $(\tau\alpha)_e$, are determined. U-values for cover systems for solar walls are temperature dependent and therefore determined as equivalent mean values.

3. Description of the investigated solar walls

In this project both unvented and vented solar walls have been investigated. Most of the solar walls have obtained low U-values through use of different sorts of transparent insulation materials. These are monolithic silica aerogel (Airlux), honeycombs (Arel, Okalux) and horizontal and vertical V-corrugated plast foils (Isoflex). Others are provided with selective foils glued to the wall surface (Inco). Finally it is possible to reduce the U-value by increasing the number of plane covers, eg. one or more layers of teflon foil (Dupont) or gas-filled triple glazings (Pilkington, LBL). The basic designs of the investigated solar walls are shown in figure 1. The construction and the thermal and optical properties of the investigated cover systems are shown in table 3. The cold bridge effect from the framing systems is included in the U-values.

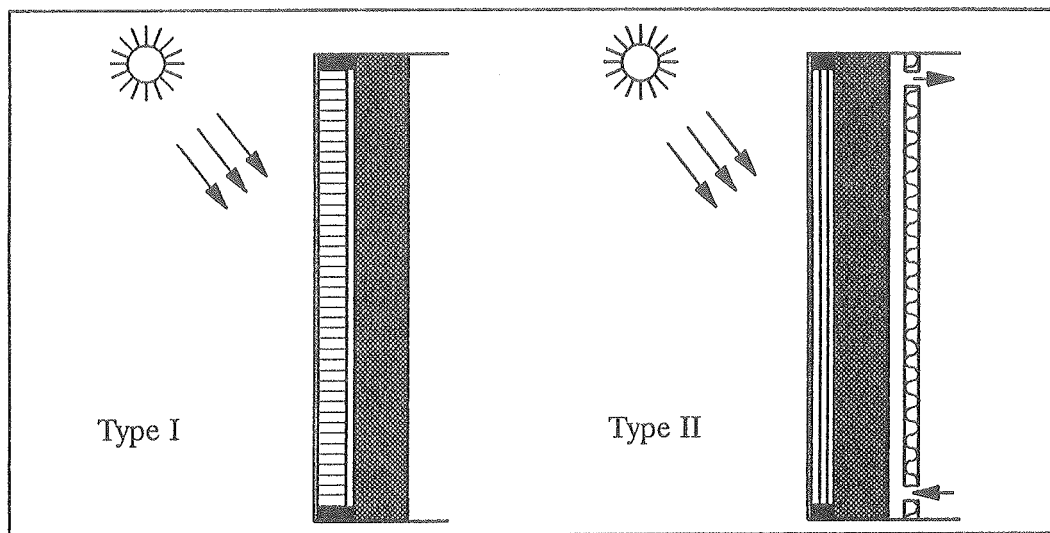


Figure 1. Basic design of the investigated solar walls. Type I: Unvented (here honeycombs). Type II: vented (two layers of teflon foil) solar walls.

The vented solar wall, type II, is fitted with manually operated sliding dampers that prevent circulation of cold air during the night and circulation of hot air during the summer.

Table 3. Construction and thermal and optical properties for the cover systems of the investigated solar walls.

Type	Construction	U, [W/m ² K]	$(\tau\alpha)_{e,dir}$	$(\tau\alpha)_{e,dif}$
A	20 mm Airglass between 2 layers of low iron glass, plain dark absorber.	0.6	0.70	0.59
B, C	1 layer of low iron glass, 100 mm Arel or Okalux honeycombs, plain dark absorber.	1.1 / 1.0	0.90 / 0.90	0.64 / 0.66
D	1 layer of low iron glass, 50 mm Okalux honeycombs, plain dark absorber.	1.6	0.90	0.70
E	1 layer of low iron glass, 30 mm Isoflex, plain dark absorber.	1.9	0.64	0.56
F, I	1 layer of low iron glass, 2 layers of teflon foils, selective absorber, wall type I and II.	1.2	0.81	0.66
G, H	Gas-filled triple glazings, Pilkington or LBL, plain dark absorber.	1.1 / 1.1	0.52 / 0.65	-

4. Results from calculations

All simulations are carried out for south-facing solar walls. The skyline profile has been set to 15° as there even for new housing always will be some shading from surrounding buildings, trees, etc. The possible energy savings for unvented and vented solar walls relative to the chosen reference house are shown in figure 2. It is seen that cover systems using Airglass-filled glazings or 100 mm different thicknesses of bricks or I

It be almost no extra savings using different thicknesses of bricks or lightweight concrete or different sorts of hybrid mass walls to improve the thermal mass such as water-filled steel boxes, concrete boxes filled with sand, etc. The optimal mass wall is a simple 150 mm concrete wall. If the wall thickness is less than 150 mm it will not be able to function as a load bearing wall. Detailed analyses of the possible energy savings and the thermal comfort are given in [4].

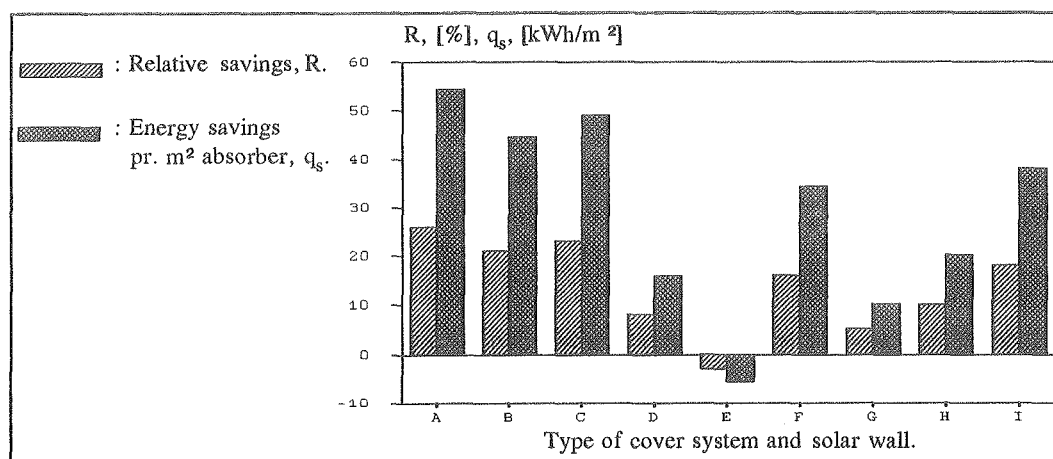


Figure 2. Possible energy savings for unvented and vented solar walls used in future housing in Denmark, relative to the chosen reference house (cf. Table 1).

Regarding the thermal comfort only the risk of unacceptably high indoor temperatures has been investigated. For unvented solar walls some sort of shading device will be necessary. The most effective devices are automatic roller blinds or exterior blinds covering the glass during the summer period. Overhangs of 750 - 1000 mm are efficient but they will cause smaller energy savings as they will reduce the solar incident during the heating season.

Using the vented solar wall the risk of high indoor temperatures is reduced, but still unacceptably high indoor temperatures will occur. Compared to the reference house the temperature increase will be approx. 3 °C. When using "summer blinds" as described above the maximum increase of the indoor temperature will be approx. 0.4 °C.

5. Results from laboratory tests

Measurements made at the Thermal Insulation Laboratory in an indoor test facility, [5], indicate a U-value for the vented solar wall of $1.5 \pm 0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$. This value includes the cold bridges in the framing system. The efficiency of the solar wall has been measured to 0.55.

6. Conclusion

For future housing in northern climates both unvented and vented solar walls using effective TIM's will result in a lower energy consumption for space heating than traditional outer walls insulated with opaque insulation. If shading devices are used there will be no unacceptable thermal discomfort.

Acknowledgement

This project has been funded by the Danish Ministry of Energy.

References

- [1] "Energi 2000. Handlingsplan for en bæredygtig udvikling". Energiministeriet 1990.
- [2] "SUNCODE-PC". T. Wheeling, L. Palmiter. Ecotope Group, Seattle, WA, 1985.
- [3] "Vejrdata for VVS og Energi. Dansk referenceår TRY". SBI-rapport 135, Statens Byggeforskningsinstitut. B. Andersen, S. Eidorff, L. Hallgren, H. Lund, E. Pedersen, S. Rosenørn, O. Valbjørn, 1982. In Danish with an English summary.
- [4] "Udvikling af solvæg til nybyggeri". Olaf Bruun Jørgensen. LfV, DTH, 1991. In Danish with an English summary.
- [5] "Undersøgelse af solvægge ved hjælp af en indendørs forsøgsopstilling". Meddelelse nr. 179. LfV, DTH, 1987. In Danish with an English summary.

A.2. Beskrivelse af solvægge i EDB-model

I SUNCODE-manualen, [17], 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 beskrivelse af solvægge. Endvidere er omtalt de "tricks", som er gjort i forbindelse med undersøgelsen af de mere avancerede solvægge i dette projekt. Betydningen af de benyttede symboler er som i kap. 4 og 5.

I programmet er det ikke muligt at angive nogen sammenhæng mellem U_L og forskellen mellem middel-absorbertemperaturen, T_p , og middel-lufttemperaturen, T_a , på trods af, at der ofte vil være tale om en betydelig forøgelse af U_L , når temperaturforskellen, $T_p - T_a$, øges. Når der er solindfald om dagen, vil man typisk have en forskel på mellem 20 og 40°C. I fyringssæsonen vil forskellen, i situationer med varmetab gennem væggen, om natten typisk være mellem 5 og 20°C. I dette projekt er de benyttede værdier for solvæggens U_L beregnet ved en absorbertemperatur på 20°C. Dette medfører, at U_L ofte vil være lidt for lav om dagen og lidt for høj om natten. Herved sker en lille undervurdering af solvæggens energibesparende egenskaber.

Ved beregning af transmittansen for et dæklagssystem, forudsættes det i programmet, at systemet er sammensat af et vist antal identiske simple dæklag. Dette er imidlertid ikke tilfældet for de fleste af de i dette projekt undersøgte dæklagssystemer, dvs. systemerne med transparent isolering. For dæklagssystemer med transparent isolering er transmittansen beskrevet v.h.a. ækvivalente dæklagssystemer. Disse er bestemt ved 3 forskellige metoder:

Metode 1) For det undersøgte dæklag bestemmes i denne metode ækvivalente værdier af brydningsindekset, antallet af homogene lag samt tykkelsen af det enkelte lag. Værdierne bestemmes, således at de beregnede værdier af transmittansen for forskellige dæklag opbygget af x lag almindeligt glas stemmer bedst muligt med de målte eller allerede kendte værdier for det pågældende dæklagssystem. I simuleringerne er f.eks. benyttet et brydningsindex på 1,0 for dæklag med Isoflex for bedre at kunne simulere den stærke vinkelafhængighed for de forskellige typer transparent isolering. For ekstinktionskoefficienten benyttes for glas værdien 16 m^{-1} .

Metode 2) Denne metode er magen til metode 1, dog med den forskel at det i flere tilfælde har vist sig at være fordelagtigt i stedet at benytte et brydningsindeks på 1,526 (glas) og i stedet at variere værdierne for ekstinktionskoefficienten.

Metode 3) Metode 3 benyttes kun ved vurdering af dæklag med monolitisk silica aerogel (Airglass). Metoden er beskrevet detaljeret i [32].

Herudover er specificeret en reduktionsfaktor, SC , der bevirker, at det af programmet beregnede effektive transmittansabsorptans-produkt, $(\tau\alpha)_e$, får en korrekt værdi. Den benyttede værdi af SC er bestemt af:

$$SC = 0,5 \times \left(\frac{(\tau\alpha)_{e,1,n}}{(\tau\alpha)_{e,0,n}} + \frac{(\tau\alpha)_{e,1,d}}{(\tau\alpha)_{e,0,d}} \right)$$

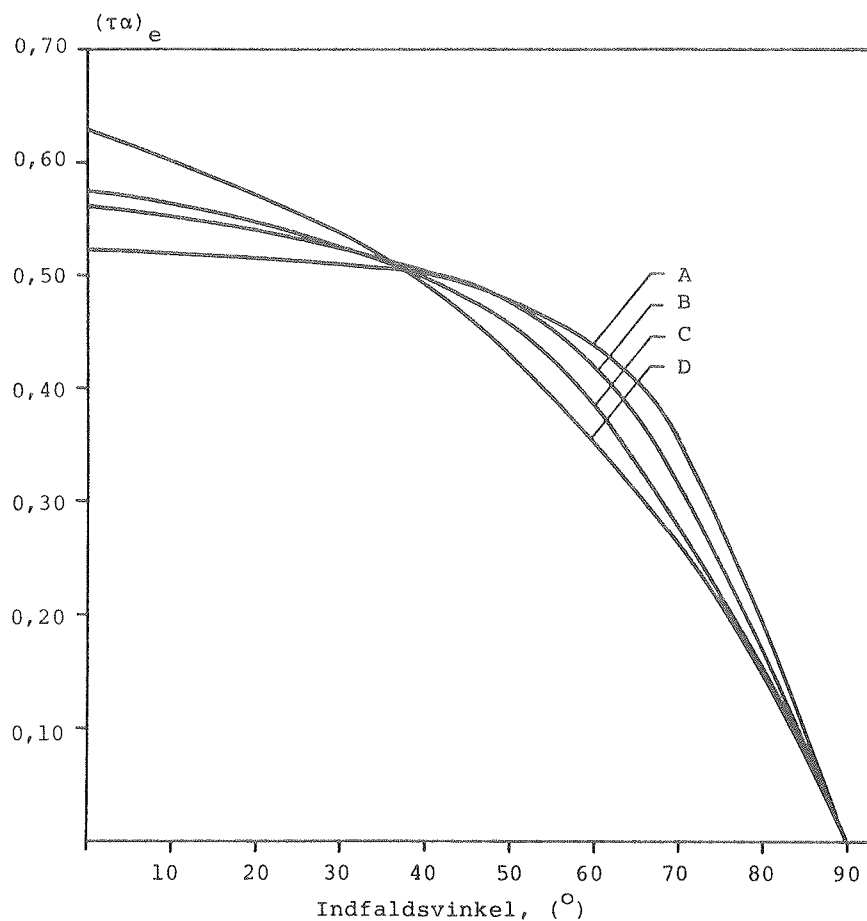
hvor indices 1, 0, n og d angiver, at der er tale om de korrekte værdier for hhv. det aktuelle dæklagssystem med transparent isolering, det ækvivalente dæklagssystem med x lag alm. glas, direkte solstråling og diffus solstråling.

For at illustrere princippet i metode 1 er de beregnede og målte værdier for $(\tau\alpha)_e$ for et dæklag med Isoflex sammenlignet i figur A.1. De forskellige kurver er beskrevet nedenfor:

- A - Transmittans for dæklag med Isoflex simuleret som i [1].
- B - Transmittans for dæklag med Isoflex simuleret som 4 lag alm. glas incl. reduktionsfaktor, SC, og med et brydningsindex på 1,0.
- C - Transmittans for dæklag med Isoflex simuleret som 6 lag alm. glas incl. reduktionsfaktor, SC, og med et brydningsindex på 1,0.
- D - Målte værdier for dæklag med Isoflex.

Energi- og komfortberegninger i kap. 5 er for Isoflex baseret på simuleringsmodel C.

Programmets tilnærmede beregning af $(\tau\alpha)_e$ vil generelt give lidt for lave værdier ved små indfaldsvinkler og lidt for høje værdier ved store indfaldsvinkler samt ved diffus stråling.



Figur A.1 Sammenligning mellem målte og simulerede værdier af $(\tau\alpha)_e$ for et dæklagssystem med Isoflex.