

SOLVÆGGE
MÅLT OG BEREGNET

af

LARS OLSEN



Laboratoriet for Varmeisolering
Danmarks Tekniske Højskole
Meddelelse nr. 167
Juli 1985

FORORD

Denne rapport er resultatet af et licentiatarbejde, som undertegnede startede i sommeren 1977 ved Laboratoriet for Varmeisolering med professor Vagn Korsgaard som faglærer. Licentiatprojektets titel er: Udnyttelse af solindfaldet på klimaskærmen til rumopvarmning.

Projektet er finansieret af et licentiatstipendium fra Danmarks tekniske Højskole og fra en fondsansættelse på Energiministeriets Solvarmeprogram. Til gennemførelse af de praktiske forsøg er der endvidere ydet støtte fra Superfos Glasuld a/s og civ.ing. Jacob Durup.

Det har været målet med afhandlingen, at også andre end særligt sagkyndige kan have glæde af de afsnit, der enten er generelle eller mere resultatorienterede, hvilket især er afsnit 2.

Til de medarbejdere fra laboratoriet, der har bistået med praktisk hjælp, råd og vejledning vil jeg gerne sige tak, ligesom en stor tak skal rettes til Kenneth Sørensen for rentegning af figurer og til Birthe Friis for et stort arbejde med renskrivning af manuskriptet.

Gentofte 1985

Lars Olsen

INDHOLD

Forord	i
1. INDLEDNING	1
1.1 OVERVEJELSER VEDRØRENDE SYSTEMTYPER	1
1.2 PROJEKTETS FORLØB	6
1.3 HISTORISK UDVIKLING	7
2. BEREGNINGER	13
2.1 BEREGNINGER MED HUSMODEL	13
2.1.1 Beskrivelse af bygning	13
2.1.2 Varmetab fra hus	17
2.1.3 Varmeakkumuleringsevnen i bygningen	23
2.1.4 Brugsvarme	27
2.1.5 Klimadata	32
2.1.6 Energiforbrug til opvarmning af bygningen	34
2.2 BEREGNINGSRESULTATER FOR HUSMODEL MED SOLVÆG	35
2.2.1 Solvæg med mobil isolering	35
2.2.2 Brugsvarmens indflydelse på udbyttet af en solvæg	44
2.2.3 Sydvejens absorptionskoefficienter	48
2.2.4 Solvæg isoleret med hvid glasuld	49
2.3 BEREGNINGSRESULTATER FOR OPTIMERET SOLVÆG	51
2.3.1 Dæklagsudformning	51
2.3.3 Varmelagermateriale	56
2.3.4 Solvejens lagertykkelse	58
2.3.5 Horisontafskærmning	59
2.3.6 Klimavariationer	61
2.3.7 Indeklima	63
3. FORSØG	67
3.1 FORSØGSOPSTILLING	67
3.1.1 Forsøgsrum	67
3.1.2 Beskrivelse af kalksandstensvægge	68
3.1.3 Solvæg isoleret med mobil isolering	69
3.1.4 Transportsystem for mobilisolering	72
3.1.5 Solvæg isoleret med hvid glasuld	75
3.1.6 Beskrivelse af glasuld	77
3.1.7 Reguleringssystemer	78
3.1.8 Driftserfaringer med mobil isolering	82
3.1.9 Solvægge med selektiv overflade	84
3.2 INSTRUMENTERING OG MÅLEPUNKTER	87
3.2.1 Opbygning af målesystem	87
3.2.2 Temperaturmålinger	91
3.2.3 Målepunkter i solvægge	93
3.2.4 Varmestrømsmålere	95
3.2.5 Måling af solindfald	97
4. MÅLINGER	99
4.1 MÅLERESULTATER	99
4.1.1 Måleperioder	99
4.1.2 Måleresultater for solvæg med mobil isolering	99
4.1.3 Solvæg isoleret med hvid glasuld	106

4.1.4	Måleresultater for solvægge med selektiv absorberoverflade	110
4.2	SAMMENLIGNING MELLEM MÅLINGER OG BEREKNINGER	117
4.2.1	Sammenligning mellem målinger og beregninger for solvæg med mobil isolering	117
4.2.2	Sammenligning mellem målinger og beregninger for solvæg med hvid glasuld	121
4.2.3	Sammenligning mellem målinger og beregninger for solvæg med selektiv absorberoverflade	126
4.3	KONDENSRISIKO	134
5.1	KONKLUSION	136
5.2	REFERENCER	143
5.3	SYMBOLLISTE	149
5.4	SUMMARY	161
5.5	RESUMÉ	163
Al.	TEORI	167
Al.1	VARMELEDNING	167
Al.1.1	Instationær varmeledning	167
Al.1.2	Løsning af instationær varmeledningsligning	168
Al.1.3	Randbetingelser	171
Al.1.4	Opstilling af varmestrømsbalance for et knudepunkt	172
Al.1.5	Varmebalance for en overflade	173
Al.1.6	Stabilitet ved beregning af temperatur i akkumulerende lag ved overflade	174
Al.1.7	Minimale lagtykkelser	177
Al.1.8	Sammenfattende om stabilitet	181
Al.2	VARMEOVERGANG I EN LUFTSPALTE	181
Al.2.1	Varmeovergang ved konvektion og ledning i en luftspalte	182
Al.2.2	Varmetab fra et hulrum på grund af termisk opdrift	183
Al.2.3	Varmeovergang ved stråling i et hulrum	188
Al.3	VARMEOVERGANG VED EN FRI OVERFLADE	191
Al.3.1	Udvendig overflade	191
Al.3.2	Varmeovergang ved indvendig overflade	194
Al.4	SOLSTRÅLING	198
Al.4.1	Ekstraterrestrial solstråling	198
Al.4.2	Solstrålingens retning	198
Al.4.3	Solindfald på en overflade	200
Al.4.4	Bestemmelse af diffus andel af solindfald	202
Al.5	TRANSMISSION GENNEM FORSKELLIGE MATERIALER	205
Al.5.1	Transmission, refleksion og absorption for et enkelt lag transparent materiale	206
Al.5.2	Transmission gennem acryl	211
Al.5.3	Beregning af ekstinktionskoefficient for hvid glasuld	214
Al.6	BEREGNING AF ABSORPTION I ET DÆKLAGSSYSTEM	218
Al.6.1	Generel teori	218

Al.6.2	Transmissions- og absorptionskoefficient for en dobbeltplade	221
Al.6.3	Beregning af optiske data for ribber i dobbeltplade	222
Al.7	TRANSMISSION VED DIFFUS SOLSTRÅLING	226
Al.7.1	Absorption af diffus stråling i dæklagssystem med retningsafhængig transmission	226
Al.7.2	Absorption af diffus stråling i dæklagssystem med indfaldsvinkel afhængig transmission	231
Al.7.3	Transmission gennem glasfiberarmeret polyesterplade	236
Al.8	OPSTILLING AF LIGNINGSSYSTEMER TIL BESTEMMELSE AF TEMPERATURER	237
Al.8.1	Bestemmelse af temperaturer ved mobil isolering	237
Al.8.2	Forudsætninger ved bestemmelse af temperaturfordeling i glasuld	239
Al.8.3	Varmeovergang ved element med glasuld	239
Al.8.4	Lagdeling i hvid glasuld	241
Al.8.5	Ligningssystem til beregning af temperaturer i hvid glasuld	242
Al.8.6	Ligningssystem til beregning af temperaturer i varmela- geret	244
A2	USIKKERHEDSBESTEMMELSE	246
A2.1	Usikkerhedsoverslag for måling af temperaturer	246
A2.2	Usikkerhedsoverslag for måling af varmestrøm	247
A2.3	Usikkerhedsoverslag for måling af solindfald	248
A2.4	Usikkerhedsoverslag for måling af udbyttet	250
A2.5	Usikkerhedsoverslag for måling af effektiviteten	253
A3	KONTROL AF MOBILISOLERINGENS FUNKTION	255
A3.1	Bestemmelse af tidspunkt for flytning af mobil isolering	255
A3.2	Kontrol af differenstermostat	256
	Licentiatafhandlinger fra Laboratoriet for Varmeisolering	261

1. INDLEDNING

Licentiatprojektets grundidé er at udnytte bygningers klimaskærm som et energiproducerende element i modsætning til normalt, hvor den betragtes som energiforbrugende element. Dette er gjort ved at udvikle et specielt udformet bygningselement kaldet en solvæg. I denne rapport omtales de forsøg, der er udført med solvægge. Resultaterne fra målingerne beskrives. En beregningsmodel er opbygget, og beregninger med modellen er sammenlignet med forsøgsresultaterne. Beregningsmodellen er anvendt til at bestemme solvægges udbytte ved varierende udformninger. I det følgende er beskrevet en række overvejelser, der ligger til grund for det udførte projekt samt en beskrivelse af de anvendte begreber.

1.1 OVERVEJELSER VEDRØRENDE SYSTEMTYPER

Er en bygnings udvendige overflader solbestrålet, er der potentielle muligheder for udnyttelse af den indfaldne energimængde til rumopvarmning. Specielt er lodrette sydvendte overflader interessante på grund af det relativt store solindfald i vinterhalvåret, hvor solhøjden er lav.

Simplest kan solstrålingen udnyttes, ved at den transmitteres gennem transparente åbninger i klimaskærmen. Inde i bygningen vil størstedelen af strålingen blive absorberet på overfladerne i rummet. Den absorberede varme medfører en temperaturstigning af overflader og rumluft.

Stigningens størrelse bestemmes bl.a. af ventilation og varme-transmission til det fri og af varmeudvekslingen med de materialer, der befinder sig i rummet.

Hvis temperaturen tillades at svinge frit, vil øget varmelagring i overfladerne medføre en formindskelse af temperatursvingningerne, samtidig med at der kan lagres varme til senere brug. Denne form for anvendelse af solvarme kaldes i det følgende for udnyttelse af det direkte tilskud.

Udnyttelsen vil være begrænset af, at store vinduesarealer let giver anledning til overophedning, fordi opholdszonen populært sagt fungerer som solfanger. Tendensen til overophedning vil medføre, at der skal fjernes overskudsvarme for at holde luft- og overfladetemperaturen nede på et rimeligt niveau. Ved et vist vinduesareal vil den del af solindfaldet, der bliver til overskudsvarme, være så stor, at en øgning af vinduesarealet ikke vil give tilstrækkelig udnyttelig solindfald til at opveje det forøgede transmissionstab gennem vinduerne.

Alternativt kan klimaskærmen udnyttes til at absorbere solstrålingen i stedet for bygningens indvendige overflader. Den opsamlede varme skal, for at kunne udnyttes, transporteres til rummet. Da solindfaldets størrelse normalt ikke svarer til det øjeblikkelige opvarmningsbehovs størrelse, er det nødvendigt at lagre varmen et stykke tid inden afgivelsen til rummet. Dette kan ske i separate lagre placeret et vilkårligt sted i bygningen eller i et lager integreret i klimaskærmen.

Er lageret adskilt fra absorberen er det ofte nødvendigt at anvende mekanisk energi for at transportere varmen til lageret. Et sådant system svarer til det, der normalt kaldes et aktivt solvarmesystem.

Er absorberen integreret i lageret, kan denne varmetransport foregå ved varmeledning. På tilsvarende måde kan varmeafgivelsen sammenbygges med lageret. Anvender man dette sidste princip, bliver opbygningen enkel, mens styringsmuligheden bliver vanskelig. Systemet kan derfor normalt ikke anvendes til fuldstændig dækning af opvarmningsbehovet, men kræver et supplerende opvarmningssystem, hvis rimelige komforttemperaturer skal kunne opretholdes.

For at der ikke skal tabes for meget af den varme, der absorberes i klimaskærmen, er det nødvendigt at varmeisolere mod det fri.

Et system som beskrevet ovenfor kaldes i det følgende for et solvægssystem (fig 1.1.1). Det er hovedsageligt dette princip, der er beskrevet i denne afhandling. Ofte benyttes betegnelsen solvæg uden ventilation for at skelne mellem de i det efterfølgende omtalte systemer.

Kravet til varmeisoleringen af solvæggen mod det fri er, at den er mest mulig transparent for solstråling, samtidig med at størst mulig varmeisoleringsevne bibeholdes. Ved at anvende mobil isolering er det muligt at forbedre varmeisoleringsgevnen i tidsrum, hvor der ikke er solskin.

I systemer, hvor varmen transporteres væk fra klimaskærmen og lagres i et separat lager, vil kravet til isolering mod varmetab fra absorberen være mindre, end hvis varmen lagres i klimaskærmen. Dette skyldes i det første tilfælde, at varmeisoleringen kun er nødvendig, når solen skinner, mens den varmeisolerende funktion i det andet tilfælde skal udnyttes hele døgnet.

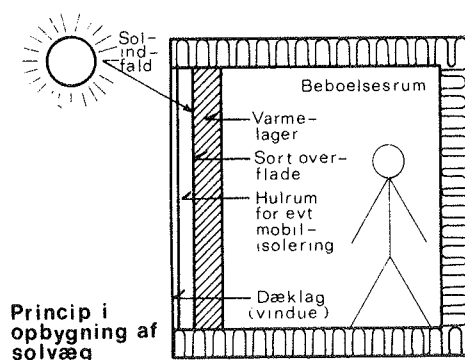


Fig. 1.1.1 Princippet i en solvæg

Energitransporten i en solvæg kan nærmere beskrives ved de forskellige former for varmetransport, der sker i dette system: Den indfaldne solstråling transmitteres gennem dæklagssystemet og absorberes på ydersiden af varmelageret. Den absorberede stråling omdannes til varme og giver anledning til en temperaturforøgelse på absorberen, der er varmelagerets yderside. Størstedelen af varmen ledes ind i lageret og bliver akkumule-

ret. En del af varmen tabes dog ved varmetransmission til det fri gennem dæklagssystemet. Den akkumulerede varme vil efterhånden ledes igennem varmelageret og afgives på den side af lageret, der vender ind mod rummet. Her vil varmen blive afgivet ved konvektion til rumluften og ved stråling til rummets overflader. Varmeafgivelsen vil ske med en vis tidsforsinkelse i forhold til solindfaldet. Tidsforsinkelsen er afhængig af væggens opbygning: For samme lagermateriale vil tidsforsinkelsen øges med en øget lagertykkelse. Tidsforsinkelsen er endvidere afhængig af lagermaterialets varmeledningsevne, varmemefylde og massefylde. Det er muligt at vælge disse størrelser, således at varmen hovedsagelig sker om aftenen og om natten, hvor der ikke er solindfald gennem vinduerne. Derved opnås en god kombination af udnyttelsen af solvarmen, idet solindfaldet gennem vinduerne hovedsagelig kan dække opvarmningsbehovet om dagen, mens solvæggen kan dække en del af behovet om natten.

Ovenstående gælder for lagermaterialer af faste stoffer. Er lagermaterialet vand, vil der på grund af konvektive strømme i vandet ske en hurtig forplantning af temperaturstigningen ind igennem lageret.

I udlandet er der udført en del forsøg med et system, der kaldes en Trombé væg opkaldt efter dr. Felix Trombé (1). Dette system er en speciel type solvæg, hvor hulrummet mellem absorberoverflade og dæklag udnyttes til cirkulation af rumluft. Luften kan cirkulere af sig selv på grund af den opvarmede lufts termiske opdrift.

Grunden til at dette system ikke er valgt fremfor solvægssystemet uden ventilation er, at der er en række problemer forbundet med luftcirkulationen. Luftcirkulationen er normalt tidsmæssigt sammenfaldende med solindfald gennem vinduer. Dette medfører let overophedningsproblemer i det bagvedliggende rum. Luftcirkulationen kan være svær at styre manuelt, hvorfor nogle anvender en ventilator til at cirkulere luften. Ventilationsåbningerne til hulrummet mellem dæklag og absorber vil kunne

forventes at give anledning til problemer: kondens og snavs på indersiden af dæklaget. Trombévægge kan give et lidt større energimæssigt udbytte end uventilerede solvægge (2), (3), (4). Disse undersøgelser viser endvidere at den energimæssige fordel er beskeden ved anvendelse af dette system, når der er god isolation mod varmetab til det fri.

Er varmelageret i Trombévæggen erstattet af isolering, svarer den til en luftsolfanger med selvcirkulation af rumluft. Dette system kaldes ofte en ventileret solvæg. Systemet er ikke her valgt til nærmere undersøgelse på grund af de ovenfor omtalte overophedningsproblemer, men systemet vil ifølge (5) kunne give et udbytte af samme størrelse som de i det følgende beskrevne uventilerede solvægge.

En medvirkende årsag, til at solvægge er valgt til nærmere undersøgelse, skyldes de potentielle økonomiske fordele ved, at absorber, varmelager og varmeafgiver er integreret i en enhed i modsætning til traditionelle solvarmesystemer med adskilte komponenter.

Ud over besparelsen ved at solvarmesystemet er en enhed, vil der være en besparelse, ved at en solvæg kan erstatte et traditionelt vægparti. Ved at anvende tunge byggematerialer som varmelager kan solvæggen indgå som et led i bygningens bærende konstruktion.

Solvægge medfører en ukontrolleret varmeafgivelse til de bagvedliggende rum. I denne rapport er undersøgt, hvorledes indeklimaet påvirkes af varmeafgivelsen. For at regulere rumlufttemperaturen kan det være nødvendigt at udlufte for at fjerne overskudsvarmen.

I perioder med høje udelufttemperaturer bør solvægge helst afskærmes for at undgå opsamling af solenergi. Dette kan ske ved at anvende mobil isolering eller specielle solafskærmninger. Permanent solafskærmning i form af udhæng kan være mindre velegnet pga. reduktionen af solindfald i opvarmningssæsonen.

1.2 PROJEKTETS FORLØB

På grundlag af førnævnte overvejelser blev der udviklet et relativt simpelt edb-beregningsprogram (6), der kunne simulere temperaturer og varmemestrømme i solvægge. Med dette første program blev der udført forskellige beregninger, der viste lovende resultater. For at kunne verificere disse beregninger var det ønskeligt at udføre målinger på solvægge.

Dette ønske resulterede i en række forslag til udførelse af solvægge. Mulighederne for at inkorporere salte i beton for at udnytte saltens smeltevarme til akkumulering af varme blev undersøgt. Dette blev opgivet, da denne løsning ville give mange materialeteknologiske problemer. I stedet valgtes som lagermateriale kalksandsten, da dette materiale havde relativ stor varmekapacitet, og da materialet relativt hurtigt kunne udtørres i modsætning til beton. Dette ville give en varme-transport i materialet, der kun i beskeden grad var influeret af fugtvandringer. Som dæklag for solvæggen ønskedes én udførelse med og én uden mobilisolering. Til solvæggen med mobilisolering blev der undersøgt forskellige systemer. En hæveportløsning blev undersøgt, men opgivet, da det ville give en vanskelig indbygning. Forskellige rullegardinløsninger blev opgivet på grund af deres relativt beskedne varmeisoleringsevne. I stedet blev der valgt en løsning, som Laboratoriet for Varmeisolering tidligere havde udført eksperimenter med: Ekspanderede polystyrenkugler, der blev transporteret af en luftstrøm. Denne løsning giver samtidig en god isoleringsevne (7). Som dæklag blev en acryl dobbeltplade valgt, da den har en god soltransmission og god isoleringsevne samtidig med en enkel fastgørelse.

Til den anden solvæg blev der anvendt en fast isolering af hvid glasuld. Ideen ved denne konstruktion er, at noget af solindfaldet vil blive absorberet et stykke inde i mineralulden. En del af denne varme vil blive transporteret ind til væggen og give en reduktion af varmetabet fra væggen til det fri.

Efter opbygningen af forsøget foregik der målinger i perioder i 1979. Efter en kontrol af målingerne blev disse sammenlignet med det oprindelige edb-program. Ved disse mindre justeringer blev edb-programmet tilpasset forsøgene. Beregningsprogrammet blev ændret, således at det blev muligt at regne på solvægge indbygget i en normal bygning. På grundlag af dette reviderede edb-program blev der gennemført beregninger på basis af reference vejrdato. Beregninger af solvæggene, der blev udført forsøg med, gav anledning til at foreslå en forbedret type solvæg uden mobil isolering, men med anvendelse af et antal lag glas og en selektiv absorber.

Beregningsprogrammet er benyttet til at udføre en følsomhedsanalyse af en række parametre, der har betydning for udbyttet af en solvæg. Af disse kan nævnes solvægsareal, lagermateriale, lagertykkelse og horisontafskærmning.

Senere er der udført målinger på en solvæg med en selektiv absorberoverflade med og uden V-korrugeret honeycomb mellem glasset og absorberoverfladen. Derved har det været muligt at sammenligne beregningsmetoden med målinger for en solvæg med selektiv absorber.

1.3 HISTORISK UDVIKLING

Udnyttelse af solindfald på klimaskærmen til opvarmningsformål er en teknik, der har været anvendt i flere ældre kultursamfund.

Pueblo indianerne i USA tilpassede orienteringen af væggene i klippehulerne, således at disse var solbeskinnede om vinteren og i skygge om sommeren.

Sokrates har beskrevet et solhus fra oldtiden, der udnytter solindfaldet på sydfacaden om vinteren og giver en vis solafskærmning om sommeren.

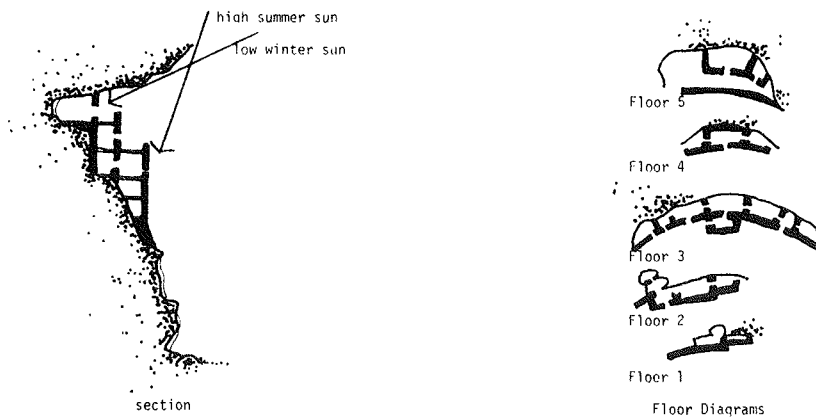


Fig. 1.3.1 Huler i Montezuma's Castle, hvor klipperne giver solafskærmning om sommeren, mens solindfaldet er uhindret om vinteren (8).

«Solarhaus-Konzeption»

von Sokrates

- 1 Sonneneinstrahlung auf die Südfassade im Sommer
- 2 Sonneneinstrahlung auf die Südfassade im Winter
- 3 Gedeckte Terrasse
- 4 Wohnraum
- 5 Vorratsräume als thermische Pufferzone
- 6 Isolierwand gegen Norden

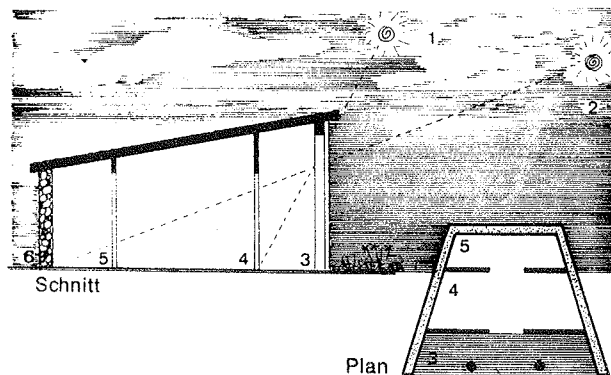


Fig. 1.3.2 Sokrates' solhus princip (9).

I vor egen kulturkreds var en af pionererne E.L. Morse, der i 1881 patenterede en selvcirkulerende solfanger indbygget i sydfacaden i et hus (10), (11). Systemet blev anvendt til rumopvarmning.

Ideen blev genanvendt af dr. Felix Trombé og Jaques Michel i Odeillo, Frankrig. De anvendte et system, der både udnyttede selvcirkulation af luft og varmetransmission gennem den bagvedliggende væg (1).

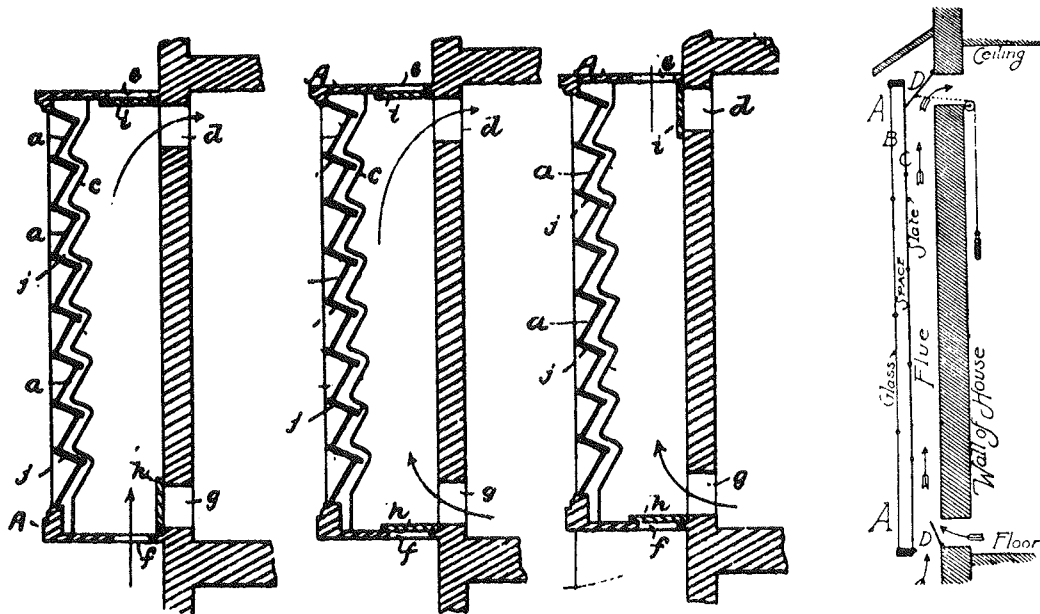


Fig. 1.3.3 Patenttegninger af professor Edward S. Morses første solvæg fra 1881 (t.v.). De viser tre forskellige anvendelser. Til højre tværsnit af solvæg i Morses hus i Salem, Massachusetts (11).

Efter oliekrisen i 1973 øgedes interessen for udnyttelse af solen som energikilde. Specielt i USA og Frankrig er der udført et stort arbejde med at bygge, forbedre og teste solvægssystemer. I det følgende er beskrevet en række muligheder for udformning af en solvæg.

Den centrale del af solvæggen, lageret, kan udføres af gængse byggematerialer, eller lageret kan være en vandtank. En kombination er at have vand i hulrum i et betonelement (12).

Faseændringsmaterialer er også en mulighed (13), (14). Anvendes disse materialer, er det muligt at reducere tykkelsen af solvæggen. Man må dog være opmærksom på salthydraternes relativt dårlige varmeledningsevne. Det forhold kan let medføre, at den varme, der er akkumuleret på ydersiden af væggen, kun i begrænset omfang ledes gennem væggen til det bagvedliggende rum.

Absorberen på ydersiden af lageret kan være en mørk overflade. Den skal helst være sort, men endnu bedre vil en selektiv absorber være (15). En selektiv absorber er i stand til at absorbere størstedelen af solstrålingen samtidig med, at den langbølgede varmeudstråling er begrænset.

Varmeisoleringen mod det fri kan opnås på flere forskellige måder. Hindring af varmetab fra absorberen til det fri alene ved udnyttelse af den udvendige varmeovergangsisolans vil normalt ikke være tilstrækkeligt. Ved at have en eller flere lukkede luftspalter foran absorberen vil varmetabet fra absorberen blive reduceret væsentligt.

Dæklagene kan være af glas, plastplade eller en udspændt plastfolie. En forøgelse af antallet af dæklag nedsætter transmissionen af solstråling, men forøger isoleringsevnen af dæklagskonstruktionen. Et muligt plastmateriale er fx teflon, der for tynde folier har en transmission for solstråling på 96%, mens transmissionen for langbølget temperaturstråling er på 58% (16). Dette gør, at en kombination med selektive overflader, der har en lille emission i det langbølgede område, vil være at foretrække. En anden mulighed er at anvende dæklag med en påført transparent coating. Der udføres et stort arbejde med udvikling af nye belægninger (17). Et problem er at opnå tilstrækkelig god transmission for solstråling samtidig med en tilstrækkelig lille emission af langbølget varmestråling.

Det er også muligt at anvende specielle materialer mellem absorber og yderste dæklag som fx honeycomb, der opdeler hulrummet i et antal mindre hulrum. Honeycomb kan udformes på mange måder, af fx rør eller skiver, vandrette eller hældende (18), (19), eller som V-korrugerede flader mellem absorber og dæklag (20). Opskummet akryl er en anden mulighed (19), men transmissionen af solstråling er mindre end hvad der kan opnås ved en dæklagskonstruktion af vinduesglas med samme varmetransmissionskoefficient.

Et materiale, der i fremtiden kan tænkes at blive anvendt i dæklagskonstruktioner, er silika aerogel (17), (21), (22). Materialet har en stor porøsitet og er opbygget af en mikrostruktur af bundne fine siliciumpartikler. Ifølge (17) er transmissionen for solstråling 90% ved 5 mm tykkelse og 67% ved 20 mm tykkelse. Materialet isolerer bedre end mineraluld og har et brydningsindex, der svarer til luftens. Ekstinktionskoefficienten og dermed absorptionen af solstråling i materialet svarer til almindeligt vinduesglas.

Ovennævnte isoleringssystemer er alle gennemskinnelige og uden bevægelige dele. For at reducere varmetabet mest muligt kan varmeisoleringen øges ved at anvende mobil isolering. Denne kan udformes som beskrevet i denne rapport med ekspanderede polystyrenkugler. Andre muligheder er isolerende gardiner, persienner og skodder (23). Isoleringsevnen kan øges, ved at mobilisoleringens overflader har en lav emissionskoefficient for langbølget stråling. En væsentlig fordel ved mobilisolering er, at den kan anvendes som solafskærmning i tidsrum, hvor solindfald er uønsket, men til gengæld kræves en styring af systemet.

Systemer, hvor varmetransporten mellem absorber og lager ikke foregår ved ledning, er også en mulighed. Dette kan være i form af de tidligere omtalte ventilerede solvægge. Et andet system benytter heat pipes, der består af lukkede rør, hvori der er et varmetransporterende medie, som ved hjælp af en fordamplings-kondensationsproces er i stand til at fungere som en termisk diode (18), (24).

I hovedparten af ovennævnte systemer er det nødvendigt at anvende solafskærmning i sommerperioden. Som afskærmning kan fx anvendes lameller, gardiner eller markiser. Et problem er dog betjeningen. Manuel betjening er mulig men besværlig. Automatisk regulering kan let blive dyr.

En løsning i fremtiden kan være elektrokromatiske belægninger, hvor en elektrisk spænding vil være i stand til at ændre transmissionen af solstråling gennem belægningen. Der er dog ikke i

de hidtidige forskningsresultater fremkommet belægninger, som er tilstrækkelig gode til anvendelse i praksis (17), (25).

Ovenstående viser, at der findes en lang række muligheder for at udnytte klimaskærmen som et energiopsamlende element.

2. BEREGNINGER

I dette kapitel er først vist resultater fra beregninger med bygningsmodeller uden solvægge. I efterfølgende afsnit vises resultater af beregninger med solvægge indbygget i tilsvarende bygningsmodeller.

2.1 BEREGNINGER MED HUSMODEL

Til at beregne varmebalancen for bygningsmodellerne er edb-programmet kaldet BA4 anvendt (26). BA4 kan beregne varmebalancen for et rum hver halve time igennem et år. Beregningsmodellen i BA4 er vist på fig. 2.1.1.

Forudsætningerne i modellen er, at temperaturerne i rummet kan beskrives ved hjælp af én rumlufttemperatur, én overfladetemperatur og én temperatur for de akkumulerende lag, et såkaldt fiktivt akkumulerende lag. Endvidere forudsættes konstante varmeovergangskoefficienter for overfladerne. Modellen er detaljeret beskrevet i ref. (26), (27), (28).

2.1.1 Beskrivelse af bygning

Til beregning af årsvarmebalancen tages udgangspunkt i et parcelhus på 150 m². Grundplanen er vist på fig. 2.1.2.

Orienteringen i forhold til verdenshjørnerne er valgt således, at der er gode potentielle muligheder for udnyttelse af solindfaldet på sydfacaden. Huset er aflangt med akseretning øst-vest og med et vægareal mod syd på 50 m². Heraf regnes 6,8 m² at være uudnytteligt med hensyn til solvarmeudnyttelse. Det resterende areal tænkes opdelt i 4 moduler à 10,8 m². Hvert af disse felter kan bestå af

- a) Normal væg isoleret med 200 mm mineraluld.
- b) Glasfacade med 2 eller 3 lag glas
- c) Solvæg.

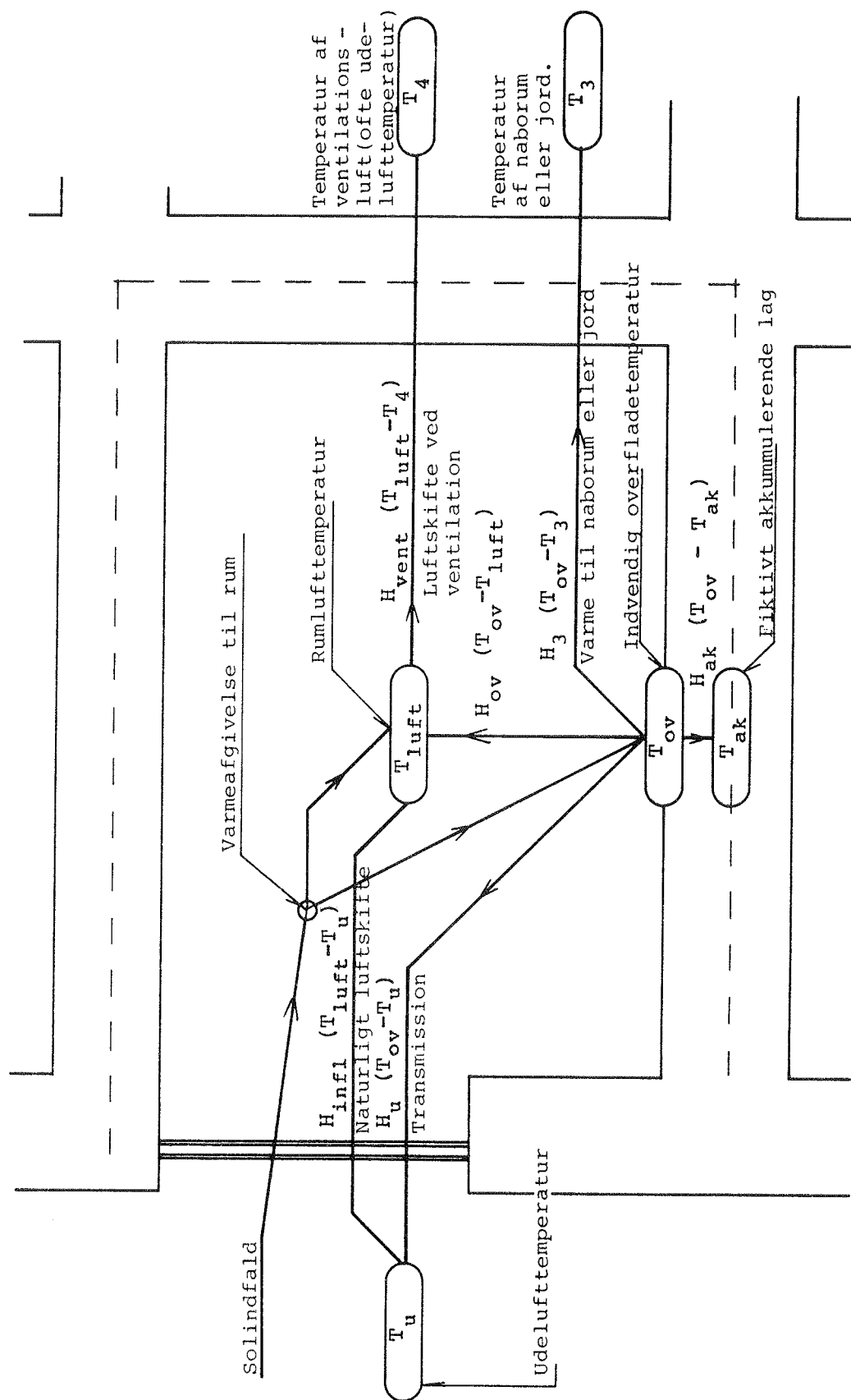
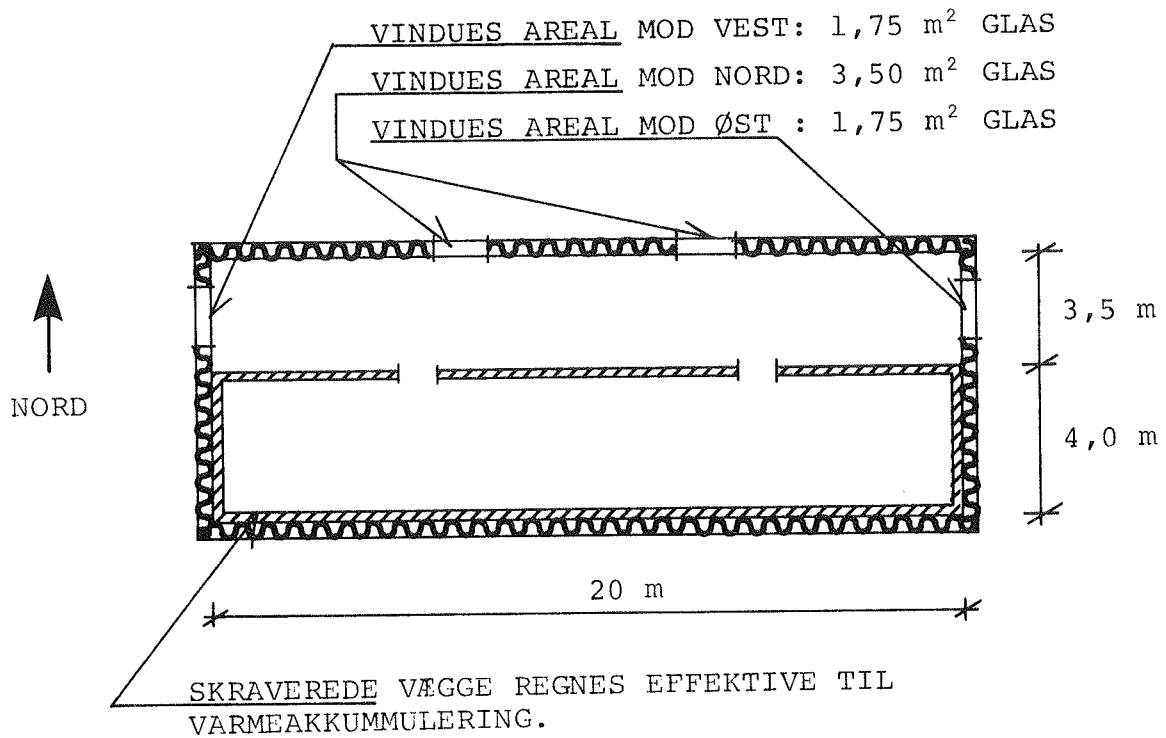
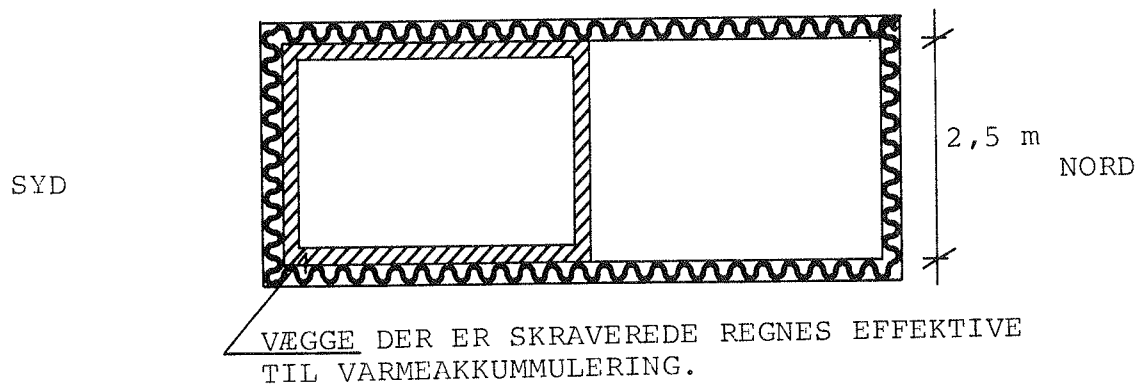


Fig. 2.1.1 Skematisk tegning af rum med beregningsmodel til BA4.



PLAN AF HUSMODEL UDEN VINDUES- ELLER SOLVÆGSAREAL MOD SYD.



LODRET SNIT I HUSMODEL

Fig. 2.1.2 Grundplan og lodret snit i husmodel.

Væggene mod øst, nord og vest er forsynet med i alt 8,4 m² vinduer fordelt som vist på fig. 2.1.3. Dette sikrer tilstrækkeligt dagslys i de nordvendte rum.

GLAS OG/ELLER SOLVÆGSAREAL INCL. KARM m ²	GLASAREAL m ²	REDUCERET AREAL VED ANVENDELSE AF 3 LAG GLAS m ²	VÆGAREAL m ²
Sydvæg			
0,0	0,0	0,0	50,0
10,8	9,0	8,1	39,2
21,6	18,0	16,2	28,4
32,4	27,0	24,3	17,6
43,2	36,0	32,4	6,8
Vestvæg			
2,10	1,75	1,575	16,7
Nordvæg			
4,20	3,50	3,150	45,8 m ² heraf 6,0 m ² døre
Østvæg			
2,10	1,75	1,575	16,7
Tag			
Areal	150 m ²		

Fig. 2.1.3 Tabel over arealer til bestemmelse af solindfald og transmissionstab i huset.

Solvæggen indpasses i huset, ved at en del af husets sydvæg erstattes med en solvæg. De termiske data for bygningen, der benyttes i dette tilfælde, er dem, der svarer til huset med et vinduesareal lig summen af solvægsarealet og det aktuelle vinduesareal.

2.1.2 Varmetab fra hus

Som referenceværdier for husets varmetab er benyttet to typer huse:

- a) Hus bygget efter bygningsreglementet fra 1982 (29)
- b) Lavenergihus med et dimensionerende varmetab på ca. 2/3 af et hus bygget efter BR-82

		BR-82 hus	Lavenergihus
Boligareal	m ²	150	150
Rumvolumen	m ³	375	375
Vinduesareal (glas)			
Syd	m ²	0-36	0-36
Øst	m ²	1,75	1,75
Vest	m ²	1,75	1,75
Nord	m ²	3,50	3,50
Lag glas		2	3
Karmareal (i forh. til glasareal)	%	20	20
Transmissionskoefficient incl. karm, k_{vind}	W/m ² K	2,8	2,1
Dørareal	m ²	6,0	6,0
k-værdi	W/m ² K	2,0	1,2
Loftsisolering	m	0,2	0,3
k-værdi	W/m ² K	0,200(0,205)	0,130(0,132)
Ydervægsisolering	m	0,125	0,2
k-værdi	W/m ² K	0,300(0,31)	0,195(0,20)
Gulvisolering	m	0,10	0,15
Ydre randfelt	W/m ² K	0,37(0,39)	0,27(0,28)
Indre randfelt	W/m ² K	0,29(0,30)	0,22(0,226)
Naturligt luftskifte	h ⁻¹	0,50	0,15
Kontrolleret luftskifte	h ⁻¹	0	0,50
Varmegenvinding	%		70
Køling med forceret ventilation			
Luftskifte max	h ⁻¹	4	4

Fig. 2.1.4 Data for de to husmodeller. Tallene i parentes er transmissionskoefficienter uden indvendig overgangsisolans.

De benyttede værdier for isolering og varmetransmissionskoefficienter er angivet i fig. 2.1.4. Varmetransmissionskoefficienten for mobilisolering, når den medregnes, er $0,55 \text{ W/m}^2\text{K}$. I fig. 2.1.5 er angivet et eksempel på opnåelse af denne k -værdi.

	3 lags rude	2 lags rude	Enhed
Isoleringstykkelse af ekstruderede polystyrenkugler (L)	100	107	mm
Isolans $\frac{L}{0,050}$	2,00	2,14	$\text{m}^2\text{K/W}$
Isolans af lufthulrum	0,13	-	$\text{m}^2\text{K/W}$
Overgangsisolans	0,17	0,17	$\text{m}^2\text{K/W}$
Samlet isolans	2,30	2,31	$\text{m}^2\text{K/W}$
Karmareal	20	20	%
Varmetransmissionskoefficient af karm	1,0	1,0	$\text{W/m}^2\text{K}$
Varmetransmissionskoefficient k_{mob}	0,55	0,55	$\text{W/m}^2\text{K}$

Fig. 2.1.5 Eksempel på opnåelse af en transmissionskoefficient på $0,55 \text{ W/m}^2\text{K}$ for vinduer med mobil natisolering (k_{mob}).

Der beregnes varmeoverføringsevnen ($H_{\text{-sydvæg}}$) fra rumluft til udeluft gennem klimaskærmen, dog uden hensyntagen til 50 m^2 sydvæg (se fig. 2.1.6). Denne størrelse benyttes til at beregne varmeoverføringsevnen gennem klimaskærmen, når sydvæggen anvendes til vindue eller væg (fig. 2.1.7):

$$\begin{aligned}
 H_{\text{hus} + \text{vind}} &= H_{\text{-sydvæg}} + k_{\text{vind}} \cdot A_{\text{vind},s} + k_{\text{væg}} \cdot A_{\text{væg}} \\
 &= \begin{cases} \text{BR-82 hus: } 113,46 + 2,8 A_{\text{vind},s} + 0,31 A_{\text{væg}} & (\text{W/K}) \\ \text{Lavenergihus: } 76,53 + 2,1 A_{\text{vind},s} + 0,20 A_{\text{væg}} & (\text{W/K}) \end{cases} \quad (2.1.1)
 \end{aligned}$$

		BR-82 HUS		LAVENERGIHUS	
	Areal	Transmissionskoefficient	Varmeoverføring	Transmissionskoefficient	Varmeoverføring
	m ²	W/m ² K	W/K	W/m ² K	W/K
Loft	150	1,15 · 0,205	35,36	1,15 · 0,132	22,77
Ydervægge (uden 50 m ² sydvæg)	73,2	0,31	22,69	0,20	14,64
Døre	6,0	2,0	12,0	1,2	7,20
Gulv, ydre randfelt	51,0	0,39	19,89	0,280	14,28
Vinduer (øst, vest, nord)	8,4	2,8	23,52	2,1	17,64
Transmission til udeluft, dog ikke gennem 50 m ² sydvæg			113,46		76,53
Gulv, indre randfelt	99	0,30	29,70	0,226	22,37

	Volumen	Effektivt luftskifte	Varmeoverføring	Effektivt luftskifte	Varmeoverføring
	m ³	h ⁻¹	W/K	h ⁻¹	W/K
Naturligt luftskifte	150 x 2,5	0,50	63,75	0,15	19,13
Kontrolleret luftskifte		0	0	0,50(1-0,7)	19,13
Varmeoverføring ved ventilation			63,75		38,25

Fig. 2.1.6 Beregning af husets transmissions- og ventilations- tab. Varmetransmission gennem de 50 m² sydvæg er ikke medregnet.

Bygningsstype					UDEN MOBIL ISOLERING		MED MOBIL ISOLERING		
	Vægarreal syd A _{væg}	k _{væg} · A _{væg}	Glasareal syd	Vinduesareal A _{vind,S}	k _{vind} · A _{vind,S}	H _{hus+vind}	k _{mob} · A _{vind,S}	H _{hus+mob}	H _{hus+mob} H _{hus+vind}
	m ²	W/K	m ²	m ²	W/K	W/K	W/K	W/K	-
BR-82 hus	50,0	15,50	0	0,0	0,0	128,96	0,0	110,06	0,8534
	39,2	12,15	9	10,8	30,24	155,85	5,94	112,65	0,7228
	28,4	8,80	18	21,6	60,48	182,74	11,88	115,24	0,6306
	17,6	5,46	27	32,4	90,72	209,64	17,82	117,84	0,5621
	6,8	2,11	36	43,2	120,96	236,53	23,76	120,43	0,5092
Lavenergihus	50,0	10,00	0	0,0	0,0	86,53	0,0	73,51	0,8495
	39,2	7,34	9	10,8	22,68	107,05	5,94	77,29	0,7220
	28,4	5,66	18	21,6	45,36	127,57	11,88	81,07	0,6355
	17,6	3,52	27	32,4	68,04	148,09	17,82	84,85	0,5730
	6,8	1,36	36	43,2	90,72	168,61	23,76	88,63	0,5257

Fig. 2.1.7 Beregning af varmetab fra hus med og uden mobil natisolering for vinduer. Ingen solvæg.

Her er $A_{vind,S}$ vinduesarealet i sydfacade og $A_{væg}$ vægarealet i sydfacade.

Er der mobil isolering for vinduerne, er varmeoverføringsevnen:

$$\begin{aligned}
 H_{hus+mob} &= H_{-sydvæg} + k_{mob} \cdot A_{vind,S} + k_{væg} \cdot A_{væg} \\
 &\quad - (k_{vind} - k_{mob}) \cdot \Delta A_{vind,N,\emptyset,V} \\
 &= \begin{cases} \text{BR-82 hus:} & 94,56 + 0,55 A_{vind,S} + 0,31 A_{væg} \text{ (W/K)} \\ \text{Lavenergihus:} & 63,51 + 0,55 A_{vind,S} + 0,20 A_{væg} \text{ (W/K)} \end{cases} \quad (2.1.2)
 \end{aligned}$$

Her er $A_{vind,N,\emptyset,V}$ vinduesarealet mod nord, øst og vest, idet der antages, at alle vinduesarealer mobilisoleres. De øst-, nord- og vestvendte arealer kan evt. mobilisoleres med skodder.

Endvidere er der foretaget beregninger, hvor vinduesarealet mod syd fastholdes på 10,8 m², mens solvægsarealet (A_{solv}) varieres op til 27 m². (Fig. 2.1.8). Dette vil være realistiske størrelser ved udnyttelse af solvægge. Vinduesarealet vil dermed være tilstrækkeligt til at kunne tilfredsstille de belysningsmæssige krav. Vinduesarealet i huset udgør i alt 11% af gulvarealet, og 56% af vinduesarealet er i dette tilfælde anbragt i sydfacaden.

Det dimensionerende varmetab ved rumlufttemperaturen 20°C, udelufttemperaturen -12°C og jordtemperaturen 8°C er beregnet. Beregningen følger Dansk Ingeniørforenings regler for beregning af varmetab (30). For de to hustyper er varmetabet angivet for de enkelte varmetabsandele i afhængighed af vinduesarealet mod syd. (Fig. 2.1.9 og 2.1.10).

I beregningerne er der forudsat, at rumlufttemperaturen frit tillades at flyde mellem 20 og 24°C. Varmeafgivelsen er beregningsmæssigt sat til at være ideel, således at temperaturen holdes på præcis 20°C i perioder, hvor der tilføres varme fra varmesystemet. Er temperaturen ved at komme over 24°C, forudsættes der beregningsmæssigt automatisk udluftning med et luftskifte på op til 4 g/h.

	$A_{\text{vind}, S}$	$A_{\text{sol v}}$	$A_{\text{væg}}$	$k_{\text{væg}} \cdot A_{\text{væg}}$	$H_{\text{hus}} + \text{vind}$	$H_{\text{hus}} + \text{mob}$	$\frac{H_{\text{hus+mob}}}{H_{\text{hus+vind}}}$
	m^2	m^2	m^2	W/K	W/K	W/K	
BR 82-hus	10,8	0,0	0,0	0,0	143,70	100,50	0,6994
	10,8	0,0	39,2	12,15	155,85	112,65	0,7228
	10,8	10,8	28,4	8,80	152,50	109,30	0,7167
	10,8	21,6	17,6	5,46	149,16	105,96	0,7104
	10,8	32,4	6,8	2,11	145,81	102,61	0,7037
Lavenergihus	10,8	0,0	0,0	0,0	99,21	69,45	0,7000
	10,8	0,0	39,2	7,84	107,05	77,29	0,7220
	10,8	10,8	28,4	5,68	104,89	75,13	0,7163
	10,8	21,6	17,6	3,52	102,73	72,97	0,7103
	10,8	32,4	6,8	1,36	100,57	70,81	0,7041

Fig. 2.1.8 Beregning af varmetabet fra hus med solvæg med konstant vinduesareal. (Varmetransmission gennem solvæg ikke medregnet).

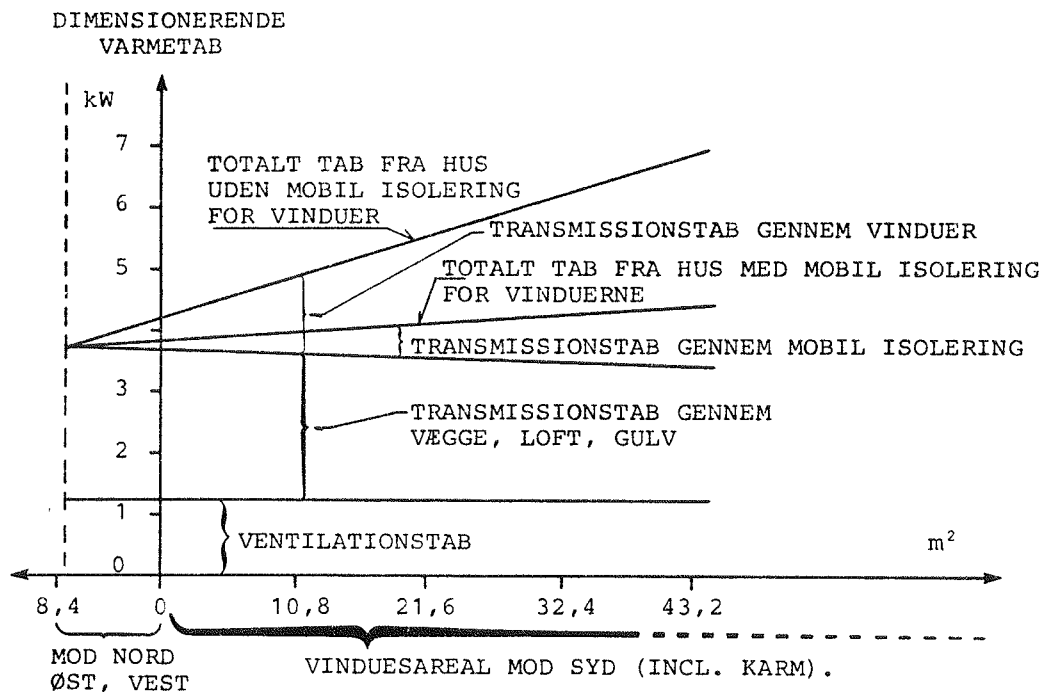


Fig. 2.1.9 Fordeling af transmissions- og ventilationstab fra "Lavenergihus" med forskellige vinduesarealer.

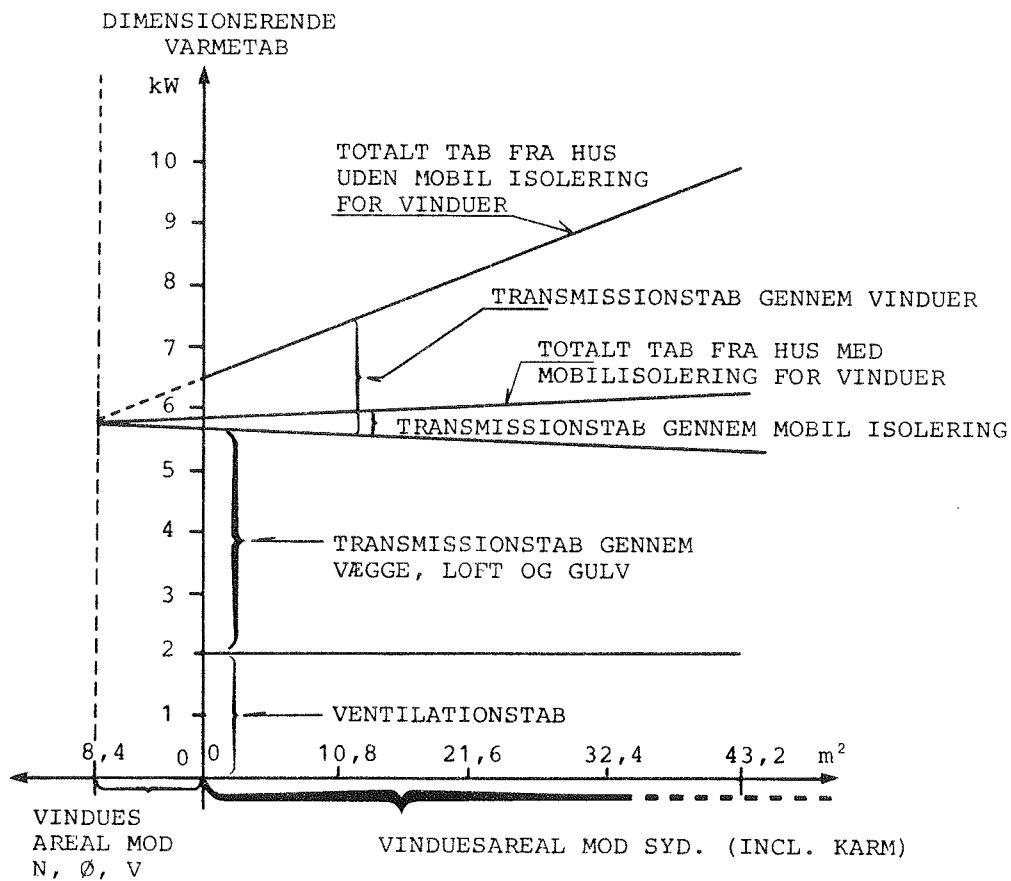


Fig. 2.1.10 Fordeling af transmissions- og ventilationstab fra "BR 82" huset med forskellige vinduesarealer.

2.1.3 Varmeakkumuleringsevnen i bygningen

Ved beregning af bygningens varmebalance antages, at bygningens varmekapacitet beregningsmæssigt er samlet i ét fiktivt akkumulerende lag inde i bygningselementerne. I det følgende beskrives hvorledes varmekapaciteten af og varmeovergangen til dette lag kan bestemmes. Den beskrevne metode bygger hovedsagelig på de forudsætninger, der er beskrevet i ref. (27) og (31).

I beregningerne medtages de akkumulerende bygningselementer, der begrænser det sydvendte rum, idet det nordvendte rum kun i begrænset omfang vil deltage i temperatursvingningerne.

For at bestemme varmeudvekslingen mellem det fiktive lag og de indvendige overflader findes først de termiske karakteristika for hver af de indgående bygningselementer.

Det enkelte bygningselement er ofte opbygget af forskellige materialeglag. Varmekapaciteten antages at ligge i midten af hvert dellag. (Se fig. 2.1.11).

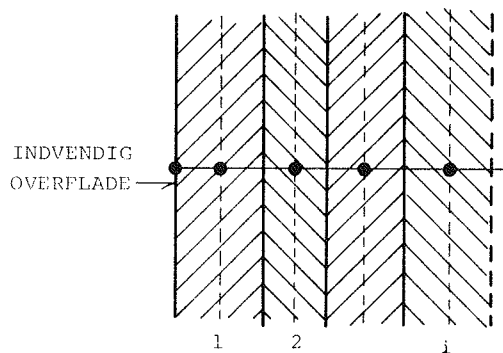


Fig. 2.1.11 Skematisk tegning af bygningselement opdelt i lag af forskellige materialer.

Isolansen for det i 'te lag kan beregnes af:

$$M_i = \frac{L_i}{\lambda_i} \quad (\text{m}^2 \text{ K/W}) \quad (2.1.3)$$

hvor L_i er tykkelsen af lag i
 λ_i er varmeledningsevnen af lag i

Varmekapaciteten for lag i

$$K_i = \frac{L_i \cdot \rho \cdot c_p}{3600} \quad (\text{Wh/m}^2 \text{ K}) \quad (2.1.4)$$

hvor ρ massefylden (kg/m^3)
 c_p varmekapaciteten (J/kg K)

Resultierende isolans mellem i'te akkumulerende lag og indvendig overflade:

$$M_{i,res} = M_i/2 + \sum_{j=1}^{i-1} M_j \quad (\text{m}^2 \text{ K/W}) \quad (2.1.5)$$

Rumluft- og overfladetemperaturer vil ændre sig i afhængighed af bl.a. udeklimaets variationer. Den dominerende svingning af temperaturerne vil være en døgnsvingning. Tidskonstanten for denne svingning er: $\tau_{\max} = 1/\omega = 24/2\pi = 3,82 \text{ h}$, hvor ω er vinkelhastigheden for en sinusformet døgnsvingning. Et dellag vil ændre temperatur i afhængighed af indvendig overfladetemperatur og tidskonstanten for svingningen af lagets temperatur.

Det i'te lags bidrag til tidskonstanten kan beregnes af:

$$\tau_i = M_{i,res} \cdot K_i \quad (\text{h}) \quad (2.1.6)$$

Den samlede tidskonstant for lagene fra 1 til i kan bestemmes som summen af de første i tidskonstanter.

$$\tau_{i,res} = \sum_{j=1}^i \tau_j \quad (\text{h}) \quad (2.1.7)$$

Ved beregning af tidskonstanterne for bygningselementerne skal der medtages så stor en dybde, at tidskonstanten $\tau_{i,res}$ ikke overstiger konstanten for en døgnsvingning, med mindre der er anbragt et isolerende lag mellem den indvendige overflade og det akkumulerende lag. Er dette tilfældet, kan der medtages så

meget af materialet, at tidskonstanten bliver 6 h. Hvis der i konstruktionen indgår et isolerende lag med en tykkelse større end 30 mm, skal dette og dybereliggende lag ikke medtages. Endvidere skal der for en symmetrisk væg kun medregnes halvdelen af væggen tykkelse fra hver side af væggen.

Den samlede varmekapacitet af et bygningselement kan bestemmes ved summation af de indgående akkumulerende lags varmekapaciteter.

$$K_{be} = \sum_{j=1}^i K_j \quad (\text{Wh/m}^2 \text{ K}) \quad (2.1.8)$$

Varmeoverføringstallet mellem den indvendige overflade og det fiktive akkumulerende lag, der indeholder den samlede varmekapacitet for et bygningselement, kan bestemmes som:

$$h_{be} = \frac{K_{be}}{\tau_{i,res}} \quad (\text{W/m}^2 \text{ K}) \quad (2.1.9)$$

Er bygningselementet homogent, kan den tykkelse (L_1), der skal medtages, let bestemmes.

Tidskonstanten er:

$$\begin{aligned} \tau &= M_{res} \cdot K_{be} = \frac{M_1}{2} \cdot K_1 \\ &= \frac{L_1}{2\lambda_1} \cdot \frac{L_1 \cdot \rho \cdot c_p}{3600} \\ &= \frac{L_1^2 \cdot \rho \cdot c_p}{7200 \cdot \lambda_1} \quad (h) \end{aligned} \quad (2.1.10)$$

Er den dominerende svingning en døgnsvingning, må tidskonstanten maksimalt være $\tau_{max} = 3,82$ h. Den maksimale tykkelse bliver:

$$\begin{aligned}
L_{\max} &= \sqrt{\frac{\tau_{\max} \cdot \lambda_1 \cdot 7200}{\rho \cdot c_p}} \\
&= \sqrt{3,82 \cdot 7200 \cdot \frac{\lambda_1}{\rho \cdot c_p}} \\
&= 166 \sqrt{\frac{\lambda_1}{\rho \cdot c_p}} = 166 \cdot \sqrt{a} \quad (m)
\end{aligned} \tag{2.1.11}$$

hvor a er temperaturledningstallet.

De foregående formler omfatter kun bygningselementer af samme type. For et rum med forskellige bygningselementer kan den samlede varmekapacitet bestemmes ved summation af de enkelte bygningselementers varmekapacitet pr. m^2 multipliceret med deres areal (A_{be}):

$$K_{\text{tot}} = \sum_{j=1}^n (K_{be} \cdot A_{be}) \quad (Wh/K) \tag{2.1.12}$$

Middelvarmeoverføringstallet kan bestemmes ved vægtning af de enkelte bygningselementers bidrag med hensyn til deres respektive varmekapacitet:

$$h_{\text{mid}} = \frac{\sum_{j=1}^n (h_{be} \cdot K_{be} \cdot A_{be})}{K_{\text{tot}}} \quad (W/m^2 \cdot K) \tag{2.1.13}$$

Varmeoverføringsevnen fra indvendig overflade til det fiktive akkumulerende lag kan bestemmes som:

$$H_{ak} = h_{\text{mid}} \sum_{j=1}^n A_{be} \quad (W/K) \tag{2.1.14}$$

Til sammenligning af forholdene ved lette kontra tunge rum er der benyttet 3 rumtyper:

- a) Tungt rum, hvor de indre bygningsselementer hovedsagelig er af beton. (fig. 2.1.12).
- b) Middeltungt rum med indre vægge hovedsagelig af mursten. (fig. 2.1.13).
- c) Let rum med indre bygningsselementer hovedsagelig af spånplader med bagvedliggende mineraluld. (fig. 2.1.14).

For de forskellige rumtyper er materialekonstanterne beregnet i fig. 2.1.15. Varmeroverføringssevnen og varmekapaciteterne for de enkelte rummodeller er beregnet som vist i fig. 2.1.16. Varmerovergangstallet for de indvendige overflader er ifølge (26) sat til $h_{indv} = 3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$.

2.1.4 Brugsvarme

Varmen fra personer, el-apparater, husholdning og belysning, der tilføres bygningen, kaldes i det følgende brugsvarmen.

Beregning af energien fra disse kilder er ret vanskelig at bestemme og varierer principielt ligeså tilfældigt som solindfaldet, men det må ventes, at beboere i gennemsnit følger et relativt konstant døgnmønster.

Som udgangspunkt er der i denne rapport anvendt de samme værdier som anvendt ved simulering af beboelse i de seks lavenergihuse i Hjortekær (32). Den tilførte varme varierer efter et døgnmønster svarende til en hverdag for en familie med 2 voksne og 2 børn, hvoraf den ene m/k tænkes hjemmegående.

Varmerafgivelsen fra personerne er sat til:

siddende og sovende person	75 W
aktiv person	125 W

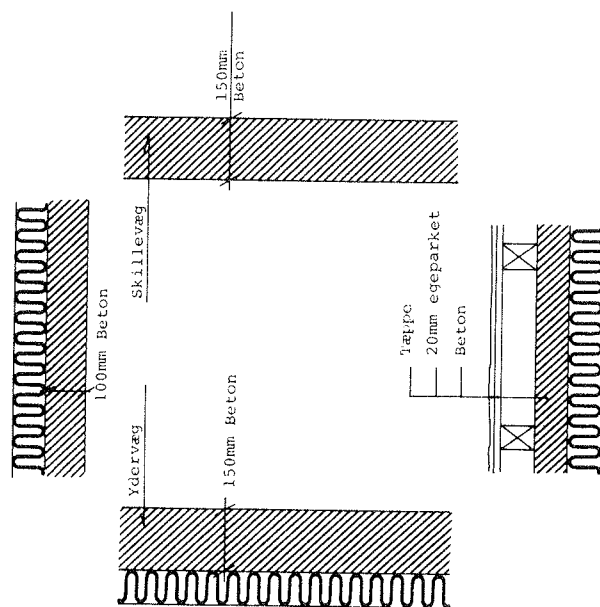


Fig. 2.1.12 Skematisk tegning til bestemmelse af akkumulering i tungt rum.

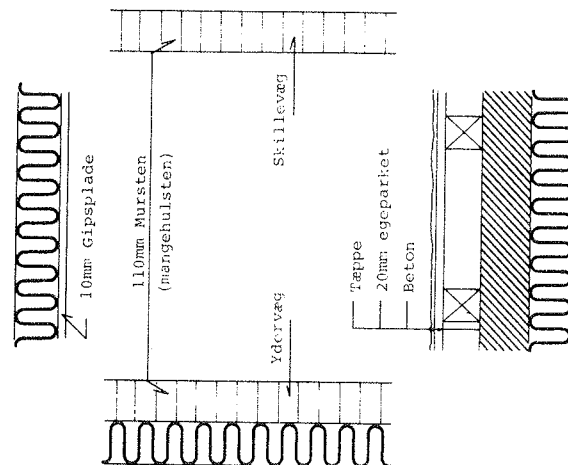


Fig. 2.1.13 Skematisk tegning til bestemmelse af akkumulering i middeltungt rum.

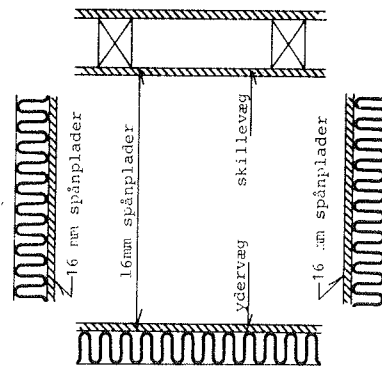


Fig. 2.1.14 Skematisk tegning til bestemmelse af akkumulering i let rum.

	L_i	λ	ρ	c_p	$M_i = \frac{L_i}{\lambda}$	$M_{i,res} = \frac{M_i}{2} + M_{i-1} + M_{i-2}$	$K_i = \frac{L_i \cdot \rho \cdot c_p}{3600}$	$T = \frac{M_{i,res}}{K_i}$	$T_{be} = T_{i-1} + T_{i-2}$	$K_{be} = K_i + K_{i-1} + K_{i-2}$	$h_{be} = \frac{K_{be}}{T_{be}}$
Materialer	Tykkelse	Varmelednings- evne	Masse- fylde	Varme- fylde	Isolans for laget	Samlet Isolans	Varme- kapacitet	Tids- konstant	Total tids- konstant	Total varme- kapacitet	Varme- overfø- ringstal
	m	W/m K	kg/m ³	J/kg K	m ² K/W	m ² K/W	Wh/m ² K	h	h	Wh/K m ²	W/K m ²
Let rum	Spånlader	0,14	550	2300	0,114	0,0571	5,62	0,321	0,321	5,62	17,50
Tungt og Middel tungt rum	Teppe	0,050	-	-	0,06	-	-	-	-	-	-
	Egparket	0,170	700	2300	0,12	0,12	8,94	1,07	1,07	-	-
	Luft	-	-	-	0,17	-	-	-	-	-	-
	Beton	1,6	2300	880	0,0085	0,35	7,87	2,75	3,82	16,8	4,40
Middel tungt rum	Pap	0,07	-	-	0,014	-	-	-	-	-	-
	Gips	0,52	1200	1090	0,019	0,024	3,63	0,085	0,085	3,63	42,71
	Ydervægge mursten	0,36	1050	800	0,302	0,1508	25,33	3,82	3,82	25,33	6,63
	Loft Beton	1,6	2300	880	0,0625	0,0313	56,22	1,76	1,76	56,22	31,94
Tungt rum	Vægge	1,6	2300	880	0,0922	0,0461	82,93	3,82	3,82	82,93	21,71

*) Lagets tykkelse reduceret således at tidskonstanten bliver 3,82 h.

Fig. 2.1.15 Materialekonstanter for forskellige typer bygningsselementer.

	Solvec- + vindues- areal Syd	Vågåreal Syd	Over- flade- areal Hus	Varme- kapacitet Sydvæg	Varme- kapacitet Hus	Vægt- nings- faktor Sydvæg	Vægt- nings- faktor Hus	Varme- overfø- ring til akkum. lag	Varme- overfø- ring luft/ overfl.
		A_{syd}	ΣA_{be}	$K_{\text{be}} A_{\text{syd}}$	$K_{\text{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{\text{be}}} + \frac{1}{A_{\text{syd}}}}$	$h_{\text{be}} K_{\text{be}} A_{\text{syd}}$	$\bar{h}_{\text{be}} K_{\text{be}} A_{\text{be}}$	H_{ak}	$H_{\text{ov}} = \frac{h_{\text{indv}}}{\Sigma A_{\text{be}}}$
	m^2	m^2	m^2	Wh/K	Wh/K	$(\text{W/mK})^2 \text{h}$	$(\text{W/mK})^2 \text{h}$	W/K	W/K
Let rum	0,0	0,0	226,0	0	1270				
	0,0	50,0	276,0	281	1551			4830	828
	10,8	39,2	265,2	220	1490			4641	795,6
	21,6	28,4	254,4	160	1430			4452	763,2
	32,4	17,6	243,6	99	1369			4263	730,8
	43,2	6,8	232,8	38	1308			4074	698,4
Middeltungt rum	0,0	0,0	226,0	0	3306	-	29385	-	
	0,0	50,0	276,0	1267	4573	8400	37785	2280	828,0
	10,8	39,2	265,2	993	4299	6584	35969	2218	795,6
	21,6	28,4	254,4	719	4025	4767	34152	2159	763,2
	32,4	17,6	243,6	446	3752	2957	32342	2100	730,8
	43,2	6,8	232,8	172	3478	1140	30525	2043	698,4
Tungt rum	0,0	0,0	226,0	0	11316	-	268420	-	
	0,0	50,0	276,0	4147	15463	90030	358450	6398	828,0
	10,8	39,2	265,2	3251	14567	70580	339000	6172	795,6
	21,6	28,4	254,4	2355	13671	51130	319550	5946	763,2
	32,4	17,6	243,6	1460	12776	31700	300120	5722	730,8
	43,2	6,8	232,8	564	11880	12240	280660	5500	698,4

Fig. 2.1.16 Konstanter for beregning af varmeakkumulering i BA4-rummodeller.

Fordelingen af varmeafgivelsen fra personer er vist på fig. 2.1.17. Det samlede tilskud fra personer udgør 6975 Wh pr. døgn eller 2550 kWh pr. år.

Fra elektrisk belysning og el-apparater afgives også varme. De enkelte apparaters varmeafgivelse er angivet på fig. 2.1.18. Diverse el angiver elforbrug til fx støvsuger, strygejern,

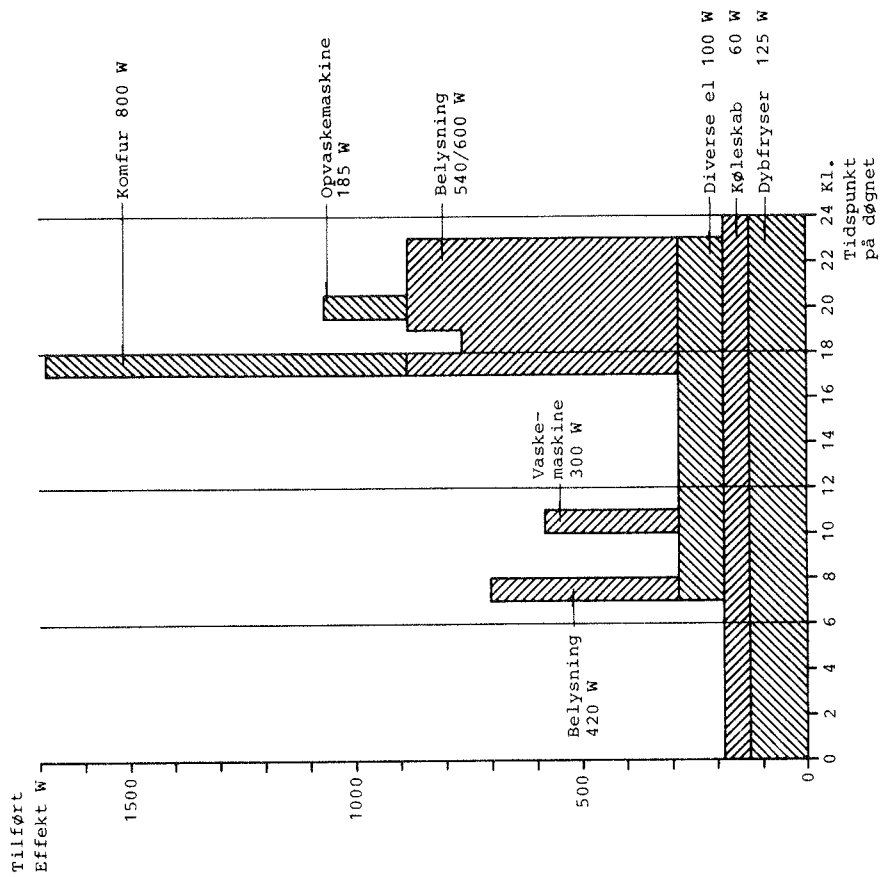


Fig. 2.1.18 Fordeling over et døgn af udnyttet varme fra lys og el-apparater. I alt 11200 Wh/Døgn.

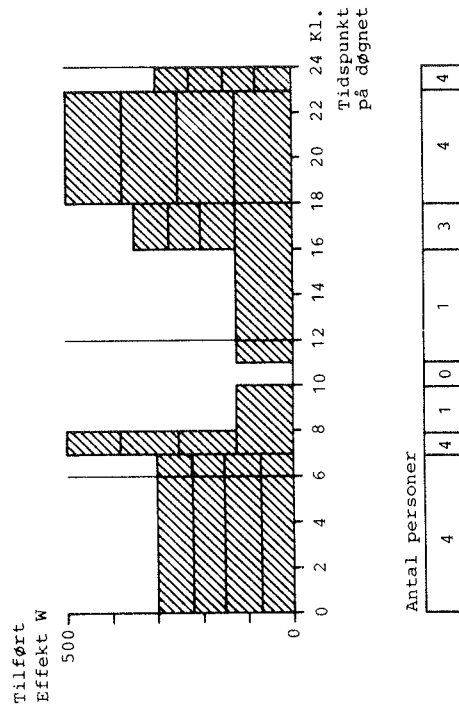


Fig. 2.1.17 Fordeling over et døgn af varme fra personer. I alt 7000 Wh/Døgn.

Antal personer									
4	4	1	0	1	3	4	4		

hårtørrer, radio, tv m.v. Den del af opvaske- og vaskemaskinens elforbrug, der tilføres rummene, er bestemt som 15% af værdierne i den elforbrugsoversigt NESA udgiver. Den afgivne varme fra elforbrug er ialt 11225 Wh pr. døgn eller 4100 kWh pr. år.

De her benyttede brugsvarmetilskud svarer til de i ref (33) anbefalede værdier i vintermånederne for en husstand på 3 personer. De anførte varmeangivelser vil nok i fremtiden kunne reduceres. Der er en del muligheder for at gøre el-apparaterne mere effektive, fx tykkere isolering i fryser og køleskabe, belysningskilder med større lysudbytte o.s.v. Man må også forvente, at varme afgivet fra personer i gennemsnit vil være mindre, idet de anvendte varmeafgivelser fra personer svarer til voksne personer, og at middelhusstandsstørrelsen er mindre end benyttet her. For at vise følsomheden af solvæggene for mindre tilskudsvarme er der i afsn. 2.2.2 beregnet eksempler, hvor den helt er fjernet.

2.1.5 Klimadata

I hovedparten af beregningerne er benyttet Referenceårets klimadata (34) for udelufttemperaturer og solindfald. Der er dog sket en modificering af solindfaldet i månederne december, januar og marts. I disse måneder er det direkte solindfald på visse dage fjernet for at give bedre overensstemmelse med et middelår. De på månedsbasis benyttede middeludelufttemperaturer og solindfald gennem en lodret dobbeltrude ved forskellige orienteringer er vist på fig. 2.1.19. For at vurdere ændringerne ved at anvende det senere udarbejdede Danske Referenceår TRY (35) er der udført enkelte sammenlignende beregninger med disse vejrdata (afsn. 2.3.6). Endvidere er disse vejrdata sammenlignet med simuleringer med vejrdata fra en 15 års periode.

I lavenergihusmodellen er vinduesarealerne beregningsmæssigt reduceret med 10% i forhold til BR-82 husmodellen. Dette skyldes den mindre transmissionskoefficient for solstråling gennem 3-lags ruder.

Der er forudsat frit udsyn i alle retninger svarende til en horisont på 0° . Refleksionen fra et forudsat vandret terræn uden for huset er sat til 0,25. Der er ikke regnet med skygge fra tagudhæng eller vinduesniche. Der er regnet med solindfald på ydervæggene. Absorptionskoefficienten for solstråling er ved disse overflader sat til 0,85 (26).

Varmen fra solindfald gennem vinduer og anden tilskudsvarme er fordelt med 50% tilført som stråling og 50% tilført som konvektion. Hvis rummet er tomt, vil solindfaldet hovedsagelig blive tilført stråling til rummets overflader, men da der normalt er møbler og andet inventar, der absorberer solstrålingen, vil en del af denne blive tilført som konvektiv varme.

	Referenceår modificeret					Dansk referenceår TRY	
Måned	Middel- udeluft- temp.	Solindfald gennem 2 lags rude i kWh/m ²				Middel- udeluft- temp.	Solind- fald kWh/m ²
	°C	Nord	Syd	Øst	Vest	°C	Syd
jan.	0,2	3,9	30,3	9,5	8,0	-0,6	21,5
febr.	-0,4	8,0	55,4	17,8	21,2	-1,1	41,4
marts	2,0	16,2	69,6	37,0	41,8	2,6	43,8
april	5,7	25,9	69,8	60,2	58,9	6,6	65,8
maj	11,4	36,8	65,2	70,0	68,5	10,6	68,1
juni	16,0	46,0	65,3	79,3	76,3	15,7	71,7
juli	16,4	43,3	66,8	71,0	74,9	16,4	66,8
aug.	16,1	32,2	62,3	57,4	56,8	16,7	72,6
sept.	13,7	21,0	62,7	40,1	39,0	13,7	62,7
okt.	9,2	11,4	46,5	21,6	22,3	9,2	46,4
nov.	5,0	5,3	30,2	9,5	9,7	5,0	30,2
dec.	-0,4	3,5	28,5	7,3	6,3	1,6	29,7
året	7,9	253,5	652,6	480,7	483,7	8,1	620,5

Fig. 2.1.19 Middeludelufttemperatur og solindfald gennem en 2-lags rude i det modificerede referenceår og Dansk referenceår (TRY) fordelt på måneder.

2.1.6 Energiforbrug til opvarmning af bygningen

For at kunne sammenligne solvægge med vinduer er det nødvendigt at have et sæt samhørende beregninger. På figur 2.1.20 - 2.1.23 er opvarmningsbehovet for forskellige bygningsudformninger optegnet som funktion af vinduesarealet mod syd. De angivne parametre er gennemgået i de foregående afsnit.

De fire figurer er opdelt efter, om der tilføres gratisvarme til rummet fra personer og el, samt om der er anvendt mobilnatisolering.

Figurerne viser, at ved en sammenligning mellem lette og tunge rum vil de tunge rum have mulighed for at få et lavere opvarmningsbehov end de lette rum. Jo bedre isolerede vinduer, jo større er fordelene ved en øgning af vinduesarealet. I mange tilfælde har kurverne et minimum ved et bestemt vinduesareal. Mindre tilført gratisvarme fra el og anden husholdning betyder større udbytte af vinduet som solfanger. Dette er nogle af hovedkonklusionerne ved sammenligning af kurverne.

For at bestemme den termiske komfort er antallet af halvtimer med temperaturer over 25°C angivet (Fig. 2.1.24 - 2.1.27). Rumlufttemperaturen tillades at svinge mellem 20 og 24°C . Der er ikke regnet natsenkning af rumlufttemperaturen. Hvis temperaturen er ved at komme over 24°C , regnes med automatisk reguleret forceret ventilation med udeluft. Det maksimale luftskifte er sat til 4 g/h. Af kurverne fremgår, at store vinduesarealer kan give mange timer med for høje temperaturer. De tunge bygninger giver større akkumulering og dermed færre halvtimer med overtemperaturer end bygninger med lette overflader.

2.2 BEREGNINGSRESULTATER FOR HUSMODEL MED SOLVÆG

I dette kapitel er benyttet en edb-model til at gennemregne solvægge indbygget i et enfamiliehus. I edb-programmet er anvendt de i appendix 1 viste ligninger.

Både bygningens og solvæggens udformning varieres. Solvæggene forudsættes at være lodrette og sydvendte. Indbygningen af solvægge er beregnet således, at der fjernes et areal af den oprindelige væg, som erstattes af et tilsvarende solvægsareal.

2.2.1 Solvæg med mobil isolering

I det foregående er gennemgået forskellige hustyper. For at sammenligne udbyttet ved de forskellige udformninger af bygningen er der udført en serie beregninger af opvarmningsbehovet i et hus med solvægge i sydfacaden. De solvægge, der er benyttet i dette afsnit, har samme karakteristika som den solvæg, der er udført forsøg med i anden måleperiode (se afsnit 3.1.3) Den eneste forskel er, at der i modellen er benyttet beton som lagermateriale i modsætning til forsøgene, hvor kalksandsten blev anvendt. Dette er gjort, da beton er et meget anvendt byggemateriale, og da materialet giver et lidt større udbytte end kalksandsten.

Fig. 2.2.1 og 2.2.2 viser opvarmningsbehovet henholdsvis med og uden mobil isolering for vinduer (maksimalt $19,2 \text{ m}^2$ vinduer incl. karm). Solvæggene i dette afsnit er regnet mobilisoleret. Kurverne viser, at for et givet solvægsareal vil bygningsmodeller med størst varmeakkumuleringssevne have det mindste opvarmningsbehov.

I det følgende benyttes udtrykket udbytte for den forskel i opvarmningsbehov, der opnås pr. m^2 solvæg ved at erstatte en normal ydervæg med en solvæg. Det skal bemærkes, at udbyttet for en given solvæg er afhængig af ydervæggens isoleringsevne og i øvrigt hvilken bygning den anvendes i.

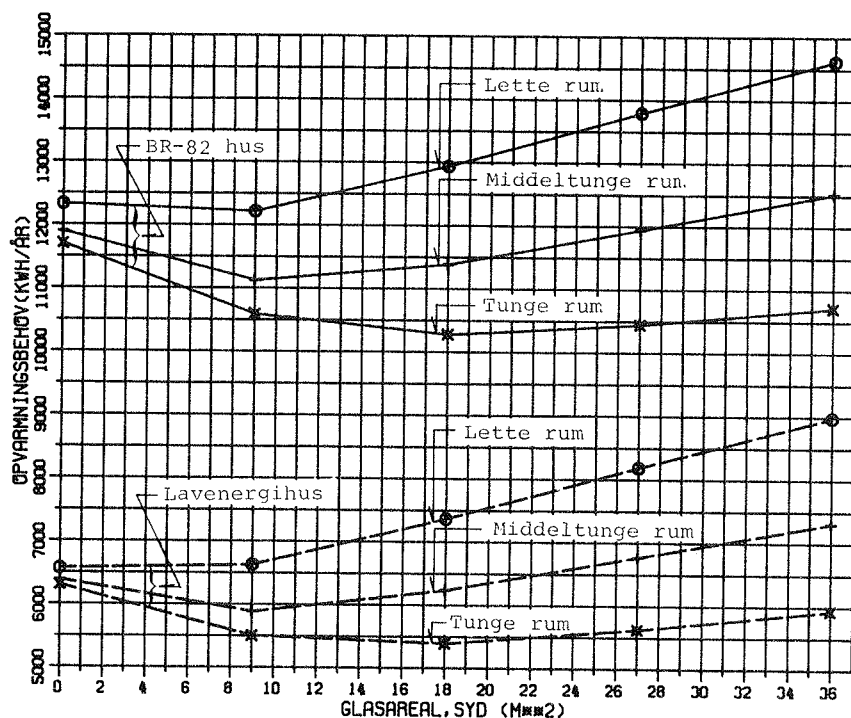


Fig. 2.1.20 Opvarmningsbehov af bygningsmodel med varierende tyngde og glasareal mod syd. Ingen mobil natisolering for vinduer. Normal brugsvarme fra el og personer.

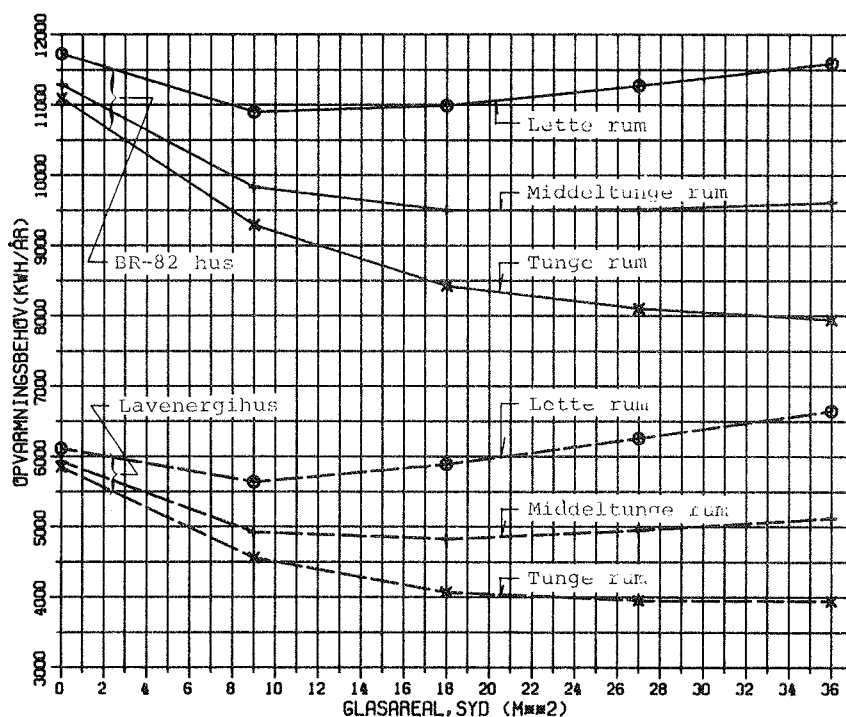


Fig. 2.1.21 Opvarmningsbehov af bygningsmodel med varierende tyngde og glasareal mod syd. Mobil natisolering for vinduer. Normal brugsvarme fra el og personer.

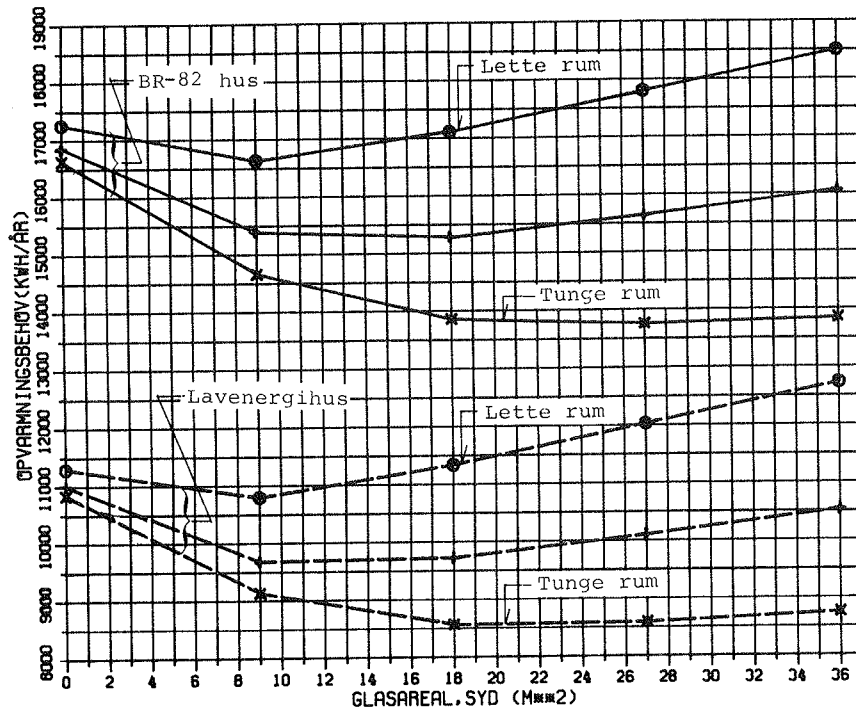


Fig. 2.1.22 Opvarmningsbehov af bygningsmodel med varierende tyngde og glasareal mod syd. Ingen mobil natisolering for vinduer. Ingen brugsvarme fra el og personer.

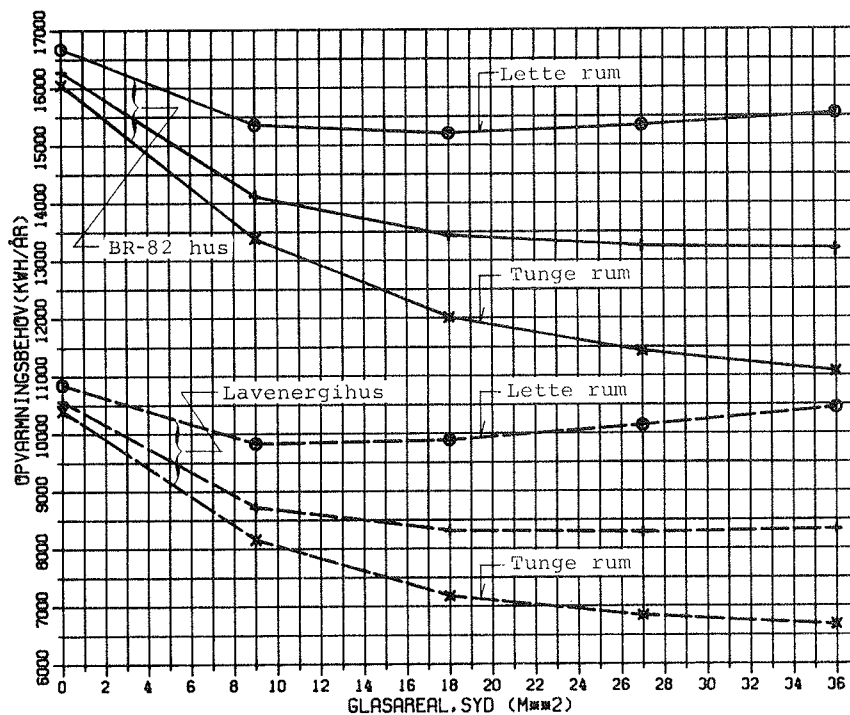


Fig. 2.1.23 Opvarmningsbehov af bygningsmodel med varierende tyngde og glasareal mod syd. Mobil natisolering for vinduer. Ingen brugsvarme fra el og personer.

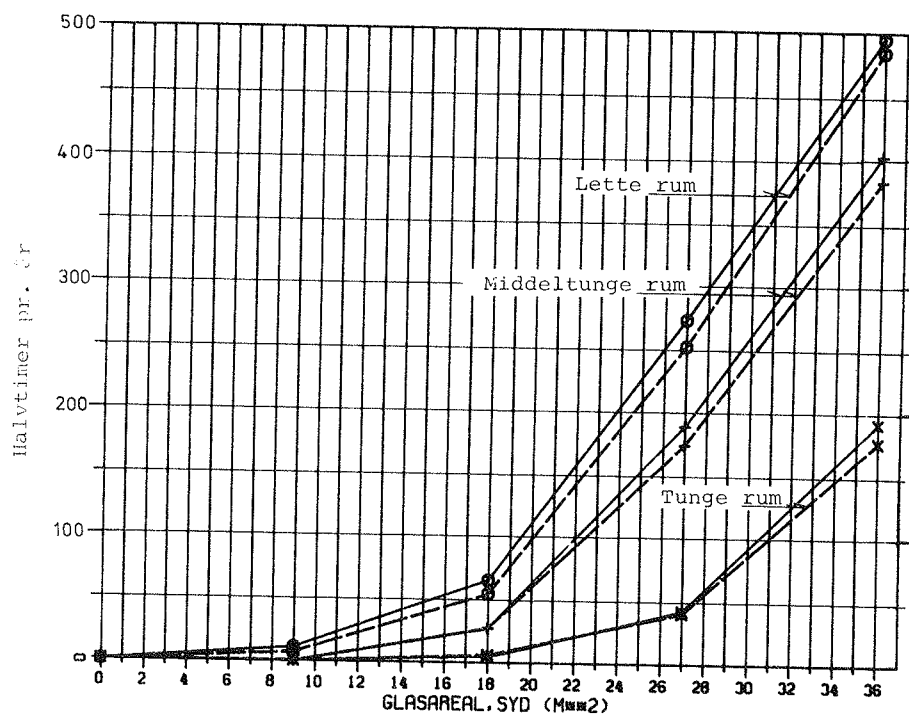


Fig. 2.1.24 Antal halvtimer med rumlufttemperaturer over 25°C i månederne oktober til april (incl.). Ingen mobil natisolering for vinduer. Normal brugsvarme fra el og personer.

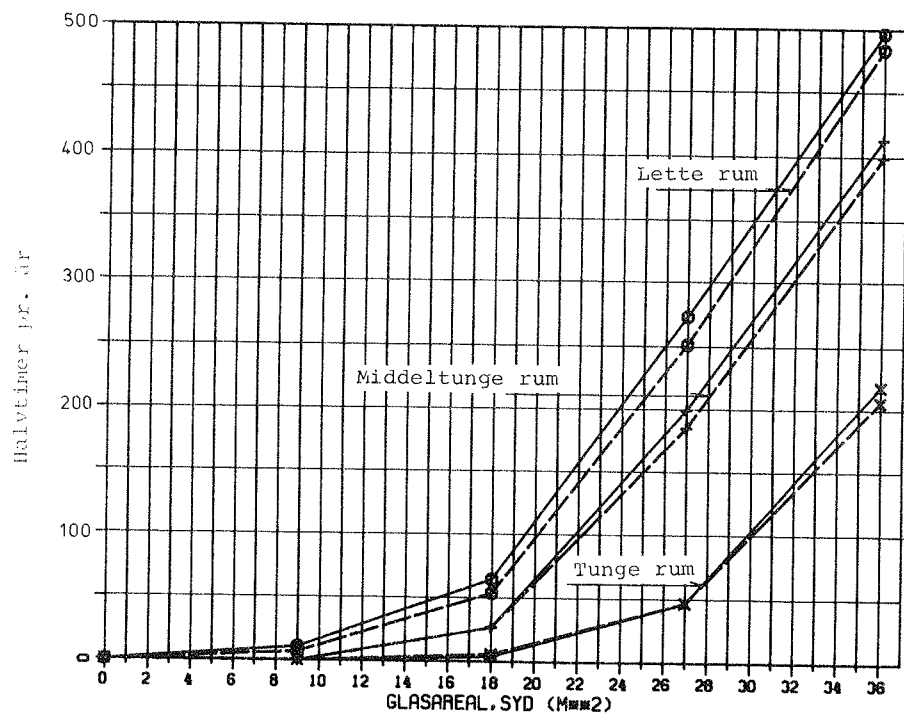


Fig. 2.1.25 Antal halvtimer med rumlufttemperaturer over 25°C i månederne oktober til april (incl.). Mobil natisolering for vinduer. Normal brugsvarme fra el og personer.

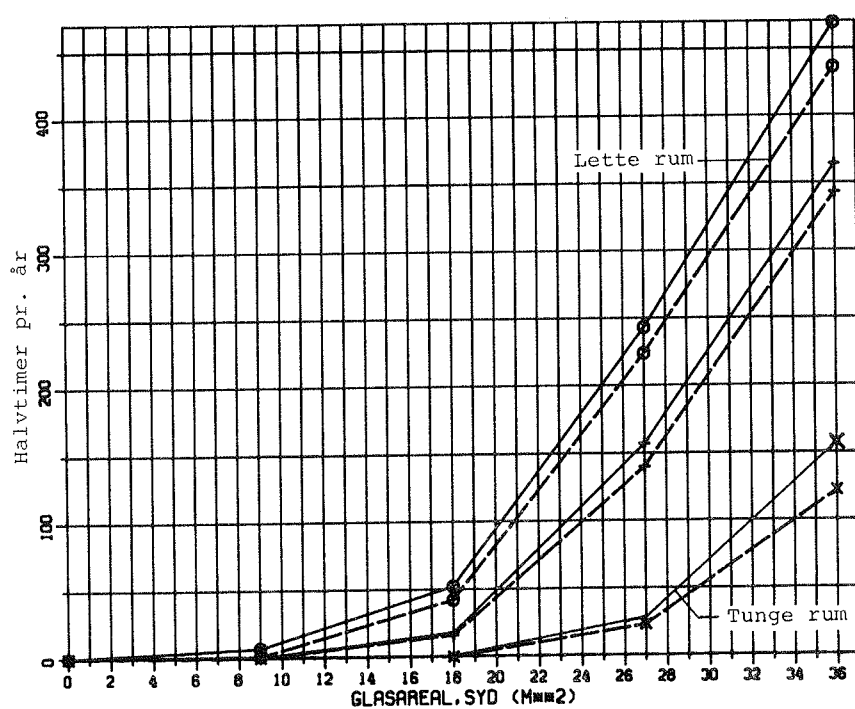


Fig. 2.1.26 Antal halvtimer med rumlufttemperaturer over 25°C i månederne oktober til april (incl.). Ingen mobil natsolering for vinduer. Ingen brugsvarme fra el og personer.

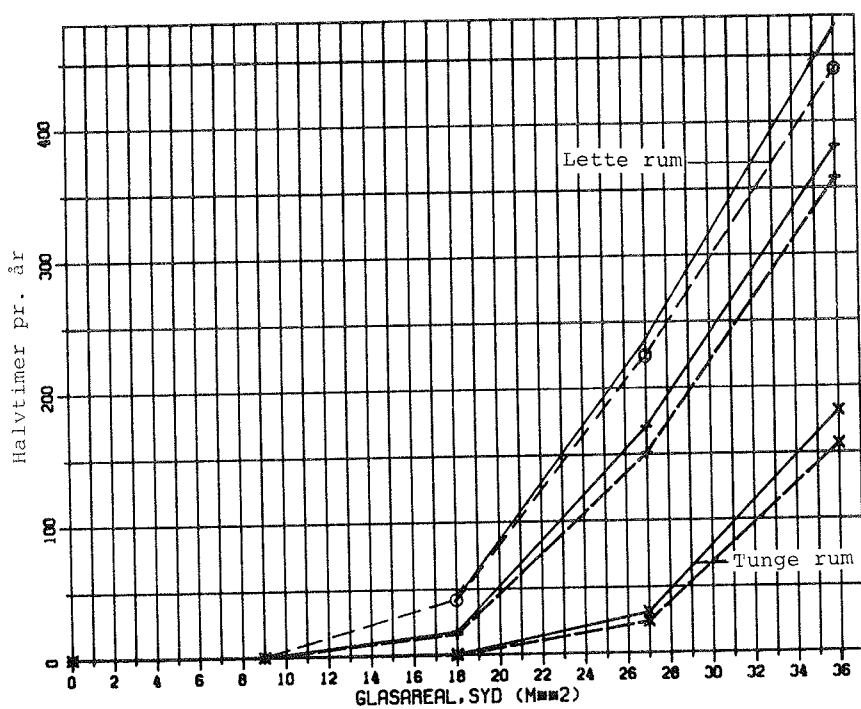


Fig. 2.1.27 Antal halvtimer med rumlufttemperaturer over 25°C i månederne oktober til april (incl.). Mobil natisolering for vinduer. Ingen brugsvarme fra el og personer.

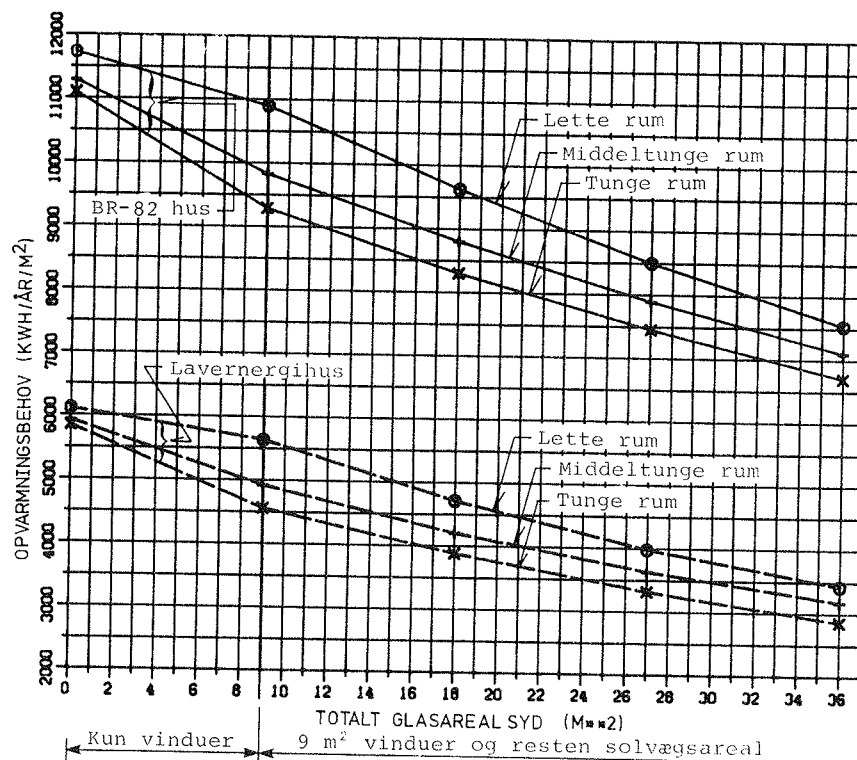


Fig. 2.2.1 Opvarmningsbehov af hus med mobilisoleret solvæg ved varierende tyngde og glasareal mod syd. Solvæg som i forsøg dog betonlager. Mobil natisolering for vinduer. Normal brugsvarme fra el og personer.

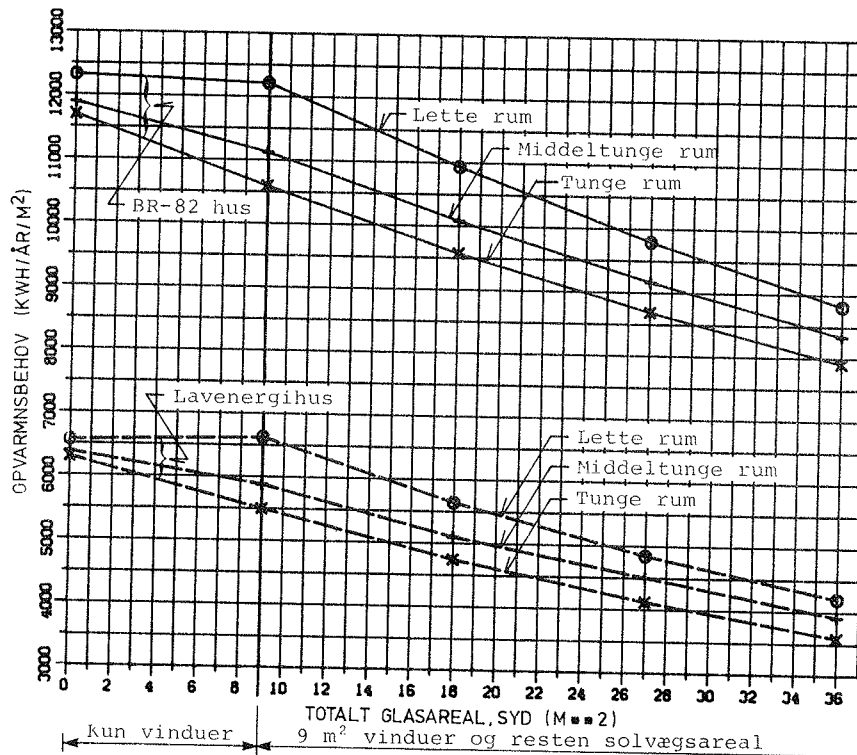


Fig. 2.2.2 Opvarmningsbehov af hus med mobilisoleret solvæg ved varierende tyngde og glasareal mod syd. Solvæg som i forsøg dog betonlager. Ingen mobil natisolering for vinduer. Normal brugsvarme fra el og personer.

Udbyttet pr. arealenhed af solvæggen er vist på fig. 2.2.3 og 2.2.4. Det ses, at solvægge i lette rum giver større udbytte end i tunge rum. Dette kan forklares med, at den forøgede varmekapacitet fra solvæggen giver rummet en større lagringsevne af den tilførte tilskudsvarme fra solindfald gennem vinduer, el-apparater, belysning og personer. Udbyttet af solvægge er større i BR-82 husmodellen end i lavenergihusmodellen. En årsag er, at de ydervægge solvæggen erstatter er bedre isoleret i lavenergihusmodellen end i BR-82 modellen. Endvidere skal næsten den samme mængde tilført varme fra solvæggen dække et mindre opvarmningsbehov, og derved vil der i lavenergihusmodellen være flere perioder end i BR-82 modellen, hvor varmen fra solvæggen ikke kan nyttiggøres.

Benyttes et hus med vinduesareal mod syd på 9 m^2 som referencehus, kan dækningsgraden ved de her anvendte solvægge findes som andelen af sparet rumopvarmningsbehov i et hus med solvæg i forhold til opvarmningsbehovet for et tilsvarende hus uden solvæg.

Ved et solvægsareal på 27 m^2 er den relative reduktion af opvarmningsbehovet beregnet for forskellige husmodeller (Fig. 2.2.5). I disse tilfælde varierer dækningsgraden mellem 25 og 39%. Det ses, at ved en formindskelse af varmetabet fra huset bliver dækningsgraden større, mens udbyttet mindskes.

Sammenlignes huse med forskellige tyngder, ses at dækningsgraden er mindst for huse med middeltunge rum. Følgende teori kan forklare dette forhold:

Ved de lette rummodeller uden solvæg vil en betragtelig del af tilskudsvarmen blive bortventileret for at undgå for høje temperaturer. Man kan sige, at solindfaldet er for stort i forhold til varmelagringsevnen i rummets overflader. Når solvæggen anvendes i denne hustype, vil det medføre en stor øgning i husets varmekapacitet.

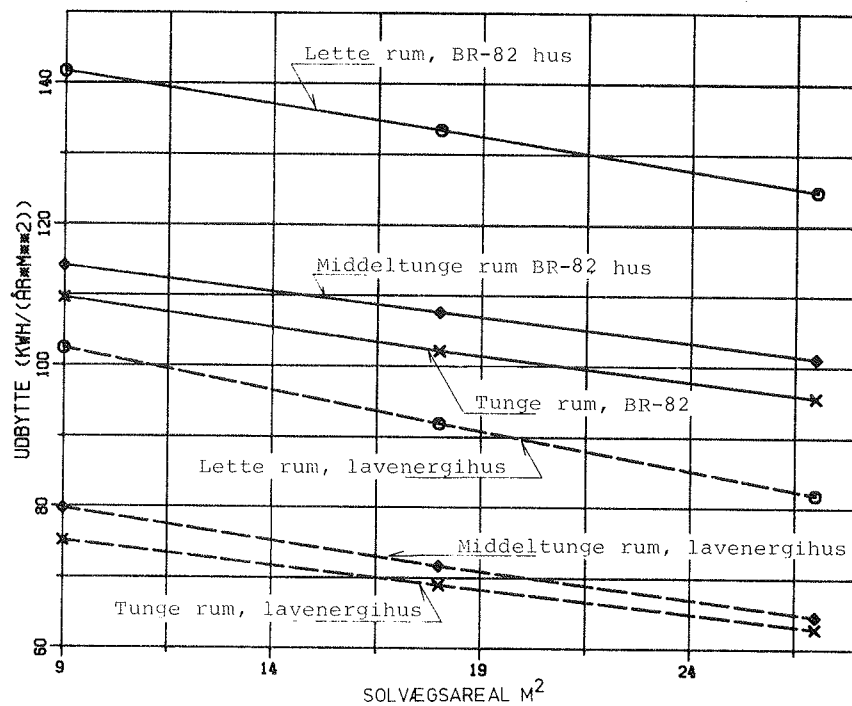


Fig. 2.2.3 Udbytte af mobilisoleret solvæg ved varierende tyngde og glasareal mod syd. Solvæg som i forsøg dog betonlager. Mobil natisolering for vinduer. Normal brugsvarme fra el og personer.

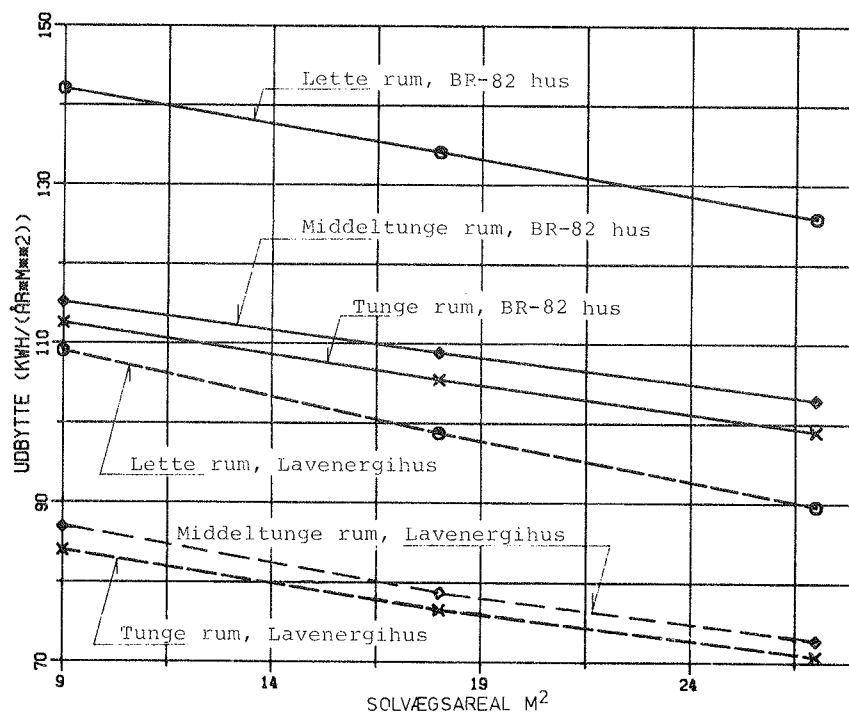


Fig. 2.2.4 Udbytte af mobilisoleret solvæg ved varierende tyngde og glasareal mod syd. Solvæg som i forsøg dog betonlager. Ingen mobil natisolering for vinduer. Normal brugsvarme fra el og personer.

Vindues- isolering	Hustype	Tyngde af rum	Opvarmnings- behov i referencehus kWh/år	Besparelse kWh/år	Dækningsgrad %
Ingen mobil vindues- isolering	BR-82	Let	12210	3400	27,8
		Middeltung	11120	2780	25,0
		Tung	10590	2670	25,2
	Lav- energihus	Let	6630	2420	36,5
		Middeltung	5880	1970	33,4
		Tung	5500	1910	34,7
Mobil vindues- isolering	BR-82	Let	10900	3370	30,9
		Middeltung	9830	2730	27,8
		Tung	9290	2580	27,8
	Lav- energihus	Let	5640	2210	39,2
		Middeltung	4920	1740	35,4
		Tung	4560	1700	37,2

Fig. 2.2.5 Beregnede besparelser og dækningsgrader for en 27 m² mobilisoleret solvæg som i forsøg men med betonlager. Solvæggen er anbragt i hus med 9 m² sydvendt vinduesareal.

Ved husmodellen med tunge rum forekommer den modsatte situation. De tunge rum udjævner ofte ved solindfald rumluftens temperatur så meget, at den maksimalt tilladelige temperatur ikke opnås. Dette forhold medfører, at når der anbringes en solvæg i sydfacaden, vil betonen i rummets øvrige flader have overskydende varmekapacitet til rådighed, som tilskudsvarmen fra solvæggen vil kunne udnytte.

I de middeltunge rummodeller vil den begrænsede varmekapacitet gøre, at solvæggen kun i begrænset omfang kan lagre varme i bygningens øvrige indvendige overflader.

For at give et indtryk af indeklimaet i et hus med solvægge er antallet af halvtimer med temperaturer over 25°C i opvarmnings-sæsonen summeret (se fig. 2.2.6). Antallet af halvtimer med høje temperaturer er lille sammenlignet med et hus, hvor der er anbragt vinduer i sydfacaden i stedet for solvægge. (se fig. 2.1.24 - 2.1.27). Figur 2.2.6 viser, at antallet af halvtimer med høje temperaturer øges med solvægsarealet for lette og mid-deltunge rum. Ved tunge rum er det ifølge beregningerne muligt helt at undgå for høje temperaturer om vinteren. I sommerhalv-året er afskærmning mod solindfald ønskelig for at undgå for høje temperaturer.

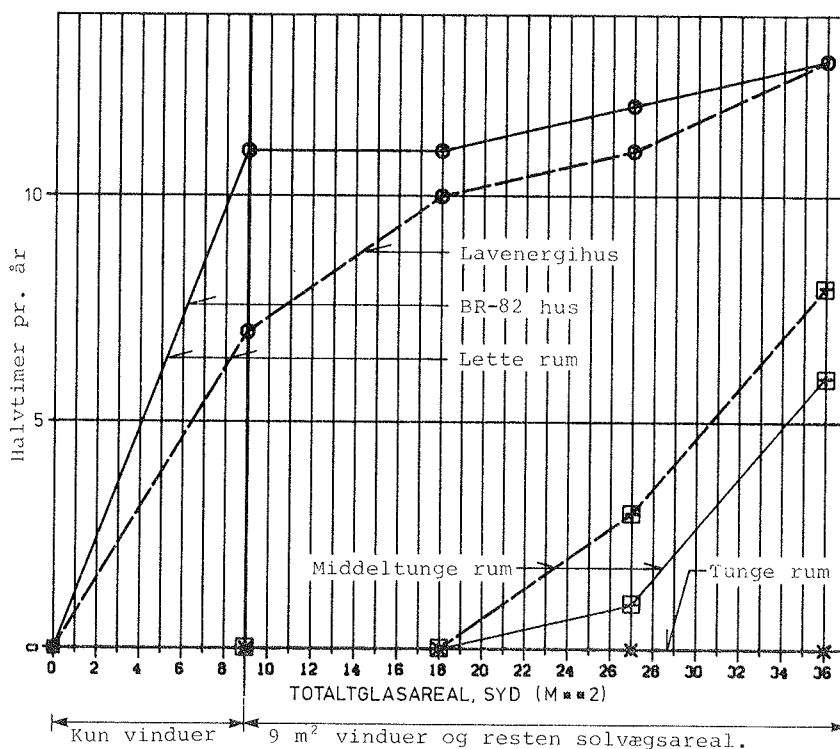


Fig. 2.2.6 Antal halvtimer med rumlufttemperaturer over 25°C i månederne oktober til april (incl.). Mobilisoleret solvæg som i forsøg og betonlager. Ingen mobil natisolering for vinduer. Normal brugsvarme fra el og personer.

2.2.2 Brugsvarmens indflydelse på udbyttet af en solvæg

Med en BR-82 husmodel og en solvæg ligesom i forsøgene med mobilisolering (dog varmelager af beton) er opvarmningsbehovet beregnet med og uden tilførsel af brugsvarme fra personer og

el-apparater (fig. 2.2.7). Figuren viser, at der som ventet er et øget udbytte fra solvæggen ved en formindskelse af det ukontrollerbare varmetilskud fra andre varmekilder.

Dækningsgraden bliver dog mindre, da opvarmningsbehovet forøges væsentligt, når tilskudsvarmen reduceres. Da kun en del af brugsvarmen udnyttes til rumopvarmning, og da den betalte del ofte er dyrere end varme produceret af varmeanlægget, vil det være en fordel at reducere den betalte del af brugsvarmen. Endvidere vil en reduktion af den tilførte brugsvarme mindske tendensen til overophedning i solrige perioder.

På figur 2.2.8 er fordelingen af udbyttet fra solvæggen fordelt på månedsbasis. Det ses, at der er et udbytte fra solvæggen i alle måneder. Udbyttet er ifølge beregningerne størst i februar. I månederne juni, juli og august er udbyttet i tilfældet med brugsvarme næsten 0, mens der er et beskedent udbytte i disse måneder, når der ikke er brugsvarme.

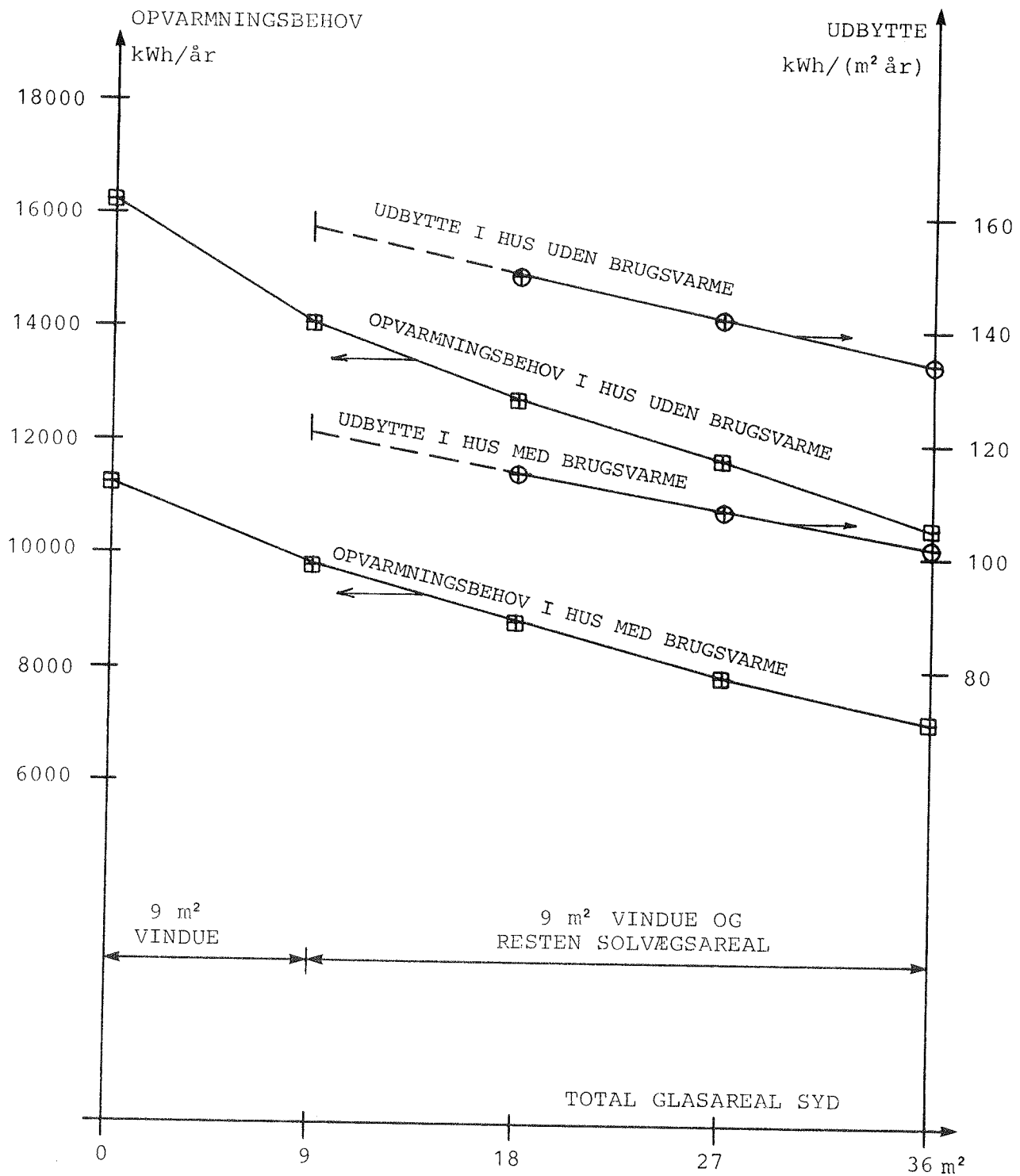


Fig. 2.2.7 Opvarmningsbehov og udbytte for mobilisoleret solvæg i hus med og uden brugsvarme fra el og personer (18,2 kWh/døgn). Solvæg som i forsøg, dog betonlager.
 Hustype: BR-82 hus, mobil natisolering for vinduer, middel-tungt hus, 9 m² vinduesareal mod syd.

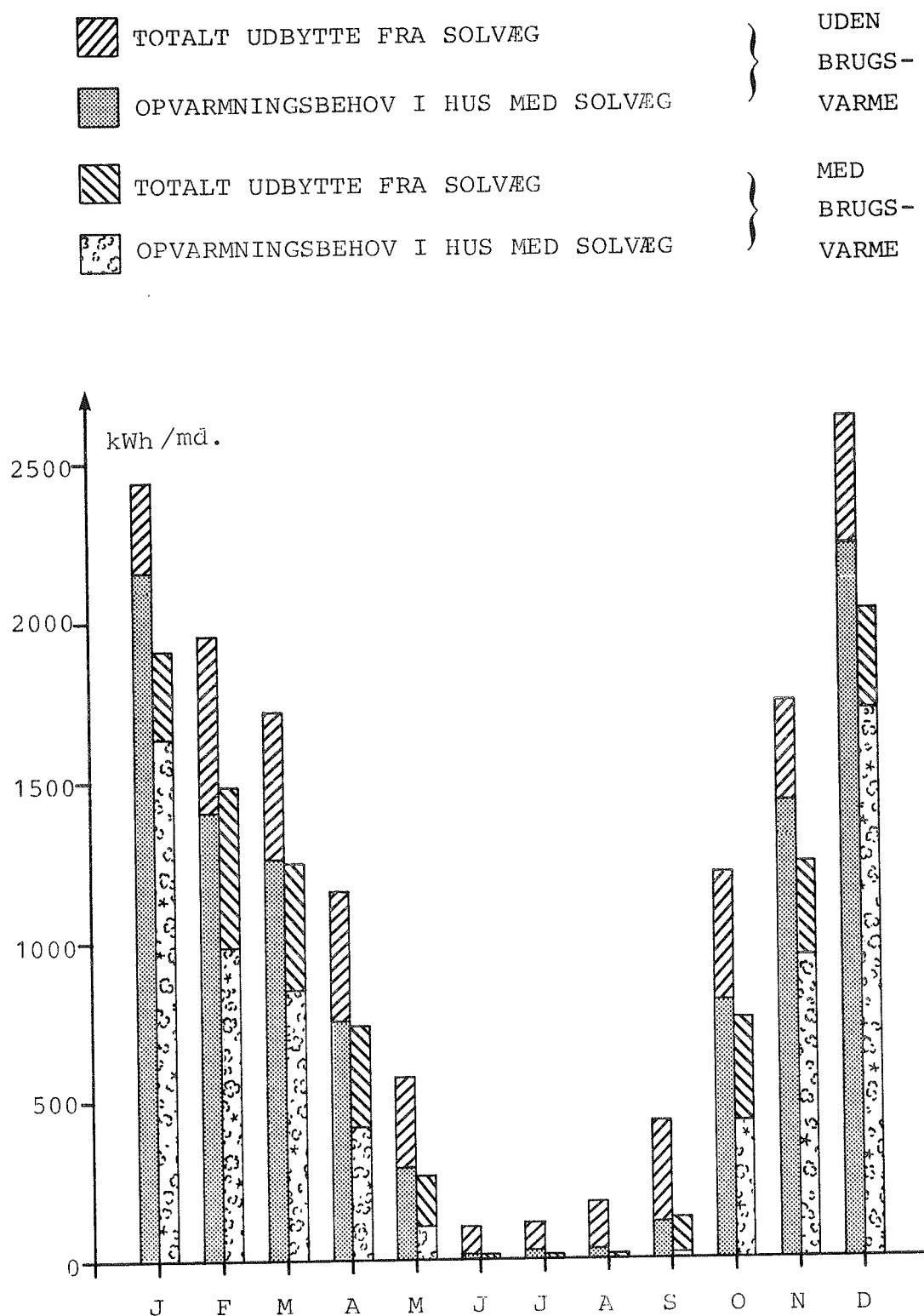


Fig. 2.2.8 Opvarmningsbehov på månedsbasis i hus med og uden brugsvarme og med og uden 27 m² mobilisoleret solvæg (som i forsøg, dog betonlager).
 Hustype: BR-82 hus, mobil natisolering for vinduer, middel-tungt hus, 9 m² vinduesareal mod syd.

2.2.3 Sydvæggens absorptionskoefficienter

Ændring af en overflades absorptionskoefficient medfører en ændring af den del af solstrålingen, der absorberes og ledes ind gennem væggen. I dette afsnit er opvarmningsbehovet for et hus beregnet, hvor referencehusmodellen er benyttet (se fig. 2.3.2). Varmetransmissionskoefficienten er efter de sædvanlige regler bestemt til $k = 0,3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Det svarer til 100 mm mineraluld og en bagvedliggende betonvæg. Den sydvendte ydervægs areal er 39 m^2 .

Med disse forudsætninger er BA4-programmet (26) benyttet til at bestemme opvarmningsbehovet ved varierende absorptionskoefficient for ydersiden af den sydvendte væg.

Benyttes en absorptionskoefficient på 0,85 som referenceværdi, kan udbyttet ved ændringer i den lodrette sydvendte facades absorptionskoefficient bestemmes (se fig. 2.2.9).

$$H = 14,8 (\alpha - 0,85) \quad (\text{kWh/m}^2 \text{ år}) \quad (2.2.1)$$

Ved absorptionskoefficienter mindre end 0,85 er udbyttet defineret som værende negativt. Ændres konstruktionens isolans, vil udbyttet med tilnærmelse ændres omvendt proportionalt med isolansen.

For den givne væg og definition vil udbyttet af en hvid ydervæg med en absorptionskoefficient på 0,5 være $-5 \text{ kWh/m}^2 \text{ år}$.

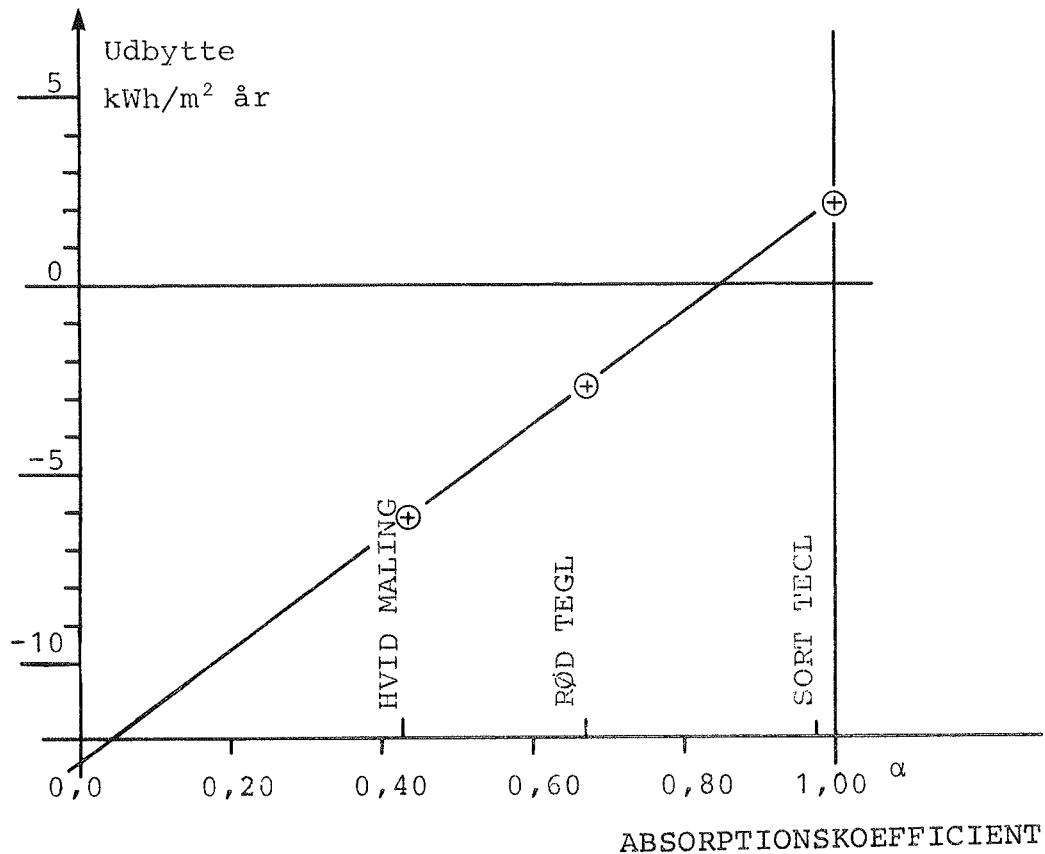


Fig. 2.2.9 Udbyttet ved at anvende overflader med forskellige absorptionskoefficienter på en lodret sydvendt væg. Varmetransmissionskoefficient: $k = 0,3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

2.2.4 Solvæg isoleret med hvid glasuld

I dette afsnit vises resultaterne af en beregning, der på årsbasis viser varmebalancen for en solvæg isoleret med hvid glasuld. De beregningsmæssige forudsætninger er beskrevet i appendix A1.5.3 og A1.8.2. Bestemmelsen af udbyttet er foretaget med en varmeledningsevne af mineralulden på $\lambda = 0,044 \text{ W/mK}$ ved 20°C . Dette svarer til en rumvægt af glasulden på $\rho = 14,2 \text{ kg/m}^3$ anvendt i anden måleperiode. På fig. 2.2.10 er udbyttet for denne solvæg angivet i forhold til en reference ydervæg. Denne er som i afsnit 2.2.3 sat til at være en væg med en k -værdi på $0,3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ og en absorptionskoefficient på 0,85.

Det ses, at udbyttet er proportionalt med den reciprokke værdi af ekstinktionskoefficienten for glasuld. I forhold til refe-

rencen vil solvæggen med hvid glasuld give et udbytte på ca. 20 kWh/m² år, hvis der anvendes en konstruktion svarende til den der er anvendt i anden måleperiode.

Hvis glasfibrene vendes vinkelret på overfladen eller jernindholdet i glasset nedsættes, vil ekstinktionskoefficienten mindskes med øget udbytte til følge.

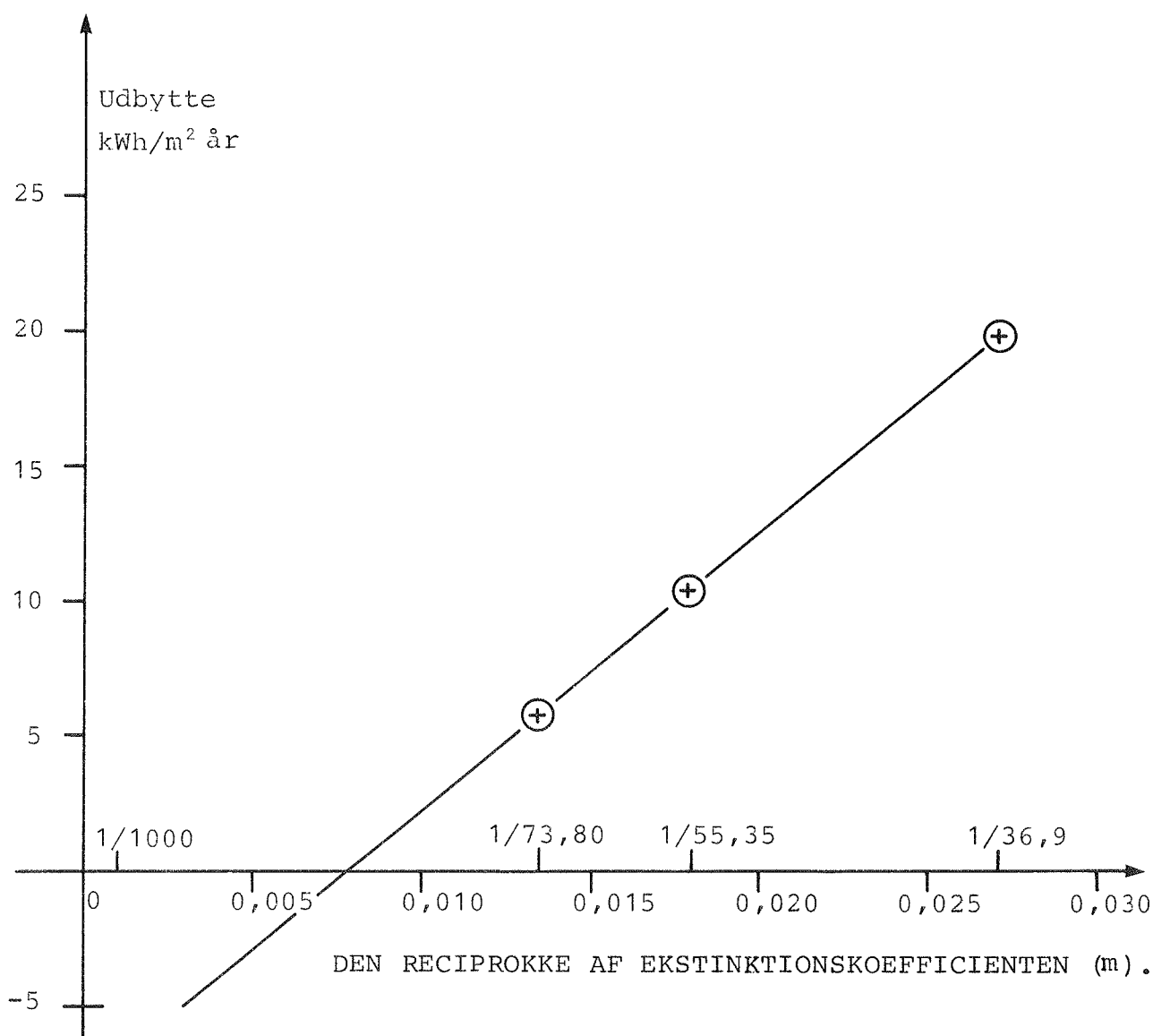


Fig. 2.2.10 Udbyttet af solvæg med hvid glasuld ved forskellige ekstinktionskoefficienter for glasuld med øvrige parametre fastholdt. Konstruktionens varmetransmissionskoefficient er $k = 0,3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Som reference er en ikke gennemskinnelig overflade med absorptionskoefficient på 0,85 benyttet.

2.3 BEREGNINGSRESULTATER FOR OPTIMERET SOLVÆG

2.3.1 Dæklagsudformning

For at undersøge andre muligheder for solvægge er der foretaget beregninger uden anvendelse af mobil isolering. Til beregningerne er både anvendt almindeligt glas og glas med lavt jernindhold, dvs. en ekstinktionskoefficient på 4 m^{-1} . Udbyttet, når der anvendes selektive absorberoverflader er også beregnet. Karmudformningen er også tænkt forbedret som vist på fig. 2.3.1. Med denne udformning, hvor karmarealet udgør 20% af det totale solvægsareal er varmetransmissionskoefficienten gennem karmen pr. m^2 glasareal beregnet til at være $0,13 \text{ W/K m}_{\text{glas}}^2$. Til sammenligning har den såkaldte almindelige karmudformning et karmtab på $0,41 \text{ W/K m}_{\text{glas}}^2$. Disse karmtab er beregnet ud fra de glasstørrelser, der er anvendt i forsøg (se fig. 3.1.4). De øvrige koefficienter, der er benyttet, er som beskrevet i referencesystemet på fig. 2.3.2 og 2.3.3. I beregningerne er benyttet de i appendix 1 viste ligninger.

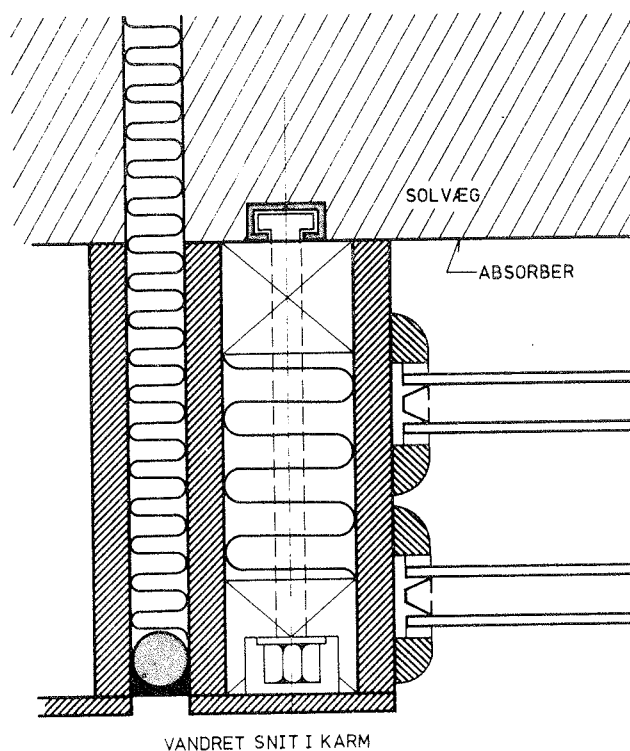


Fig. 2.3.1 Eksempel på udformning af karm med et formindsket varmetab.

Referencetilfælde for husmodel	
Bygningsmodel	BR-82 hus
Dimensionerende varmetab efter regler for beregning af bygningers varmetab:	
Uden mobil isolering for vinduer	7287 W
Med mobil isolering for vinduer	5905 W
Brugsvarme fra el og personer	ja (18,2 kWh/døgn)
Vinduesareal mod syd	9 m ² (glas)
Antal glaslag	2
Mobil natisolering af vinduer	ja ($k = 0,48 \text{ W/m}^2 \text{ K}$)
Solvægsareal mod syd	18 m ²
Tyngde af rumoverflader	middeltungt

Fig. 2.3.2 Referencetilfælde for husmodel.
Øvrige data som i fig. 2.1.4.

Lagermateriale	Beton
Tykkelse	0,228 m
Absorberoverflade	Selektiv
Emissionskoeff.	0,10
Absorptionskoeff.	0,95
Glastype	Lavt jernindhold
Ekstinktionskoeff.	0,004 mm ⁻¹
Emissionskoeff.	0,94
Antal glaslag	4
Glasafstand	0,030 m
Glastykkelse	0,004 m
Karm	Specialkarm se fig. 2.3.1
Varmetransmissionstab fra karm (pr. m ² karm)	0,49 W/m ² K
Karmareal i forhold til total areal	20%

Fig. 2.3.3 Referencetilfælde for solvæg.

Type	1	2	3	4
Absorberoverflade	Selektiv	Selektiv	Selektiv	Alm.
Glaslag	4	4	3	4
Karmtab pr glasareal (W/m ² K)	lille k = 0,130	stort k = 0,414	lille k = 0,130	stort k = 0,414
Hulrumstykkelser (mm)	30	30	30	30
Hulrum ved væg (m)	0,44	0,44	0,44	0,16
Øvrige hulrum (m)	3 x 0,16	3 x 0,16	2 x 0,16	3 x 0,16
Udv. overgangsisolans (m ² K/W)	0,04	0,04	0,04	0,04
Σm_{vind} (excl karm) (m ² K/W)	0,44 0,48 <u>0,04</u> 0,96	0,96	0,80	0,68
k_{vind} (excl karm) (W/m ² K)	1,04	1,04	1,25	1,47
k_{vind} (incl karm) (W/m ² K)	1,17	1,45	1,38	1,88
Karmtab i forhold til transmissionstab gennem dæklag	13%	40%	10%	28%
Isolans beton (m ² K/W)	0,13	0,13	0,13	0,13
Indvendig overgangs- isolans (m ² K/W)	0,13	0,13	0,13	0,13
k_{total} (incl betonvæg) (W/m ² K)	0,90	1,05	1,02	1,26

Fig. 2.3.4 Beregning af varmetransmissionskoefficienter if. varmetabsregler (30) ved forskellige udformninger af solvæg. Data for type 1 svarer til referencevæg.

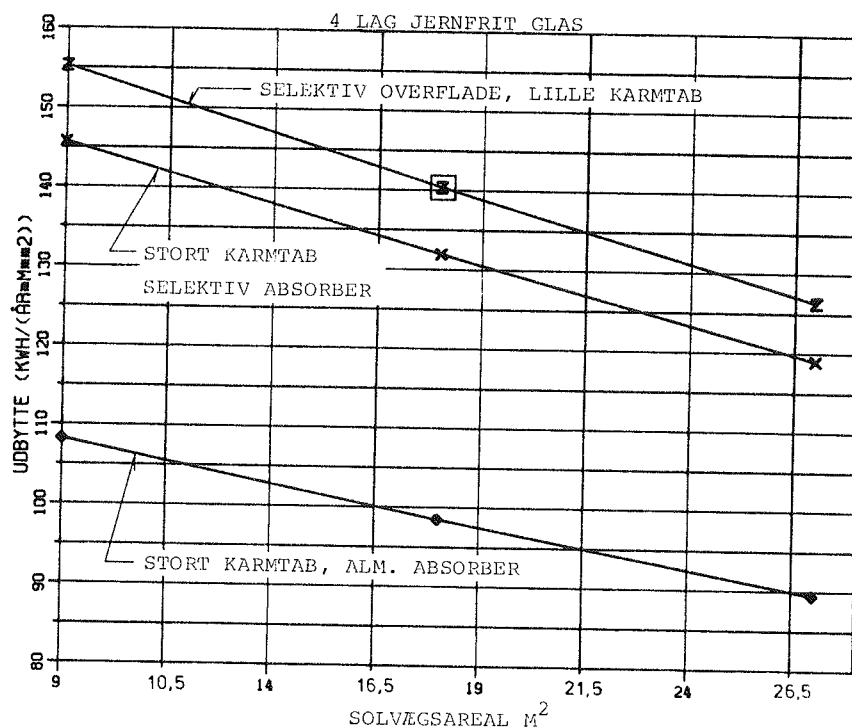


Fig. 2.3.5 Udbytte af solvæg med forskellige dæklagskonstruktioner med og uden selektiv belægning afhængig af glasareal mod syd. Solvæg som referencetilfælde bortset fra absorberoverflade, karmtab og solvægsareal. Referencesolvæggen er markeret med \square .

Isolansen for de enkelte lag i solvæggen er beregnet for visse af de valgte udformninger (fig. 2.3.4). Det ses, at isolansen fra absorberoverfladen til det fri i væsentlig grad overstiger isolansen fra absorberoverfladen og til rumluften. Dette er en forudsætning for et stort udbytte af solvæggen.

Udbyttet som funktion af solvægsarealet er vist på fig. 2.3.5. For 4 lag glas med lavt jernindhold, selektiv absorberoverflade og lille karmtab er udbyttet $155 \text{ kWh/m}^2 \text{ år}$ ved et solvægsareal på 9 m^2 . Ved et øget solvægsareal falder som ventet udbyttet. Ved et areal på 27 m^2 er udbyttet $125 \text{ kWh/m}^2 \text{ år}$ for ovennævnte solvæg. Ændres karmudformningen til "stort karmtab", falder udbyttet ved 9 m^2 solvægsareal til $146 \text{ kWh/m}^2 \text{ år}$. Anvendes i denne solvæg en "almindelig absorberoverflade" i stedet for en selektiv, formindskes udbyttet ved samme areal til $108 \text{ kWh/m}^2 \text{ år}$.

Forudsættes et solvægsareal på 18 m², kan af fig. 2.3.6 ses udbyttet ved forskellige udformninger med varierende antal glaslag.

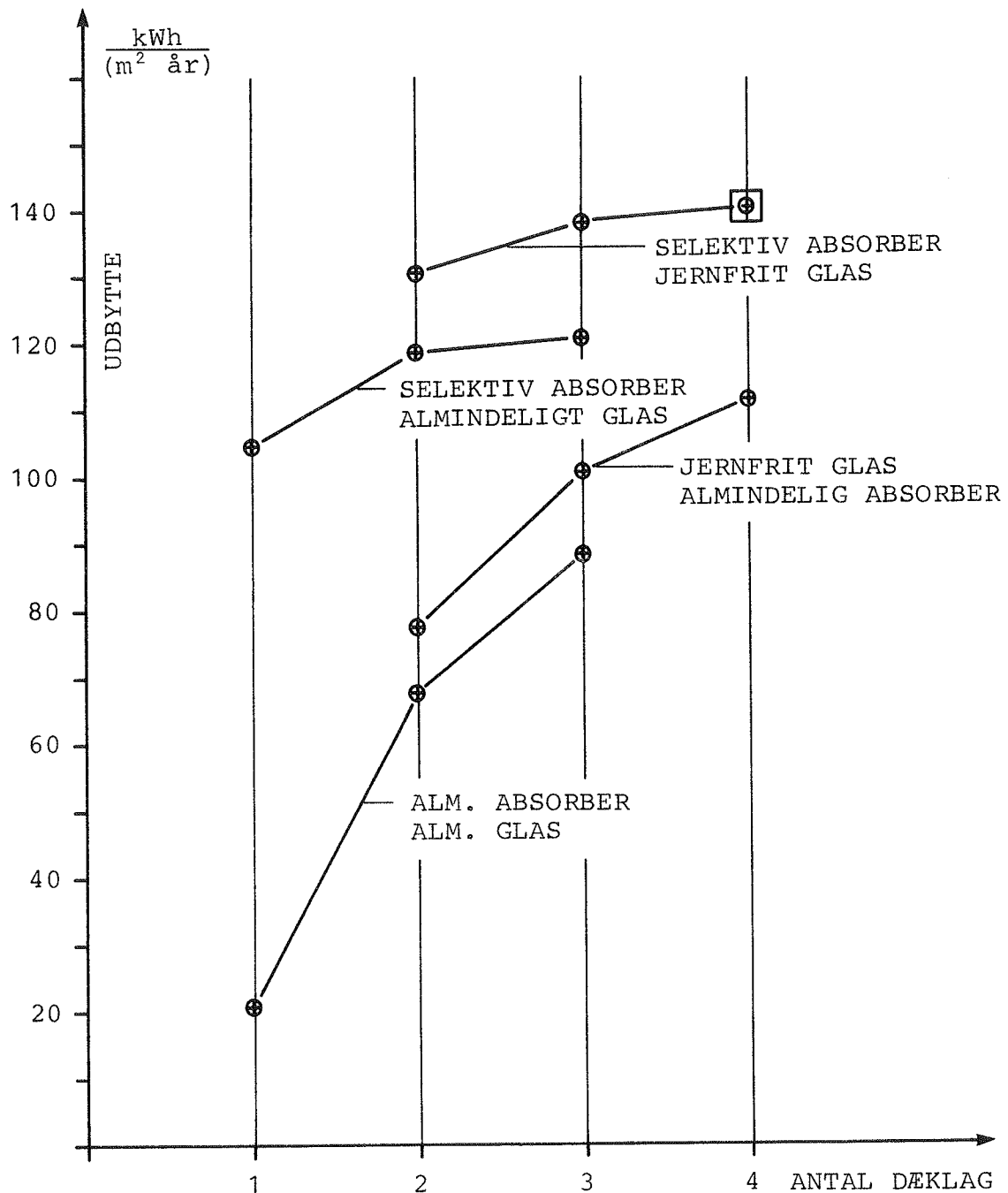


Fig. 2.3.6 Udbytte af solvæg ved forskellige glastyper og absorberoverflader. Forudsætninger: BR-82 hus, 18 m² solvæg, lille karmtab. Referencesolvæggen er markeret med □.

Udbyttet øges for de viste tilfælde med mellem 29 og 84 kWh/m² år ved at anvende den selektive belægning i stedet for den almindelige absorberoverflade. Kurverne viser, at et lag almindeligt glas og en selektiv belægning giver et pænt udbytte (105 kWh/m² år). Selv 1 lag almindeligt glas med en almindelig absorberoverflade giver et positivt udbytte (21 kWh/m² år). Kurverne viser også, at variationen med antal glaslag er stor med den almindelige absorberoverflade, mens der kun opnås en beskedne forbedring af udbyttet ved en forøgelse af antal glaslag, når absorberoverfladen er selektiv. Af kurverne ses også, at fordelene ved jernfrit glas er størst ved et stort antal dæklag.

2.3.3 Varmelagermateriale

Med den valgte reference solvæg som grundlag er varmelagermaterialet varieret. De benyttede materialedata er angivet i appendix fig. Al.1.6.

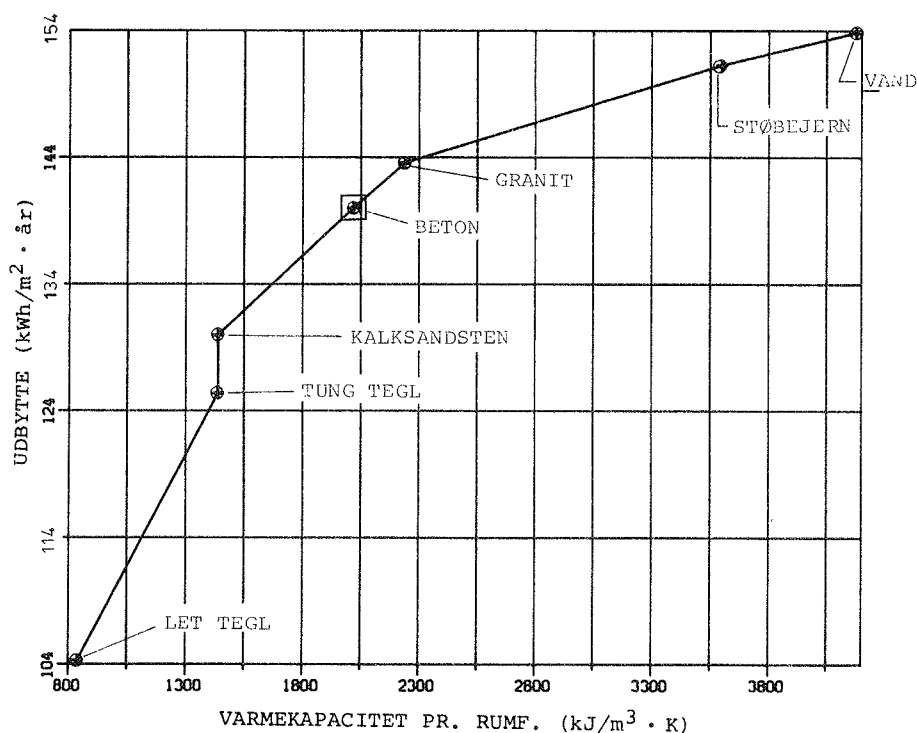


Fig. 2.3.7 Udbytte af solvæg med forskellige typer varmelager. Varmelagerets tykkelse er 0,228 mm. Referencesolvæggen er markeret med □.

Udbyttet pr. arealenhed er optegnet på fig. 2.3.7. Kurven viser, at udbyttet med god tilnærmelse kan bestemmes som funktion

af materialets varmekapacitet pr. rumfangsenhed. Der vil dog være en vis spredning, som skyldes forskellige varmeledningsevner af materialerne. Dette kan ses for fx kalksandsten og tung tegl. For de valgte materialer varierer udbyttet mellem 104 og 154 kWh/m² år. Af kurven ses, at beton er velegnet, når der ønskes et gængs byggemateriale.

Betonen kan forbedres en smule med tilslagsmaterialer af mineraler med stor varmeledningsevne og massefylde. Vand er det materiale, der giver det største udbytte af solvæggen. Dette skyldes vandets store specifikke varmekapacitet og gode varmetransporterende egenskaber.

Antallet af halvtimer med overtemperaturer er vist på fig. 2.3.8. Kurven viser, at antallet af halvtimer øges med en øgning af varmekapaciteten, dog har granit, støbejern og vand samme antal halvtimer. Antallet af halvtimer er meget begrænset set i forhold til tilsvarende vinduesarealer med direkte solindfald.

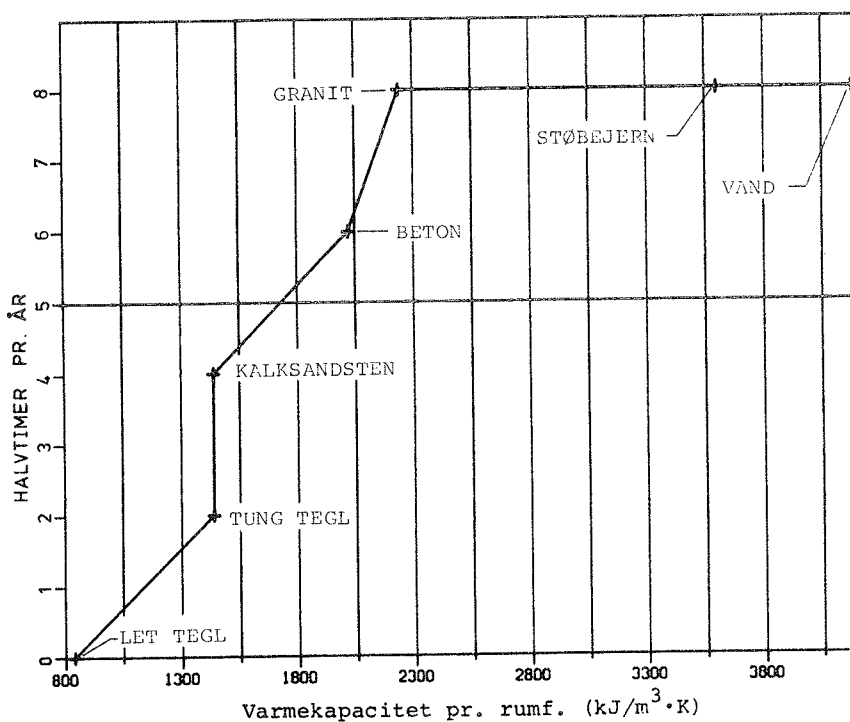


Fig. 2.3.8 Antal halvtimer med rumlufttemperaturer over 25°C i månederne oktober til april (incl.) ved forskellige materialer i solvæg, men med samme lagertykkelse. Forudsætninger som på fig. 2.3.6.

2.3.4 Solvæggens lagertykkelse

Med beton og vand som lagermateriale og øvrige parametre som i referencesolvæggen er lagertykkelsen varieret. Resultatet ses af fig. 2.3.9 og viser, at der for beton opnås et maksimalt udbytte med en lagertykkelse mellem 0,2 og 0,4 m.

For beton kan kurvens form forklares med, at ved små lagertykkelser øges udbyttet ved en forøgelse af tykkelsen på grund af øgningen af varmelagringssevnen. Ved store tykkelser opnås et faldende udbytte ved øget lagertykkelse, da væggen isolans øges og varmetransporten af solvarme gennem væggen mindskes. Dette ræsonnement gælder kun faste materialer. I vand vil der ske strømninger, således at temperaturforskellene hurtigt udjævnes.

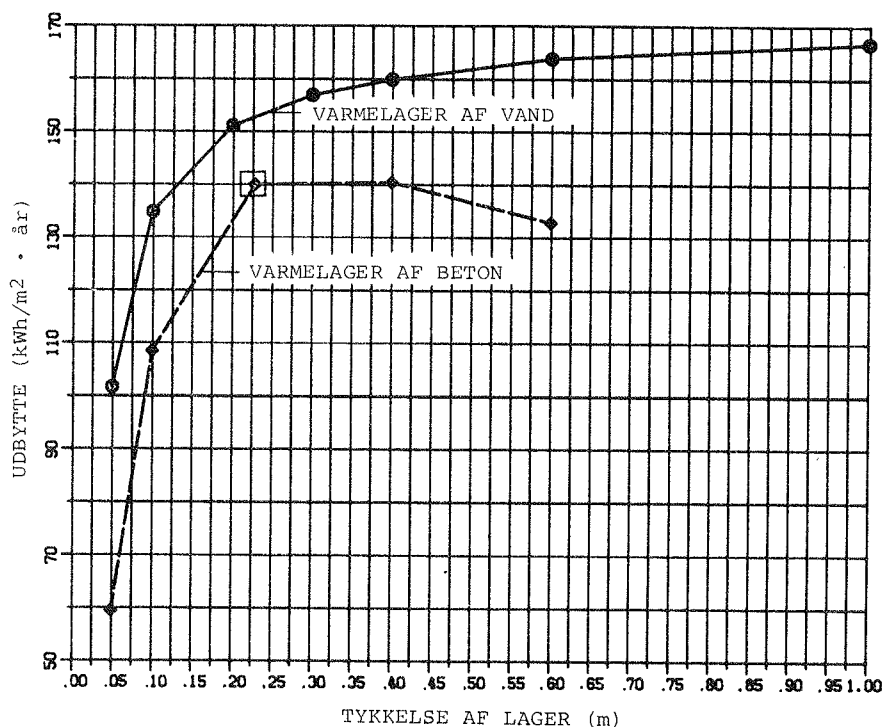


Fig. 2.3.9 Udbytte af solvæg med forskellige tyngder af varmelager afhængig af lagertykkelse. Solvæg som i referencetilfælde bortset fra lagertykkelse og lagermateriale. Referencesolvæggen er markeret med □.

Med vand som varmelagringsmateriale øges udbyttet med en forøgelse af tykkelsen. Ved store tykkelser er der kun et beskedent merudbytte ved en øgning af tykkelsen.

Antallet af halvtimer med overtemperaturer falder drastisk ved en øgning af varmelagertykkelsen (se fig. 2.3.10). Dette skyldes, at temperatursvingningerne på indersiden af væggen mindskes ved en forøgelse af lagertykkelsen.

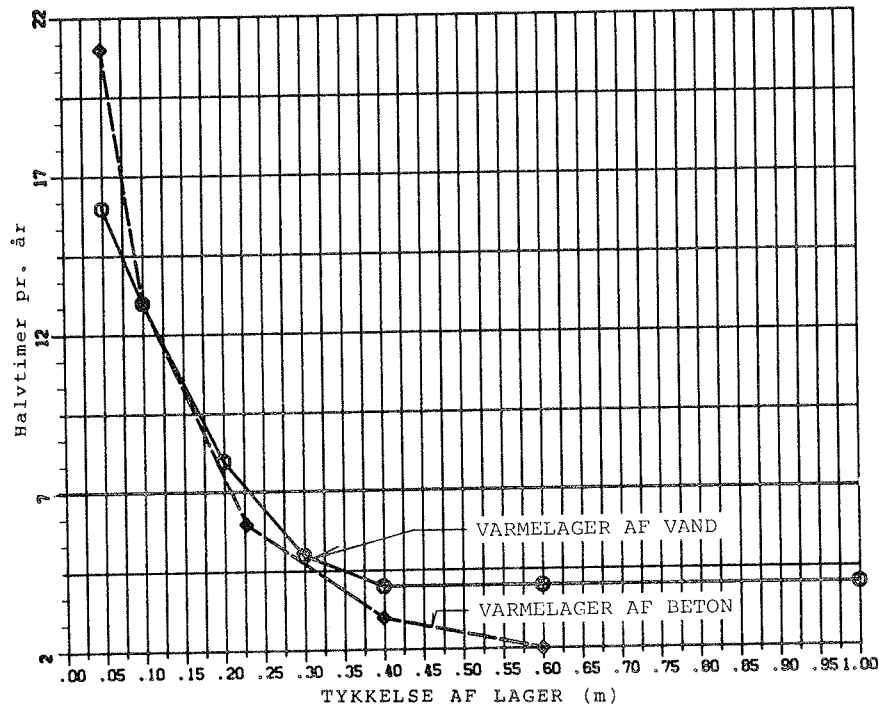


Fig. 2.3.10 Antal halvtimer med rumlufttemperaturer over 25°C i månederne oktober til april (incl.) ved varierende lagertykkelse. Solvæg som i referencetilfælde bortset fra lagertykkelse og lagermateriale.

2.3.5 Horisontafskærmning

Udbyttet af solvæggen ved varierende horisontafskærmning er vist på fig. 2.3.11. Udbyttet er fundet som differensen mellem opvarmningsbehovet for referencehuset med og uden solvæg ved varierende horisontafskærmning. Der er forudsat en beregningsmæssigt uendelig fjern afskærmning på 0° , 10° , 20° og 30° . Direkte solstråling med solhøjder mindre end grænseværdien afskærmes, mens den diffuse stråling er regnet uændret uanset horisontafskærmningens størrelse.

Resultaterne viser et øget opvarmningsbehov for husmodellen med og husmodellen uden solvæg, ved en øgning af horisontafskærmningen.

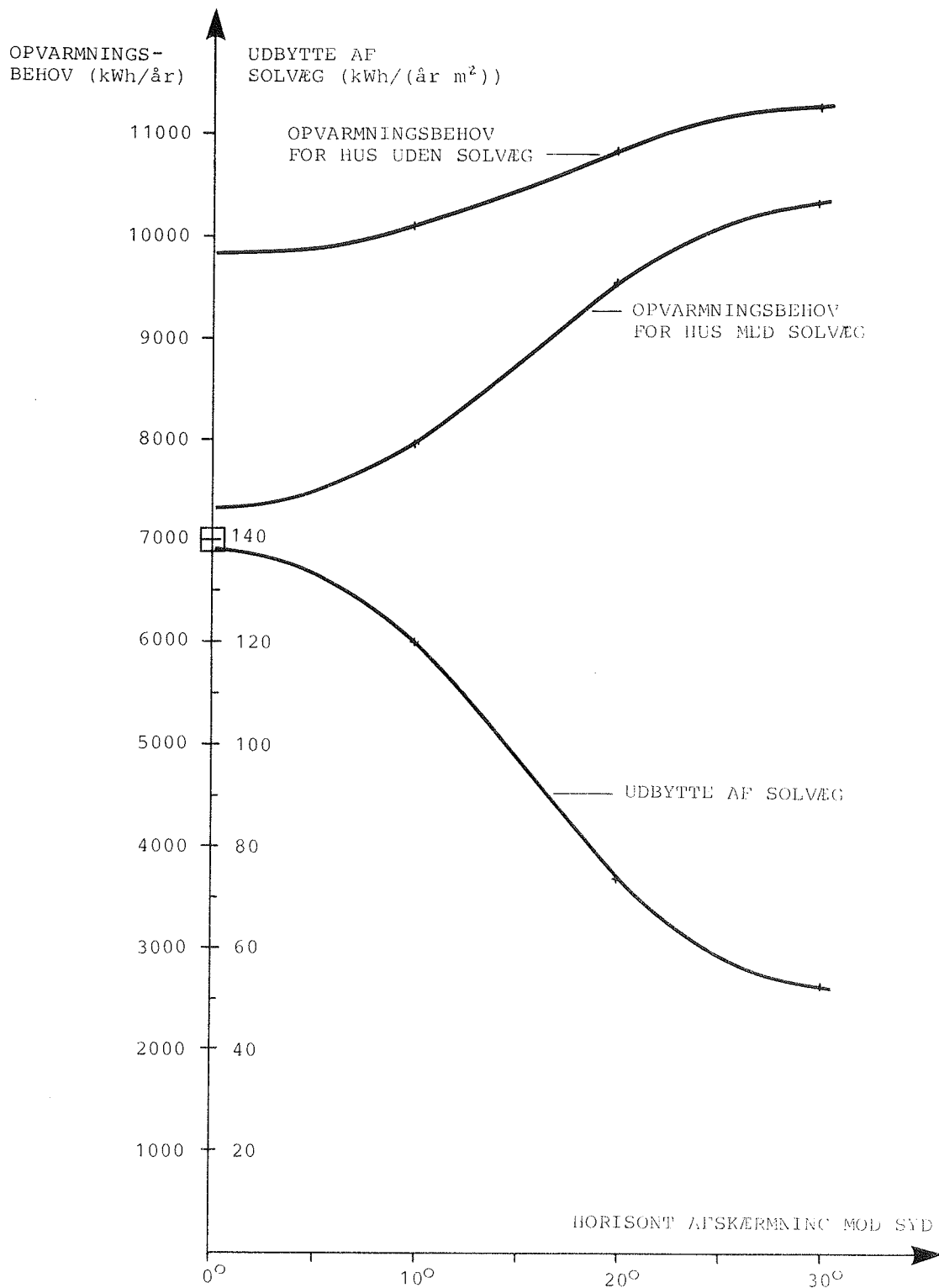


Fig. 2.3.11 Opvarmningsbehov for hus med og uden solvæg, samt udbytte af solvæg ved varierende horisontafskærmning. Referencesolvæg er anvendt, dog kun med 3 lag jernfrit glas. Solvægsareal: 18m². Referencesolvæg er markeret med □.

Kurverne nærmer sig hinanden ved en øgning af horisontafskærmningen. Udbyttet pr. arealenhed er også vist. Ved horisontafskærmninger mellem 0° og 5° er der næsten ingen forskel på udbyttet. Ved større horisontafskærmninger falder udbyttet væsentligt. Mellem 20° og 30° flader kurven ud og bliver næsten vandret. Dette kan forklares med, at horisontafskærmningen skygger for en stor del af solstrålingen i opvarmningssæsonen, og at en øgning af afskærmningen derved kun giver en begrænset reduktion af solindfaldet. Grunden til at kurven tilsyneladende ikke fortsætter mod nul skyldes, at den diffuse stråling regningsmæssigt er uændret.

2.3.6 Klimavariationer

For at kunne vurdere afhængigheden af varierende solindfald og udelufttemperaturer er referencesolvæggene simuleret på grundlag af 15 års vejrdata målt i Tåstrup i årene 1959 til 1973. Endvidere er udført beregninger af udbyttet ved anvendelse af det danske testreferenceår (TRY), ref. (35) og det modificerede referenceår, der er benyttet til de tidligere beskrevne simuleringer, (se afsnit 2.1.5).

Årsudbyttet er i fig. 2.3.12 angivet som funktion af det på den udvendige side af lageret absorberede solindfald i opvarmningssæsonen, der her er defineret som perioden oktober til april (incl.).

Årsagen til at det årlige solindfald ikke er benyttet er, at kun ca. 15% af årsudbyttet ligger uden for den egentlige opvarmningssæson. Derfor anses solindfaldet i månederne oktober til april incl. for at være de mest relevante med hensyn til bestemmelse af udbyttet.

Af figuren ses ikke en entydig sammenhæng mellem udbytte og solindfald. Der kan dog aflæses en tendens til, at udbyttet øges med stigende solindfald. Variationerne kan skyldes, at solindfaldet i nogle år er rimelig jævnt fordelt over opvarm-

ningssæsonen, mens det i andre tilfælde hovedsagelig findes i efterårs- eller forårsmånederne, hvor opvarmningsbehovet er moderat. På figuren er indtegnet middelværdien af de 15 års vejrdata og de benyttede referenceår. Det ses, at det i de foregående afsnit benyttede modificerede referenceår har et større solindfald og udbytte end middelværdien for de 15 års vejrdata. Udbyttet beregnet ved hjælp af det modificerede referenceår er 6% større end middelværdien beregnet på grundlag af 15 års vejrdata.

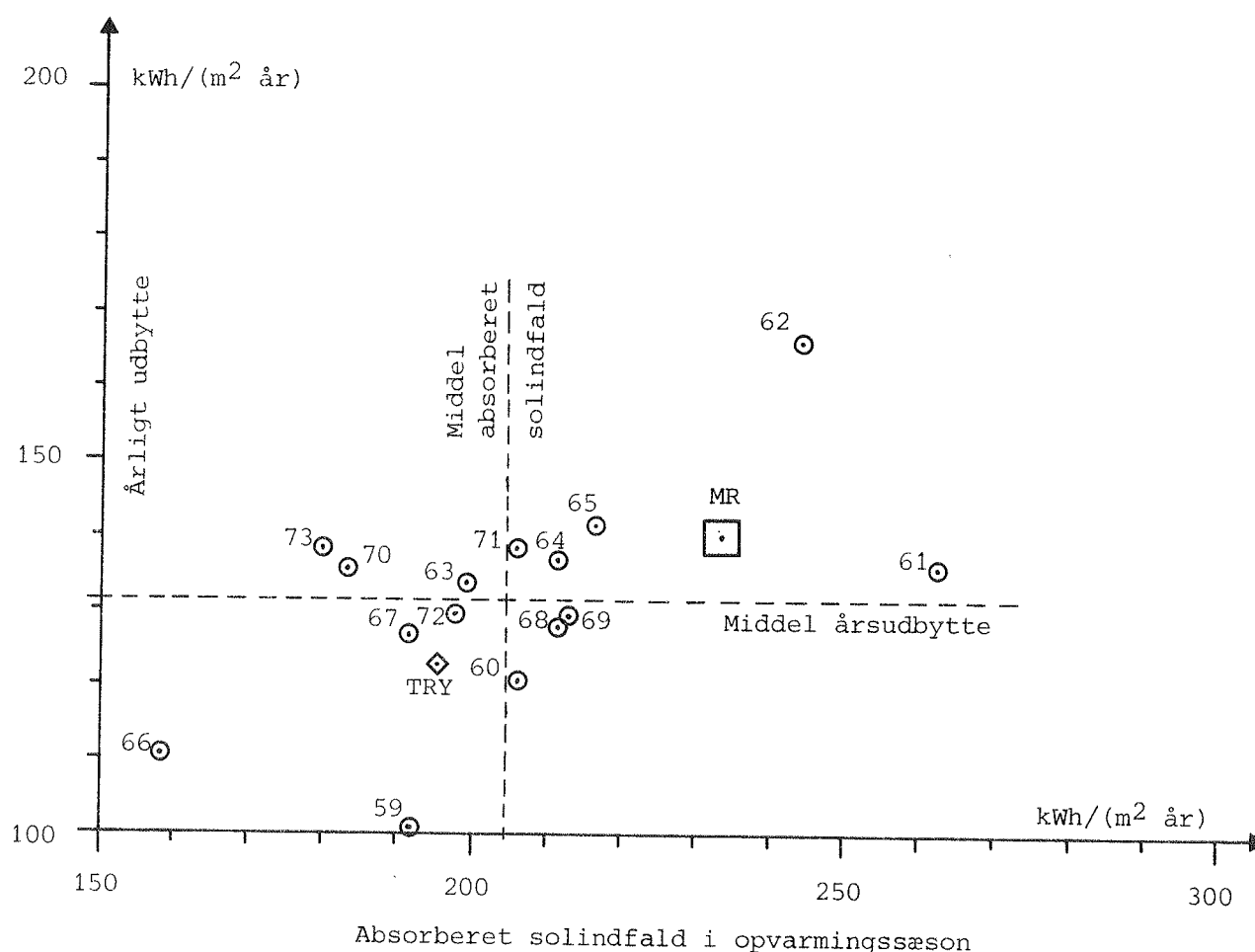


Fig. 2.3.12 Det årlige udbytte for referencesolvæg som funktion af det absorberede solindfald i opvarmningssæsonen (oktober - april incl.) for årene 1959 - 1973 og modificeret referenceår (MR) og det danske testreferenceår (TRY). Endvidere er angivet middelværdier af årsudbytte og absorberet solindfald for de 15 års vejrdata.

Beregninger med det danske testreferenceår TRY viser, at både solindfaldet og udbyttet er mindre end middelværdien for de 15 år. TRY-vejrdataene giver et udbytte, der er 6% lavere end 15 års middelværdien.

Temperaturerne på den indvendige side af lageret var i løbet af de 15 år ikke lavere end 15°C , og der var i alt 83 timer med temperaturer mellem 15 og 16°C . Ved beregninger med de to referenceår var temperaturerne på denne overflade ikke lavere end 16°C . Solvægge med referencevæggens udformning vil dermed yderst sjældent give anledning til gener på grund af lave overfladetemperaturer.

2.3.7 Indeklima

For to bygningsmodeller er lufttemperaturforholdene sammenlignet med og uden anvendelse af solvægge. Rumlufttemperaturerne er her benyttet som et udtryk for det termiske indeklima. Ved en mere præcis bestemmelse af det termiske indeklima bør der også indgå en række andre parametre, blandt andet middelstrålingstemperaturen.

Rumlufttemperaturerne i bygningsmodellerne tillades at svinge frit mellem 20 og 25°C . Er rumlufttemperaturen ved at falde under 20°C , tilføres rummet varme, men hvis temperaturen er ved at komme over 25°C , foretages beregningsmæssigt automatisk udluftning med et ekstra luftskifte på op til 4 g/h . Luftskiftet afpasses således at lufttemperaturen holdes på 25°C . Luftskiftet på 4 g/h er dog ikke altid tilstrækkeligt til at holde rumlufttemperaturen nede på 25°C i tilfælde af stort varmetilskud fra solindfald. I beregningerne er der ikke forudsat anvendt gardiner eller anden afskærmning til reduktion af solindfaldet. I praksis vil ventilationen ofte ske ved at vinduerne åbnes, og hvis dette ikke er tilstrækkeligt, vil der blive anvendt afskærmning, fx i form af gardiner, der trækkes for vinduerne.

Bygningsmodellen svarer til referencetilfældet, hvor der er forudsat, at bygningen er isoleret svarende til kravet i Bygningsreglementet (29), og at der i bygningen er anvendt vinduer med 9 m² sydvendt glasareal. Varmeakkumuleringssevnen svarer til den middeltunge rummodel (fig. 2.1.13), hvor hovedparten af rummenes varmeakkumuleringssevne udgøres af 110 mm murværk i de indre vægoverflader. I modellen med solvæg er referencesolvæggen anvendt med et areal på 18m² og med et varmelager af beton (fig. 2.3.3).

Forskellen mellem de to sæt kurver er ret lille (fig. 2.3.13 og 2.3.14). I begge tilfælde findes, at der næsten ikke forekommer lufttemperaturer højere end 24°C i månederne november til februar. Temperaturer højere end 26°C forekommer kun i månederne juni til august. Den måned, hvor der forekommer de højeste temperaturer er juni måned. I denne måned er der henholdsvis med og uden solvægge 112 og 82 timer med temperaturer over eller lig med 26°C samt 39 og 26 timer med temperaturer over eller lig med 28°C.

På grundlag af ovenstående ses, at det kun er i månederne juni til august, hvor der under de givne forudsætninger kan opstå overophedningsproblemer. I disse tre måneder tilføres rummene i bygningsmodellen med solvægge en varmemængde på 3800 kWh stammende fra solindfald gennem vinduer og 2000 kWh fra solvæggen. Da størstedelen af den tilførte solvarme kommer fra vinduerne, vil en solafskærmning i form af gardiner for vinduerne være i stand til at reducere antallet af timer med høje temperaturer i et væsentligt omfang, idet den fra vinduerne tilførte varme sker i et væsentligt kortere tidsrum end varmen afgivet fra solvæggen.

Endvidere vil problemerne i sommermånederne kunne reduceres ved at starte den beregningsmæssigt forøgede ventilation ved en lavere rumlufttemperatur end den anvendte på 25°C.

Det kan konkluderes, at det potentielt vil være muligt at anvende solvægge uden afskærmning om sommeren, forudsat at

der i bygningen er sikret gode muligheder for at fjerne overskudsvarmen, og at der i bygningen ikke tilføres store mængder solvarme fra solindfald gennem vinduerne.

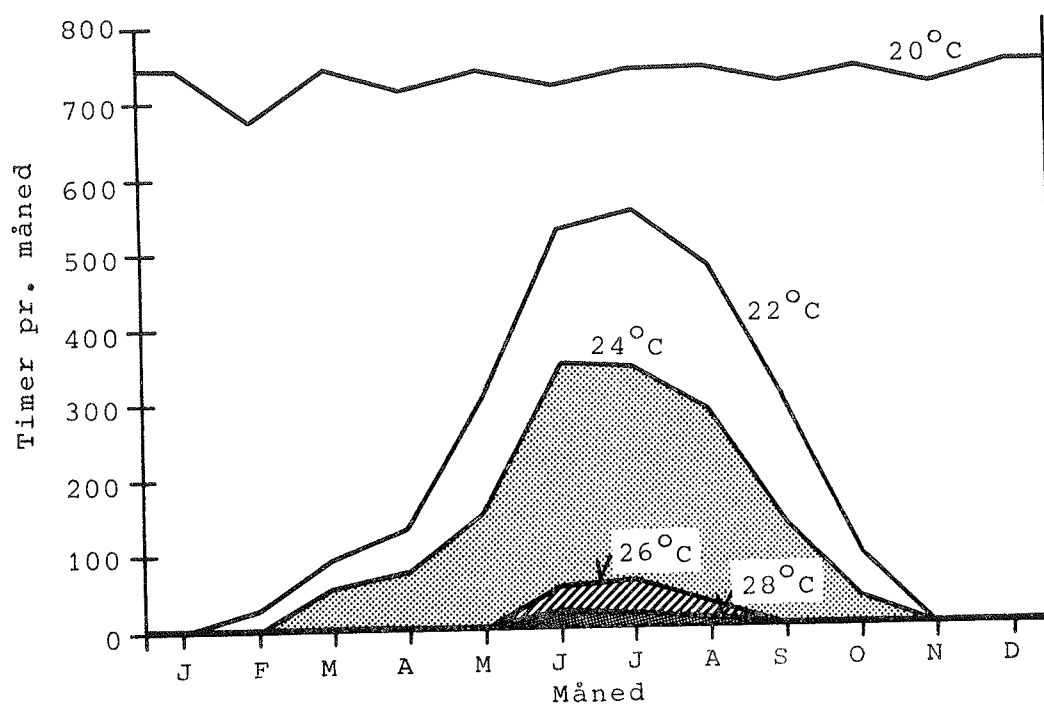


Fig. 2.3.13 Antal timer pr. måned med temperaturer over henholdsvis 20, 22, 24, 26 og 28°C ved husmodel som i referencetilfælde, dog uden solvæg, se fig. 2.3.2.

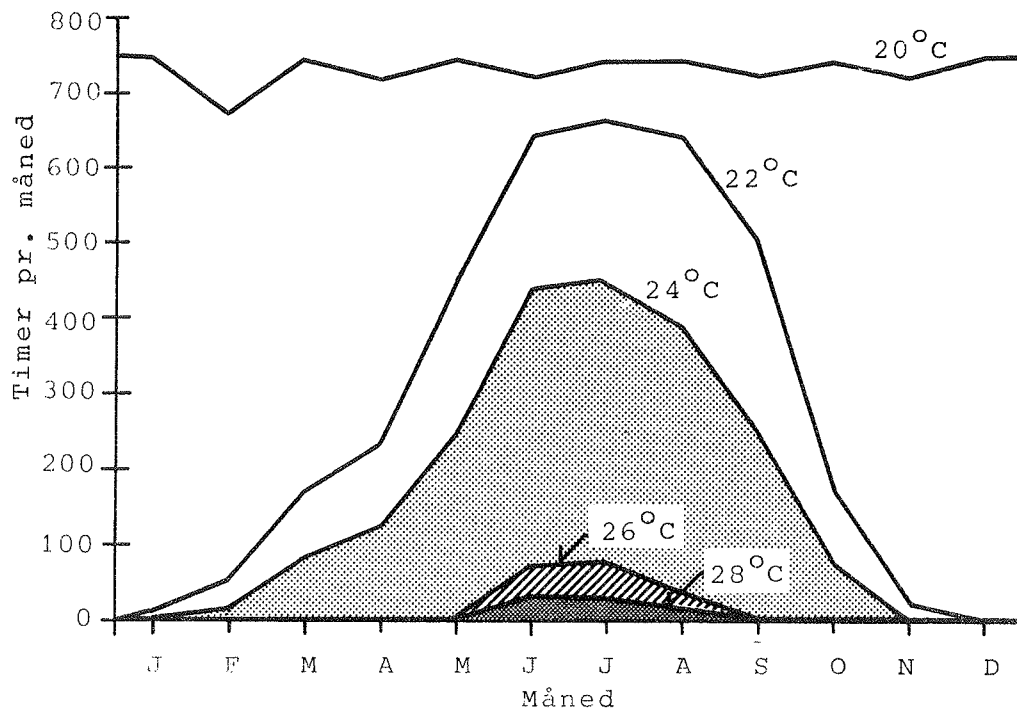


Fig. 2.3.14 Antal timer pr. måned med temperaturer over henholdsvis 20, 22, 24, 26 og 28°C ved husmodel med solvæg som i referencetilfælde, se fig. 2.3.2 og 2.3.3.

3. FORSØG

I dette kapitel beskrives de udførte forsøg med to typer solvægge. Formålet med forsøgene er at måle temperaturer og varmestrømme og benytte disse registrerede data til kontrol af et EDB-beregningsprogram.

3.1 FORSØGSOPSTILLING

3.1.1 Forsøgsrum

Rummene er opbygget af en lægteskelet-konstruktion. Gulvarealerne i forsøgsrummene er 10 m^2 (se fig. 3.1.1). Isoleringen i de udvendige overflader er 100 mm tyk. En nærmere beskrivelse af rummene findes i (36). Rummenes indvendige overflader består

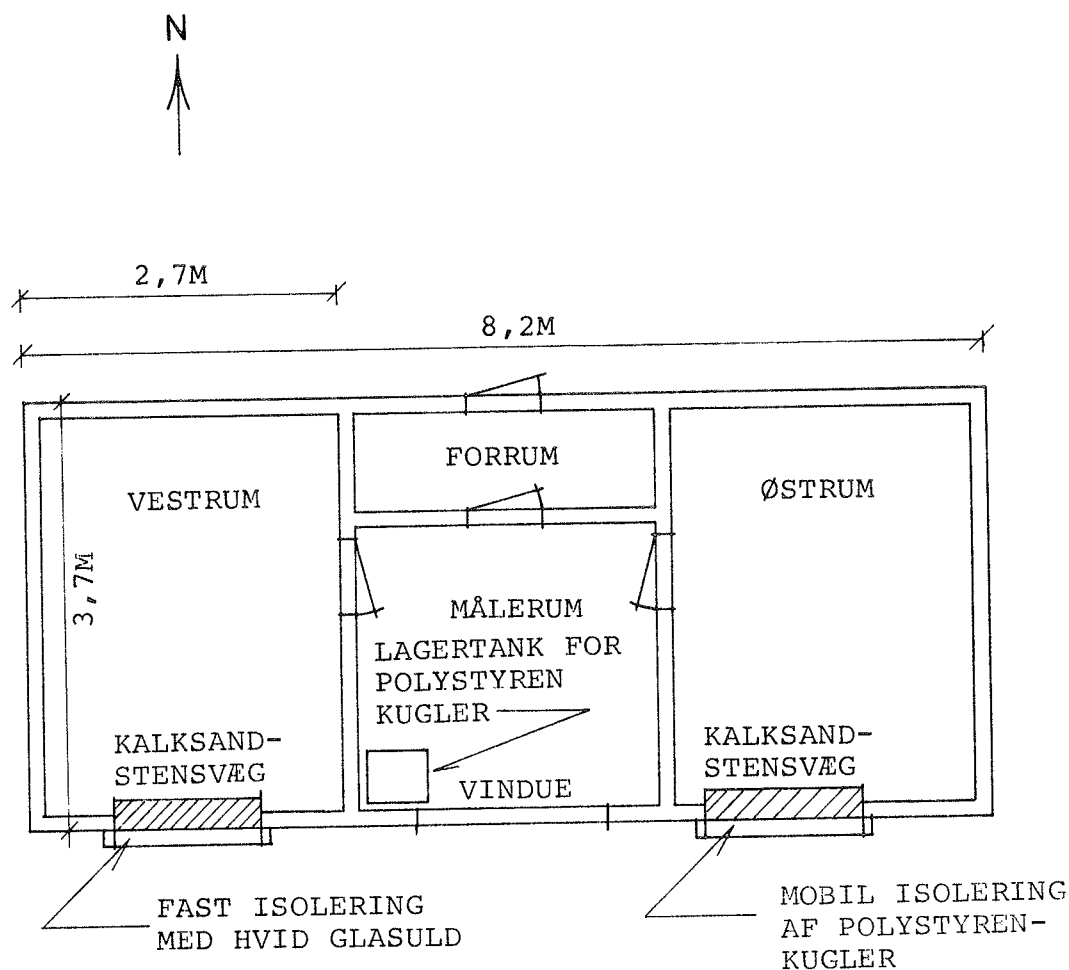


Fig. 3.1.1 Oversigtsplan af forsøgshus med solvægge.

af finerplader i vægge, spånplader i gulv og gipsplader i loftet. Luftskiftet i rummene er på ca. 3 gange i timen.

I forsøgshusets sydfacade er indbygget 2 forskellige solvægge som beskrevet i det følgende (se fig. 3.1.2).

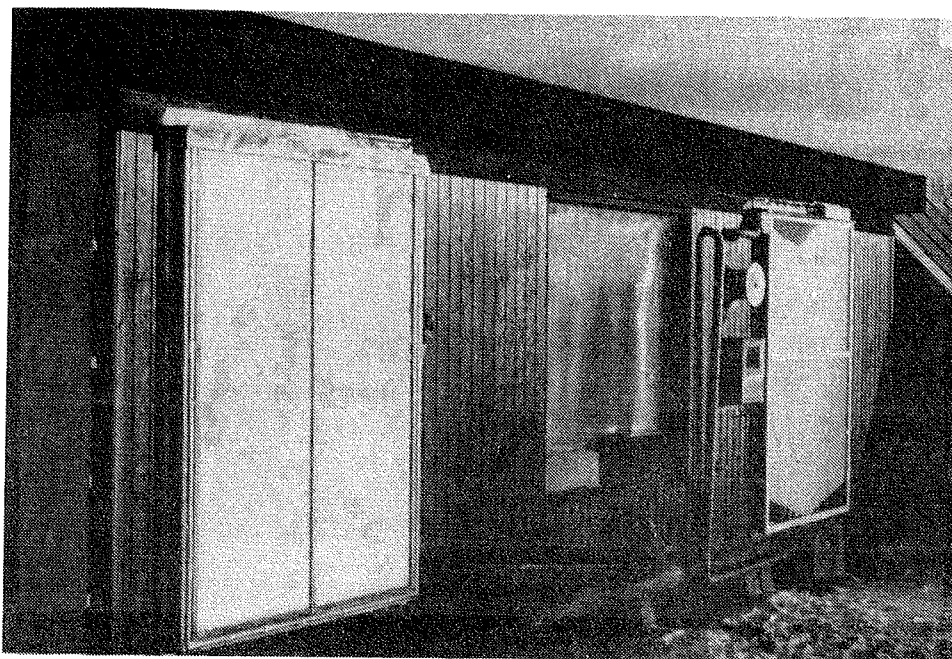


Fig. 3.1.2 Solvægge i forsøgshus.

3.1.2 Beskrivelse af kalksandstensvægge

Inderst mod rummet er begge vægge opbygget af 228 mm tykke kalksandstensmure med sten i bredt format (158 x 228 x 55 mm). Kalksandstensvæggene i de to forsøgsrum er ens opbygget og har hver et areal på 3,1 m². Væggene fungerer som varmelager i solvæggen.

Murene er opmuret med 1 mm fuger af flisemørtel. Derved er den tilførte mængde fugt fra mørtelen begrænset. Udvendigt er murene vandskuret for at lukke eventuelle revner mellem stenene. Efter denne behandling er murene afslebet med en kalksandsten for at fjerne de største ujævnheder. Udvendigt er murene malet med sort skoletavlelak. Denne overflade udgør solvæggens absorber.

Mellem muren og siderne er udført tilpasninger af vandfast krydsfiner. Disse er udvendigt fuget med siliconefugemasse for at tætn eventuelle hulrum mellem mur, krydsfiner og stolper.

Væggenes belastning optages ved jorden af sokkelen anbragt på komprimeret stabilt grus (se fig. 3.1.4). En bjælke opkilet på sokkelstenene optager belastningen fra gulvbjælkelaget og solvæggen (se fig. 3.1.5). Kraftoverføringen er forbedret ved klodser over bjælken i hulrummet mellem de enkelte gulvbjælker. Over bjælkelaget er anbragt en 90 x 233 mm limtræsbjælke i murens bredde, som danner fundament for muren. Til sikring af væggenes stabilitet er væggen foroven fastgjort til remmen med specielle beslag af 2 x 20 mm bøjet fladjern (se fig. 3.1.5).

3.1.3 Solvæg isoleret med mobil isolering

Udvendigt på varmelageret er anbragt en dæklagskonstruktion (se fig. 3.1.3 - 3.1.5). Den består i 1. måleperiode af en 16 mm plexiglasdobbeltplade anbragt i 100 mm afstand fra kalksandstensvæggen. Pladen er opsat således at kanalerne er vandrette. Dobbeltpladen har kanaler med et tværsnit på 13 x 15 mm.

Fastgørelsen af pladen sker ved hjælp af en speciel profil-sprosse bestående af en aluminiumsskinne og tilhørende PVC-afdækningsliste.

I 2. måleperiode var yderligere et dæklag bestående af en 2 mm plexiglasplade anbragt på ydersiden af væggen tæt på absorberen. Dette er gjort for at forbedre isoleringsevnen af solvæggen i perioder, hvor der ikke er mobil isolering i hulrummet. Plexiglaspladen er langs hele randen tætnet med sort tape for at øge lufttætheden.

Plexiglas-dobbeltpladen har fået en blivende udbøjning. Dette skyldes formentlig luftovertrykket, der opstår ved fyldning af mobil isolering i hulrummet foran solvæggen. Dobbeltpladens udbøjning er målt til 21 mm.

Med en afstand på 1500 mm mellem understøtningerne svarer udbøjningen til 2% af spændvidden. Tilnærmes udbøjningskurven til en cirkel, fås en middeludbøjning på 15 mm.

Den inderste plexiglasplade er ved randen fastholdt i en afstand på 9 mm fra væggen. På grund af mindre fremspring på væggen er den mindste afstand til væggen 1 mm. Dette giver en middelfaststand til væggen på 4 mm.

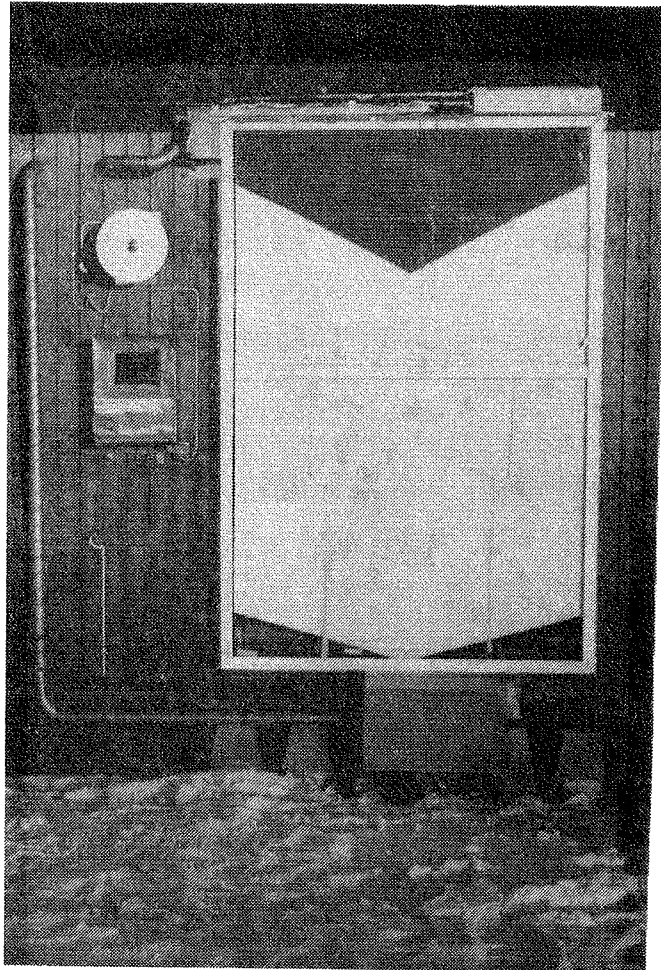


Fig. 3.1.3 Solvæg med mobil isolering under tømning.

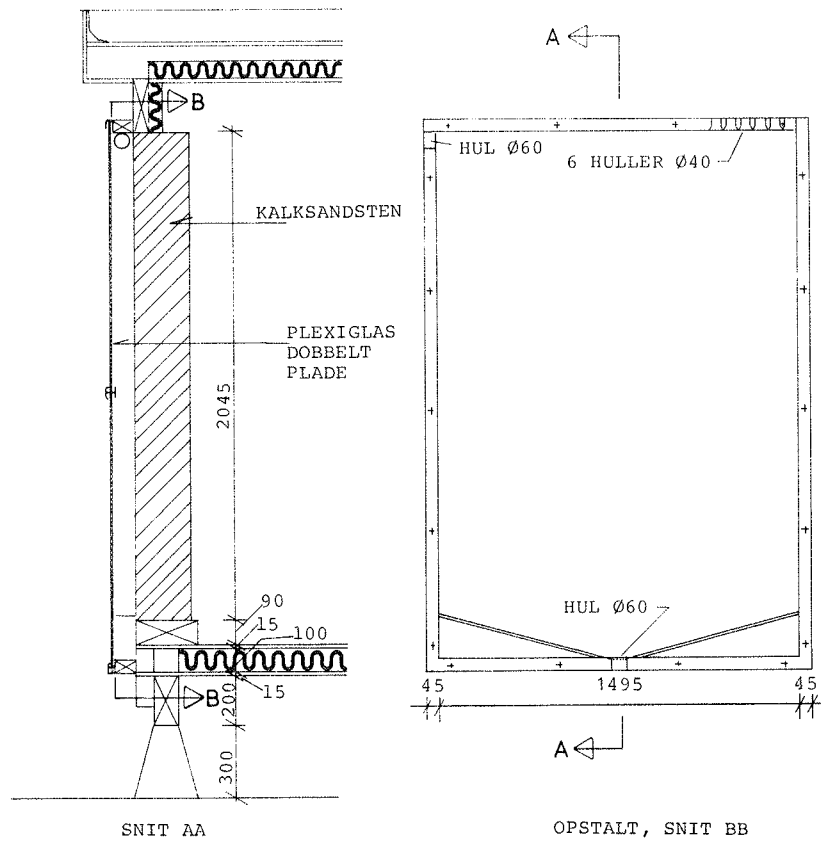


Fig. 3.1.4 Solvæg isoleret med ekspanderede polystyrenkugler.

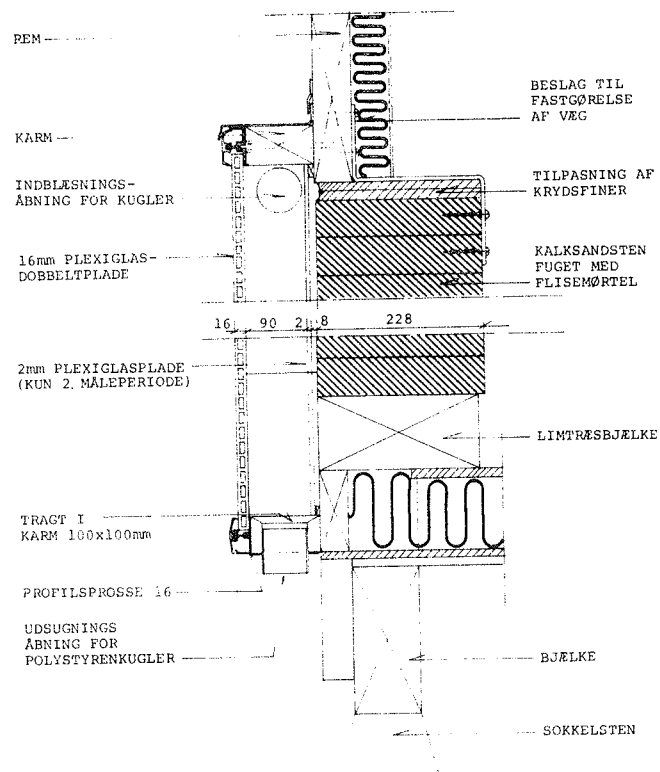


Fig. 3.1.5 Lodret snit i top og bund af solvæg med mobil isolering.

3.1.4 Transportsystem for mobilisolering

Transportsystemet er opbygget af varmgalvaniserede, spiralsnoede ventilationsrør med en diameter på 60 mm. (se fig. 3.1.6), som er samlet med tape. Luftstrømmen skabes af injektorer, der drives af ventilatorer (se fig. 3.1.7). Bag dysen i injektoren dannes et undertryk, der suger kugler og luft ind i luftstrømmen foran dysen. Kuglerne transporteres med luftstrømmen i rørene. For enden af rørene ledes transportluften væk gennem et filter, og kuglerne lagres. Placeringen af udluftningsåbningerne kan ses af fig. 3.1.6. Øverst i hulrummet foran solvæggen er der to ventilationsåbninger.

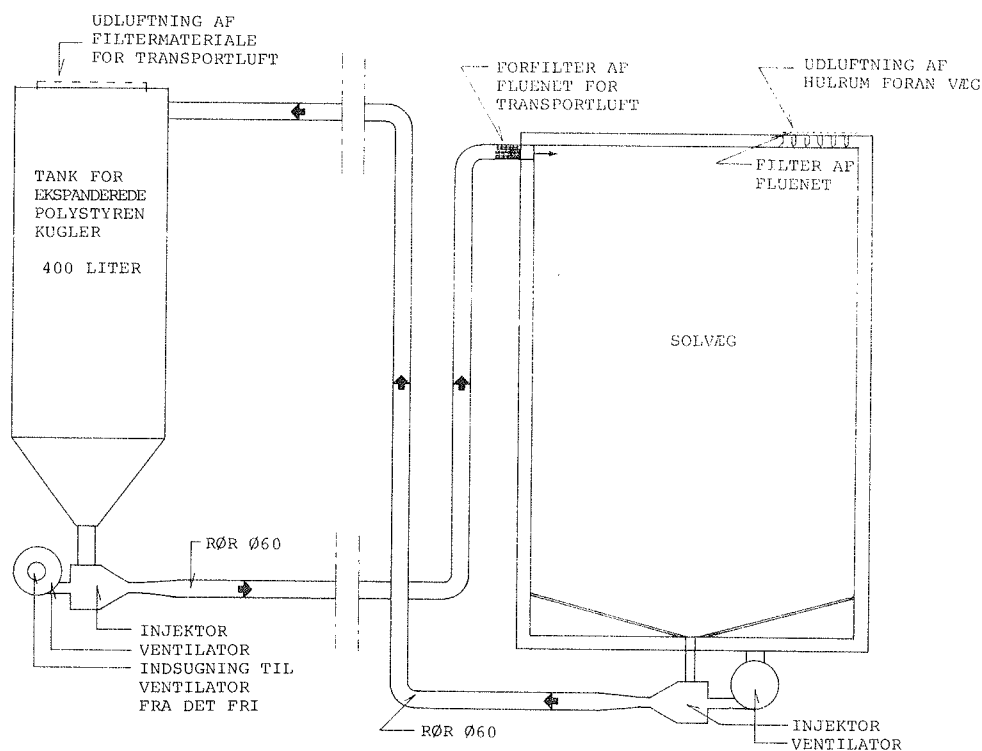


Fig. 3.1.6 Skematisk tegning af transportsystem for ekspanderede polystyrenkugler.

Hullet i øverste modsatte hjørne af hvor kuglerne blæses ind er det største. Størrelsen sikrer tilstrækkelig luftstrøm i hulrummet til at kuglerne bliver kastet langt ind i hulrummet. Når hulrummet er næsten fuldt, sikrer åbningen at også øverste højre hjørne (set udefra) bliver fyldt med kugler. Når filteret

er tilstoppet (se fig. 3.1.8), ledes hovedparten af luftstrømmen ud gennem ventilationsåbningen lige før solvæggen (forfilter). Der er dog tilstrækkelig hastighed af kuglerne til, at den resterende del af hulrummet fyldes.

Fra det tidspunkt, hvor hovedfilteret er stoppet og indtil hulrummet er fyldt, sker en trykstigning i hulrummet afhængig af åbningsarealet i forfilteret. Under normale omstændigheder er dette mindre end 200 Pa (20 mm VS).

Når hulrummet foran solvæggen er helt fyldt, begynder tilgangsrøret at blive fyldt. Der er kun et rørstykke på ca. 20 cm før forfilteret, som fyldes, idet der sker en trykstigning i røret, således at injektoren ophører med at fungere, selv om ventilatoren kører. Den derved dannede prop af kugler kan under normale driftsforhold let fjernes ved næste fyldning, forudsat at hulrummet foran solvæggen er tomt.

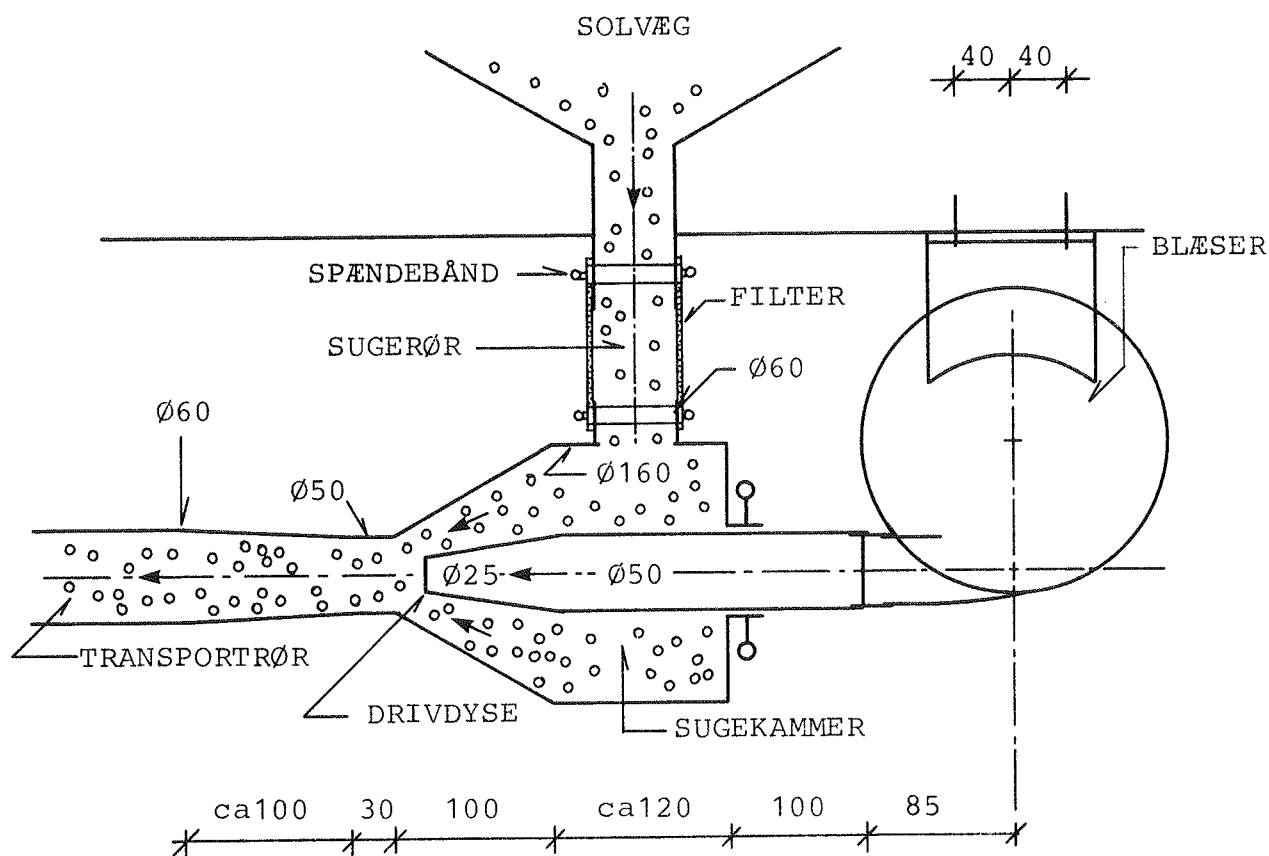


Fig. 3.1.7 Injektor under solvæg. Alle mål i mm.

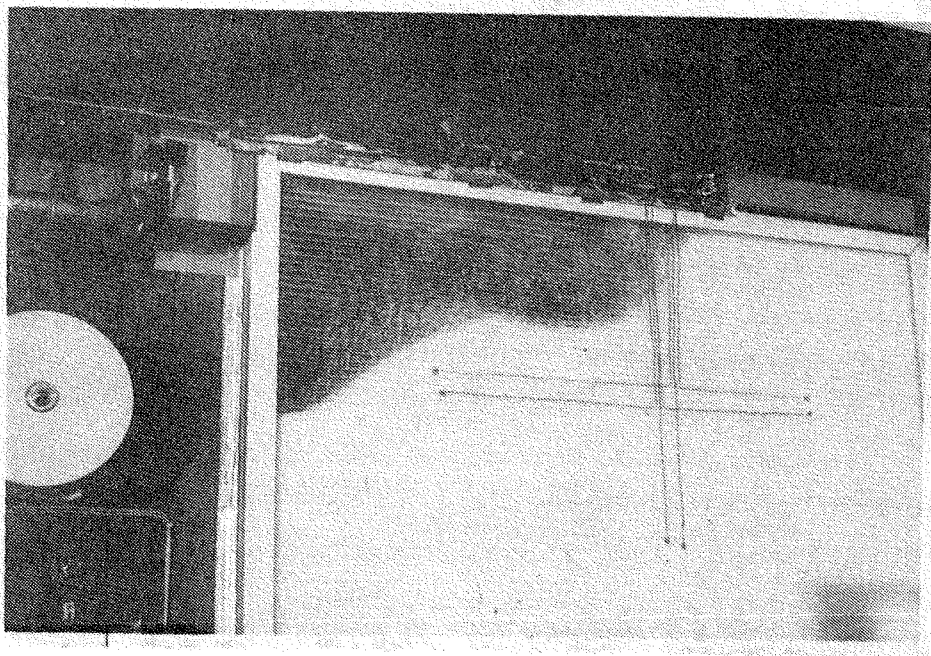


Fig. 3.1.8 Solvæg der er ved at blive fyldt med mobil isole-ring.

Tømningen af hulrummet sker ved en injektor anbragt under solvæggen forbundet med et rør til lagertanken. Bunden af solvæggen har en hældning på ca. 15° fra vandret. Overfladen af bunden har været genstand for eksperimenter. Der er forsøgt forskellige overfladebelægninger: Aluminiumsfolie og teflonfolie. Erfaringerne omtales senere sammen med de andre driftserfaringer.

For at hindre opladning af kuglerne med statisk elektricitet er disse påsprøjtet en opløsning med kvartære ammoniumforbindelser ca. hvert halve år. Dette er tilstrækkeligt til at undgå problemer. Inden denne metode blev anvendt, gav statisk elektricitet anledning til, at kuglerne blev hængende på plexiglasoverfladen.

Injektorerne drives af ventilatorer af typen Elektror AGN. Mærkeeffekten er 300 W. Fyldning og tømning af systemet tager ca. 5-8 minutter. Dette giver et flow af kugler på 4,6 - 2,9 m^3/h . Flowet er afhængigt af om der er utætheder i røret og eventuelle forhindringer i selve røret. Skønnes i gennemsnit 2

- 4 tømme/fyldecykler i døgnet, fås et energiforbrug til ventilatoren på årsbasis på 7 til 14 kWh/år m².

3.1.5 Solvæg isoleret med hvid glasuld

Glasulden er indbygget i et element med en ramme (se fig. 3.1.9 og 3.1.10). Rammen er på hver side lukket med en plade af glasfiberarmeret polyester (fig. 3.1.11). Pladerne er fastholdt ved hjælp af lister, der er skruet fast til rammerne. Samlingen mellem plade og ramme er tætnet med fugemasse.

Elementet er anbragt i en karm opbygget uden om kalksandstensvæggen. Elementet er på den side, der vender ind mod muren tætnet med skumgummilister, mens siderne af elementet er tætnet med gummiprofiler.

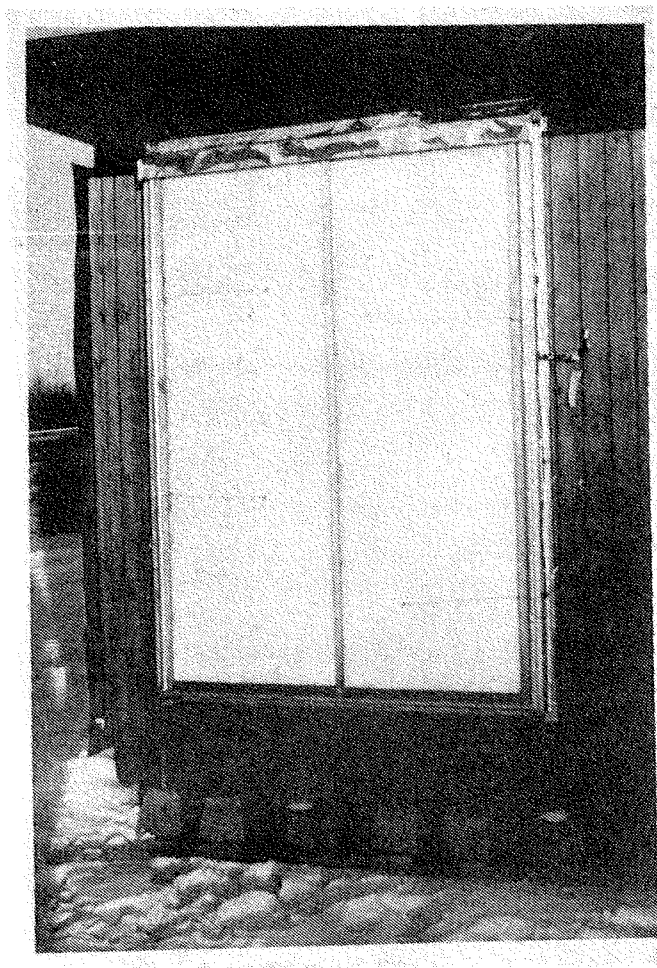


Fig. 3.1.9 Solvæg isoleret med hvid glasuld.

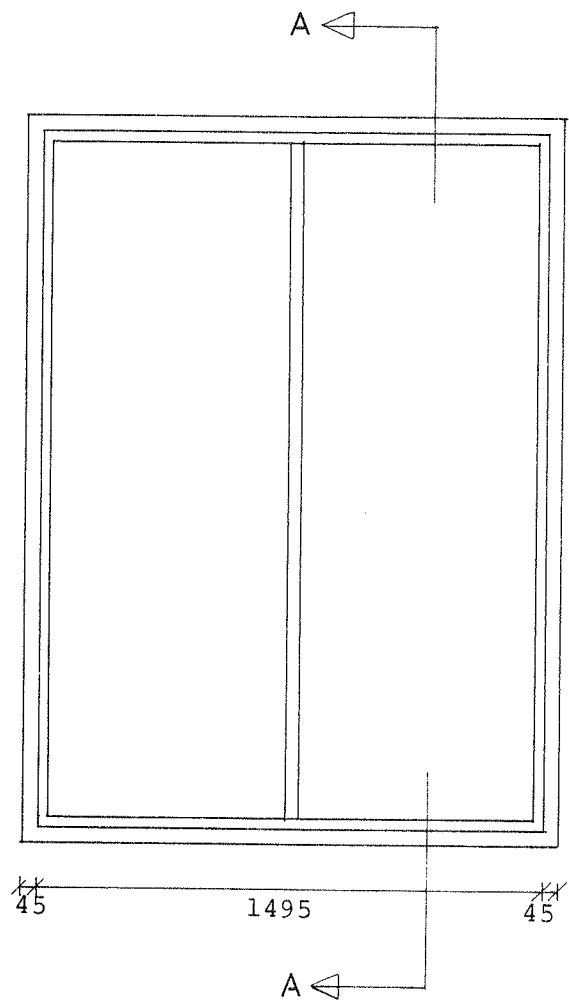
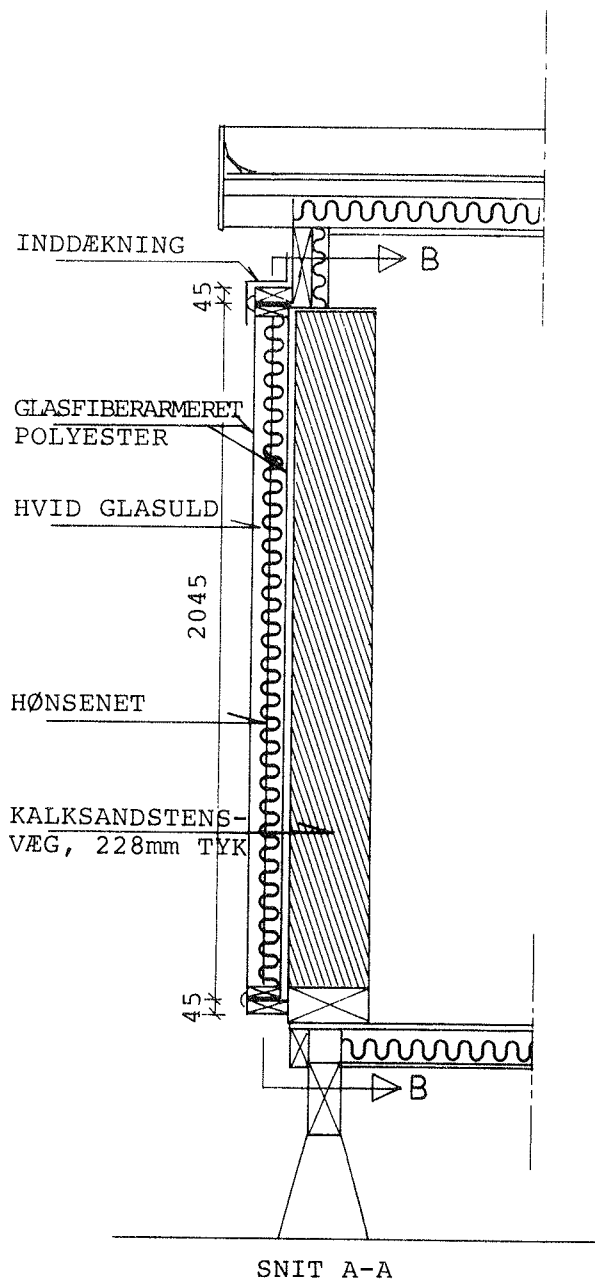


Fig. 3.1.10 Snit og opstalt af solvæg isoleret med hvid glasuld.

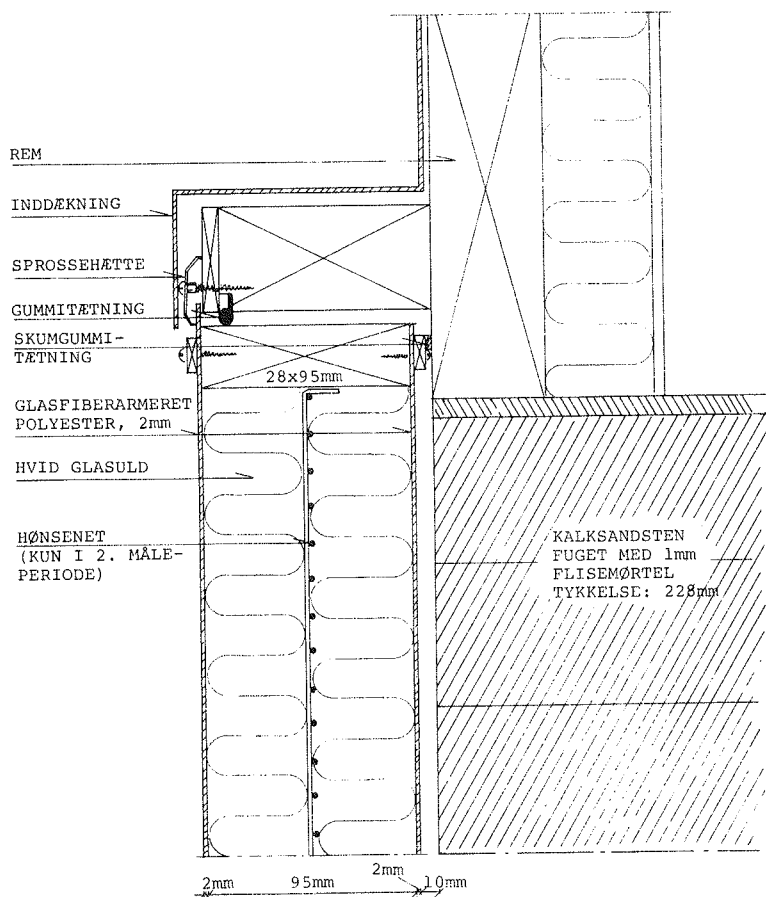


Fig. 3.1.11 Detalje ved top af solvæg med hvid glasuld.

3.1.6 Beskrivelse af glasuld

Den anvendte glasuld er specialfremstillet, således at der ikke er tilsat bindemiddel ved fabrikationen. Glasulden er leveret i lange baner i ca. 5 cm tykkelse, i usammenpresset tilstand.

I den første måleperiode er anvendt 4 og 5 lag af disse baner i hver sin sektion af rammen. I den anden måleperiode er elementet ombygget således, at der overalt i elementet er anvendt to baner. Dette er sket for at mindske massefylden af glasulden uden samtidig at øge varmeisoleringssevnen nævneværdigt. Derved vil den solstråling, der er absorberet i glasulden i middel ske i større afstand fra den udvendige overflade end i første måleperiode. En større del af solvarmen vil dermed blive ledet ind mod lageret i stedet for ud til det fri.

For at hindre glasulden i at skride ned er der i anden måleperiode parallelt med dæklagene midt i hulrummet anbragt et hønsenet. Nettet er sømmet til rammerne og påsmurt kontaktilim inden ilægning af glasuld i elementet. Dette sikrer effektivt mod sammensynkning af glasulden.

For at finde massen af glasulden pr. arealenhed er der udtaget følgende prøver, som er blevet vejjet.

Prøve	Mål m x m	Vægt kg	Vægt/Areal kg/m ²
1	0,12 x 0,22	19,48 x 10 ⁻³	0,738
2	1,92 x 0,38	0,5168	0,708

Da usikkerheden på måling nr. 2 er mindst, vælges denne værdi for vægten pr. arealenhed. Med en afstand på 0,10 m mellem de glasfiberarmerede polyesterplader kan massefylden beregnes.

	Måleperiode	Antal lag	Massefylde
1	78/79	4,5	31,9 kg/m ³
2	79/80	2	14,2 kg/m ³

3.1.7 Reguleringsystemer

Rumlufttemperaturen i målerummene reguleres af termostater med en gennemsnitlig temperatur på 21°C. Rumlufttemperaturen er ikke tilstræbt udpræget konstant, da dens størrelse bliver målt i hvert scan hver halve time. Varmen til rummene bliver leveret af elvarmepaneller med en maksimal effekt på 600 W i østrum og 800 W i vestrummet. Effekten er dog ikke tilstrækkelig til at opvarme rummene i meget kolde perioder, således at temperaturen falder til ca. 16°C.

Den mobile isolering bliver styret af en differenstermostat. Den ene temperatur, termostaten måler, er den udvendige overfladetemperatur af solvæggen. Den anden temperatur bliver målt i en kontrolbox monteret ved siden af solvæggen. (fig. 3.1.12 og 3.1.13). Boxen har samme dæklag som solvæggen. Bag dobbeltpladen afgrænser mineraluld et lufthulrum. På mineralulden er anbragt en tynd aluminiumsplade med påmonterede følere. Aluminiumspladen, følerne og mineralulden udenom er sortmalet. Derved fungerer aluminiumspladen som en "pilot" absorberoverflade, idet den har en lille varmekapacitet og er godt isoleret mod varmetab til bagsiden. Er aluminiumspladen i boxen varmere end absorberoverfladen på solvæggen, vil der være et positivt udbytte ved at fjerne mobilisoleringen. Hvis pilotabsorberens temperatur derimod er lavere end solvæggens absorberoverflade, vil der være et tab, hvis der ikke er mobil isolering i hulrummet.

I starten var der også påmonteret en ventilator i boxen for at hindre for høje temperaturer og sikre en hurtigere regulering. Denne er dog stoppet, da det viser sig, at solvæggen godt kan komme højere end de 60°C , som ventilatortermostaten maksimalt kan indstilles på. Ventilatoren medfører også, at kuglerne ret hurtigt bliver fyldt i igen, når solen går bag en sky. Ved at stoppe ventilatoren bliver dette tidspunkt flyttet, således at for hyppige tømninger og fyldninger kan undgås.

Differenstermostaten er indstillet på en startdifferens på 10 K og en stopdifferens på 3 K.

Opbygningen af styresystemet fremgår af diagram (fig. 3.1.14) og funktionsdiagram (fig. 3.1.15). Den sekundære driftsform, fylde-tømme drift er beregnet til anvendelse, når kuglerne skal påsprøjtes antistatisk væske. Skiftevis kørsel med fyldning og tømning af solvæggen giver bedre fordeling af væsken og en hurtigere tørring af opløsningsmidlet.

Beskrivelse af hvorledes tidspunktet for flytning af mobil isolering er målt og hvorledes starttemperaturdifferensen er kontrolleret er vist i appendix A3.

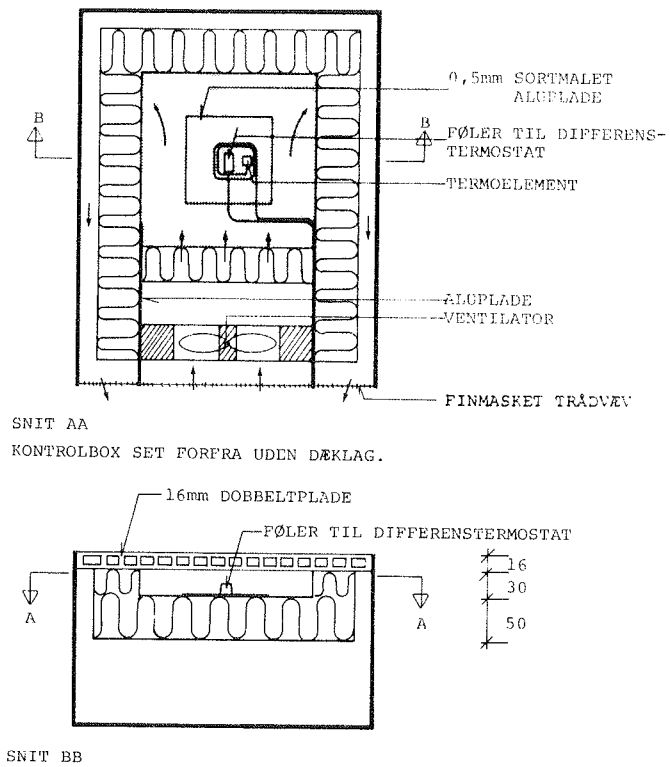


Fig. 3.1.12 Kontrolbox.

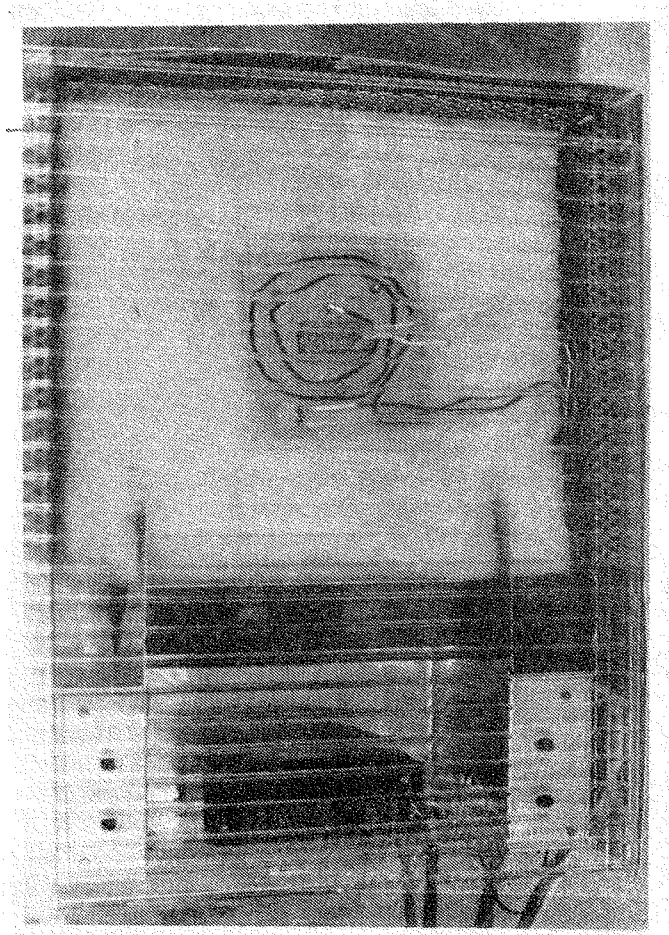


Fig. 3.1.13 Opbygning af kontrolbox (før maling af mineraluld og alu-plade).

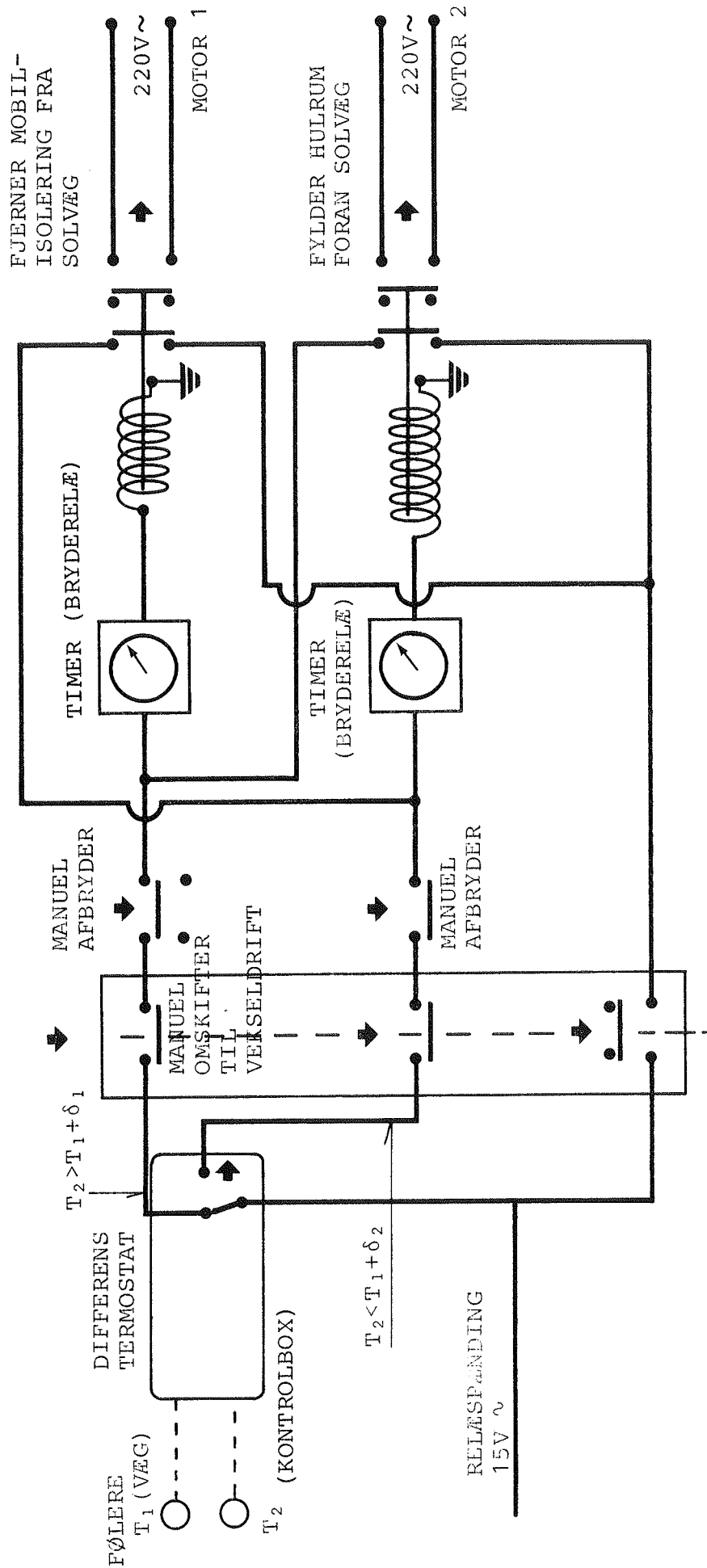


Fig. 3.1.14 Reguleringsystem for solvæg med mobil isolering. Relæpositionen er angivet i hvilestilling.

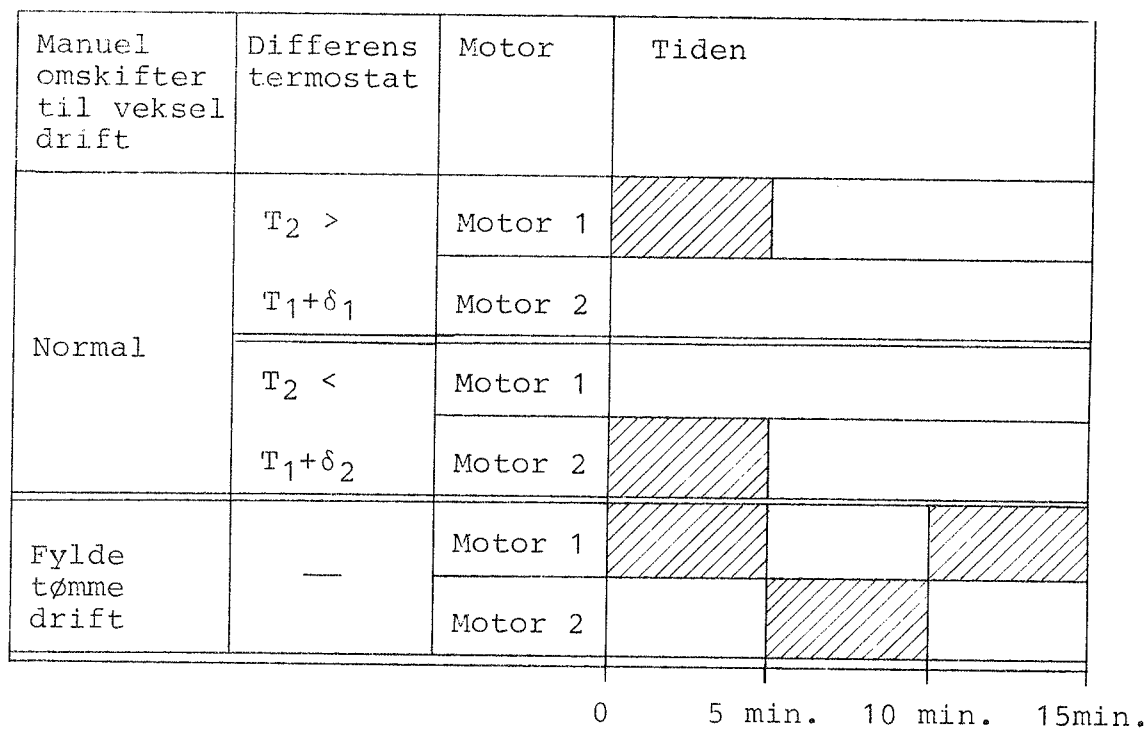


Fig. 3.1.15 Funktionsdiagram for styresystem.

3.1.8 Driftserfaringer med mobil isolering

Det største problem i måleperioderne har været kondens på indersiderne af dæklagene. Hovedårsagen har været overtrykket i forsøgsrummene på grund af ventilatorerne. Det har bevirket, at der er sivet fugtig rumluft ud gennem sprækker i de ellers omhyggeligt fugede samlinger. Efter måleperioden, hvor ventilationshullernes areal blev forøget, forsvandt dette problem fuldstændigt.

Ved den mobilisolerede væg bevirkede kondensen i visse perioder, at kuglerne klæbede til den indvendige side af dobbeltpladen. Dette har medført, at resultaterne fra disse perioder er udeladt. Efter måleperioden har systemet ikke fungeret i en periode på grund af kondens i injektoren. Dette problem er dog løst ved at lave et lille drænhul ca. 1 x 1 mm i injektorens sugesamling.

Opladning af kuglerne med statisk elektricitet kunne konstateres ved, at kuglerne klæbede til dæklagsoverfladen uden at disse var fugtige. Dette gav dog ikke problemer, da kuglerne blev behandlet hvert halve år med antistatisk væske.

Som filtermateriale blev i starten benyttet traditionelle ventilationsfiltermætter. Disse har dog en tendens til at blive stoppet af fint støv fra polystyrenkuglerne. Dette medførte i visse perioder en forøgelse af trykket i hulrummet, der kombineret med varmepåvirkning gav sig udslag i en blivende krumning af plexiglas-dobbeltpladen. Problemet med tilstopning af filtrene blev løst fuldstændigt ved at erstatte filtermåtten med et filter af galvaniseret trådvæv (fluenet), således at det fine polystyrenkuglestøv blev fjernet.

Når rørene var lukket i den ene ende og ventilatoren kørte, opstod store tryk inde i rørene (ca. 4000 Pa (400 mm VS)). Dette stillede store krav til holdbarheden af rørtætningen. I starten blev anvendt tape med fibervæv. Dette gav ikke altid tilstrækkelig tæthed. Udendørs blev tapen nedbrudt af vejret efter ca. et års tid. Problemet blev løst ved at anvende PVC-tape, der var delvis elastisk, således at tapen var presset ind mod røret. Utætheder medfører, at kuglernes transporthastighed formindskes, og ved store utætheder kan der ske tilstopning af rørene.

Bunden af solvæggen gav nogle problemer. Det var hensigten med bunden, at kuglerne skulle kunne trille ved en hældning på 15° . Det viste sig, at ved en afstand på mere end 10 cm fra udsugningsåbningerne var der en begyndende ophobning af kugler. Årsagen er bl.a., at der var ujævnheder mellem bund og sider, som kuglerne kunne hænge fast i. Derfor forsøgte at ændre overfladen fra en lakagtig træoverflade til en mere glat overflade. Der blev gjort forsøg med aluminiumsfolie og teflonfolie. Det viste sig, at aluminiumsfolien var lidt bedre end de andre løsninger. Ved fremtidige konstruktioner kan det anbefales at anvende en vandret flade på 5-10 cm på hver side af udsugningsåbningen, da der her er en vis lufthastighed til

transport af kuglerne. Ved større afstand fra udsugningsåbningen anbefales en større hældning end de anvendte 15° .

Alt i alt kan det siges, at det anvendte transportsystem kan anvendes under danske forhold, men at der kræves regelmæssigt tilsyn og pasning.

3.1.9 Solvægge med selektiv overflade

Solvæggene er opbygget på de samme kalksandstensvægge som beskrevet i afsnit 3.1.2. På den udvendige side af lageret er der på begge solvægge klæbet en metalfolie med en selektiv belægning. For at give tilstrækkelig vedhæftning er væggen først påført en klæbemasse.

Den selektive belægning har ifølge datablade (37) en absorptionskoefficient for solstråling på 0,95-0,99, mens emissionskoefficienten (ved 100°C) for langbølget stråling er angivet til 0,08-0,11.

Som karme er benyttet termolægter med dimensionerne 100x150 mm, der er beklædt med vandfast krydsfiner. Afstanden mellem den selektive folie og glasset er 150 mm. Glasset er 4 mm tykt og fastgjort med glaslister. På indersiden af karmene er anbragt reflekterende folie coatet med krom og beskyttet af et tyndt akryllag.

I den østlige solvæg er der mellem glasset og den selektive absorberoverflade anbragt en honeycomb-struktur. Honeycomb-materialet er opbygget af en V-korrugeret folie af 0,38 mm polykarbonat. Honeycomb'en danner vandrette luftspalter (fig. 3.1.16). Tværnittet i luftspalterne er ligesidede trekanter med en grundlinie på 22 mm og en højde på 150 mm. Fordelen ved den valgte honeycomb-struktur er en reduktion af varmetransmissionskoefficienten, samtidig med at reduktionen af solstråling er beskeden.

De to solvægge er vist på fig. 3.1.17 og 3.1.18. Med disse solvægge er der udført forsøg i en periode i 1983. Forsøgene er detaljeret beskrevet i ref. (20).

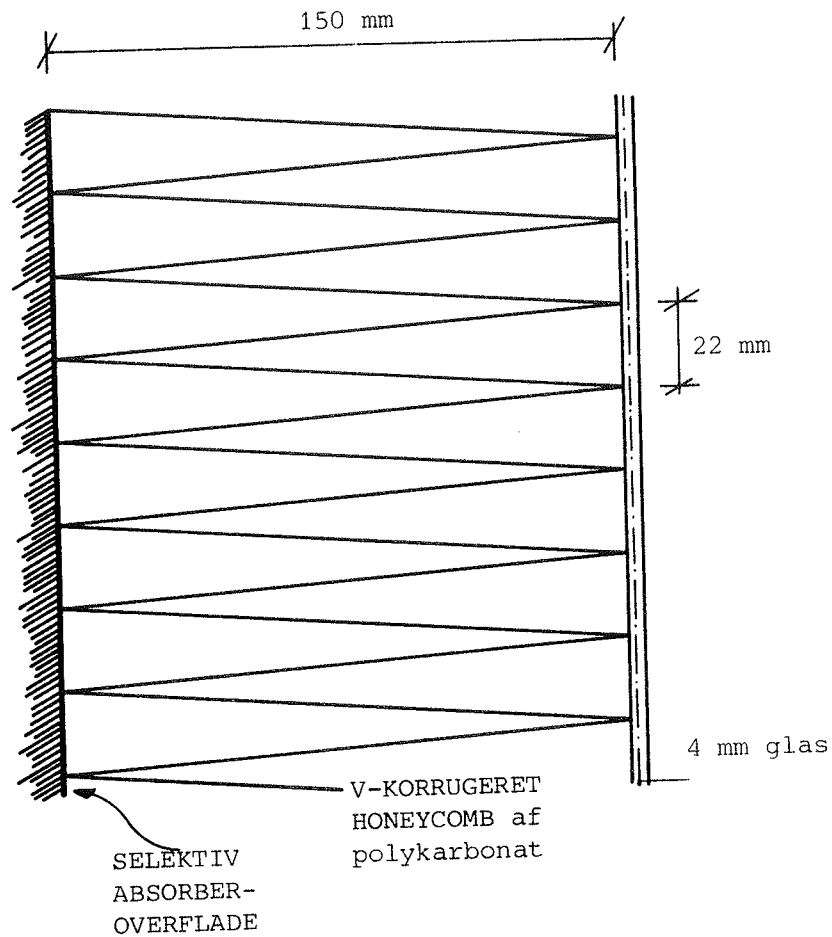


Fig. 3.1.16 Lodret snit visende udformningen af solvæg med selektiv absorberoverflade og V-korrugeret honeycomb.

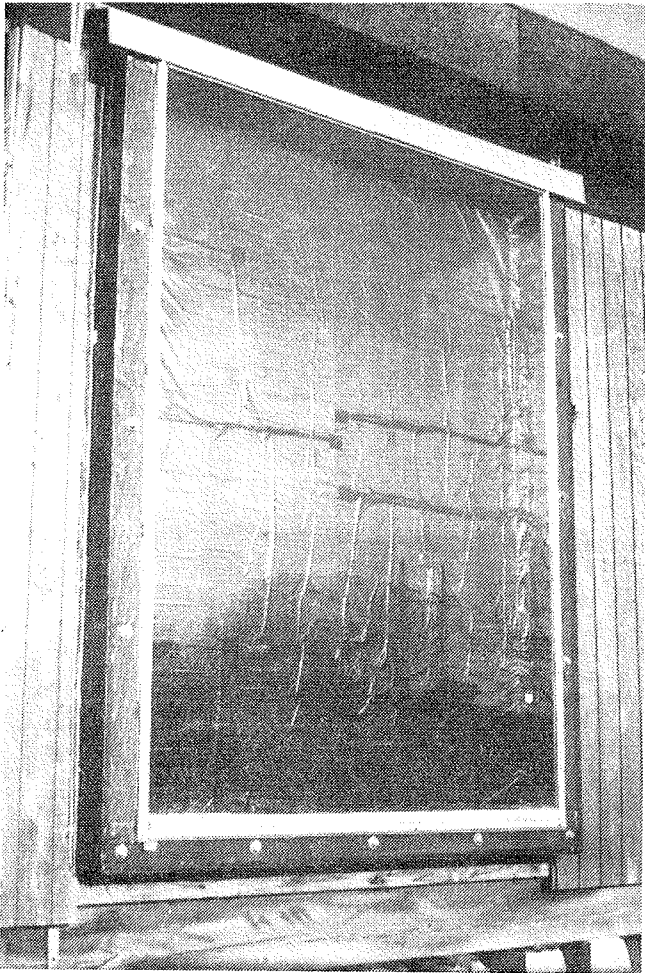


Fig. 3.1.17 Solvæg med selektiv absorberoverflade.

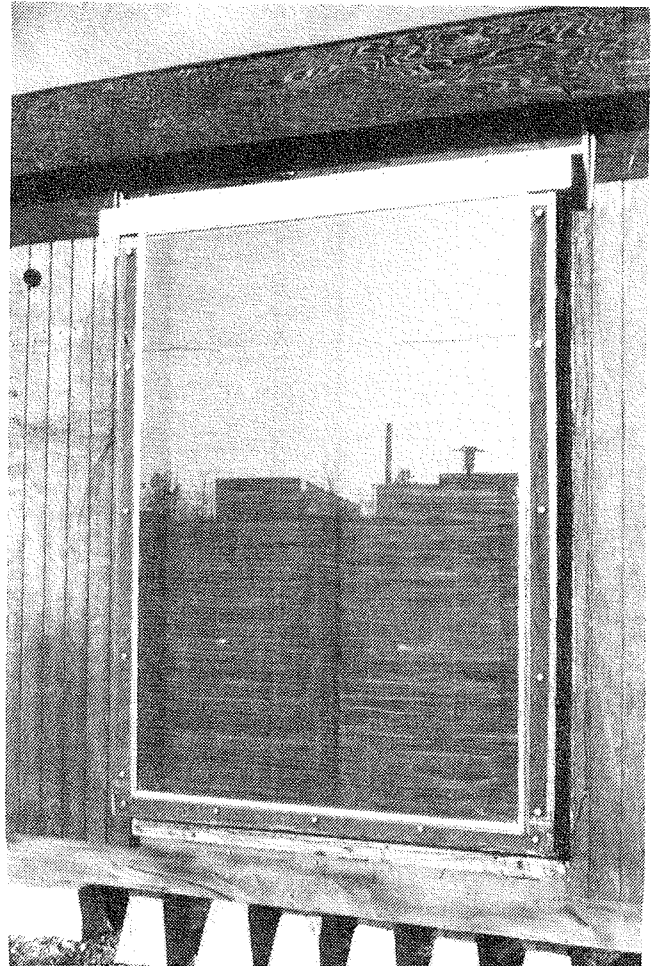


Fig. 3.1.18 Solvæg med selektiv absorberoverflade og V-korrugeret honeycomb.

3.2 INSTRUMENTERING OG MÅLEPUNKTER

3.2.1 Opbygning af målesystem

I det følgende beskrives måleudstyret anvendt i 1. og 2. måleperiode. I den tredje måleperiode er forsøgene beskrevet i ref. (20). Til opsamling af de registrerede målinger blev der anvendt en datalogger af typen Esterline Angus PD2064. Hver halve time blev kanalerne scannet. Dataloggeren kunne i alt måle 48 kanaler, men højst 43 var i brug (se fig. 3.2.1). Dataloggeren var tilsluttet en papertape-perforator, der punchedede de registrerede spændinger. Papertapestrimlerne blev skiftet 3 gange ugentligt. De perforerede strimler blev indlæst på regnecenteret NEUCC, hvor den videre databehandling blev foretaget. Måle- og registreringsudstyret er vist på fig. 3.2.2 og 3.2.3.

FØRSTE MÅLEPERIODE				
Kanal nr.	Måling	Antal målinger	Øst/Vest rum	Placering
0	T-søjle	5	Vest	Indvendig side mur
1	"	5	"	Inderst i mur
2	"	5	"	Midt i mur
3	"	5	"	Yderst i mur
4	"	5	"	Udvendigt på mur
5	"	4	"	Mellem indv. glasfiber-armeret polyester-plade og glasuld
6	T-diff	1	"	76 mm inde i glasuld
7	"	1	"	57 "
8	"	1	"	38 "
9	"	1	"	19 "
10	"	1	"	72 "
11	"	1	"	48 "
12	"	1	"	24 "
13	T-søjle	4	"	Mellem udv. glasfiber-armeret polyester-plade og glasuld
14				Benyttes ikke
15	T-diff	1	"	Rumløfttemperatur
16	T-søjle	4	"	Indvendig overflade-temperatur i rum
17	T-søjle		"	Varmestrømsmåler på indvendig side af solvæg
18	"	5	Øst	Indvendig side mur
19	"	5	"	Inderst i mur
20	"	5	"	Midt i mur
21	"	5	"	Yderst i mur
22	"	5	"	Udvendigt på mur
23	"	5	"	Indvendigt plast
24	"	5	"	Udvendigt plast
25	T-diff	1	"	Indvendigt på alu-skinne
26	"	1	"	Rumløfttemperatur
27	T-søjle	4	"	Indvendig overfladetemp.

fortsættes

Fig. 3.2.1 Oversigt over målepunkter. T-søjle betyder termosøjle, mens T-diff betyder, at der kun måles en enkelt differensmåling. Ved T-søjle er angivet antallet af differensmålinger. Der måles differenspændingen mellem målepunkterne og den sekundære referencebox (se afsnit 3.2.2).

FØRSTE MÅLEPERIODE fortsat				
Kanal nr.	Måling	Antal målinger	Øst/Vest rum	Placering
28	T-diff	2	"	Udelufttemperatur
29	"	1	"	Temperatur i målerum
30	"	1	Øst	Temperatur i sekundær referencebox
31	T-diff	1	Vest	Temperatur i sekundær referencebox
32	"	1	(Øst)	Temperatur i kontrolbox for styring
33	T-søjle	1	Øst	Varmestrømsmåler
34		1		Solarimeter, lodret syd
35		1		Indikator for mobilisolering
36		1	Vest	Digitale
37		1	"	kanaler til
38		1	"	måling af
39		1	"	el-forbrug
40		1	Øst	Digitale
41		1	"	kanaler til
42		1	"	måling af
43		1	"	el-forbrug

ANDEN MÅLEPERIODE				
Samme målepunkter som i første måleperiode bortset fra				
6	T-diff	1	Vest	Indvendig glasfiber- armeret plade
7	"	1	"	Midt i glasset
8	"	1	"	Midt i glasuld
9	"	1	"	Udvendig glasfiber- armeret plade
10	"	1	"	Indvendig i glasuld
11	"	1	"	Midt i glasuld
12	"	1	"	Midt i glasuld

Fig. 3.2.1 fortsat.

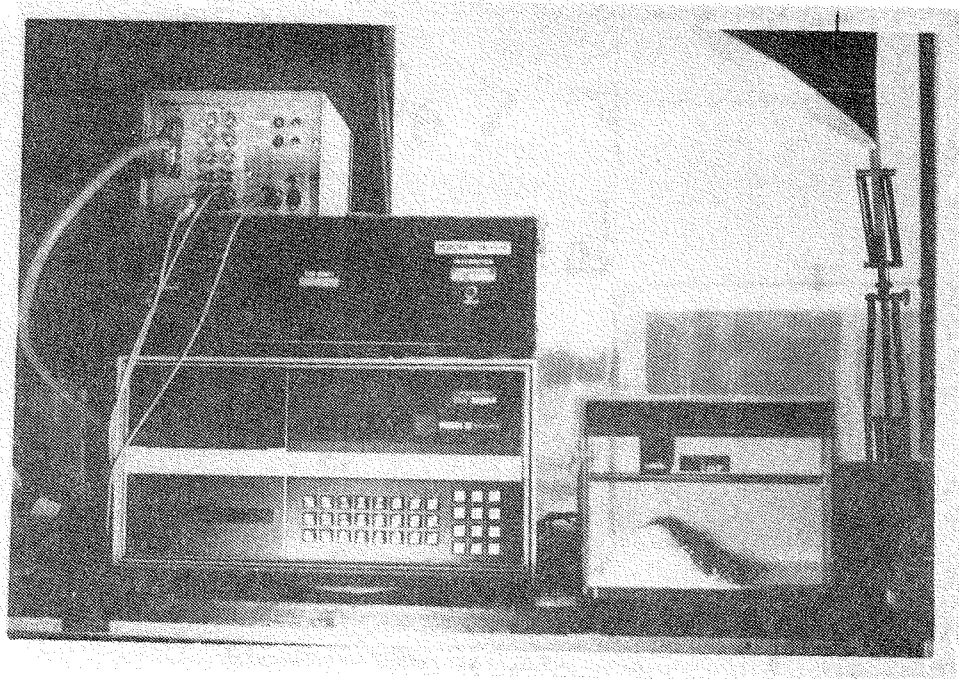


Fig. 3.2.2 Måleudstyr med el-måler, datalogger med integrator og papertape-perforator.

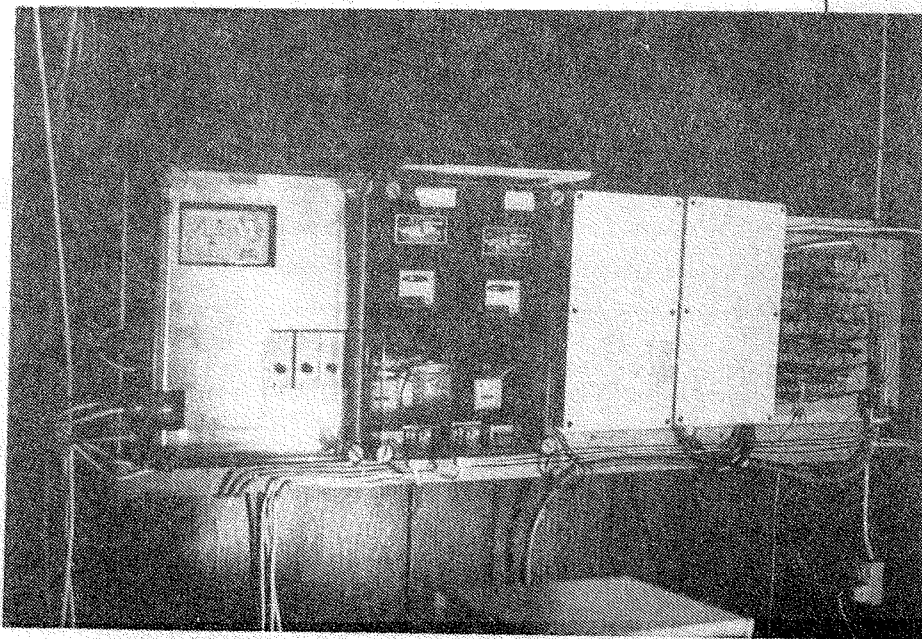


Fig. 3.2.3 Måle- og kontroludstyr. Fra venstre kontrolbox, registrering af injektorventilatorer, primær og sekundær temperaturreference samt fordelerpanel.

3.2.2 Temperaturmålinger

Til måling af temperaturen er anvendt kobber-konstantan termoelementer af typen TT.

Opbygningen af målesystemet er vist på fig. 3.2.4. Som temperaturreference blev benyttet en reference bygget på Laboratoriet for Varmeisolering. Den er på figuren betegnet som primær reference. Loddestedet holdes på en konstant temperatur ved hjælp af en termostat, der er indbygget i en aluminiumscylinder og omgivet af isolering. Temperaturen er målt med jævne mellemrum. Middeltemperaturen er fundet til $51,0^{\circ}\text{C}$, med en maksimal afvigelse på $\pm 0,3\text{ K}$.

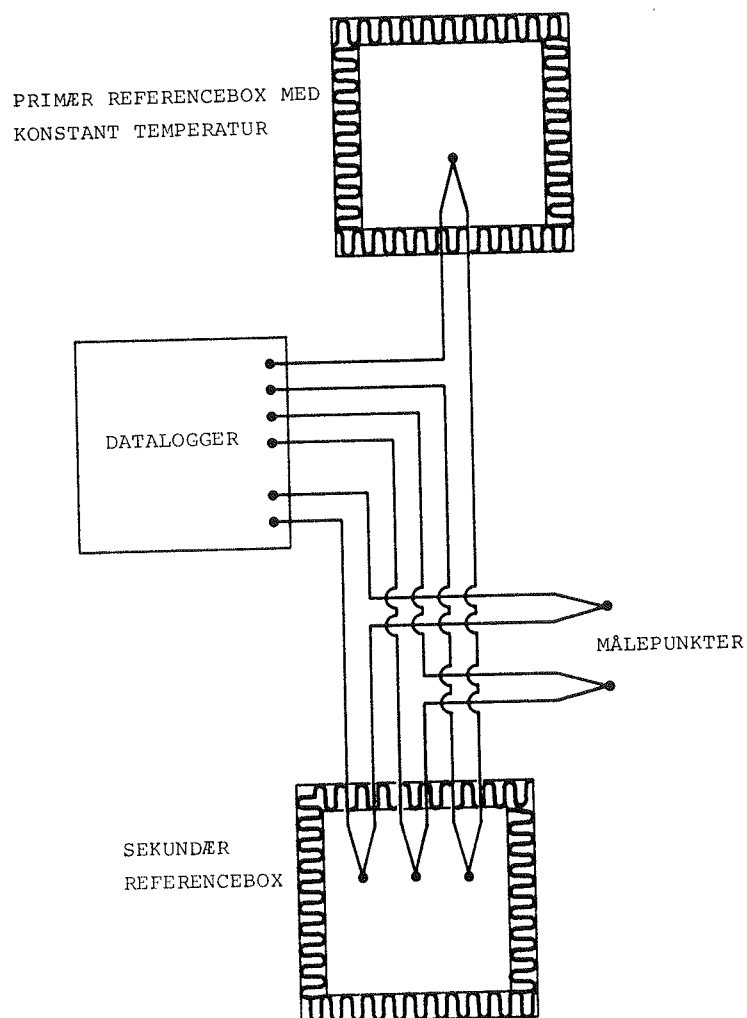


Fig. 3.2.4 Principdiagram for opbygning af temperaturmålesystem.

For ikke at få for store længder af termoelementtråd blev der anvendt to sekundære temperaturreferencer anbragt i hvert sit forsøgsrum og indbygget i apparatkasser (se fig. 3.2.5).

Loddestederne er isoleret og anbragt inde mellem 5 stk. 1 mm aluminiumsplader, der er omgivet af minimum 50 mm mineraluld. Dette sikrer en god temperaturfordeling i hulrummet og mere afdæmpede temperatursvingninger end af rumluften.

Da temperaturen af alle loddestederne kan anses for at være ens i referenceboxen, er det kun nødvendigt at måle temperaturen i boxen i et loddested. Resten af målepunkterne i forsøget kan således måles som en temperaturforskel mellem den sekundære referencebox og målepunktet. Temperaturen er målt med et digitaltermometer efter at dette er kalibreret med et præcisions-termometer.

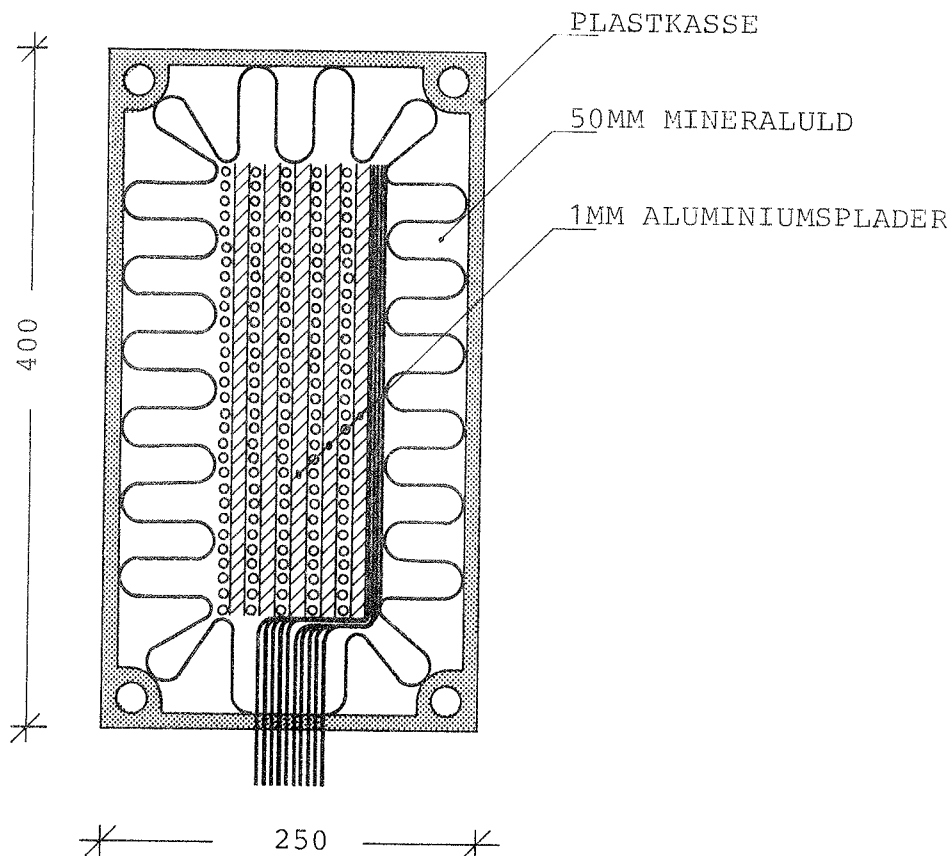


Fig. 3.2.5 Snit i sekundær temperaturreference for 50 termoelementer. Mål i mm.

3.2.3 Målepunkter i solvægge

Termoelementerne var ved måling af overfladetemperaturer sammenloddet med en kobberplade af størrelsen 10 x 10 mm. Disse plader og mindst 500 mm ledning blev limet til overfladen for at undgå varmeudveksling gennem tilledningen.

Termoelementerne i muren blev udført ved at der i kalksandstenene blev savet riller langs hele omkredsen i forskellige dybder af de sten, der skulle anvendes ved temperaturmålingerne. Loddestederne på termoelementtrådene blev elektrisk isoleret med pålimning af tynd plastfolie og anbragt i borede huller (se fig. 3.2.6).

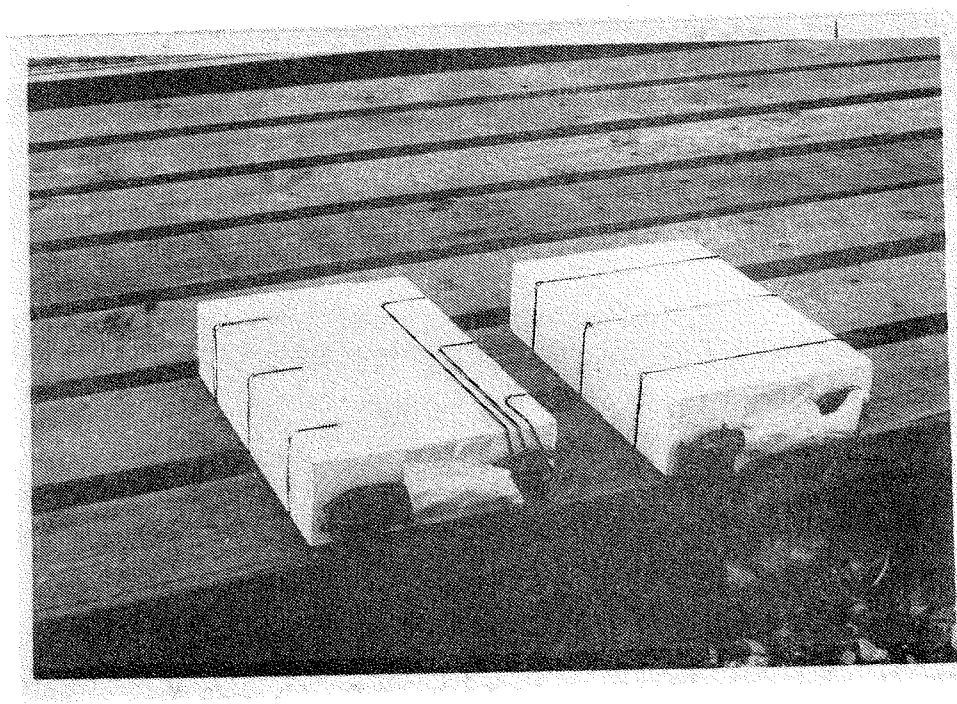


Fig. 3.2.6 Kalksandsten monteret med termoelementtråde.

Termoelementtråden blev viklet næsten 1 gang rundt om stenen inden den blev ført ud til overfladen. Den samlede længde termoelementtråde i loddestedets dybde var 300 mm. Termoelementerne blev anbragt i væggen i sjattedelspunkterne nærmest overfladerne samt i midten (se fig. 3.2.7).

I lodret plan blev termoelementerne anbragt svarende til at væggen opdelt i fire lige store rektangler. I midten af hvert af disse, samt i midten af hele væggen, blev der anbragt målepunkter (se fig. 3.2.8).

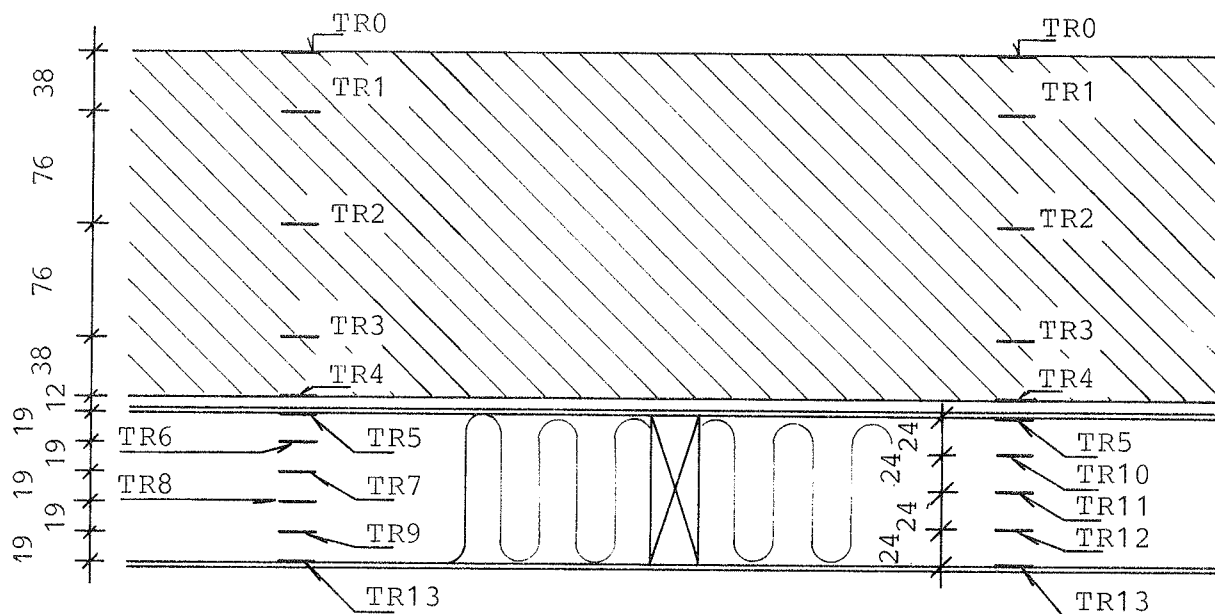


Fig. 3.2.7 Placering af målepunkter i solvæg med hvid glasuld. (vandret snit). Første måleperiode. Mål i mm.

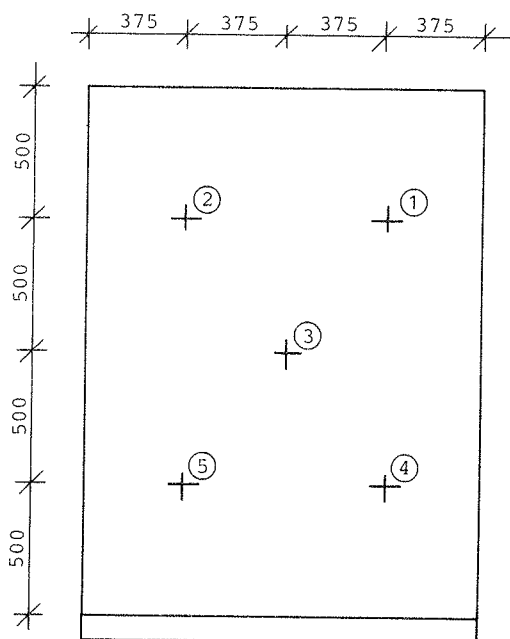


Fig. 3.2.8 Opstalt af solvæg set fra rum. Anbringelse af målepunkter på solvæg. Mål i mm.

Temperaturen i glasulden blev målt i forskellige dybder. I første måleperiode blev der anbragt termoelementer mellem de enkelte lag af hvid glasuld (fig. 3.2.7). I anden måleperiode blev der kun målt temperaturer på ydersiden og i midten mellem de to lag glasuld (se fig. 3.2.9). Ved solvæggen med mobil isolering blev temperaturen målt på begge sider af dobbeltpladen.

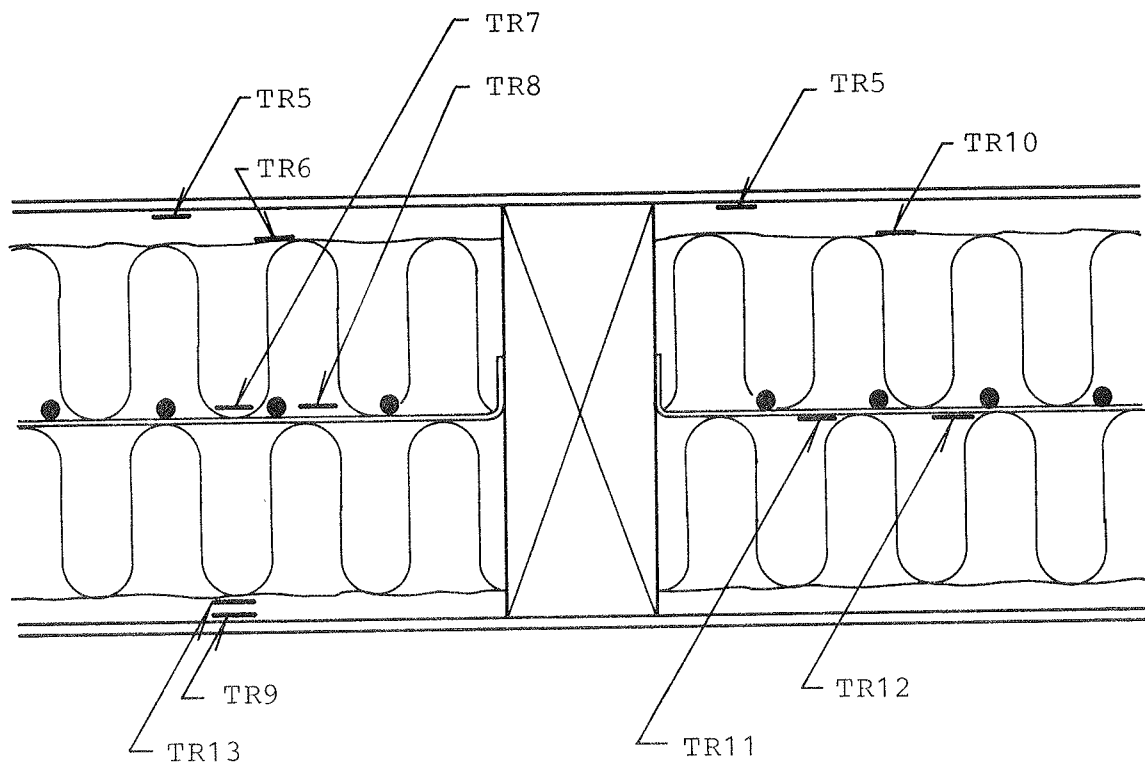


Fig. 3.2.9 Placering af målepunkter i hvid glasuld. Anden måleperiode.

3.2.4 Varmestrømsmålere

Varmestrømmen mellem væg og rummet blev målt ved hjælp af varmemestrømsmålere (fig. 3.2.10). Disse består af en 4 mm tyk plexiglasplade, hvori der er fræset spor til to modsat snoede spiraler af henholdsvis kobber- og konstantantråd. Efter påspolingen af de to tråde er alle skæringspunkter loddet og rillerne fyldt med Araldit. Endelig er der på hver side af måleren fræset en rille for at dele de sammenloddede krydsningspunkter i to loddesteder.

Varmestrømsmålerne er fastgjort til væggen med to beslag, der kun punktvis berører varmestrømsmåleren. Målerne er opsat med et tyndt lag varmeledende kit på bagsiden for at sikre god termisk kontakt mellem vægge og målere.

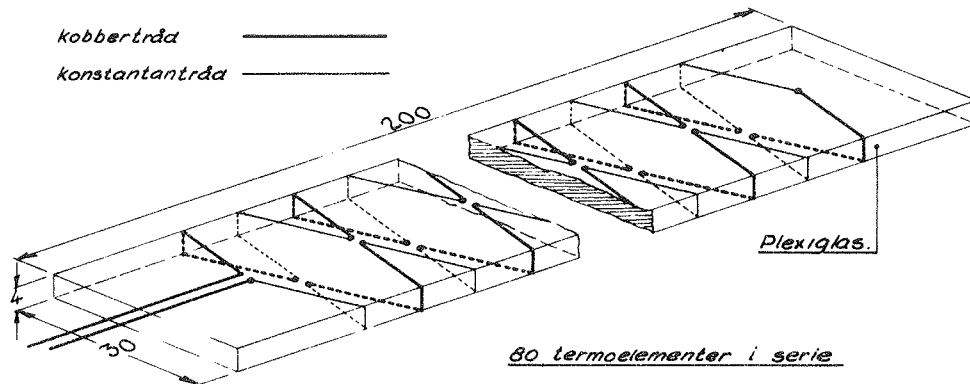


Fig. 3.2.10 Principskitse af varmestrømsmåler (38).

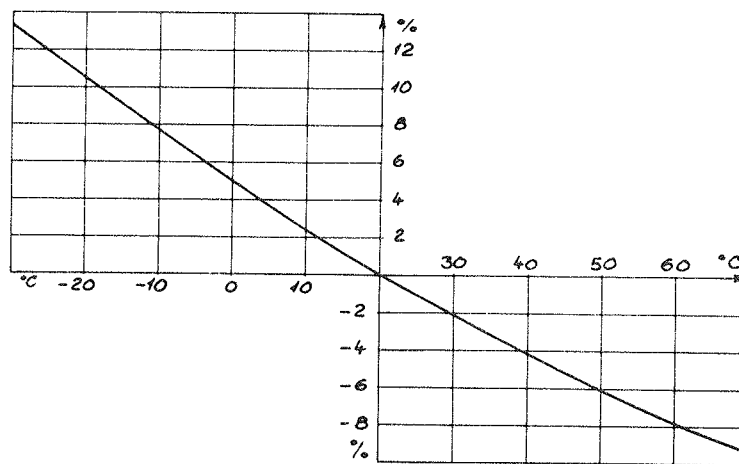


Fig. 3.2.11 Kalibreringskoefficientens temperaturafhængighed (38).

Varmestruømsmålerne er kalibreret i et λ -apparat med beskyttelsesring. Følgende kalibreringskonstanter er fundet:

$$\text{Vestrum: } q_v = 15,3 \times P_v \times (1 - (t_v - 20) \times 0,0022) \quad (3.2.1)$$

$$\phi\text{strum : } q_\phi = 15,2 \times P_\phi \times (1 - (t_\phi - 20) \times 0,0022) \quad (3.2.2)$$

hvor q er varmemstrømstæthed (W/m^2)
 P spænding (mV)
 t varmemstrømsmålerens temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
 V, ϕ vestrum, ϕ strum

Temperaturafhængigheden er vist på fig. 3.2.11.

Ifølge (38) kan den relative usikkerhed på målingen af varmemstrømmen sættes til 6%.

3.2.5 Måling af solindfald

Til måling af solindfaldet blev anvendt et solarimeter af fabrikatet Kipp & Zonen CM5. Solarimetret er opsat lodret og sydvendt, således at måleplanet er parallelt med solvæggens overflader. Måleusikkerheden er opgivet til $\pm 5\%$, dog minimum $\pm 10 \text{ W/m}^2$. Fejlen ved lodret placering kan være op til 3% (39).

Målingen blev integreret kontinuert i en integrator tilknyttet dataloggeren.

Solarimetrets udgangssignal er ifølge kalibreringsattesten:

$$P = 0,0129 I_{\text{tot}} \quad (\text{mV}) \quad (3.2.3)$$

I_{tot} er bestrålingsstyrken i W/m^2 på solarimeteroverfladen.

For at kunne måle hvor meget af solindfaldet, der har kunnet udnyttes, er der installeret en indikator til visning af kuglernes placering. Dataloggeren har scannet et udtag fra det

relæ, som hører til den ventilator der tømmer hulrummet foran solvæggen. Når der er kugler i hulrummet, er den målte spænding ca. 4 Volt, ellers er den omkring 0 Volt.

4. MÅLINGER

4.1 MÅLERESULTATER

4.1.1 Måleperioder

Det tidsmæssige forløb var at forsøgsopstillingen blev opbygget efteråret 1978. I december 1978 blev der foretaget spredte målinger. I 1979 blev der i første måleperiode målt indtil april. I enkelte uger var der funktionsfejl ved dataopsamlingen og mobilisoleringen. Anden måleperiode, hvor solvæggene var blevet modificeret, startede oktober 1979 og sluttede december 1979. I dette tidsrum var der kun kortvarige afbrydelser af målingerne. Til grundlag for databehandlingen blev et antal måneder med lille fejlhyppighed udvalgt. Det er månederne februar, marts, september og oktober. Den tredje måleperiode var i første halvdel af 1983. I denne periode var solvæggene ombygget, således at absorberoverfladen var selektiv.

4.1.2 Måleresultater for solvæg med mobil isolering

Temperaturforløbet i solvæggen igennem et døgn er optegnet på fig. 4.1.1. Om natten er der mobil isolering i hulrummet foran solvæggen. Figuren viser om morgenen kl. 9.00 en ensartet temperatur i varmelageret og et temperaturfald gennem mobilisoleringen. Solen begynder at skinne ca. kl. 9.30, og samtidig fjernes mobilisoleringen fra hulrummet. Ved middagstid er temperaturen på ydersiden af væggen steget til $42,5^{\circ}\text{C}$. Der er en stor temperaturgradient fra overfladen og ind i varmelageret. Kl. 15.00 er temperaturen på ydersiden af kalksandstensvæggen øget til 52°C og temperaturen på indersiden af solvæggen er øget med 5 K. Mobilisoleringen fyldes i hulrummet ca. kl. 16.00, og kl. 18.00 er temperaturen på ydersiden af solvæggen faldet, og der er ret små temperaturgradienter gennem solvæggen. Ved midnatstid er temperaturforskellene i varmelageret næsten udjævnet, idet der mellem inder- og ydersiden af solvæggen er en temperaturforskel på 3 K. Middelttemperaturstigningen fra kl. 9 om morgenen til midnat er ca. 12 K.

Ovenstående er en beskrivelse af et typisk temperaturforløb på en dag med godt solskin. På fig. 4.1.2 er temperaturforløbet af varmelagerets overflader og kontrolboxen vist for den samme dag. Det ses, at i tidsrummet 9-9.30 stiger kontrolboxens temperatur brat, og at absorberoverfladens temperatur begynder at stige, idet mobilisoleringen er blevet fjernet fra hulrummet. Mellem kl. 16.00 og 16.30 falder kontrolboxens temperatur brat ned under absorberoverfladens temperatur. Mobilisoleringen transporteres i dette tidsrum på plads foran absorberoverfladen. Figuren viser, at på den pågældende dag er temperaturstigningen på ydersiden og indersiden af varmelageret henholdsvis 34 K og 10 K.

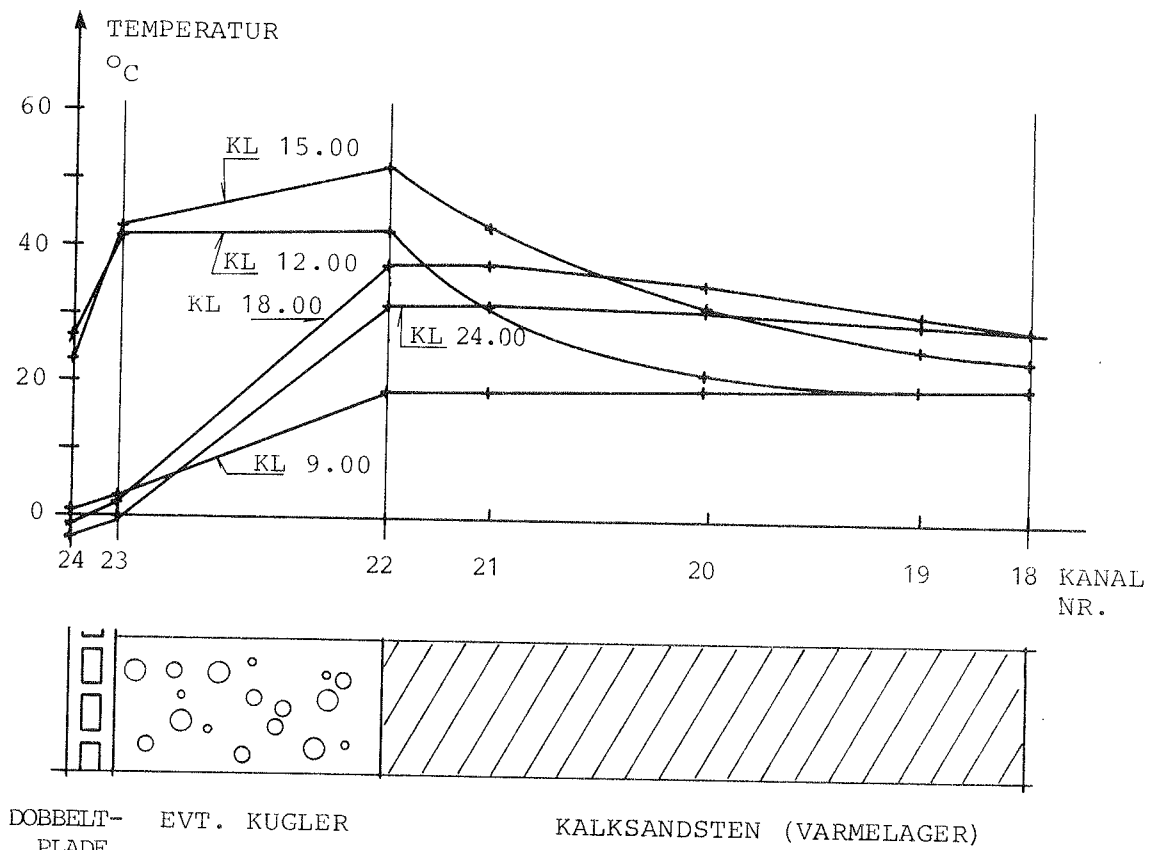


Fig. 4.1.1 Temperaturforløb gennem solvæg med mobil isolering, 24/2 1979.

Temperaturerne i måleperioderne er gengivet i fig. 4.1.3 ved hjælp af middel-, maksimums- og minimumsværdier. Det ses, at

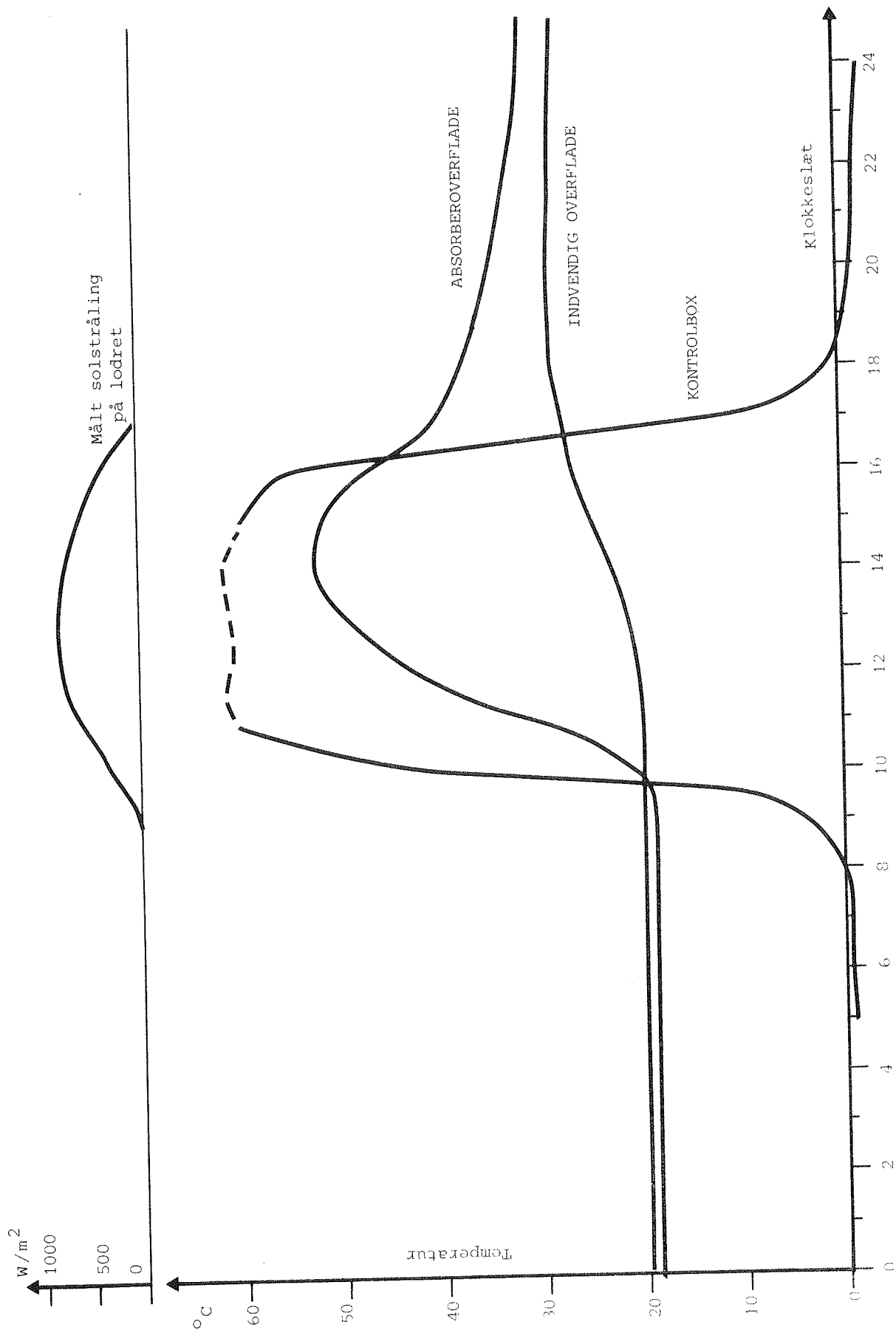


Fig. 4.1.2 Målt absorberoverflade- og indvendig lageroverfladetemperatur, temperatur i kontrolbox og solindstråling for solvæg med mobil isolering. (24/12-79).

den maksimale temperatur på ydersiden af solvæggen er målt til 71,6°C. På indersiden er den maksimale temperatur målt til 36,4°C.

Måleperiode		Udelufttemperatur			Udvendig side af varmelager			Indvendig side af varmelager			Rumluft-temp.
		Middel	Max.	Min.	Middel	Max.	Min.	Middel	Max.	Min.	Middel
1	Feb. 79	-1,2	2,9	-11,4	25,5	59,1	14,7	22,7	30,8	15,0*	22,0
	Mar. 79	2,6	11,5	-8,1	25,6	55,7	14,7	23,7	29,8	18,3	23,1
2	Sep. 79	13,3	25,0	1,8	30,5	71,6	20,6	25,5	34,5	21,8	21,1
	Okt. 79	8,7	17,1	-0,5	32,9	61,1	20,8	26,2	36,4	21,3	22,7

*) Denne temperatur skyldes lav rumlufttemperatur i en kold periode.

Fig. 4.1.3 Målte middel-, maksimum og minimumstemperaturer ved solvæg med mobil isolering (°C).

For februar 1979 er endvidere optegnet (fig. 4.1.4) den kumulerede temperaturfordeling. Kurverne viser, at for de nedre fraktiler er der en begrænset forskel mellem rumlufttemperaturen og den indvendige overfladetemperatur. Over ca. 40% af tiden er den indvendige overfladetemperatur højere end rumlufttemperaturen.

Temperaturerne i varmelageret og dermed også varmeindholdet i starten af måleperioderne er ikke de samme som i slutningen af måleperioden. Disse forskelle kan ækvivaleres med en middelvarmestrøm mellem lager og omgivelser fordelt over hele måleperioden. Disse varmestrømme giver anledning til en korrektion af de med varmestrømsmålerne målte middelvarmestrømme. Korrektionen er reduceret under hensyntagen til den varmeudveksling, der sker på de to sider af varmelageret.

Korrektionen for de enkelte måleperioder er angivet på fig. 4.1.5.

Varmestrømmene mellem solvæggene og det bagved liggende rum er målt. I fig. 4.1.6 ses middelvarmestrømmene mellem solvæggen med mobil isolering og rummet angivet i 4 måneder, hvor der blev målt. For at give et indtryk af solvæggens isoleringsevne er varmetransmissionskoefficienten ved hjælp af varmetabsreglerne (30) beregnet til $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ med mobil isolering og til henholdsvis $1,5$ og $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ uden mobilisolering i første og anden måleperiode. Til sammenligning er anført varmetabet gennem en normal ydervæg med en k -værdi på $0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ og uden solindfald. Det forudsættes, at temperaturforskellen over væggen er den samme som målt mellem temperaturer i forsøgshus og udelufttemperaturen. I tabellen er også angivet varmetabet gennem den samme væg, hvis den er sydvendt og udsat for solindfald. Dette ville svare til, at solvæggen blev erstattet af en væg med mørk overflade med en k -værdi på $0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$. Størrelsen af det solindfald, der er transmitteret gennem denne referencevæg er beregnet ud fra det aktuelle solindfald på væggen. Det forudsættes, at referencevæggens overflade har en absorptionskoefficient på $\alpha = 0,85$. Varmebalancen for referencevæggen beregnes med samme varmeovergangstal som for solvæggene (se appendix A1).

Sammenlignes middelvarmestrømmen gennem referencevæggen med den aktuelt målte middelvarmestrøm, kan udbyttet bestemmes ved, at de to størrelser subtraheres fra hinanden. I fig. 4.1.6 er udbyttet sammenlignet med det målte solindfald. Ved division af udbyttet med solindfaldet fremkommer en effektivitet på 21-23% i 1. måleperiode, mens den i 2. måleperiode er henholdsvis 28 og 33% i månederne september og oktober. Forskellen i effektivitet skyldes bl.a. lidt bedre driftsforhold i anden måleperiode, idet der var problemer med kondens på indersiden af dobbeltpladen i 1. måleperiode. Dette medførte, at kuglerne klæbede til kondensvandet, således at de skyggede for solindfaldet. I anden måleperiode var der ikke disse problemer i nævneværdig grad.

Det skal bemærkes, at det i dette afsnit målte udbytte ikke kan nyttiggøres fuldstændigt til nedsættelse af opvarmningsbehovet.

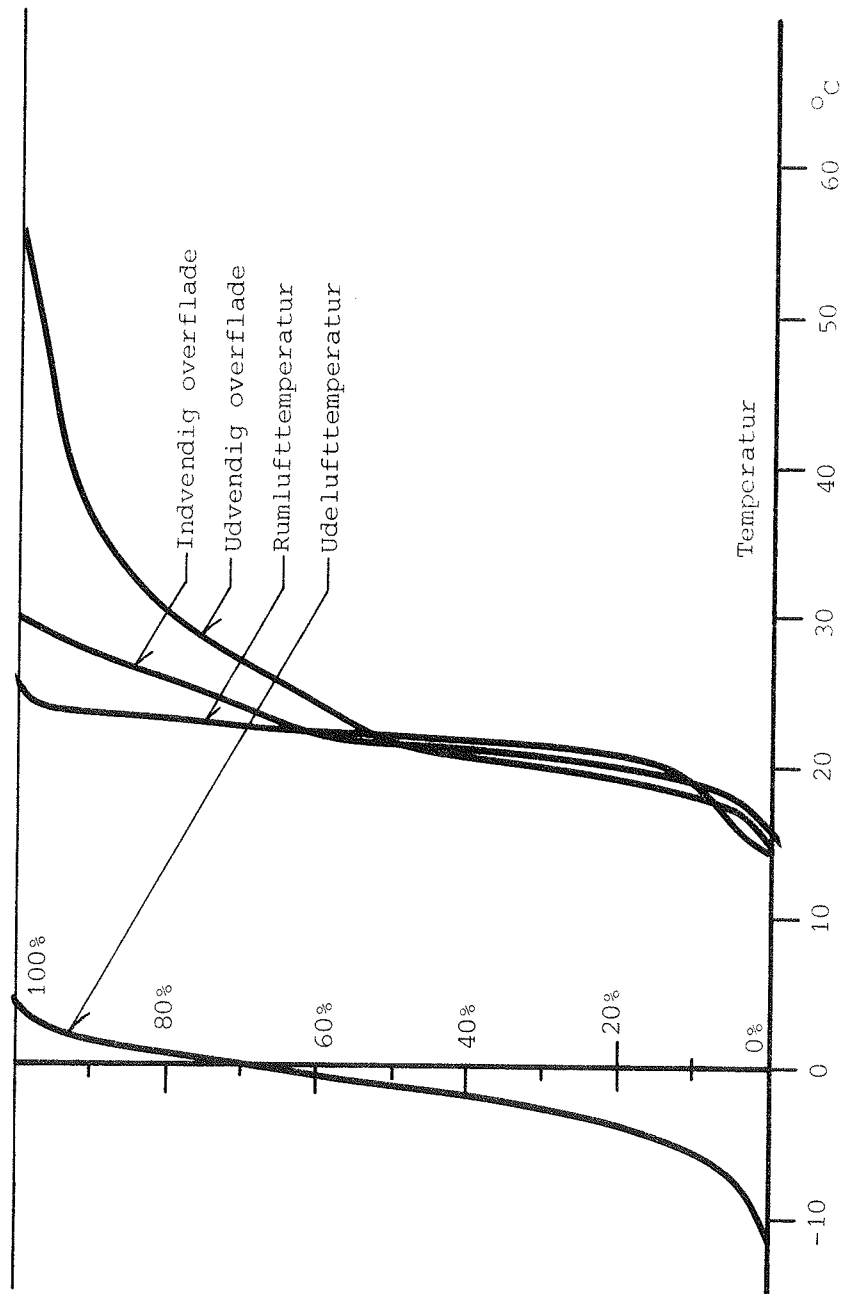


Fig. 4.1.4 Kumuleret fordeling af rumluft- og udelufttemperatur samt udvendig og indvendig overfladetemperatur af varmelager for solvæg med mobil isolering (februar 1979).

		Temperatur, start °C	Temperatur, slut °C	Temperatur- forskell K	Gennem- snitlig forskell K	Antal dage	Korrektion W/m ²
Februar	B	18,5	28,8	-10,2	-11,8	28	-1,4
	C	18,2	30,4	-12,2			
	D	17,8	30,9	-13,1			
Marts	B	28,8	21,8	7,0	8,5	31	0,9
	C	30,2	21,4	8,8			
	D	30,8	21,1	9,7			
September	B	31,8	22,3	9,5	11,7	30	1,3
	C	34,0	22,3	11,7			
	D	35,0	21,2	13,8			
Oktober	B	22,3	21,4	0,9	1,1	31	0,1
	C	22,3	21,2	1,1			
	D	22,1	20,9	1,2			

Fig. 4.1.5 Korrektion af middelvarmestrøm ved den indvendige side af lager for solvæg med mobil isolering. B og D angiver temperaturer i sjattedelsspunkterne, mens C angiver temperatur midt i varmelager.

		Varmestrømstæthed W/m ²						%
Måleperiode	Måned i 1979	Beregnet varmetab gennem almindelig nordvæg	Beregnet varmetab gennem sortmalet sydvæg	Målt varme- strøm fra solvæg til rum	Korrektion	Udbytte	Sol- indfald	Effek- tivitet
1	FEB	-6,8	-5,8	12,4	-1,4	16,8	80,1	21
	MAR	-6,0	-5,2	10,2	0,9	16,3	70,1	23
2	SEP	-2,7	-1,6	23,1	1,3	26,0	92,4	28
	OKT	-4,1	-2,9	29,2	0,1	32,2	98,5	33

Fig. 4.1.6 Målt middelvarmestrømstæthed fra solvæg med mobil isolering til rum sammenlignet med en normal ydervæg med k-værdi på 0,30 W/m²K.

I kapitel 2.2 er detaljeret redegjort for udbyttet på årsbasis ved forskellige udformninger af solvægge.

4.1.3 Solvæg isoleret med hvid glasuld

Temperaturen gennem solvæggen på en dag med godt solskin er vist på fig. 4.1.7. Solindfaldet medfører en relativt stor temperaturstigning i glasulden. Den maksimale temperatur på den viste dag er 72°C . Temperaturstigningen i varmelageret er beskeden; 2 K på ydersiden.

En oversigt over målte temperaturer er vist på fig. 4.1.8. De maksimale temperaturer i glasulden er 89°C . De relativt lave temperaturer på indersiden af varmelageret er udtryk for de begrænsede varmestrømme gennem solvæggen.

En kumuleret fordelingskurve af temperaturerne er vist på fig. 4.1.9. Kurverne viser, at den udvendige overfladetemperatur af lageret aldrig bliver større end rumlufttemperaturen. Af kurverne kan ikke ses nogen markant indflydelse af solindfaldet på den indvendige overfladetemperatur. Temperaturen på den udvendige side af glasulden følger udelufttemperaturen inden for en temperaturforskel på 1,5 K op til et fraktilniveau på ca. 80%. For højere fraktilværdier er temperaturen udvendigt på glasulden markant højere end udelufttemperaturen. Temperaturen 19 mm inde i glasulden er højere end rumlufttemperaturen i 12% af måleperioden og i dette tidsrum vil solvæggen give et nettovarmetilskud til rummet.

Ved en beregning efter varmetabsreglerne kan varmetransmissionskoefficienten af solvæggen med hvid glasuld bestemmes til henholdsvis 0,31 og $0,36 \text{ W/m}^2\text{K}$ i første og anden måleperiode. Fig. 4.1.10 viser en sammenligning mellem de målte varmestrømme og en normalt isoleret væg med en k -værdi på $0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$. Varmestrømmene er korrigeret for forskelle i solvæggens lagertemperatur ved starten og slutningen af måleperioderne. Resultaterne viser, at solvæggen har et positivt udbytte i forhold til referencevæggen med undtagelse af november måned. I denne måned kan det negative udbytte forklares med det begrænsede solindfald og med at referencevæggen har en mindre varmetabskoefficient end solvæggen.

Udbyttet er meget beskedent i forhold til solindfaldet. Det ser dog ud som om udbyttet er større i anden end i første måleperiode (månederne september og oktober), til trods for at solvæggens varmetransmissionskoefficient er større i anden end i første måleperiode.

Dette kan forklares med den mindre massefylde af glasulden i 2. måleperiode og dermed, at solstrålingen i gennemsnit bliver absorberet dybere inde i glasulden i 2. måleperiode end i 1. måleperiode. Resultaterne viser, at der opnås et i begrænset omfang mindre varmetab ved solvæggen med hvid glasuld i forhold til en sort ydervæg med samme isoleringsevne.

Da fig. 4.1.10 kun omfatter visse af årets måneder, er udbyttet på årsbasis søgt bestemt i afsnit 2.2.4.

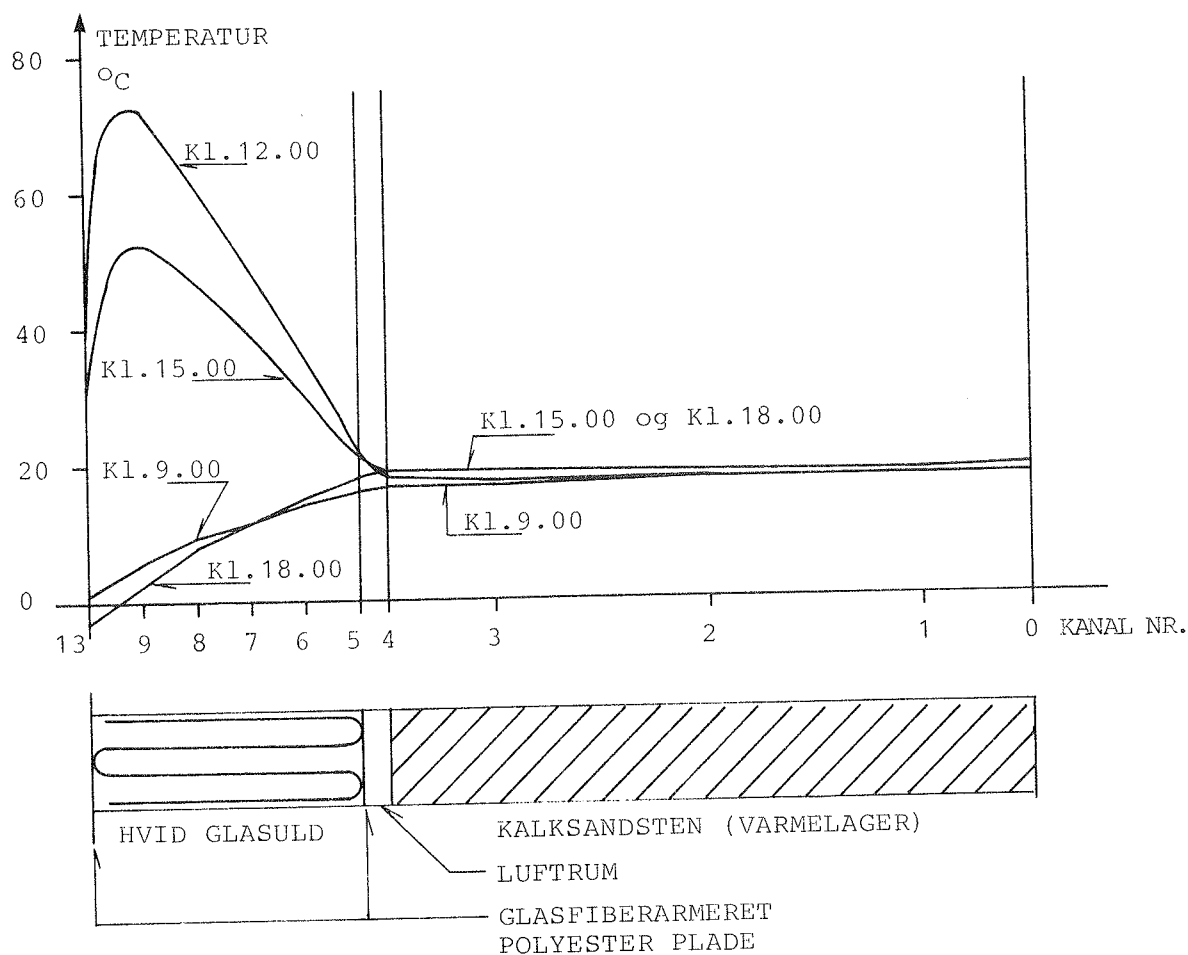


Fig. 4.1.7 Temperaturforløb gennem solvæg isoleret med hvid glasuld. 24. februar 1979.

Måleperiode	Måned i 1979	Yderside af glasuld			I glasuld 19 mm fra yderside			Midt i glasuld			Udvendig side af varmelager			Indvendig side af varmelager		
		mid.	max	min	mid.	max	min	mid.	max	min	mid.	max	min	mid.	max	min
1	FEB	1,2	43,8	-11,3	9,3	88,8	-4,8	12,3	63,6	2,2	16,9	21,5	11,9	17,8	21,4	12,7
	MAR	4,8	42,5	-12,3	12,1	80,0	-5,6	15,4	58,7	2,8	20,3	23,4	16,0	21,3	23,6	16,2
2	SEP	16,0	48,5	-0,5	-	-	-	23,2	67,7	11,4	23,3	25,6	21,8	23,2	25,6	21,8
	OKT	11,5	46,8	-2,6	-	-	-	21,6	69,2	10,2	22,7	28,8	19,9	22,9	24,7	21,4
	NOV	6,2	33,3	0,0	-	-	-	14,3	61,9	4,9	20,3	25,7	18,9	21,6	23,2	20,2

Fig. 4.1.8 Målte temperaturer (°C) i solvæg med hvid glasuld.

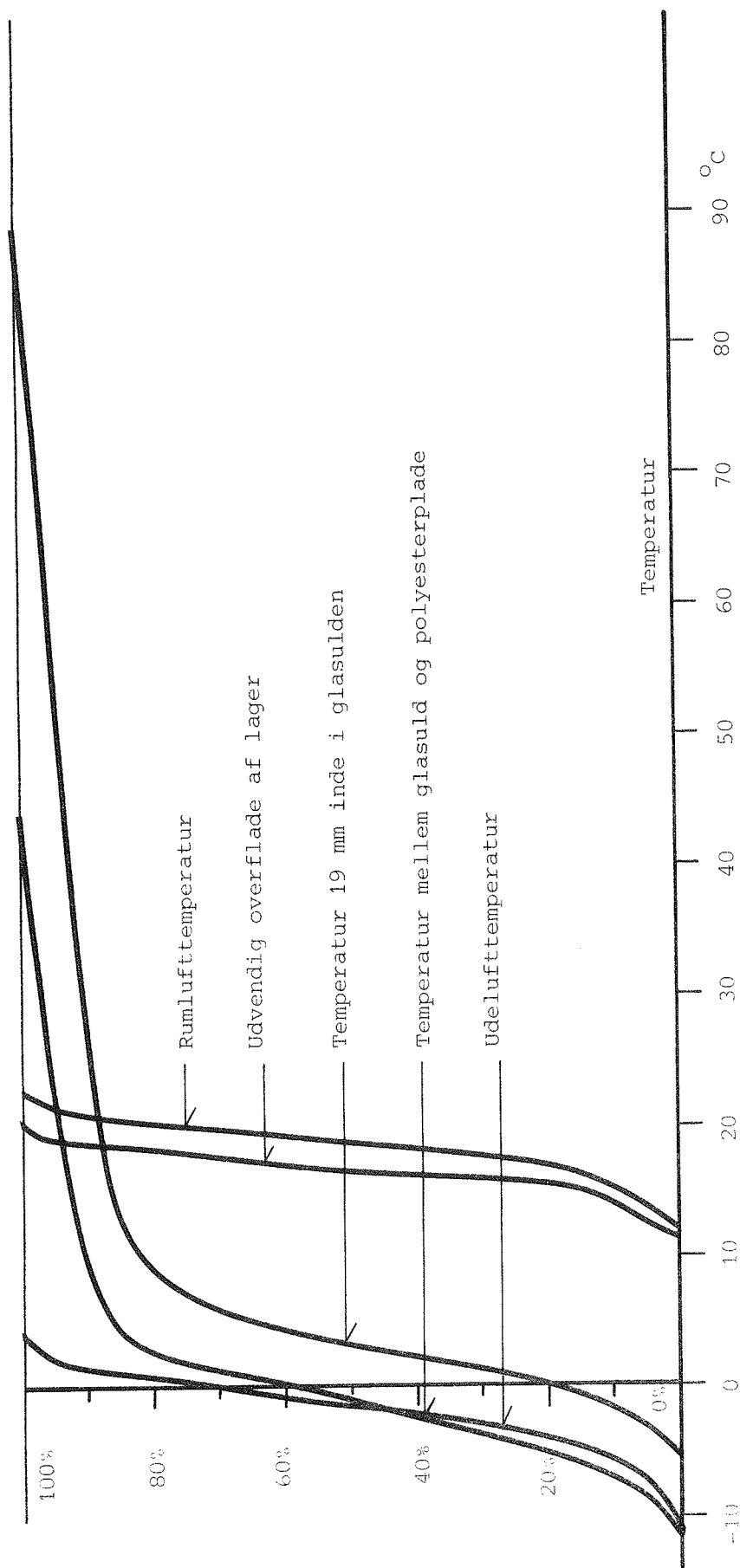


Fig. 4.1.9 Kumuleret fordeling af rumluft- og udelufttemperatur, temperatur i grænselaget mellem glasuld og polyesterplade, temperatur 19 mm inde i glasulden og udvendig overfladetemperatur af varmelager for solvæg isoleret med hvid glasuld i perioden februar 1979.

		Middelvarmestromstæthed W/m^2					
Måle- periode	Måned	Beregnet varmetab gennem nordvæg	Solindfald	Beregnet varmetab gennem sydvæg	Målt varmetab før korrekt.	Målt varmetab korrig.	Forskel
1	Februar	-5,8	80,1	-4,8	-5,1	-4,5	0,3
	Marts	-5,8	70,1	-4,9	-4,9	-4,6	0,3
2	September	-3,0	92,4	-1,8	0,4	0,3	1,5
	Oktober	-4,2	98,5	-3,0	-0,5	-0,8	2,3
	November	-5,0	8,5	-4,9	-5,2	-5,3	-0,4

Fig. 4.1.10 Sammenligning mellem middelvarmestromstæthed gennem solvæg isoleret med hvid glasuld og det beregnede varmetab for en normalt isoleret ydervæg ($k = 0,3 W/m^2K$) udsat for samme temperaturforhold og solindfald som solvæggen. Absorptionskoefficienten for solstråling er for sydvæggen 0,85 og for nordvæggen 0.

4.1.4 Måleresultater for solvægge med selektiv absorberoverflade

Målinger af temperaturer og varmestromme er udført i 3 perioder. Resultaterne bygger på de samme målinger som i ref. (20), bortset fra at de her viste resultater bygger på de fulde måleperioder, hvor der i ref. (20) kun er rapporteret for 3 fjortendagsperioder.

En oversigt over temperaturerne i de to typer solvægge er vist på fig. 4.1.11. I forsøgsrummet bag solvæggen, der har honeycomb i hulrummet mellem absorberoverflade og glas (B), har termostaten være indstillet højere end i det andet forsøgsrum (A). Derved har rumlufttemperaturen i rum B i middel været 1,1 til 1,4 K højere end i rum A. De højeste udvendige overfladetemperaturer af lageret er målt til over $70^{\circ}C$ i februar/marts, men minimumstemperaturen har været $12^{\circ}C$ for solvæggen uden honeycomb og $15^{\circ}C$ for solvæggen med honeycomb. Den indvendige overfladetemperatur har for begge solvægge varieret mellem 16 og $36^{\circ}C$. Den kumulerede fordeling af temperaturerne i måleperioden februar/marts for de to solvægge er vist på fig. 4.1.12 og fig. 4.1.13. Kurverne viser, at i den pågældende periode er den indvendige overfladetemperatur højere end rumlufttemperaturen i 50% og 60% af tiden for henholdsvis væg A og B. Ved de nedre

fraktiler på figurerne ses tydeligt temperaturforskellen mellem rumluft og den udvendige side af varmelageret, mens temperaturforskellen mellem rumluften og den indvendige side af lageret er beskeden.

Måleperiode	Solvæg	Udvendig side af lager			Indvendig side af lager			Rumløft	Udelufttemperatur		
		Middel	Max	Min	Middel	Max	Min		Middel	Max	Min
24/2 - 12/3	A	23,7	70,9	12,3	21,0	34,5	16,2	19,6	2,0	2,9	-5,2
	B	27,3	73,3	15,0	23,2	36,4	17,5	20,7			
19/3 - 5/4	A	23,2	58,9	12,6	20,6	30,2	16,1	19,3	2,5	11,3	-2,6
	B	26,3	58,4	16,1	22,7	31,1	18,2	20,6			
10/4 - 1/5	A	25,9	58,4	14,4	22,0	31,7	16,8	19,6	6,7	16,8	-2,1
	B	28,3	56,4	17,7	23,8	31,7	19,1	21,0			

Fig. 4.1.11 Målte middel-, minimum- og maksimumtemperaturer (OC) ved solvæg med selektiv overflade (A) og selektiv overflade plus V-korrigeret honeycomb (B).

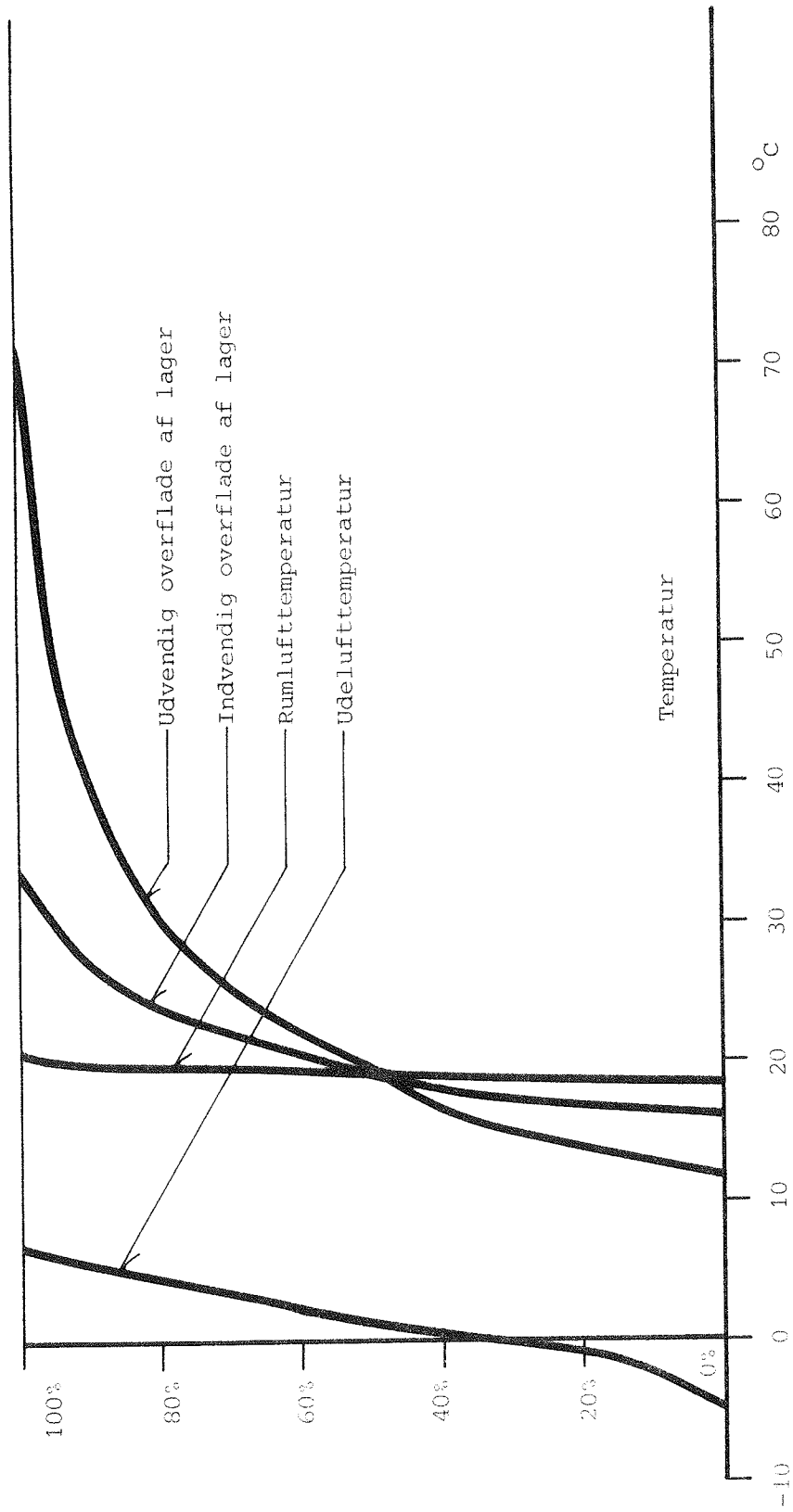


Fig. 4.1.12 Kumuleret fordeling af rumluft- og udeløfttemperatur samt udvendig og indvendig overfladetemperatur for solvæg med selektiv absorberoverflade (væg A) i perioden 24/2-12/3-83.

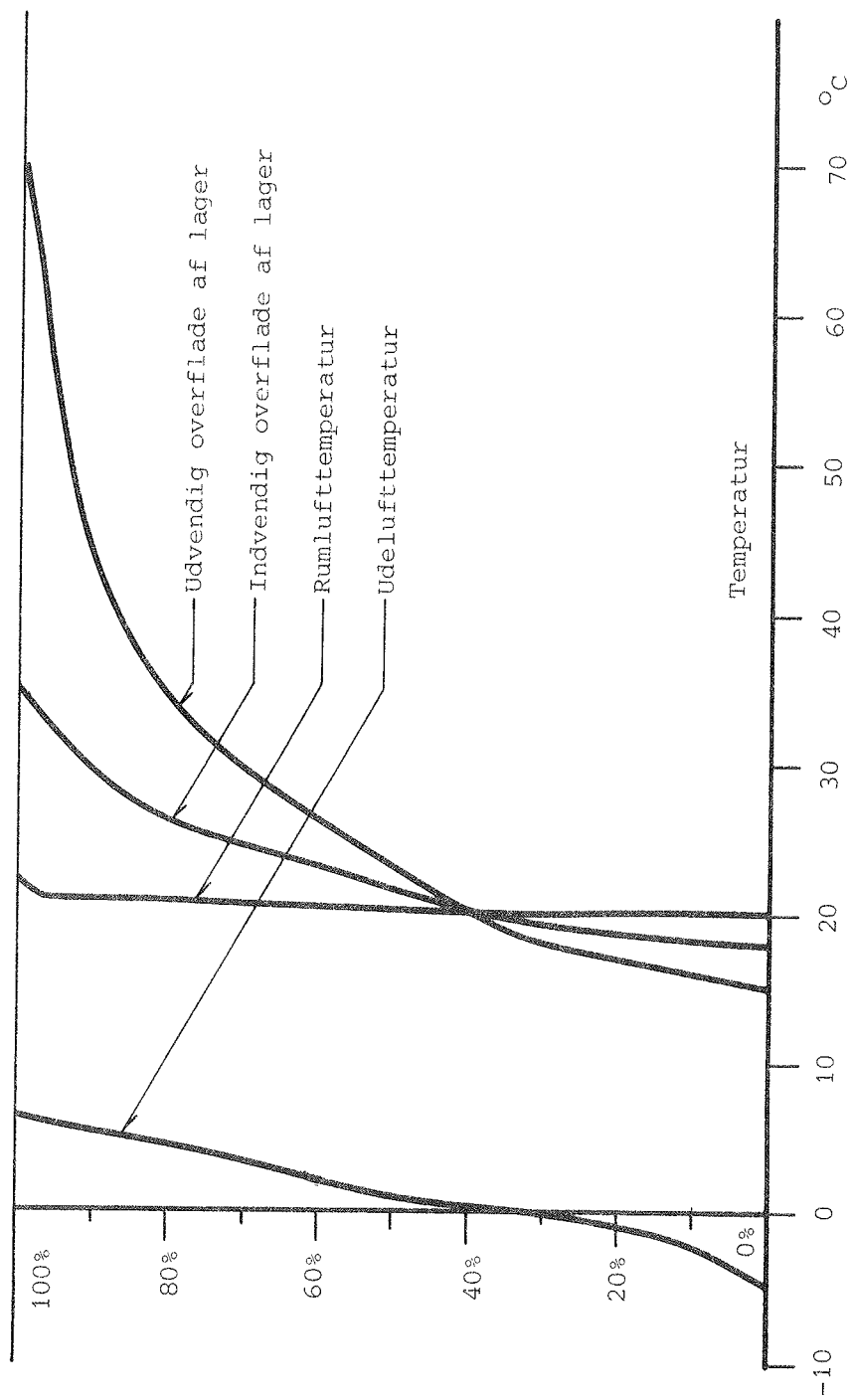


Fig. 4.1.13 Kumuleret fordeling af rumluft- og udelufttemperatur samt udvendig og indvendig overfladetemperatur af varmelager for solvæg (væg B) med selektiv overflade og honeycomb i perioden 24/2 - 12/3-83.

		Middelvarmestromstæthed W/m^2						
Solvæg	Måle- periode	Beregnet varmetab gennem nordvæg	Sol- indfald	Beregnet varmetab gennem sort sydvæg	Målt varme- strøm uden korrektion	Korrektion af målt varmestrom	Udbytte	Effek- tivitet %
A	24/2 -	-5,1	75,3	-4,0	14,1	-2,0	16,1	21
B	12/3	-5,5		-4,4	17,6	-2,6	19,4	26
A	19/3 -	-5,1	75,6	-4,0	12,2	0,2	16,0	21
B	5/4	-5,4		-4,3	14,4	0,2	18,5	24
A	10/4 -	-3,9	84,0	-2,7	17,2	0,4	19,5	23
B	1/5	-4,3		-3,1	18,0	0,4	20,7	25

Fig. 4.1.14 Målt middelvarmestromstæthed for solvægge med selektiv absorberoverflade (A) og selektiv absorberoverflade med V-korrugeret honeycomb (B) i tre måleperioder. Udbyttet er beregnet på grundlag af den korrigerede målte varmestrom og det beregnede varmetab gennem en normal sydvendt ydervæg med en k-værdi på $0,30 W/m^2K$.

De målte varmestromme i de tre måleperioder er vist på fig. 4.1.14. Varmestrommene fra solvæggen til rummet er korrigeret for at tage hensyn til forskelle i lagertemperaturer fra starten til slutningen af perioden. I alle tre måleperioder er der i gennemsnit en positiv varmestrom fra solvæggen til rummet. På grundlag af temperaturer og solindfald er varmetabet gennem en normalt isoleret, mørk og sydvendt ydervæg ($k = 0,30 W/m^2K$) beregnet med og uden solindfald. Den sydvendte ydervæg med solindfald er benyttet som referencevæg ved beregning af udbyttet for de to typer solvægge. Ved at dividere udbyttet med solindfaldet er bestemt en effektivitet for solvæggen, der angiver hvor stor en del af solindfaldet der netto tilføres rummet.

Årsagen til at effektiviteten ikke er 100% skyldes dels optiske tab, dels termiske tab ved at en del af den opsamlede solvarme transmitteres til det fri gennem dæklagskonstruktionen.

Af resultaterne ses, at for de pågældende måleperioder er opnået en effektivitet på mellem 21 og 26%, og at den største effektivitet opnås ved solvæggen med honeycomb.

Det er ikke muligt umiddelbart at overføre disse måleresultater til forholdene på årsbasis, men i afsnit 2.3 er vist simuleringer af varmebalancen for solvægge med varierende udformning.

4.2 SAMMENLIGNING MELLEM MÅLINGER OG BEREKNINGER

4.2.1 Sammenligning mellem målinger og beregninger for solvæg med mobil isolering

Varmebalancen for solvæggen er beregnet ved hjælp af følgende klimaparametre: udelufttemperatur, solindfald, indikation af om der er isolering foran solvæg, rumlufttemperatur og indvendig middelstrålingstemperatur. Simuleringen af temperaturerne startes med aktuelle temperaturer i starten af den pågældende måleperiode. Sammenligningerne af temperaturer og varmestrømme er foretaget månedsvis. Ved beregningerne benyttes de i appendix A1.8.1 angivne beregningsmodeller.

Der er to størrelser, som især kan tænkes at være kritiske ved bestemmelse af varmebalancerne. Det er solindfaldet og den ventilation, der sker af hulrummet for mobilisolering. Øverst og nederst i dette hulrum er der af hensyn til transporten af kuglerne anbragt ventilationshuller. Luftinfiltrationen gennem disse åbninger er afhængig af arealet og udformningen. Åbningerne er dækket af finmasket trådvæv, hvilket formindsker luftskiftet. Ofte har hulrummet ikke været helt tømt for kugler, således at kun hullerne øverst i solvæggen er åbne. Ventilation på grund af vindtryk er også vanskelig at bestemme, specielt da vindhastigheden ikke er målt.

På grund af ovenstående er der udført sammenligninger mellem målte og beregnede værdier med forskellige åbningsarealer. Varmetabet er beregnet som stammende fra naturlig opdrift med åbningsarealer i både top og bund mellem 0 og halvdelen af hullernes arealer uden hensyn til ristene.

De beregnede temperaturer og varmestrømme gennem solvæggen er sammenlignet med de aktuelt målte. Middeldifferensen og standardafvigelsen mellem de målte og de beregnede værdier er også angivet (fig. 4.2.1). Måledata fra månederne marts og september 1979 er udvalgt, da de repræsenterer to måleperioder med hver sin opbygning af solvæggen. Endvidere har der været en

MOBIL ISOLERING		ÅBNINGSAREAL AHUL = 3,2·10 ⁻³ m ²				ÅBNINGSAREAL AHUL = 2,2·10 ⁻³ m ²				ÅBNINGSAREAL AHUL = 1,6·10 ⁻³ m ²				ÅBNINGSAREAL AHUL = 0,0 m ²				Enheder
		Beregnet	Afvigelse	Standard Afvigelse	Beregnet	Afvigelse	Standard Afvigelse	Beregnet	Afvigelse	Standard Afvigelse	Beregnet	Afvigelse	Standard Afvigelse	Beregnet	Afvigelse	Standard Afvigelse		
Marts 1979	Indv. overflade	23,7	-0,6	0,7	23,2	-0,5	0,6	23,2	-0,5	0,6	23,4	-0,3	0,5	23,4	-0,3	0,5	°C	
	Inderste lag	23,9	-0,5	0,7	23,5	-0,4	0,6	23,6	-0,3	0,6	23,8	-0,1	0,6	23,8	-0,1	0,6	°C	
	Midte i væg	24,6	-0,4	0,9	24,4	-0,2	0,9	24,5	-0,1	0,9	24,5	0,3	1,1	24,5	0,3	1,1	°C	
	Yderste lag	25,3	-0,4	1,3	25,2	-0,1	1,4	25,4	0,1	1,4	25,8	0,5	1,8	25,8	0,5	1,8	°C	
	Udv. overflade	25,6	-0,4	1,6	25,5	-0,1	1,6	25,7	0,1	1,7	26,2	0,6	2,1	26,2	0,6	2,1	°C	
	Varmestrøm	10,1	-0,4	3,1	10,4	0,3	3,2	10,9	0,8	3,5	12,3	2,2	4,6	12,3	2,2	4,6	W/m ²	
September 1979	Indv. overflade	25,5	-0,3	0,5	25,2	-0,3	0,4	25,3	-0,2	0,4	25,4	-0,1	0,4	25,4	-0,1	0,4	°C	
	Inderste lag	26,3	-0,1	0,5	26,3	0,0	0,5	26,4	0,1	0,5	26,5	0,2	0,6	26,5	0,2	0,6	°C	
	Midte i væg	27,9	0,4	0,9	28,4	0,5	1,0	28,5	0,6	1,0	28,7	0,8	1,2	28,7	0,8	1,2	°C	
	Yderste lag	29,6	0,7	1,4	30,4	0,8	1,5	30,5	0,9	1,6	30,8	1,2	1,9	30,8	1,2	1,9	°C	
	Udv. overflade	30,5	0,7	1,5	31,4	0,9	1,7	31,5	1,0	1,8	31,8	1,3	2,1	31,8	1,3	2,1	°C	
	Varmestrøm	23,1	2,9	5,1	26,4	3,3	5,6	26,7	3,6	5,9	27,5	4,4	6,9	27,5	4,4	6,9	W/m ²	

Fig. 4.2.1 Sammenligning mellem beregnede og målte middelværdier af temperaturer og varmestrømsstæthed ved forskellige åbningsarealer af ventilationshuller.

del solskin i måleperioderne, og mobilisoleringen har fungeret uden driftsstop.

I alle viste tilfælde (fig. 4.2.1) afviger den beregnede middeltemperatur mindre end 1,3 K fra den målte. Standardafvigelsen mellem temperaturerne er mellem 0,4 og 2,1 K. For temperaturknudepunkter nær den udvendige overflade er der mindst afvigelse ved et åbningsareal mellem 1,6 og $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ i marts-målingerne. I september-målingerne er der mindst afvigelse ved åbningsarealet på $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. På den indvendige overflade er der i begge måleperioder mindst temperaturafvigelse ved det mindste åbningsareal.

Gennemsnitsafvigelsen mellem den målte og den beregnede varmemestrømstæthed gennem væggen ligger mellem -0,4 og 4,4 W/m². Standardafvigelsen ligger i intervallet 3,1 og 6,9 W/m². Årsagen til de relativt store standardafvigelser må ses i det forhold, at varmeoverføringen mellem varmelager og rum er meget afhængig af rumluft- og overfladetemperaturen. Når disse temperaturer svinger, vil der opstå kraftige udsving af varmemestrømmen.

Resultaterne tyder på, at det effektive åbningsareals ubestemt-hed ikke kan forklare hele afvigelsen mellem beregnede og målte værdier. En årsag kan være, at de optiske data er anderledes end forudsat. Dette kan skyldes afsætninger af snavs og støv fra polystyrenkugler, eller at plexiglas materialet har overfladebelagninger og ujævnheder, der mindsker transmissionen, idet der er forudsat samme egenskaber som ved plant plexiglas.

For at undersøge dette er der udført beregninger, hvor det absorberede solindfald er reduceret med op til 10% (fig. 4.2.2). Det ses, at temperaturer og varmemestrømme er følsomme over for små ændringer i solindfaldet. Med undtagelse af den indvendige overflade opnås en formindskelse af differencen ved at reducere den tilførte solstråling med 5%.

REDUKTION AF SOLINDFALD		0% REDUKTION				5% REDUKTION				10% REDUKTION				ENHED
	Målt	Beregnet	Afvigelse	Standard Afvigelse	Beregnet	Afvigelse	Standard Afvigelse	Beregnet	Afvigelse	Standard Afvigelse	Beregnet	Afvigelse	Standard Afvigelse	
Marts 1979	Indv. overflade	23,7	-0,5	0,6	23,1	-0,6	0,7	22,9	-0,8	0,8	22,9	-0,8	0,8	°C
	Midt i væg	24,6	-0,1	0,9	24,2	-0,4	0,8	24,0	-0,6	0,9	24,0	-0,6	0,9	°C
	Udv. overflade	25,6	0,1	1,7	25,3	-0,3	1,4	24,8	-0,8	1,4	24,8	-0,8	1,4	°C
	Varmestrøm	10,1	0,8	3,5	9,9	-0,3	2,8	8,8	-1,4	2,9	8,8	-1,4	2,9	W/m ²
September 1979	Indv. overflade	25,5	-0,2	0,4	25,1	-0,4	0,5	24,9	-0,6	0,7	24,9	-0,6	0,7	°C
	Midt i væg	27,9	0,6	1,0	28,1	0,2	0,8	27,8	-0,1	0,6	27,8	-0,1	0,6	°C
	Udv. overflade	30,5	1,0	1,8	31,0	0,5	1,3	30,5	-0,0	1,0	30,5	-0,0	1,0	°C
	Varmestrøm	23,1	3,6	5,9	25,2	2,1	4,4	23,8	0,7	3,2	23,8	0,7	3,2	W/m ²
Oktober 1979	Indv. overflade	26,2	-0,3	0,5	25,9	-0,3	0,7	25,4	-0,8	0,9	25,4	-0,8	0,9	°C
	Midt i væg	29,4	0,5	0,9	29,6	0,2	0,7	28,9	-0,5	0,8	28,9	-0,5	0,8	°C
	Udv. overflade	32,9	0,8	1,6	33,0	0,1	1,0	32,4	-0,5	1,1	32,4	-0,5	1,1	°C
	Varmestrøm	29,2	4,0	6,4	31,2	2,0	4,3	29,2	0,0	3,1	29,2	0,0	3,1	W/m ²

Fig. 4.2.2 Sammenligning mellem målte og beregnede middelværdier af temperaturer og varmestrømstæthed, når solindfaldet reduceres. Åbningsarealet er $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$.

En reduktion på 10% af det oprindelige solindfald giver i marts en forøgelse af middelforskellen. I månederne september og oktober formindskes middelafrvigelsen mellem målte og beregnede varmestromme ved denne reduktion, men det er kun i 2 ud af 6 tilfælde, at middelafrvigelsen formindskes.

Den målte middelvarmestromstathed i september og oktober er 23,1 og 29,2 W/m². Den skønnede ubestemthed på varmestromsmålingen er 5%, hvilket er ca. 1 W/m². Standardafvigelsen mellem den beregnede og den målte varmestrom er væsentlig større, og den målte middelværdi må derfor skønnes at være mere nøjagtig end den beregnede. Det må derfor antages, at den absorberede solstråling er mindre end oprindeligt antaget. Den reduktion i solindfaldet, der giver en middelafrvigelse på 0, er dog ikke større end hvad der kan forventes, når man tager hensyn til usikkerheden i de optiske data.

Forskellene mellem de beregnede og de målte temperaturer er vist på fig. 4.2.3 til 4.2.5 i 10 dages perioder i månederne marts, september og oktober. Kurverne er fra beregninger med åbningsareal af ventilationsåbninger på $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ og med reduktion af solindfaldet. Ud fra kurverne ses en god overensstemmelse mellem de målte og de beregnede temperaturer.

4.2.2 Sammenligning mellem målinger og beregninger for solvæg med hvid glasuld

Sammenligningerne foregår på samme måde som ved mobil isolering. En af de faktorer, der er en vis usikkerhed på, er ekstinktionskoefficienten for hvid glasuld. Der er foretaget sammenligning med varierende ekstinktionskoefficient for marts måned i 1979 (fig. 4.2.6).

Målingerne viser en gennemsnitlig varmestromstathed fra væg til rum på -4,9 W/m² i denne måned. Beregningerne af varmestrommene viser ved anvendelse af en dobbelt så stor ekstinktionskoefficient som forudsat, at middelafrvigelsen mellem målte og be-

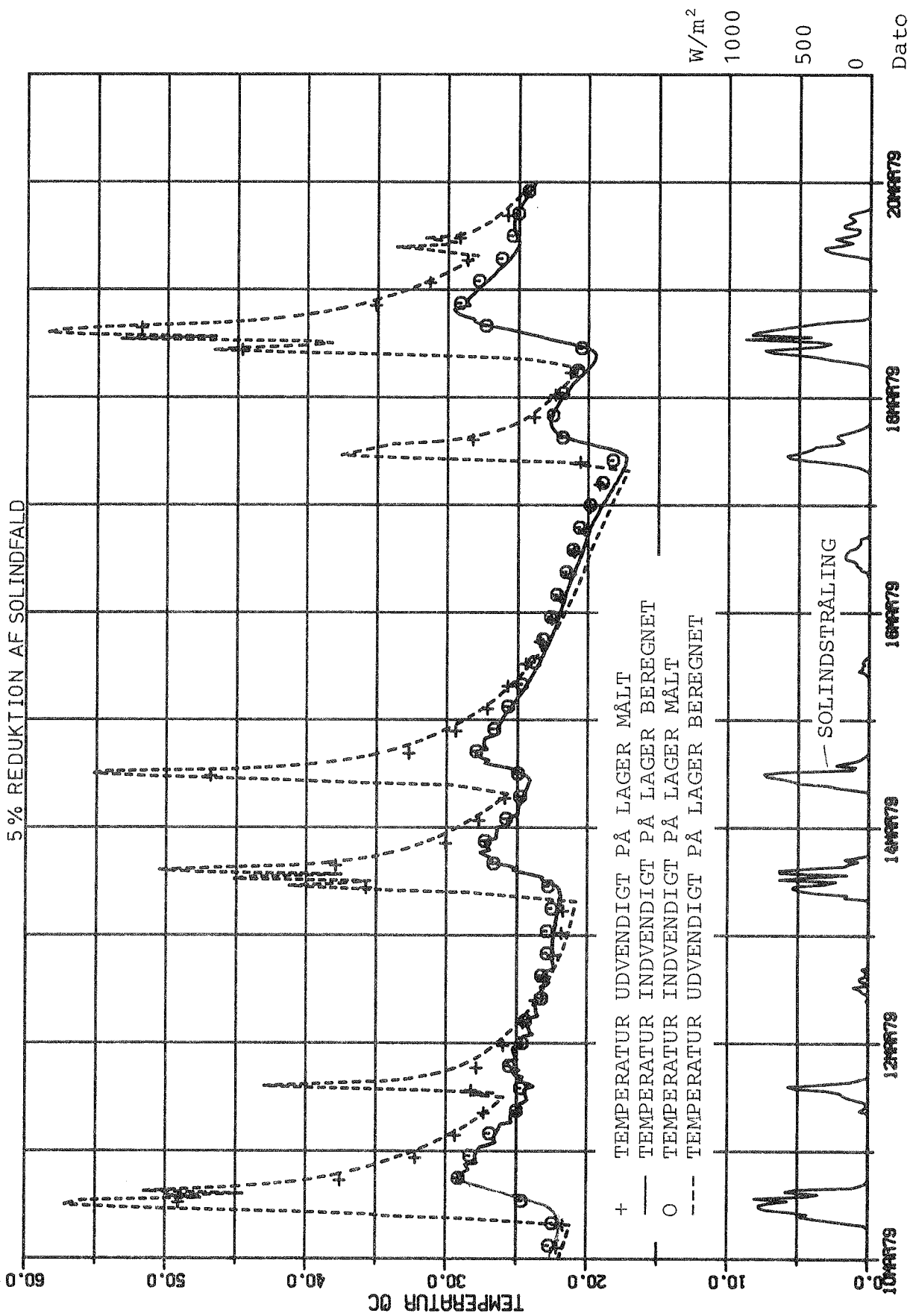


Fig. 4.2.3 Sammenligning mellem målte og beregnede temperaturer. Indvendig og udvendig overflade af solvæg med mobil isolering af ekspanderede polystyrenkugler, nederst solindfaldet. 5% reduktion af solindfald.

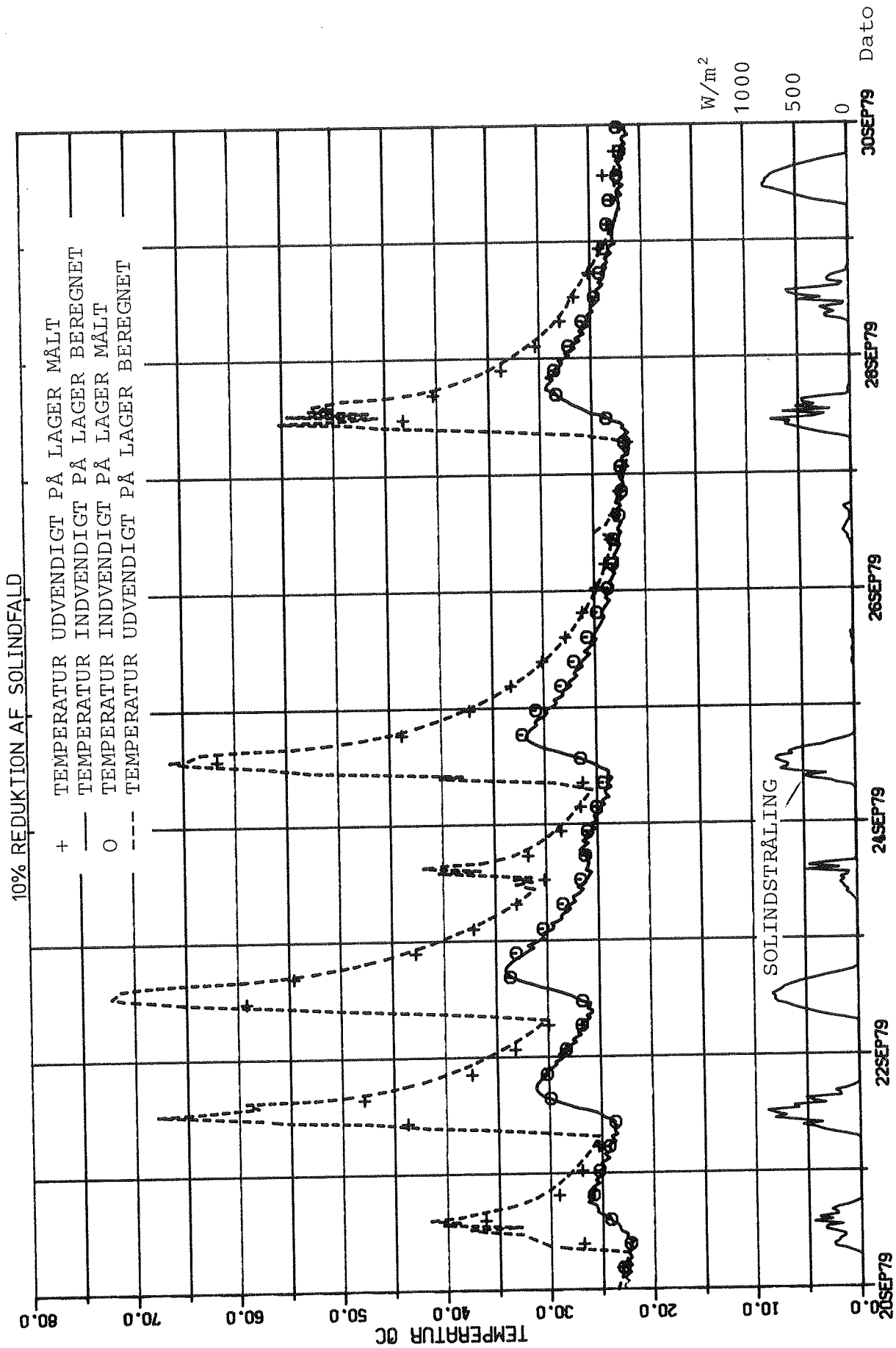


Fig. 4.2.4 Sammenligning mellem målte og beregnede temperaturer. Indvendig og udvendig overflade af solvæg med mobil isolering af ekspanderede polystyrenkugler, nederst solindfaldet. 10% reduktion af solindfald.

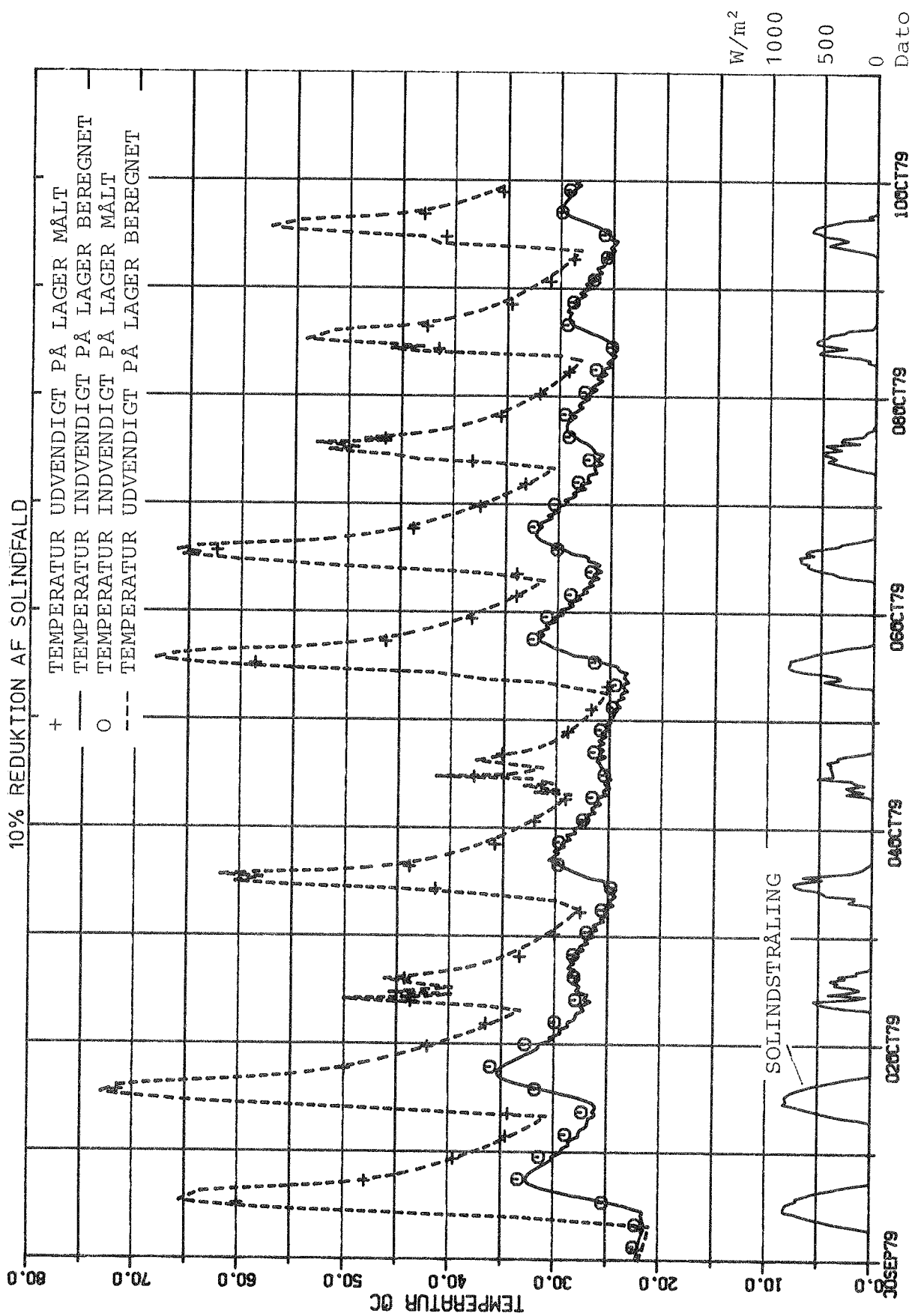


Fig. 4.2.5 Sammenligning mellem målte og beregnede temperaturer. Indvendig og udvendig overflade af solvæg med mobil isolering af ekspanderede polystyrenkugler, nederst solindfaldet. 10% reduktion af solindfald.

HVID GLASULD		EKSTINKTIONSKOEFF. 83 . m ⁻¹				EKSTINKTIONSKOEFF. 124 m ⁻¹				EKSTINKTIONSKOEFF. 166 m ⁻¹				ENHEDER
Måling	Målt	Bereg- net	Afvig- else	Standard Afvigelse	Bereg- net	Afvig- else	Standard Afvigelse	Bereg- net	Afvig- else	Standard Afvigelse	Bereg- net	Afvig- else	Standard Afvigelse	
Marts 1979	Indv. overflade	21,3	-0,6	0,6	20,6	-0,7	0,7	20,6	-0,7	0,7	20,6	-0,7	0,7	°C
	Inderste lag	21,0	-0,5	0,5	20,5	-0,6	0,6	20,4	-0,6	0,6	20,4	-0,6	0,6	°C
	Midte i væg	20,7	-0,4	0,5	20,2	-0,6	0,6	20,1	-0,6	0,7	20,1	-0,6	0,7	°C
	Yderste lag	20,5	-0,4	0,5	19,9	-0,6	0,7	19,8	-0,7	0,8	19,8	-0,7	0,8	°C
	Udv. overflade	20,3	-0,4	0,5	19,7	-0,6	0,7	19,6	-0,7	0,8	19,6	-0,7	0,8	°C
	Varmestrøm	-4,9	1,6	1,8	-3,9	-0,9	1,5	-4,2	0,6	0,8	-4,2	0,6	0,8	W/m ²
	Glasuld, inderst, 5	19,7	-0,2	0,4	19,2	-0,6	0,6	19,0	-0,7	0,8	19,0	-0,7	0,8	°C
	Glasuld - " -, 6	18,8	-1,1	1,3	17,1	-1,7	1,9	16,8	-2,0	2,4	16,8	-2,0	2,4	°C
	Glasuld, midt, 8	15,6	-1,7	2,2	12,9	-2,7	3,3	12,3	-3,3	4,4	12,3	-3,3	4,4	°C
	Glasuld, yderst, 9	12,1	-1,0	2,8	10,4	-1,8	4,0	9,8	-2,3	5,2	9,8	-2,3	5,2	°C

Fig. 4.2.6 Sammenligning mellem beregnede og målte værdier af temperaturer og varmestrømsstæthed. Numrene efter målepunkterne i glasuld henviser til fig. 3.2.7.

regnede værdier er på $0,6 \text{ W/m}^2$. Standardafvigelsen er $0,8 \text{ W/m}^2$. Temperaturerne på ydersiden af lageret kan med samme ekstinktionskoefficient simuleres med en afvigelse, der i middel for de tre måneder er mellem $-0,7 \text{ K}$ og $-0,6 \text{ K}$. De tilhørende standardafvigelser ligger mellem $0,6$ og $0,8 \text{ K}$. Temperaturerne i glasulden viser større afvigelser mellem målte og beregnede værdier. Dette kan skyldes de store temperaturgradienter kombineret med, at der er nogen ubestemthed på termoelementernes placering i glasulden. Desuden kan større fugtindhold end forudsat, samt at glasuldens varmekapacitet ikke er medregnet, også spille en rolle.

Sammenligningen viser nogen usikkerhed på simuleringen af målingerne, når der sammenlignes med den målte varmestrøm. Dette skyldes bl.a., at varmestrømmen igennem væggen er beskednen i forhold til solindfaldet på væggen.

En sammenligning af temperaturer er vist på fig. 4.2.7. Den anvendte ekstinktionskoefficient er 83 m^{-1} .

4.2.3 Sammenligning mellem målinger og beregninger for solvæg med selektiv absorberoverflade

Denne solvægstype adskiller sig fra de foregående ved, at den langbølgede strålingsudveksling i luftspalten foran varmelageret er væsentlig reduceret på grund af den selektive absorberoverflade.

Målingerne vil derfor være velegnede til kontrol af den konvektive varmeovergang mellem de to parallelle flader i den lodrette spalte. Derfor er der i det følgende foretaget sammenligninger med forskellige formler for konvektiv varmeovergang i en luftspalte (se afsnit A1.2.1).

Forudsætningerne for beregningerne er de aktuelle data fra forsøget som beskrevet i afsnit 3.1.9 og ref. (20).

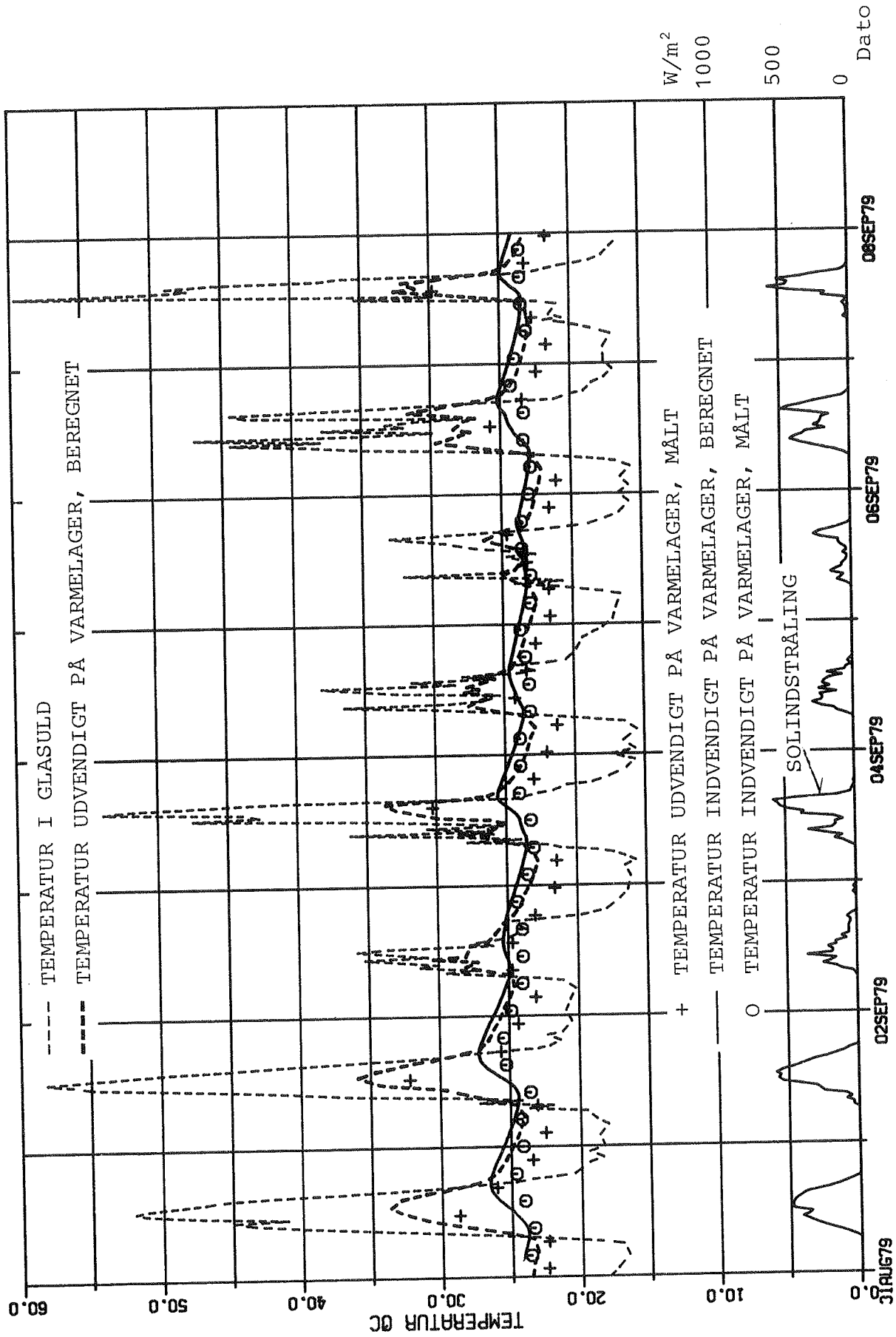


Fig. 4.2.7 Sammenligning mellem målte og beregnede temperaturer. Indvendig og udvendig overflade af solvæg med hvid glasuld. Nederst er solindfaldet vist.

Den konvektive varmeovergang er beregnet med 3 forskellige metoder a) Niemanns metode (44), der er benyttet i simuleringerne i afsnit 2, b) El Sherbinsys metode (46) og c) Jakobs metode (45).

En sammenligning mellem målinger og beregninger er vist på fig. 4.2.8.

Det ses, at metode c) giver den bedste overensstemmelse mellem middelværdier af målinger og beregninger. Sammenlignes metode a) og c) er den beregnede varmestrøm efter metode c) 16 til 22% større end beregnet efter metode a). Den tilsvarende konvektive varmeovergang er for de aktuelle temperaturforhold ca. 15% større ved metode c) end ved metode a). Det ses, at varmebalancen for solvæggen er meget følsom for ændringer i varmeovergangsforholdene.

Standardafvigelserne bliver ikke reduceret i samme grad som forskellene mellem målte og beregnede middelværdier, hvis metode c) benyttes i stedet for a). For nogle værdiers vedkommende er standardafvigelsen større ved metode c) end ved metode a).

Alligevel tyder målingerne på, at den konvektive varmeovergang er mindre end antaget ifølge de to metoder a) og b). En forklaring kan være, at de forsøg, som beregningsmetoderne til bestemmelse af konvektion bygger på, har haft væsentlig mindre fysiske dimensioner end ved de her udførte forsøg.

Forholdet mellem højde af hulrum og spaltevidde kaldes sideforholdet. Er sideforholdet lille, vil tendensen til at der forekommer hvirvelstrømme af luft fra den varme side af spalten til den kolde side være udpræget, mens ved store sideforhold vil tendensen være begrænset.

Ved forsøgene, der ligger til grund for formlerne, har sideforholdet været lille ved spaltevidder, der svarer til de i dette forsøg anvendte. I dette forsøg er sideforholdet 13, og dette

Måle- periode	Placering	Konvektion if. Niemann (44)			Konvektion if. El Sherbiny (46)			Konvektion if. Jakob (45)			En- heder
		Beregnet	Afgivelse	Standard- afvigelse	Beregnet	Afgivelse	Standard- afvigelse	Beregnet	Afgivelse	Standard- afvigelse	
24/2 - 12/3	Indv. overflade	20,1	-0,9	1,0	20,2	-0,8	0,9	20,4	-0,6	0,7	OC
	Inderste lag	20,6	-0,8	0,9	20,8	-0,6	0,7	21,0	-0,4	0,6	OC
	Midte i væg	21,5	-0,8	1,0	21,7	-0,6	0,8	22,1	-0,3	1,0	OC
	Yderste lag	22,4	-0,9	1,4	22,6	-0,6	1,3	23,0	-0,2	1,7	OC
	Udv. overflade	22,7	-1,0	1,6	23,0	-0,7	1,6	23,5	-0,2	1,9	OC
	Varmestrøm	12,3	-1,8	4,6	13,1	-1,0	4,5	14,4	0,3	5,5	W/m ²
19/3 - 5/4	Indv. overflade	20,0	-0,7	0,8	20,1	-0,6	0,7	20,2	-0,4	0,5	OC
	Inderste lag	20,4	-0,6	0,7	20,5	-0,5	0,6	20,7	-0,2	0,4	OC
	Midte i væg	21,4	-0,7	0,8	21,3	-0,5	0,6	21,7	-0,1	0,6	OC
	Yderste lag	22,0	-0,8	1,1	22,2	-0,5	0,9	22,7	-0,1	1,1	OC
	Udv. overflade	22,4	-0,9	1,4	22,6	-0,6	1,2	23,2	-0,1	1,3	OC
	Varmestrøm	9,9	-2,3	3,9	10,7	-1,5	3,5	12,2	-0,0	4,0	W/m ²

Fig. 4.2.8 Sammenligning mellem målinger og beregninger for solvæg med selektiv overflade. Beregningerne er udført med varierende konvektiv varmeovergang (44), (45), (46).

må anses for at være relativt stort. Man må derfor forvente, at der dannes to grænselag, der kun i begrænset omfang danner hvirvelstrømme, og dette forhold giver en reduceret konvektiv varmeovergang. Dette kan forklare, at den bedste overensstemmelse opnås ved anvendelse af Jakobs metode, der giver den mindste konvektive varmeovergang ved et givet Rayleightal. Det er dog ikke muligt at konkludere, at Jakobs metode altid bør anvendes, fx kan varmeovergangen ved den udvendige overflade i de udførte forsøg være mindre end antaget i beregningerne.

I beregningerne i afsnit 2 er der forudsat en spaltevidde på 0,03 m, mens spaltevidden i forsøget er 0,15 m. Dette giver et Rayleigh tal i beregningerne, der er 125 gange mindre end i forsøgene ved samme temperaturer af overfladerne. Derfor kan de ovennævnte erfaringer ikke overføres til de i afsnit 2 udførte beregninger.

For at kunne vurdere konsekvensen af ændrede varmeovergangsforhold er udført sammenligninger med konstante varmeovergangskoefficienter. I de sammenligninger, der er vist på fig. 4.2.9, er i det ene tilfælde forudsat, at varmeovergangen er beregnet som i varmetabsreglerne. Isolansen mellem absorberoverfladen og det fri er i dette tilfælde bestemt til 0,51 m²K/W.

I det andet tilfælde er varmeovergang mellem den udvendige side af lageret og udeluften bestemt, således at den målte middelvarmestrøm nogenlunde svarer til den beregnede.

Resultaterne viser, at hvis varmeovergangstallet mellem lageret og det fri er henholdsvis 11% og 24% større i de to måleperioder end beregnet efter varmetabsreglerne, opnås en god overensstemmelse mellem middelværdierne af både varmestrømme og temperaturer. Standardafvigelserne er derimod større end ved beregningerne med variable overgangstal.

En sammenligning mellem målte og beregnede temperaturer er vist grafisk på fig. 4.2.10. Kurverne viser god overensstemmelse

		Isolans, udvendigt $m = 0,51 \text{ m}^2\text{K/W}$				Isolans, udvendigt $m = 0,46 \text{ m}^2\text{K/W}$				Isolans, udvendigt $m = 0,41 \text{ m}^2\text{K/W}$			
Måle- periode	Placering	Beregnet	Afgivelse	Standard- afvigelse	Beregnet	Afgivelse	Standard- afvigelse	Beregnet	Afgivelse	Standard- afvigelse	Beregnet	Afgivelse	En- heder
24/2 - 12/3	Indv. overflade	21,0	-0,1	0,6	20,7	-0,3	0,6	20,5	-0,5	0,6	20,5	-0,5	oc
	Inderste lag	21,6	0,3	0,8	21,3	-0,1	0,6	21,1	-0,3	0,7	21,1	-0,3	oc
	Midte i væg	23,0	0,6	1,5	22,4	0,1	1,1	22,1	-0,2	1,3	22,1	-0,2	oc
	Yderste lag	24,2	1,0	2,4	23,5	0,3	1,9	23,1	-0,2	2,1	23,1	-0,2	oc
	Udv. overflade	24,8	1,1	2,8	24,0	0,3	2,2	23,6	-0,2	2,4	23,6	-0,2	oc
	Varmestrøm	17,3	3,2	7,9	15,2	1,1	6,4	13,9	-0,2	6,3	13,9	-0,2	W/m ²
19/3 - 5/4	Indv. overflade	20,6	-0,1	0,4	20,3	-0,3	0,4	20,2	-0,5	0,6	20,2	-0,5	oc
	Inderste lag	21,2	0,2	0,4	20,8	-0,2	0,4	20,6	-0,3	0,5	20,6	-0,3	oc
	Midte i væg	22,3	0,5	0,8	21,8	0,0	0,5	21,5	-0,3	0,5	21,5	-0,3	oc
	Yderste lag	23,5	0,7	1,3	22,8	0,0	1,0	22,4	-0,3	1,0	22,4	-0,3	oc
	Udv. overflade	24,1	0,8	1,6	23,3	-0,0	1,3	22,9	-0,4	1,3	22,9	-0,4	oc
	Varmestrøm	14,3	2,2	5,2	12,3	0,1	4,3	11,2	-1,0	4,2	11,2	-1,0	W/m ²

Fig. 4.2.9 Sammenligning mellem målinger og beregninger for solvæg med selektiv overflade. I beregningerne er forudsat konstante varmeovergangstal. Den udvendige isolans mellem absorberoverflade og udeluft er varieret "hhv." 0,51, 0,46 og 0,41 m²K/W.

mellem målte og beregnede værdier. Der er dog en tendens til, at de målte temperaturer er lidt højere end de beregnede i perioder uden solindfald.

Sammenfattende kan konkluderes, at udbyttet ved målingerne er 13-19% større end det umiddelbart var ventet. Dette må hovedsagelig skyldes et lavere konvektivt varmeovergangstal. Ved at benytte en alternativ beregningsmetode opnås en bedre overensstemmelse mellem målinger og beregninger. Erfaringerne kan dog ikke overføres, hvis afstanden mellem absorberoverflade og glas er væsentlig mindre end i forsøgene.

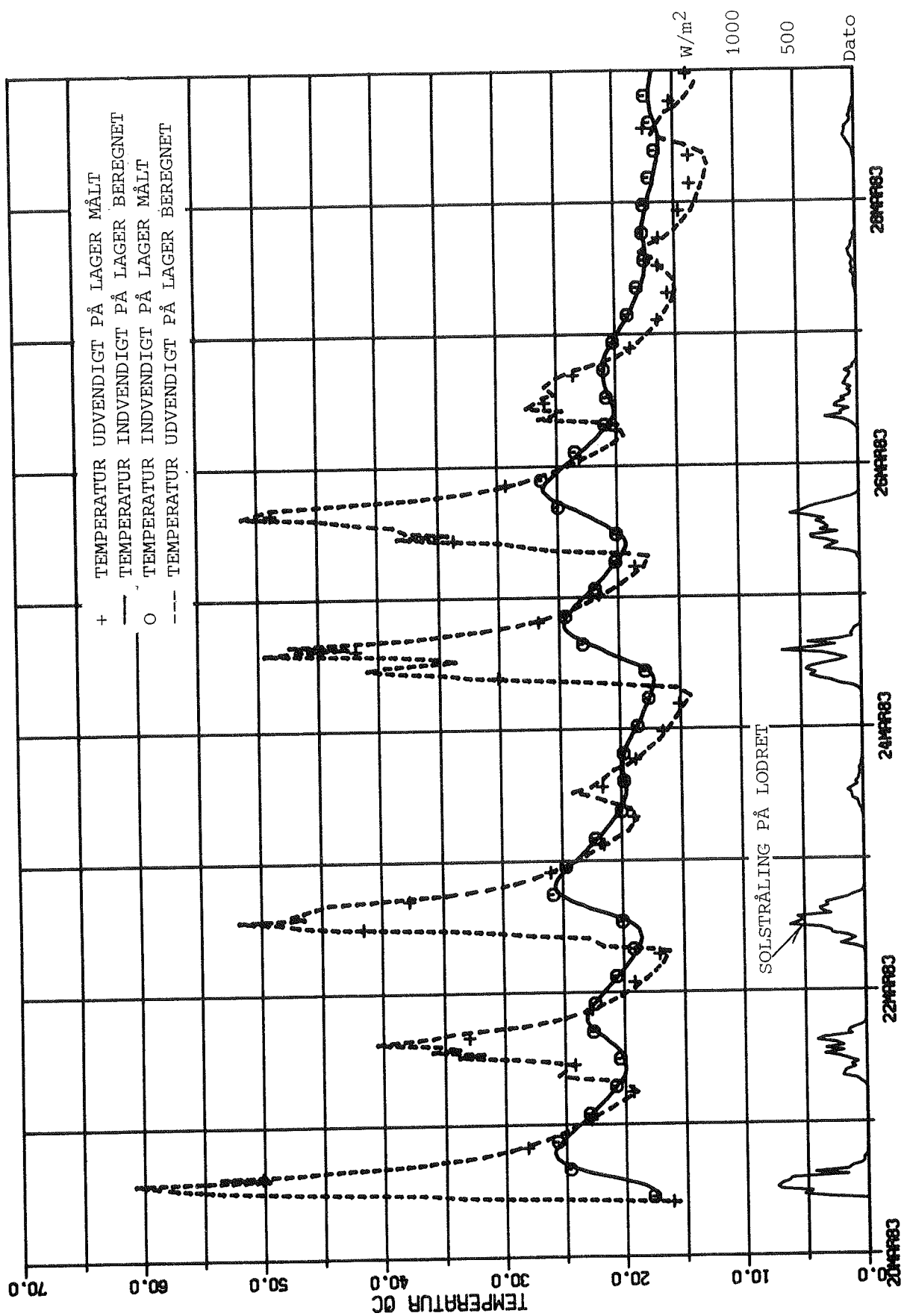


Fig. 4.2.10 Sammenligning mellem målte og beregnede temperaturer for indvendig og udvendig overflade af lager ved solvæg med selektiv absorberoverflade. Varmeovergang i hulrum if. Jakob (45).

4.3 KONDENSRISIKO

En solvæg vil i perioder have en lavere temperatur end rumluften. Er solvæggen placeret således at den ikke rammes af direkte solstråling i vintermåneder med en lav solhøjde, er der en potentiel risiko for, at der opstår kondensproblemer.

Først kan solvæggens kondensrisiko vurderes under forudsætning af, at der ikke er solindfald. Forudsættes en solvæg med en selektiv absorberoverflade, vil lagerets udvendige overflade normalt være det mest kritiske punkt på grund af metalfolien, der er påklæbet ydersiden af varmelageret. I de følgende beregninger forudsættes folien uendelig damptæt.

Benyttes varmetabsreglerne (30) til bestemmelse af de isolanser, der indgår i solvæggen på samme måde som i fig. 2.3.4, og forudsættes, at solvæggen har 1 lag glas, selektiv absorberoverflade og varmelager af beton, fås at den samlede isolans af solvæggen er $M_{\text{tot}} = 0,77 \text{ m}^2\text{K/W}$, mens isolansen mellem rumluften og den udvendige side af lageret er $M_1 = 0,26 \text{ m}^2\text{K/W}$. Forholdet mellem temperaturdifferensen mellem rumluft og udvendig overflade af lager i forhold til den samlede temperaturdifferens mellem udeluft og rumluft er

$$\frac{M_1}{M_{\text{tot}}} = 0,34$$

Ved anbringelse af dampspærre i lette ydervægskonstruktioner angives ofte, at der kan tillades anbragt isolering svarende til, at 1/3 af den samlede isolans i konstruktionen findes på den indvendige side af dampspærren. Den ovenfor beskrevne solvæg vil kunne honorere dette krav for den udvendige side af varmelageret.

Benyttes varmetabsreglerne til beregning af varmetransmission gennem solvæggen, kan den udelufttemperatur (t_u), hvor der sker kondens på en overflade, bestemmes af

$$t_u = t_{\text{luft}} - (t_{\text{luft}} - t_s) \frac{M_{\text{tot}}}{M_1}$$

hvor t_{luft} er rumlufttemperaturen
 t_s er dugpunktstemperaturen for rumluften

Denne ligning er benyttet til at optegne figur 4.3.1. Figuren viser ved hvilken udelufttemperatur, der vil ske kondensdannelse som funktion af den relative luftfugtighed af rumluften, der forudsættes at have en temperatur på 21°C .

For solvæggen er tegnet en kurve for den udvendige side af varmelageret. For vinduer er optegnet tilsvarende kurver for den indvendige side af en to- og trelagsrude (7). Af figuren ses, at med disse forudsætninger er kondensrisikoen for solvæggen mindre end for en tolagsrude, men større end for en trelagsrude.

Det mest kritiske tidspunkt for solvæggen mht. kondens vil være tidsrummet efter montering af folien, hvor lageret, der fx er af beton, har et højt fugtindhold. Efterhånden vil betonen udtørre, da lagerets temperatur i gennemsnit vil være højere end rumluftens. Endvidere vil lagerets temperatur i praksis yderst sjældent komme ned på den stationære ligevægtstemperatur, da der de fleste dage vil være et diffust solindfald, som hæver lagerets temperatur over ligevægtstemperaturen. Dette understøttes af målingerne (afsnit 4.1.4), hvor den lavest målte udvendige overfladetemperatur af lageret for de egentlige solvægge er målt til 12°C ved en rumlufttemperatur på 19°C og en udelufttemperatur på -4°C .

Anvendes materialer til varmelageret, der giver en forøget isolans mellem rumluften og den udvendige side af varmelageret, kan den øgede kondensrisiko reduceres ved at forøge antallet af dæklag.

Sammenfattende kan konkluderes, at en solvæg kan udformes således, at der ikke kan ventes kondensproblemer, hvis absorberfolien monteres på et hensigtsmæssigt tidspunkt af året, og hvis fugtforholdene i rummene kan anses for at være normale.

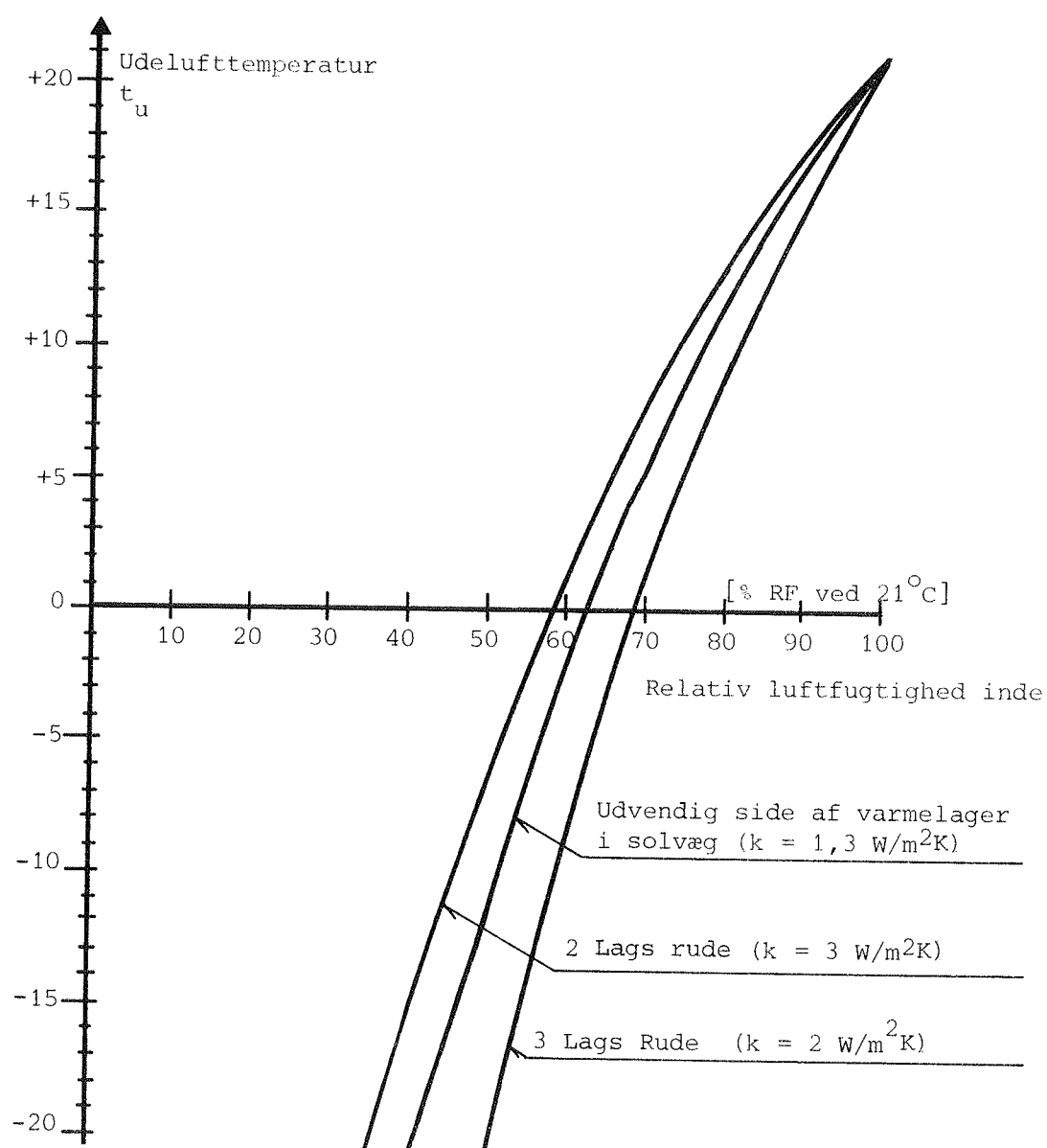


Fig. 4.3.1 Sammenligning mellem rumluftfugtighed ved 21°C og minimal udelufttemperatur, der må forekomme for at kondensdannelse kan undgås. For solvæggen er forudsat et lag glas og selektiv absorberoverflade. Kurverne er sammenlignet med 2 og 3-lags ruder.

5.1 KONKLUSION

I projektet er der udført målinger af varmestrømme og temperaturer, som viser, at solvægge kan anvendes med positivt udbytte.

For solvæggen med mobil isolering er den maksimale temperaturvariation i løbet af et døgn med klart solskin om dagen målt op til 43 K på ydersiden af varmelageret. På indersiden af varmelageret er temperaturvariationen op til 11 K i døgnet.

Den maksimale temperatur på ydersiden af varmelageret er målt til 72°C på ydersiden og til 36°C på indersiden af varmelageret.

I februar måned er der målt en gennemsnitlig varmestrøm fra solvæggen til rummet på 11 W/m². Til sammenligning vil det gennemsnitlige varmetab gennem en normalt isoleret sydvendt ydervæg være 6 W/m², forudsat at væggen har en k-værdi på 0,3 W/m²K og er udsat for samme ude- og rumlufttemperaturer som solvæggen. I de udførte målinger varierer effektiviteten m.h.t. udnyttelse af solindfaldet mellem 21 og 33%.

I den anden type solvæg, isoleret med hvid glasuld, er der målt temperaturer på op til 89°C i en afstand af 20 mm fra ydersiden af elementet med hvid glasuld. Den gennemsnitlige varmestrøm fra denne solvægstype til rummet er negativ i de måneder, hvor der er målt, dog med undtagelse af september. Varmetabet er dog, om end i begrænset omfang, mindre end ved en mørk, sydvendt ydervæg isoleret med almindelig mineraluld af samme tykkelse. Udformningen må karakteriseres som ikke særlig velegnet som solvæg.

Der er ligeledes udført forsøg med en tredje og fjerde type solvæg, begge uden mobil isolering men med selektiv absorberoverflade. I begge typer er anvendt et dæklag af glas, men i den fjerde type er der i hulrummet anbragt V-korrugeret honeycomb af plastfolie. Med begge typer er der udført målinger i

vintermåneder, og der opnås effektiviteter på mellem 21 og 26%, hvilket er sammenligneligt med solvæggen med mobil isolering.

I projektet er udviklet en edb-beregningsmodel til simulering af varmemestrømme og temperaturer for solvægge. Sammenligninger mellem beregningsmodellen og målingerne viser en rimelig god overensstemmelse (kap. 4.2).

Beregningsmodellen er benyttet til at beregne temperaturer og varmebalancer for en solvæg indbygget i et parcelhus (kap. 2.2).

Udbyttet er defineret som den reduktion af en bygnings opvarmningsbehov, der opnås ved at anvende en solvæg i stedet for en normalt isoleret ydervæg. For solvæggen med mobil isolering, der er udformet som i forsøgene, bortset fra at varmelageret er af beton, viser beregningerne, at udbyttet for solvæggen varierer mellem 60 og 145 kWh/m²år ved en række variationer af bygningens udformning.

Udbyttet af en solvæg er ca. 30% større, hvis den er placeret i en bygning med lille varmeakkumuleringssevne (let rummodel) fremfor en bygning med stor varmeakkumuleringssevne (tung rummodel).

Ændres bygningens opvarmningsbehov, ændres også udbyttet af en solvæg. Udbyttet reduceres med ca. 30% ved at ændre rummodellen fra BR-82 til lavenergi rummodellen.

Ved anvendelse af en 27 m² solvæg er det ifølge beregningerne muligt at reducere opvarmningsbehovet med mellem 25 og 40%.

En solvægsudformning uden mobil isolering er også undersøgt. Solvæggen har et eller flere dæklag af glas og der er forudsat anvendt en selektiv absorberoverflade, som har en lav emissionskoefficient for langbølget stråling.

Med denne udformning er beregnet, at der ved anvendelse af et lag almindeligt glas kan opnås omtrent samme udbytte som ved den mobilt isolerede solvæg anvendt i forsøgene. Ændres dæklagskonstruktionen fra 1 dæklag af almindeligt glas til 3 lag jernfrit glas, vil udbyttet kunne øges med 40%.

Varmelagerets betydning er også undersøgt. Er dette af beton, vil den optimale varmelagertykkelse være mellem 0,2 og 0,4 m. Anvendelse af vand som varmelagermateriale vil ved en tykkelse på 0,2 m øge udbyttet med 9% i forhold til et betonlager af samme tykkelse. Anvendelse af massiv, tung tegl i stedet for beton vil mindske udbyttet med ca. 11%.

Betydningen af horisontafskærmning er også undersøgt. Små horisontafskærmninger har kun en beskedne betydning. Reduktion af udbyttet er ca. 4% ved en horisontafskærmning på 5° , mens reduktionen er 14% ved en afskærmning på 10° .

Beregningsmodellen er anvendt til at beregne udbyttet af en solvæg isoleret med hvid glasuld. Det kan ventes, at der kan opnås et udbytte på op til ca. 20 kWh/m² år.

Endelig er ændringer i opvarmningsbehovet beregnet som funktion af absorptionskoefficienten for en sydvendt, normalt isoleret ydervæg med en k-værdi på 0,3 W/m²K. Ved at øge absorptionskoefficienten fra 0,42 til 0,97 mindskes opvarmningsbehovet med 8 kWh/m²år. De to absorptionskoefficienter svarer til en henholdsvis hvid og sort overflade.

Beregningerne viser, at det ved anvendelse af solvægge er muligt at opretholde rumlufttemperaturerne inden for de tilladte grænser i opvarmningssæsonen udelukkende ved ekstra ventilation.

Som et udtryk for det termiske indeklima er antallet af halvtimer med temperaturer over 25°C i månederne oktober til april beregnet.

Antallet af disse halvtimer med høje temperaturer varierer mellem 0 og 13 ved et solvægsareal på 27 m², hvis der ventileres med et ekstra luftskifte på op til 4 g/h, når rumlufttemperaturen er ved at komme over 24°C. Sammenlignes med vinduer, der har samme glasareal som solvæggene, og er forholdene i øvrigt de samme, øges antallet af halvtimer til mellem 120-500. Det store antal halvtimer med høje temperaturer er udtryk for, at andre foranstaltninger som fx afskærmning i opvarmningssæsonen er nødvendige ved anvendelse af store vinduesarealer. Om sommeren kan det være nødvendigt også at afskærme solvægge mod uønsket solindfald.

Udbyttet af solvægge og vinduer er afhængigt af den varmeakkumuleringssevne, der er i den bygning, som solvæggen anvendes i. Den lette og tunge rummodel må anses for at angive de grænser, der kan forekomme i almindelige bygninger. I nedenstående fig. 5.1 er ændringen af opvarmningsbehovet beregnet ved at erstatte en normalt isoleret ydervæg med vinduer uden mobil isolering, vinduer med mobil natisolering eller solvægge.

	Udbytte kWh/m ² år	
	Let rum- model	Tung rum- model
Vinduer, 2 lag glas	-86	8
Vinduer, 2 lag glas og mobil natisolering for vinduer (k = 0,48 W/m ² K)	-22	67
Mobilisolerede solvægge som i forsøg, dog betonlager	134	106

Fig. 5.1 Reduktion af opvarmningsbehov pr. glasareal af syd- vendt vindue eller solvæg ved at erstatte en normalt isoleret ydervæg med 18 m² vindue eller solvægsareal. Forudsætninger: BR-82 rummodel, i øvrigt se fig. 2.1.20, 2.1.21 og 2.2.1.

Af figuren ses, at anvendelse af solvægge kan give et større udbytte end vinduer. Der er markante forskelle mellem udbyttet ved den lette og den tunge rummodel. Ved vinduer er udbyttet størst ved en tung rummodel, mens det er omvendt ved solvægge. Dette kan forklares med, at solvæggen også kan akkumulere varme fra brugsvarme og solindfald gennem vinduer.

Resultaterne viser, at der er realistiske muligheder for at anvende solvægge i Danmark. Endvidere ses, at der eksisterer en række muligheder for at udvikle og optimere udformningen af solvægge, og at det vil være ønskeligt også at udføre afprøvninger i normale bygninger.

5.2 REFERENCER

- (1) Trombé, F., J.F. Robert et al.
Concrete walls to collect and hold heat. Solar Age. August 1977.
- (2) Sebald, A.V. et al.
Performance Effects of Trombé Wall Control Strategies. Solar Energy, 23, pp. 479-487, (1979).
- (3) Rey, Y., J.B. Gay & A. Faist.
Measurements and modellisation of a Trombé wall. Ecole Polytechnique Fédérale. Lausanne, Switzerland. Presented at Solar World Forum, ISES Congress, Brighton, England, 23-28 August 1981.
- (4) Carter, C. The Trombé Solar Wall in Canada, Trent University, Ontario, Canada. Presented at Solwest 80, Joint Solar Conference, Vancouver, August 5-10, 1980.
- (5) Paludan-Müller, C.
Undersøgelse af en selvcirkulerende luftsolfanger indbygget i sydfacaden, eksamensarbejde, Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, 1982.
- (6) Olsen, L.
Resultater fra beregning af solvægge under danske klimaforhold. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, april 1978.
- (7) Vest Hansen, T.
Undersøgelser vedrørende højisolerede vindueskonstruktioner med mobil natisolering. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, meddelelse nr. 45, januar 1977.
- (8) Lebens, R.M.
An investigation of passive solar heating and cooling, ARCAED, The Commission of the European Communities Directorate-General XII for Research Science and Education. July 1979.
- (9) Sabady, P.R.
Haus & Sonnenkraft. Helion Verlag, Zürich. Februar 1976.
- (10) Mokray, G.
Morse's air heater: An early passive system. Proceedings of the 4th National Passive Solar Conference, Kansas City, ISES, 1979.
- (11) Butti, K. and J. Perlin.
A Golden Thread, 2500 Years of Solar Architecture and Technology. Cheshire Books / Van Nostrand Reinhold, 1980.
- (12) Anderson, B.
The solar home book, heating, cooling and designing with the sun. Brick House Publishing Co., Inc., 1976.

- (13) Swet, C.J.
Phase change storage in passive solar architecture. Proceedings of the 5th National Passive Solar Conference, Amherst, October 1980.
- (14) Pellegrini, G., R. Colombo.
Building components with integrated latent heat storage, First E.C. Conference on Solar Heating, Proceedings of the International Conference held at Amsterdam, D. Reidel Publishing Company. April 30-May 4, 1984.
- (15) Hyde, J.C.
Performance of Night Insulation and Selective Absorber Coatings in LASL Test Cells. Proceedings of the 5th National Passive Solar Conference, Amherst, October 1980.
- (16) Ribbans, R.C.
Teflon^R FEP Film as inner glazing in flat plate solar collectors. Proceedings of "Solar Glazing", 1979, Topical Conference, Prowler, D. (ed.), June 22, 1979.
- (17) Lampert, C.M.
Solar Optical Materials for Innovative Window Design, Energy Research, Vol. 7, pp. 359-374 (1983).
- (18) Bähr, A., H. Piwecki.
Passive solar heating with heat storage in the outside walls. Colloque Solaire International, Experimental research with passive solar houses, Nice, France. 11-12 December 1980.
- (19) Goetzberger, A. et al.
Transparent Insulation system for passive solar energy utilization in buildings. First E.C. Conference on Solar Heating, Proceedings of the International Conference held at Amsterdam, D. Reidel Publishing Company. April 30-May 4, 1984.
- (20) Olsen, L. & C. Paludan-Müller.
Transparent Insulation for Thermal Storage walls. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, Meddelelse nr. 142. July 1983.
- (21) Boklund, H.-G.
Reflekterer kortvågigt solljus men absorberer det långvariga. Energimagasinet, Sverige 1/1983.
- (22) Brochure fra Airglass AB, Byggaregränd 1, S-27500 Sjöbo, Sweden.
- (23) Shurcliff, W.A.
Thermal Shutters and Shades. Brick House Publishing Company Inc., Andover, Massachusetts, 1980.

- (24) de Wit, M.N., J.L.M. Hensen.
High Performance passive Solar Heating System with Heat Pipe Energy Transfer. First E.C. Conference on Solar Heating, Proceedings of the International Conference held at Amsterdam, D. Reidel Publishing Company. April 30-May 4, 1984.
- (25) SERI (Solar Energy Research Institute).
SERI Research Investigates Electrochromic Coatings for Windows. In Review, A SERI Research Update, September/October 1984, Volume VI, No 9.
- (26) Lund, H.
Program BA4 for Calculation of Room Temperatures and Heating and Cooling Loads. Users Guide, Report no. 44, Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark. 2. ed. 1979.
- (27) Andersen, B.
Bygningers varmebalance. Danmarks Ingeniørakademi, København 1972.
- (28) Becher, P.
Varme- og ventilation. 4. udg., Teknisk Forlag, København, 1971.
- (29) Bygningsreglement 1982.
Publikation nr. 54, Byggestyrelsen, dec. 1982.
- (30) Beregning af bygningers varmetab.
Dansk Ingeniørforening. Dansk Standard DS 418, 4. udgave. 1977.
- (31) Lund, H.
Metoder til beregning af det termiske indeklima. Forelæsningsnotat, Varmeisolering III. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH.
- (32) Aasbjerg Nielsen, A., M.R. Byberg, R.G. Djurtoft, B. Saxhof.
Lavenergihusprojektet under Handelsministeriet. 6 Lavenergihuse i Hjortekær, Statusrapport 1. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, Medd. nr. 84. Juni 1979.
- (33) Johnsen, K., A. Nielsen.
Beregning af energiforbrug i småhuse, SBI-Rapport 148, Statens Byggeforskningsinstitut, 1984.
- (34) Referenceåret - Vejrdata for VVS-beregninger.
Statens Byggeforskningsinstitut. Rapport nr. 89. 1974.
- (35) Vejrdata for VVS og energi. Dansk referenceår TRY.
SBI rapport 135, Statens Byggeforskningsinstitut, 1982.
- (36) Ravn-Jensen, L.
Vinduer og energi. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH. Medd. nr. 55. April 1977.

- (37) Maxorb solar foil brochure fra Wiggin Electrochemical Products. Publication No 3787, Oct. 1983.
- (38) Korsgaard, V., Th. Lund Madsen.
Isoleringsevnen af nogle typiske ydervægge udsat for det naturlige klima. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, Medd. nr. 8, 1964.
- (39) Petersen, E.
Solstråling og dagslys - målt og beregnet. Rapport nr. 34, Lysteknisk Laboratorium, Oktober 1982.
- (40) Carslaw, H.S., J.C. Jaeger.
Conduction of Heat in Solids. Oxford University Press. 1959.
- (41) Glent Ventilation, Glent & Co. A/S. 1970.
- (42) Bisgaard, N.F.
Opvarmning og ventilation. 1 Varmetransmission. Akademisk Forlag, København 1972.
- (43) Gröber, Erk, Grigull.
Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1963.
- (44) Niemann, H.
Die Wärmeübertragung durch natürliche Konvektion in spaltförmigen Hohlräumen. Gesundh.-Ing. 69 (1948) 224/228.
- (45) Jakob, M.
Free heat convection through enclosed plane gas layers. Journal of Heat Transfer, Vol. 68, pp. 189-193, (1946).
- (46) El Sherbiny, S.M. et al.
Heat Transfer by Natural Convection Across Vertical and Inclined Air Layers. Journal of Heat Transfer, Vol. 104; pp. 96-102. (Feb. 1982).
- (47) Weston Sears, F.
Thermodynamics, The kinetic theory of gases, and statistical mechanics. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1970.
- (48) Grimmer, D.P.
Theoretical considerations in the use of small passive solar testboxes to model the thermal performance of passively solar-heated building designs. Solar Energy, Vol. 22, pp. 343-350, (1979).
- (49) Balcomb, J.D. and R.D. McFarland.
Simulation analysis of passive solar heated buildings - the influence of climate and geometry on performance. The 1977 Annual Meeting Am. Section ISES, Orlando, Florida, 6-10 June 1977.

- (50) Duffie, J.A., W.A. Beckman.
Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley-Inter-
science, 1980.
- (51) Williams, J.R.
Passive Solar Heating. Ann Arbor Science, the Butterworth
Group, 1983.
- (52) Hadvig, S.
Termisk Stråling for ingeniører, I. Laboratoriet for
Varme- og Klimateknik, 1980.
- (53) Blomsterberg, A.K., D.T. Harrje.
Evaluating Air Infiltration Energy Losses. ASHRAE Jour-
nal. May 1979.
- (54) Höglund, I.
Metod for beräkning av extreme ytemperaturer hos isole-
rede ytterkonstruktioner. Byggeforskningen R6, 1973.
- (55) McAdams, W.H.
Heat Transmission. 3rd ed, McGraw-Hill Book Co., Inc, New
York, 1954.
- (56) ASHRAE Handbook of Fundamentals, 1977.
- (57) Kaminski, D.A. et al.
Heat Transfer Data Book. General Electric Company. 1979.
- (58) International Energy Agency Handbook.
An introduction to Meteorological Measurements and Data
Handling for Solar Energy Applications. Prepared by TASK
IV, Solar Heating & Cooling Program. May 1979.
- (59) Petersen, E.
Solindfald gennem vinduer. Laboratoriet for Varmeisole-
ring, DTH, Meddelelse nr. 13, 1966.
- (60) Lawaetz, H.
Beregning af solindfald. Laboratoriet for Varmeisolering,
DTH. Meddelelse nr. 42. December 1975.
- (61) Petersen, E.
Solindfald og solafskærmning af vinduer. Forelæsnings-
notat. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks tek-
niske Højskole.
- (62) SAS User's Guide.
1979 Edition. SAS Institute Inc.
- (63) Jørgensen, G.
Long-term Glazing Performance. Proc. of "Solar Glazing:
1979 Topical conference". Stockton State College, Pomona,
New Jersey, June 22, 1979.

- (64) Hansen, K.K.
Om reflektions- og transmissionsmåling på Optisk Laboratorium. Kursusarbejde, Laboratoriet for Varmeisolering. Januar 1978.
- (65) Thekaekara, M.P.
The Energy Crisis and Energy from the sun. Institute of Environmental Sciences. Mount Prospect, Illinois, 1974.
- (66) Plexiglas xt, extruderte Platten, Rohre, Stäbe, Materialverhalten MV xt.3, RÖHM, GmbH, chemische Fabrik, Darmstadt, Dezember 1975.
- (67) Rapport over undersøgelse udført af Lysteknisk Laboratorium. Prøve nr. 1815, 31/3-1971.
- (68) Edwards, D.K.
Solar Absorption by each Element in an Absorber-Coverglass Array. Solar Energy, Vol. 19, pp. 401-402. (1977).
- (69) Solar News, Edition 5A.
Kalwall Corporation. Manchester, New Hampshire, USA, 1978.
- (70) IMSL (International Mathematical & Statistical Libraries Inc.). Reference manual. Edition 6, 1977.
- (71) Bankwall, C.G.
Värmetransport i fibrösa material. Rapport 15. Institutionen för Byggnadsteknik, LTH, Lund 1970.
- (72) Esterline Angus, Model PD-2064, Instruction Manual.
Indianapolis, Indiana 46224, 1975.

5.3 SYMBOLLISTE

a	Eksponent til højden ved bestemmelse af vindhastighed	-
a	Varmediffusionstallet	-
a	Absorption af stråling ved passage af et lag i et transparent materiale	-
a_n a_{n+1}	Topabsorptionen for lag hhv. n og $n+1$	-
A	Areal	m^2
A	Absorption i et lag af et transparent materiale med hensyntagen til refleksion mellem materialets overflader og absorption	-
dA	Infinitesimalt arealelement	m^2
A_0	Tværsnitsareal af hulrum	m^2
A_1	Areal af overflade 1	m^2
A_1	Tværsnitsareal af åbning i top eller bund af hulrum	m^2
A_2	Areal af overflade 2	m^2
A_{be}	Areal af bygningselement	m^2
A_{dif}	Absorptionskoefficient ved indfaldende ensartet diffus stråling	-
A_i	Absorption af lag i ved stråling fra udvendig side	-
A_i	Absorption af lag i ved stråling fra indvendig side	-
$A_{n,res}$	Resulterende absorption i lag nummer n	-
A_{solv}	Solvægsareal	m^2
$A_{vind,N,\emptyset,V}$	Vinduesareal mod nord, øst, vest	m^2
$A_{vind,S}$	Vinduesareal mod syd	m^2
$A_{væg}$	Vægareal mod syd	m^2
$A(\alpha, \gamma)$	Absorptionskoefficient afhængig af retning (solhøjde og azimut)	-
A_λ	Monokromatisk absorptionskoefficient ved bølgelængde λ	-

$A_{\lambda}(\mu, \phi)$	Monokromatisk retningsbestemt absorptionskoefficient (retning udtrykt ved cosinus til indfaldsvinkel og retningsvinkel)	-
\underline{B}	Søjlevektor i ligningssystem til bestemmelse af temperatur i hvid glasuld	W/m ²
C	Andel af absorberet stråling, der ledes til rummet	-
$\left. \begin{matrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{matrix} \right\}$	Konstanter i polynomium til beskrivelse af absorptionskoefficient	- rad ⁻¹ rad ⁻² rad ⁻³ rad ⁻⁴
C_1	Kontraktionskoefficient ved udløb fra hulrum	-
c_p	Varmefylde	J/kg K
F	Korrektionsfaktor for indfaldsvinkel	-
f	Effektivitet af solvæg	-
Fo	Fouriertallet	-
Fo _{max}	Den fastsatte øvre grænse for Fouriertallet	-
F ₁₂	Vinkelforholdet fra flade 1 til flade 2	-
F _{dif}	Andel af diffus stråling	-
F _{glob}	Forholdet mellem globalstråling ved jordoverfladen og ekstra-terrestrial stråling på en given overflade	-
F _v	Vinkelforhold til jord	-
g	Tyngdeacceleration	m/s ²
Gr	Grashofs tal	-
H	Udbytte af solvæg	kWh/m ² år
H	Varmeoverføringsevne mellem to knudepunkter	W/K
\underline{U}	Koefficientmatrice til bestemmelse af temperaturer i hvid glasuld	W/m ² K
H _{ak}	Varmeoverføringsevne mellem overflade og akkumulerende lag	W/K

h_1, h_2, \dots, h_n	Varmeoverføringstal ved lagdeling	W/m^2K
h_{be}	Varmeoverføringstal ved ledning mellem overflade og fiktivt akkumulerende lag i bygningselement	W/m^2K
$H_{hus+mob}$	Varmeoverføringsevne for hus med mobilisolering	W/K
$H_{hus+vind}$	Varmeoverføringsevne for hus uden mobilisolering	W/K
h_{inf}	Varmeoverføringstal for hver overflade af hulrum til udeluft	W/m^2K
h_{indv}	Varmeovergangstal mellem overflade og rumluft	W/m^2K
h_{konv}	Konvektivt varmeovergangstal mellem overflade og luft	W/m^2K
h_{ledn}	Varmeoverføringstal ved ledning mellem yderste knudepunkt og overflade i materiale	W/m^2K
h_{mid}	Middelvarmeoverføringstal mellem overflade og akkumulerende lag	W/m^2K
H_{ov}	Varmeoverføringsevne mellem indvendige overflader og rumluft	W/K
h_{str}	Varmeovergangstal ved stråling mellem to overflader	W/m^2K
$H_{-sydvæg}$	Varmeoverføringsevne, hus uden sydvæg	W/K
i	Lagnummer	-
I_1	Stråling absorberet	W/m^2
I_2	i lag med nummer hhv.	"
I_n	1, 2, ---n	"
dI_{abs}	Absorberet stråling i et infinitesimalt element	W/m^2
I_b	Direkte stråling på en given overflade	W/m^2
$I_{b,n}$	Direkte normalstråling (målt på en flade vinkelret på stråleretningen)	W/m^2
I_d	Diffus stråling på en given overflade	W/m^2
$I_{d,h}$	Diffus stråling på vandret (=diffus himmelstråling)	W/m^2
I_h	Globalstråling på vandret	W/m^2

$I_i(\alpha, \gamma)$	Radians af indfaldende retningsbestemt stråling på lodret sydvendt overflade i afhængighed af solhøjden α og væg-solazimutvinklen γ	$W/m^2 \text{ sr}$
$I_i(\mu)$	Indfaldende stråling, hvor μ er cosinus til indfaldsvinklen	W/m^2
I_j	Stråling absorberet i lag nummer j	W/m^2
I_n^+	Udadgående bestrålingsstyrke fra n 'te element	W/m^2
I_n^-	Indadgående bestrålingsstyrke til n 'te element	W/m^2
I_o	Stråling umiddelbart efter passage af yderste overflade	W/m^2
I_o	Ekstraterrestrial normalstråling	W/m^2
I_r	Reflekteret stråling	W/m^2
I_{sc}	Solkonstanten	W/m^2
I_{tot}	Totalt indfaldende stråling	W/m^2
$I_{t,i}$	Indfaldende stråling	W/m^2
I_x	Stråling i dybden x fra overfladen	W/m^2
$I_{x_1} \left\{ \right.$	Stråling i dybderne	W/m^2
$I_{x_2} \left. \right\}$	hhv. x_1 og x_2	W/m^2
$I_{\lambda,i}$	Monokromatisk stråling ved bølgelængden λ	$W/m^2 \mu m$
$I_{\lambda,i}(\mu, \phi)$	Monokromatisk retningsbestemt indfaldende stråling i afhængighed af bølgelængden λ , cosinus til indfaldsvinklen μ og retningsvinklen ϕ	$\frac{W}{m^2 \cdot \mu m}$
K	Kalibreringskonstant	$W/m^2 \text{ mV}$
K	Koefficient til bestemmelse af vindhastighed	variabel
K	Ekstinktionskoefficient	m^{-1}
K_{be}	Varmekapacitet for bygningselement	$Wh/m^2 K$
K_i	Varmekapacitet for lag nr. i	$Wh/m^2 K$
K_m	Ekstinktionskoefficient pr. massefyldeenhed	$m^2 \text{ kg}^{-1}$

k_{mob}	Varmetransmissionskoefficient for mobilisolering	W/m^2K
K_V	Kalibreringskonstant for varme- strømsmåler	$W/m^2 \text{ mV}$
K_{tot}	Varmekapacitet i rum	Wh/K
k_{vind}	Varmetransmissionskoefficient for vindue	W/m^2K
$k_{væg}$	Varmetransmissionskoefficient for væg	W/m^2K
L	Karakteristisk længde	m
L	Samlet tykkelse af laget	m
L_a	Mindste lagtykkelse i glasuld	m
L_d	Ændring i lagtykkelse	m
$L_{høj}$	Tykkelse af ribbe i dobbeltplade	m
L_i	Tykkelse af lag i	m
L_{max}	Maksimal tykkelse af lag der medtages	m
L_{pas}	Strålevejlength i ribbe	m
L_{res}	Gennemsnitlig strålevejlength i ribber	m
L_{rib}	Ribbernes længde	m
L_{tyk}	Tykkelse af ribbe	m
m	Konstant til bestemmelse af varmeovergang	-
m	Masse pr. m^2	kg/m^2
m	Relativ luftmasse	-
M_i	Isolans af lag i	m^2K/W
$M_{i,res}$	Resulterende isolans mellem i'te lag og indvendig overflade	m^2K/W
M_{res}	Resulterende isolans mellem indvendig overflade og fiktivt akkumulerende lag	m^2K/W
n	Konstant til bestemmelse af varmeovergang	-
n, n_1, n_2	Brydningsindex	-

n	Antal målinger	-
n	Antal lag	-
N	Skydækket	oktetter
N_{dn}	Dagens nummer i året	-
n_{rib}	Andel af strålingen, der rammer ribberne	-
$n_{rib,min}$	Minimal andel af strålingen, der rammer ribberne	-
P	Spænding	mV
p	Tryk	Pa
P_o	Tryk midt i hulrum	Pa
P_l	Tryk i top af hulrum	Pa
ΔP_l	Trykforskel mellem midt og top af hulrum	Pa
Pr	Prandtl's tal	-
q	Indre varmeproduktion pr. volumenenhed	W/m ³
Q	Varmestrøm fra en overflade til det fri	W
dq	Varmestrøm gennem et overfladeelement	W/m ²
Q_{12}	Varmestrøm mellem to overflader	W
q_a	Absorberet solstråling, der ledes til rummet (månedsmiddelværdi)	W/m ²
dq_{abs}	Absorberet stråling på overfladeelement	W/m ²
q_{abs}	Absorberet solstråling (månedsmiddelværdi)	W/m ²
Q_{abs}	Varmestrøm tilført et knudepunkt	W
q_o	Varmestrømstæthed gennem normalt isoleret ydervæg pga. temperaturforskel mellem rum og udeluft (månedsmiddelværdi)	W/m ²
q_{udb}	Udbyttet af en solvæg (månedsmiddelværdi)	W/m ²

q_v	Målt middelvarmestromstæthed fra solvæg til rum (månedsmiddelværdi)	W/m ²
q_y	Varmetab gennem en normalt isoleret ydervæg med hensyntagen til solindfald (månedsmiddelværdi)	W/m ²
r	Radius	m
R	Refleksionskoefficient for et helt lag	-
R	Gaskonstant for luft	J/kg K
R_i	Refleksionskoefficienten ved stråling fra den udvendige side af lag i	-
R_i'	Refleksionskoefficienten ved stråling fra den indvendige side af lag i	-
$R_{n,tot}$	Refleksion af de yderste n lag	-
S	Usikkerhed	Enhed som indices
T	Transmissionskoefficient gennem et helt lag med hensyntagen til refleksion og absorption mellem materialets overflader	-
T	Absolut temperatur i materiale	K
t	Temperatur	°C
\underline{T}	Søjlematrice indeholdende temperaturer i glasuld	°C
ΔT	Temperaturforskel mellem luft og overflade	K
T_O	Temperatur i fiktivt lag	K
T_O	Temperatur i hulrum	K
T_1	Temperatur af luft uden for hulrum	K
T_1	Yderste akkumulerende lag	(°C) K
T_1	Temperatur på overflade ved strålingsovergang	K
T_2	Akkumulerende lag	(°C) K
T_2	Temperatur på overflade med strålingsovergang	K

T_{ak}	Temperatur af akkumulerende lag nærmest overfladen	K
T_i	Transmissionskoefficienten for det i'te element	-
T_i	Temperatur i knudepunkt i	(°C) K
$T_{i,j}$	Temperatur i lag i til tidspunktet j	(°C) K
T_j	Temperatur i lag j	(°C) K
t_k	Temperatur i kontrolbox	°C
T_{kn}	Temperatur i knudepunkt	(°C) K
T_{luft}	Temperatur af luften	(°C) K
T_{mid}	Middeltemperatur af overflade og lufttemperatur	K
t_n	Toptransmissionen	-
T_{n+1}	Transmissionskoefficient for for n+1'te element	-
T_{omg}	Omgivelsernes middelstrålingstemperatur	(°C) K
T_{ov}	Overfladens temperatur	K
t_{ov}	Overfladens temperatur	°C
T_{rib}	Transmissionskoefficient for ribbe	-
T_u	Udelufttemperatur	K
t_u	"	°C
V	Vindhastighed i højden Z	m/s
V_o	Volumenstrøm	m ³ /s
v_o	Lufthastighed i hulrum	m/s
v_l	Lufthastighed i indløb	m/s
V_m	Vindhastighed i højden 10 m	m/s
x	Stedkoordinat	m
x	Strålingsvejlængde fra overflade	m
Δx	Lagtykkelse	m
x_l	Laggrænse i glasuld regnet fra udvendig overflade	m

Δx_1	Lagtykkelse i yderste lag i glasuld	m
x_2	Laggrænse i glasuld regnet fra udvendig overflade	m
x_i	Strålevejtlængde fra udvendig overflade til infinitesimalt element	m
dx	Strålevejtlængde gennem infinitesimalt element	m
ΔX_{\max}	Maksimal lagtykkelse ved $F_0 = 1/2$ og given sum af varmeovergange	m
ΔX_{\min}	Minimal lagtykkelse for givet F_0 tal og tidsskridt	m
Δx_n	Lagtykkelse af inderste lag i glasuld	m
y	Stedkoordinat	m
y	Spænding	mV
z	Højde i et felt i en dobbeltplade, hvorigennem strålingen rammer toppen af ribben	m
z	Højde over jordoverflade	m
z	Højde af hulrum	m
z	Stedkoordinat	m
z	Højdekoordinat i hulrum	m
z_0	Højdekoordinat for midte af hulrum	m
z_1	Højdekoordinat for top af hulrum	m

Græske bogstaver

α	Solhøjden	rad
α	Absorptionskoefficient	-
ϵ_h	Hemisfærisk emissionskoefficient	-
$\epsilon_{h,1}$	Hemisfærisk emissionskoefficient for overflade 1	-
$\epsilon_{h,2}$	Hemisfærisk emissionskoefficient for overflade 2	-
ϵ_n	Normalemissionskoefficienten	-
$\epsilon_{n,1}$	Normalemissionskoefficient for overflade 1	-
$\epsilon_{n,2}$	Normalemissionskoefficient for overflade 2	-
φ	Profilvinklen	rad
ϕ	Retningsvinkel	rad
γ	Væg-solazimutvinkel	rad
γ_s	Solazimutvinkel	rad
γ_v	Vægazimutvinkel	rad
λ	Varmeledningsevne	W/mK
λ	Bølgelængde	μm
λ_1	Varmeledningsevne i yderste lag	W/mK
λ_i	Varmeledningsevne for lag i	W/mK
μ	Cosinus til indfaldsvinklen	-
ν	Kinematisk viskositet	m^2/s
ω	Vinkelhastighed	rad/h
$\partial\omega$	Rumvinkel	sr
ρ	Massefylde	kg/m^3
ρ	Refleksionskoefficient for en overflade	-
ρ_0	Massefylde for luft i hulrum	kg/m^3
ρ_1	Massefylde for luft uden for hulrum	kg/m^3
ρ_j	Refleksionskoefficient for jordoverfladen	-

$\rho_{\#}$	Refleksionskoefficient for stråling polariseret parallelt med stråleretningen	-
ρ_{\perp}	Refleksionskoefficient for stråling polariseret vinkelret med stråleretningen	-
σ	Stefan Boltzmans konstant	W m ² K ⁻⁴
τ	Tiden	s
τ	Transmissionskoefficient	-
$\Delta\tau$	Tidsskridt	s
τ_0	Transmissionskoefficient yderst i materialet	-
τ_a	Transmissionskoefficient med hensyntagen til absorption	-
$\tau_{a,rib}$	Transmissionskoefficient med hensyntagen til absorption i ribber	-
τ_c	Tidskonstant	h
τ_i	Tidskonstant for i'te lag	h
$\tau_{i,res}$	Resulterende tidskonstant for lag i	h
τ_{max}	Maksimal tidskonstant	h
τ_r	Transmissionskoefficient med hensyntagen til refleksion	-
$\tau_{r,rib}$	Transmissionskoefficient med hensyn til refleksion i ribber	-
τ_{λ}	Transmissionskoefficient for bølgelængden λ	-
θ_b	Brydningsvinkel	rad
$\theta_{b,v}$	Brydningsvinkel ved passage af vandret overflade	rad
θ_i	Indfaldsvinkel	rad
$\theta_{i,v}$	Indfaldsvinkel for en vandret overflade	rad

5.4 SUMMARY

In this report, different types of passive solar systems are described in general (direct gain, solar wall, Trombé wall). The historical development of solar walls is briefly presented.

The theoretical formulae for heat transfer is described, including heat conduction, convection and radiation. Solar radiation and transmission formulae is shown. The theory is used for calculating the solar transmission for different materials. The system of equations for solving the heat transfer through the walls is developed.

A standard house is chosen and the energy consumption and number of hours with high temperatures are shown for different building models. The calculations are based on half hour steps using the Danish Reference Year. These house models are provided with solar walls, and the performance is described. The types of cover, storage and thickness of the solar wall are changed. The sensitivity analysis shows that it is possible to obtain a net energy gain of 100-150 kWh/m² from solar walls at Danish climatic conditions with an acceptable indoor climate maintained.

For the purpose of validating the simulation program of the solar wall an experiment is set up. Different solar walls are built into test cells. One of the solar walls uses movable insulation of expanded polystyrene beads. A double acrylic plate is used as cover. The regulation and transportation system is reported. The other solar wall has a fixed insulation of white glasswool. A third and a fourth type have a selective absorber surface, and a single cover of glass. In the fourth type, the cavity at the outer side of the storage is filled with honeycomb.

The solar wall systems have been provided with measuring equipment supplying information about temperatures, heat flow and solar radiation. The performance of the walls, for some months, is reported.

The accuracy of the measurements is estimated. The measured data are compared with results from the simulation model, and a good agreement between measurements and calculations is achieved. It is concluded that a simulation model which provides realistic values of the performance of solar walls has been developed and is applicable for optimisation and dimensioning of solar wall systems.

5.5 RESUMÉ

I denne rapport er forskellige typer af passive solvarmesystemer beskrevet generelt. (Solindfald gennem vinduer, solvægge, Trombé vægge). Den historiske udvikling af solvægge er skitseret.

De teoretiske formler for varmeovergang er beskrevet, omfattende varmeledning, konvektion og stråling. Formler for solstråling og transmission er angivet. Teorien er benyttet til at beregne transmission af solstråling for forskellige materialer. Et system af ligninger, der bestemmer varmetransmission gennem solvæggene er udviklet.

Et referencehus er valgt, og energiforbrug samt antallet af timer med høje temperaturer er bestemt for forskellige bygningsmodeller. Beregningerne er baseret på halvtimes tidskridt. Bygningsmodellerne er forsynet med solvægge, og udbyttet er beregnet med varierende udformning af dæklag, varmelager og tykkelse af solvæg. Følsomhedsanalysen viser, at det er muligt at opnå et udbytte på 100-150 kWh/m² af solvægge under danske klimaforhold med bibeholdelse af et acceptabelt indeklima.

For at kontrollere beregningsmodellen for solvæggen er der udført forsøg, hvor forskellige solvægge er bygget ind i en forsøgsbygning. I den ene af solvæggene benyttes mobil isolering af ekspanderede polystyrenkugler. En akryl-kanalplade er benyttet som dæklag. Styre- og transportsystemet er rapporteret. Den anden solvæg har en fast isolering af hvid glasuld. En tredje og fjerde type har en selektiv absorberoverflade og et enkelt lag glas som dæklag. I den fjerde type er hulrummet på ydersiden af varmelageret udfyldt med honeycomb.

Solvægssystemerne er forsynet med måleudstyr, der kan registrere temperaturer, varmestrømme og solstråling. Udbyttet af solvæggene i forskellige måleperioder er rapporteret. Der er foretaget usikkerhedsbestemmelse af de foretagne målinger. De

målte data er sammenlignet med resultater fra beregningsmodellen, og der er opnået god overensstemmelse mellem målinger og beregninger. Det konkluderes, at der er opbygget en beregningsmodel, som giver realistiske værdier for solvægges ydeevne, og som kan benyttes ved udvikling og dimensionering af solvægssystemer.

APPENDIX

A1. TEORI

I en solvæg forekommer der forskellige former for varmeovergang: Strålingsudveksling, varmeledning og konvektion. Her i appendix er først beskrevet den varmetransport i varmelagre, som foregår ved varmeledning. Dernæst gennemgås varmeovergang i luftspalter, som findes mellem dæklag og absorber. Endelig beskrives varmeovergangen ved den udvendige og indvendige overflade. Beskrivelsen er grundlaget for de anvendte edb-programmer.

A1.1 VARMELEDNING

I solvægge er varmeledning og varmeakkumulering en vigtig del af varmetransporten. I det følgende gennemgås varmeledningsligningen, en numerisk metode til løsning af denne samt en metode til at undgå numerisk ustabilitet ved metoden.

A1.1.1 Instationær varmeledning

Varmestrømme og temperaturer i et legeme varierer med stedet og tiden. Til beskrivelse af varmemstrømmen dq gennem en overflade med arealet dA gælder Fouriers varmeledningsligning.

$$dq = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) dA \quad (A1.1.1)$$

hvor λ er varmeledningstallet

$\frac{\partial T}{\partial x}$ er temperaturgradienten
vinkelret på overfladen

x er stedkoordinaten

Inden for byggeteknikken forekommer der tilfælde af flerdimensionale varmemstrømme.

Er materialet isotropt, og sker der en varmeproduktion inde i materialet, kan temperaturfeltet beskrives ved den instationære varmeledningsligning (40).

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + q \quad (\text{A1.1.2})$$

hvor ρ massefylden
 c_p varmekapacitet
 λ varmeledningsevnen
 T temperaturen
 x, y, z stedkoordinater
 q indre varmeproduktion
 pr. volumenenhed
 τ tiden

Det er ofte tilstrækkeligt kun at betragte det endimensionale tilfælde fx gennem en væg. Derved reduceres ligningen til

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q \quad (\text{A1.1.3})$$

Indføres temperaturledningstallet a :

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q}{\rho c_p} \quad (\text{A1.1.4})$$

$$\text{hvor } a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

Leddene $\frac{q}{\rho c_p}$ er et udtryk for hvilken temperaturstigning varmeproduktionen ville give, hvis varmeledningstallet var 0.

A1.1.2 Løsning af instationær varmeledningsligning

Til løsning af denne ligning kan i visse tilfælde findes analytiske løsningsmetoder. Disse er dog ret vanskelige at håndtere ved beregninger med varierende randbetingelser, som det er tilfældet ved simuleringer af et års vejrdato.

Af andre beregningsmetoder er det især de numeriske, der er generelt anvendelige.

Anvendes en central tilnærmelse til den instationære varmeledningsligning med netpunkter som skitseret på fig. A1.1.1, fås:

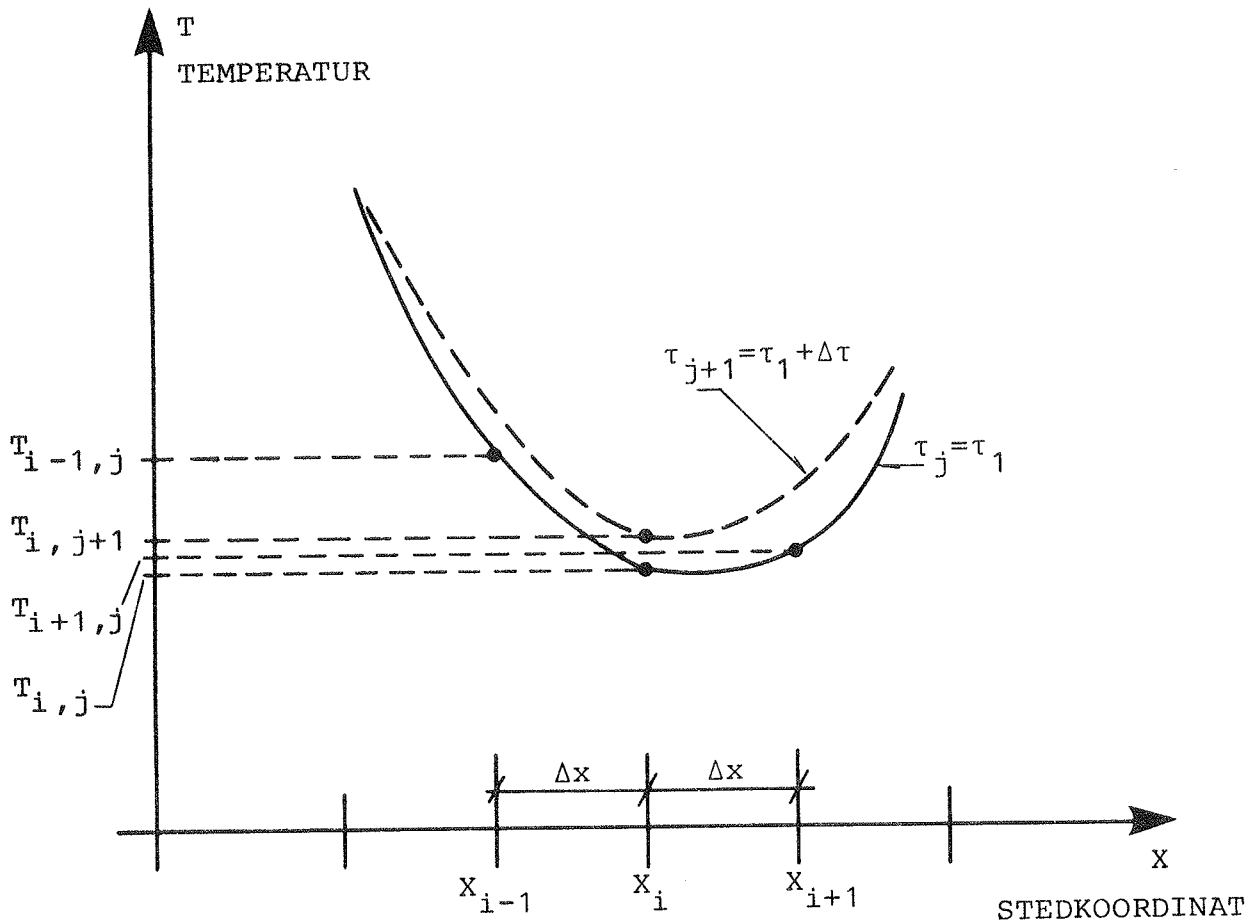


Fig. A1.1.1 Temperaturkurven i et materiale med tilhørende knudepunkter.

$$\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta\tau} = a \frac{\frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta x} + \frac{T_{i-1,j} - T_{i,j}}{\Delta x}}{\Delta x} + \frac{q}{\rho c_p}$$

⇔

$$T_{i,j+1} - T_{i,j} = a \frac{\Delta\tau}{(\Delta x)^2} (T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}) + \frac{q \cdot \Delta\tau}{\rho c_p}$$

⇔

$$T_{i,j+1} = Fo \left(T_{i+1,j} + \frac{1 - 2Fo}{Fo} T_{i,j} + T_{i-1,j} + \frac{q}{\lambda} (\Delta x)^2 \right)$$

(A1.1.5)

$$\text{hvor } Fo = a \frac{\Delta \tau}{(\Delta x)^2} \quad (A1.1.6)$$

Fo kaldes normalt for Fouriertallet.

En tilstrækkelig betingelse for at sikre stabilitet ved denne løsningsmåde er, at den "gamle" temperatur $T_{i,j}$ ikke indgår i beregningen af den nye temperatur med et negativt fortegn j :

$$1 - 2Fo \geq 0 \Rightarrow Fo \leq 1/2$$

Dette stabilitetskriterium gælder kun for knudepunkter omgivet af lag på hver side med tilsvarende knudepunkter.

Er laget til den ene side afgrænset af en adiabatisk overflade, dvs. uendelig godt isolerende lag, vil der i ligning (A1.1.5) gælde, at $T_{i+1,j} = T_{i,j}$

Forudsat at $q = 0$, gælder

$$T_{i,j+1} = Fo \cdot T_{i-1,j} + (1 - Fo) T_{i,j} \quad (A1.1.7)$$

For at være sikker på at beregningen af $T_{i,j+1}$ er numerisk stabil skal gælde at

$$1 - Fo \geq 0 \Rightarrow Fo \leq 1$$

Uligheden forudsætter, at de to lag, se fig. A1.1.2, har samme termiske egenskaber og tykkelse.

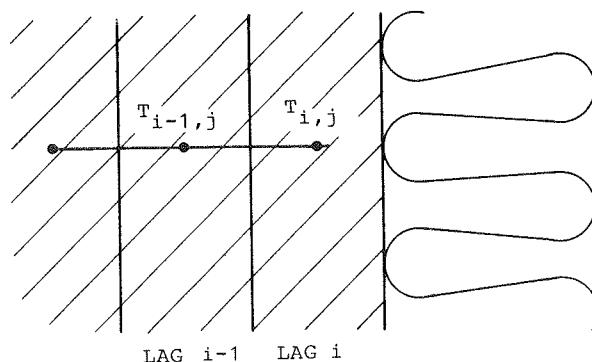


Fig. Al.1.2 Placering af lag op ad uendelig godt isolerende materiale.

Al.1.3 Randbetingelser

For at løse ligning (Al.1.5) er det nødvendigt at kende temperaturen ved starttidspunktet. Denne kan findes fra målinger, hvis det er sammenligning mellem beregningsmodel og målinger, som modellen skal bruges til. Ved anvendelse af modellen til beregninger på grundlag af klimadata kan starttemperaturen skønnes. Hvis dette kan medføre for store fejl, kan starttemperaturen findes ved iteration, fx ved at sluttemperaturen efter simulering af et års temperaturer kan benyttes som starttemperatur.

Til løsning af ligningen kræves endvidere kendskab til temperaturforløbet ved materialets overflader.

Er overfladetemperaturen T_{ov} kendt, kan den "nye" temperatur i yderste akkumulerende lag bestemmes af lign. (Al.1.5) ved at der indlægges et fiktivt lag med temperaturen T_o , der har samme egenskaber som de almindelige lag i væggen.

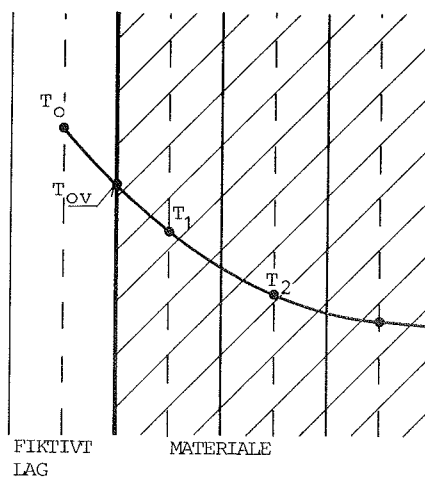


Fig. Al.1.3 Bestemmelse af det fiktive lags temperatur.

T_O bestemmes ved ekstrapolation ud fra T_{OV} og det yderste lags temperatur (fig. Al.1.3):

$$\begin{aligned} T_O &= T_1 + 2(T_{OV} - T_1) \\ &= 2T_{OV} - T_1 \end{aligned}$$

(Al.1.8)

Al.1.4 Opstilling af varmestrømsbalance for et knudepunkt

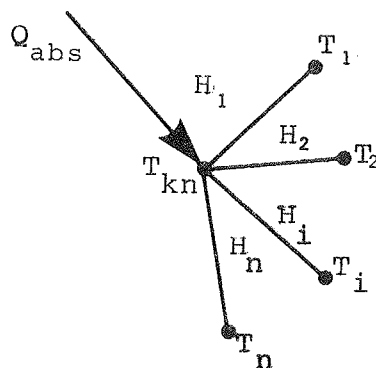


Fig. Al.1.4 Ligevægt for knudepunkt.

Et knudepunkt med temperaturen T_{kn} udveksler varme med n omgivende knudepunkter med temperaturerne T_i , hvor $i=1, n$ (fig. Al.1.4).

Varmeoverføringsevnen er af størrelsen H_i , $i = 1, n$. Endvidere tænkes knuden tilført varme, Q_{abs} , uafhængigt af knudepunkts-temperaturen, fx solstråling.

Opstilles en ligning til bestemmelse af temperaturligevægt for knudepunktet, fås når dette er uden varmekapacitet:

$$\sum_{i=1}^n \left(H_i (T_i - T_{kn}) \right) + Q_{abs} = 0$$

↔

$$T_{kn} = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i \cdot T_i) + Q_{abs}}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (A1.1.9)$$

A1.1.5 Varmebalance for en overflade

I det generelle tilfælde vil en overflade være påvirket af konvektion og stråling. Disse varmeovergange kan normalt bestemmes ud fra varmeovergangstal ved konvektion (h_{konv}) og stråling (h_{str}), der angiver varmestrømmen pr. arealenhed divideret med temperaturforskellen mellem overfladen og henholdsvis luften (T_{luft}) og omgivelsernes middelstrålingstemperatur (T_{omg}).

Det antages, at der også absorberes solstråling (q_{abs}) på overfladen.

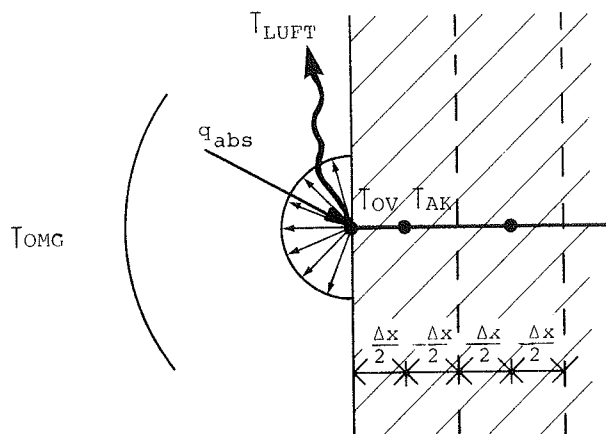


Fig. A1.1.5 Varmeovergang ved overflade.

Overfladen udveksler desuden varme med materialet inde i legemet. Dette er regningsmæssigt opdelt i lag. I hvert af disse lag samles varmekapaciteten i midten af det enkelte lag. Størrelsen af varmeudvekslingen mellem det yderste af disse lag og overfladen kan pr. grads temperaturforskel sættes til h_{ledn} .

$$h_{ledn} = \frac{2\lambda}{\Delta x} \quad (A1.1.10)$$

Benyttes lign. (A1.1.9), fås at temperaturligevægt for overfladen kan bestemmes af

$$T_{ov} = \frac{h_{str} \cdot T_{omg} + h_{konv} \cdot T_{luft} + h_{ledn} \cdot T_{ak} + q_{abs}}{h_{str} + h_{konv} + h_{ledn}} \quad (A1.1.11)$$

A1.1.6 Stabilitet ved beregning af temperatur i akkumulerende lag ved overflade

Er der mindst to akkumulerende lag, kan temperaturen af det yderste lag bestemmes af:

$$T_{1,j+1} = Fo T_{0,j} + (1 - 2Fo) T_{1,j} + Fo T_{2,j}$$

idet der forudsættes, at der ikke sker en indre varmeproduktion i knudepunktet. Indsættes (A1.1.8), fås:

$$\begin{aligned} T_{1,j+1} &= Fo(2T_{ov,j} - T_{1,j}) + (1 - 2Fo) T_{1,j} + Fo T_{2,j} \\ &= 2Fo T_{ov,j} + (1 - 3Fo) T_{1,j} + Fo T_{2,j} \end{aligned}$$

Ligning (A1.1.11) giver:

$$\begin{aligned}
T_{1,j+1} &= \frac{2Fo (h_{str} \cdot T_{omg} + h_{konv} \cdot T_{luft} + h_{ledn} \cdot T_{1,j} + q_{abs})}{h_{str} + h_{konv} + h_{ledn}} \\
&+ (1 - 3Fo) T_{1,j} + Fo T_{2,j} \\
&= \frac{2Fo (h_{str} \cdot T_{omg} + h_{konv} \cdot T_{luft} + q_{abs})}{h_{str} + h_{konv} + h_{ledn}} \\
&+ \left(\frac{2Fo \cdot h_{ledn}}{h_{str} + h_{konv} + h_{ledn}} + (1 - 3Fo) \right) T_{1,j} + Fo \cdot T_{2,j}
\end{aligned}
\tag{A1.1.12}$$

En tilstrækkelig betingelse for at beregningen er stabil, er at koefficienten til $T_{1,j}$ er større eller lig nul. Dette er i hvert fald tilfældet når:

$$(1/3 - Fo) \geq 0 \Rightarrow Fo \leq 1/3.$$

Mere korrekt skal gælde at:

$$\begin{aligned}
1 - Fo \left(3 - \frac{2 h_{ledn}}{h_{str} + h_{konv} + h_{ledn}} \right) &\geq 0 \\
\Leftrightarrow \\
Fo &\leq \frac{1}{\left(3 - \frac{2 \cdot h_{ledn}}{h_{str} + h_{konv} + h_{ledn}} \right)}
\end{aligned}
\tag{A1.1.13}$$

Antages at alle lagene har samme tykkelse og at der er mindst 3 akkumulerende lag, skal gælde at $Fo \leq 1/2$. Det vil derfor være interessant at vide, hvornår denne betingelse er tilstrækkelig:

$$\frac{1}{\left(3 - \frac{2 \cdot h_{ledn}}{h_{str} + h_{konv} + h_{ledn}}\right)} \geq \frac{1}{2}$$

⇔

$$h_{ledn} \geq h_{str} + h_{konv}$$

(A1.1.14)

Med andre ord er betingelsen $Fo \leq 1/2$ tilstrækkelig, når varmeoverføringstallet mellem to midtpunkter i to tilgrænsende lag er større end summen af konvektions- og strålingsvarmeoverføringstallet.

Af lign. (A1.1.13) fås, at med 2 akkumulerende lag vil der også være muligheder for stabilitet i intervallet:

$1/3 \leq Fo \leq 1$ afhængig af randbetingelserne.

Ved kun et akkumulerende lag inde i materialet fås, at den nye temperatur af det akkumulerende lag kan beskrives som:

$$\begin{aligned} T_{1,j+1} &= Fo \cdot T_{0,j} + (1 - Fo) T_{1,j} \\ &= 2Fo \cdot T_{ov,j} + (1 - 2Fo) T_{1,j} \\ &= \frac{2Fo (h_{str} \cdot T_{omg} + h_{konv} \cdot T_{luft} + h_{ledn} \cdot T_{1,j} + q_{abs})}{h_{str} + h_{konv} + h_{ledn}} \\ &\quad + (1 - 2Fo) T_{1,j} \\ &= \left(1 - 2Fo \left(1 - \frac{h_{ledn}}{h_{str} + h_{konv} + h_{ledn}}\right)\right) T_{1,j} \\ &\quad + 2Fo \left(\frac{h_{str} \cdot T_{omg} + h_{konv} \cdot T_{luft} + q_{abs}}{h_{str} + h_{konv} + h_{ledn}}\right) \end{aligned} \tag{A1.1.15}$$

For at være sikker på numerisk stabilitet skal gælde:

$$\left(1 - 2Fo \left(1 - \frac{h_{ledn}}{h_{str} + h_{konv} + h_{ledn}}\right)\right) \geq 0$$

Dette medfører:

$$Fo \leq \frac{1}{2 \left(1 - \frac{h_{ledn}}{h_{str} + h_{konv} + h_{ledn}} \right)} \quad (A1.1.16)$$

Det ses, at uligheden altid er opfyldt, når $Fo \leq 1/2$.

Rummodellen i beregningsprogrammet BA4 (26) har netop et akkumulerende lag. Fouriertallet ved denne beregning kan findes af:

$$Fo = \frac{\Delta\tau}{(\Delta x)^2} a \approx \frac{\Delta\tau}{\Sigma (A \cdot \Delta x \cdot \rho \cdot c_p)} \cdot \left(\frac{\lambda}{\Delta x} A \right) = \frac{\Delta\tau \cdot (H_{ak}/2)}{K_{tot}} = \frac{\Delta\tau}{\tau_c}$$

Hvor H_{ak} er varmeoverføringsevne fra overflade af væg til akkumulerende lag

K_{tot} Den samlede varmekapacitet

$\Delta\tau$ Tidsskridtet, normalt 0,5 h

τ_c Tidskonstant ($= K_{tot}/(H_{ak}/2)$)

Det er ikke altid tilfældet, at $Fo \leq 1/2$ ved beregninger med BA4. Da H_{ak} svarer til h_{ledn} i lign. (A1.1.16), og da varmeovergangen ved ledning ofte er betydelig i forhold til de øvrige varmeovergangstal, kan der som regel tillades store værdier af Fouriertallet.

I BA4 rummodellen benyttes som standard tidsskridtet 1/2 time. Er tidskonstanten mindre end 1 time, kræves nærmere eftervisning af ulighed (A1.1.16) for at være sikker på numerisk stabilitet.

A1.1.7 Minimale lagtykkelser

Antages et isotropt materiale, der er opdelt i mindst 3 lag med samme tykkelse, kan den minimale lagtykkelse af hensyn til nu-

merisk stabilitet bestemmes. Er den øvre grænse på Fouriertallet Fo_{\max} :

$$Fo = \frac{\Delta\tau}{(\Delta x)^2} \cdot a \leq Fo_{\max}$$

$$\Rightarrow \Delta x \geq \sqrt{\frac{\Delta\tau \cdot a}{Fo_{\max}}} = \Delta x_{\min} \quad (Al.1.17)$$

Benyttes de i fig. Al.1.6 angivne data for byggematerialer, findes med maksimale Fouriertal på henholdsvis 1/2 og 1/3 de i fig. Al.1.7 viste minimale lagtykkelser (Δx_{\min}). Ved $Fo_{\max} = 1/2$ er begrænsningen på varmeovergangstallet fra knudepunkt til overflade ifølge (Al.1.10) og (Al.1.14)

$$h_{\text{ledn}} = \frac{2\lambda}{\Delta x} \geq h_{\text{konv}} + h_{\text{str}}$$

$$\Rightarrow \Delta x \leq \frac{2 \cdot \lambda}{h_{\text{konv}} + h_{\text{str}}} = \Delta x_{\max} \quad (Al.1.18)$$

Den maksimale lagtykkelse (Δx_{\max}) ifølge denne ulighed er for $Fo_{\max} = 1/2$ vist i fig. Al.1.8.

De tilladelige lagtykkelser ifølge ligning (Al.1.17) og (Al.1.18) er indtegnet på fig. Al.1.9 for tre materialer.

Materialer	ρ	c_p	ρc_p	λ	$a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$
	kg/m ³	J/kg K	$\frac{10^{-3}}{J/m^3 K}$	W/m K	$10^6 \cdot m^2/s$
Vand	1000	4180	4180		
Støbejern	7200	500	3600	47,0	13,1
Hæmatit (jernoxyd)	4400	~500	2200	8,1	3,7
Granit	2700	830	2240	3,5	1,6
Marmor	2740	800	2190	2,8	1,28
Jernbeton	2300	880	2020	1,6	0,79
Kalksandsten	1800	~800	1440	0,95	0,66
Tegn tung, massiv	1800	800	1440	0,68	0,47
Tegl let, mangelhul	1050	800	840	0,36	0,43
Porebeton (tør)	650	~880	572	0,20	0,35
Fyrretræ	450	2300	1035	0,12	0,16

Fig. Al.1.6 Termiske data for forskellige materialer. (30), (41).

Materiale	Fo_{max}	a	Δx_{min} lagtykkelse i m		
			$\Delta\tau =$ 10 sek	$\Delta\tau =$ 300 sek	$\Delta\tau =$ 7200 sek
		m^2/s			
Beton	1/2	$0,791 \cdot 10^{-6}$	$3,98 \cdot 10^{-3}$	$21,8 \cdot 10^{-3}$	$107 \cdot 10^{-3}$
Kalksandsten		$0,660 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-3}$	$19,9 \cdot 10^{-3}$	$97,5 \cdot 10^{-3}$
Tegl, tung, massiv		$0,472 \cdot 10^{-6}$	$3,07 \cdot 10^{-3}$	$16,8 \cdot 10^{-3}$	$82 \cdot 10^{-3}$
Tegl, let, mangelhul		$0,429 \cdot 10^{-6}$	$2,93 \cdot 10^{-3}$	$16,0 \cdot 10^{-3}$	$78,6 \cdot 10^{-3}$
Porebeton		$0,350 \cdot 10^{-6}$	$2,65 \cdot 10^{-3}$	$14,5 \cdot 10^{-3}$	$71,0 \cdot 10^{-3}$
Fyrretræ		$0,116 \cdot 10^{-6}$	$1,52 \cdot 10^{-3}$	$8,34 \cdot 10^{-3}$	$40,9 \cdot 10^{-3}$
Beton	1/3	$0,791 \cdot 10^{-6}$	$4,87 \cdot 10^{-3}$	$26,7 \cdot 10^{-3}$	$131 \cdot 10^{-3}$
Kalksandsten		$0,660 \cdot 10^{-6}$	$4,45 \cdot 10^{-3}$	$24,4 \cdot 10^{-3}$	$119 \cdot 10^{-3}$
Tegl, tung, massiv		$0,472 \cdot 10^{-6}$	$3,76 \cdot 10^{-3}$	$20,6 \cdot 10^{-3}$	$101 \cdot 10^{-3}$
Tegl, let, mangelhul		$0,429 \cdot 10^{-6}$	$3,59 \cdot 10^{-3}$	$19,6 \cdot 10^{-3}$	$96,3 \cdot 10^{-3}$
Porebeton		$0,350 \cdot 10^{-6}$	$3,24 \cdot 10^{-3}$	$17,7 \cdot 10^{-3}$	$86,9 \cdot 10^{-3}$
Fyrretræ		$0,116 \cdot 10^{-6}$	$1,87 \cdot 10^{-3}$	$10,2 \cdot 10^{-3}$	$50,1 \cdot 10^{-3}$

Fig. A1.1.7 Minimal lagtykkelse (Δx_{min}) ved givet Fourier-tal Fo_{max} og tidsskridt $\Delta\tau$.

Materiale	λ	Maksimal sum af varmeovergang ved konvektion og stråling		
		$\Sigma h_{max} = 10$	$\Sigma h_{max} = 25$	$\Sigma h_{max} = 50$
	$W/m \cdot K$	Δx_{max} (m)		
Beton	1,6	$320 \cdot 10^{-3}$	$128 \cdot 10^{-3}$	$64 \cdot 10^{-3}$
Kalksandsten	0,95	$190 \cdot 10^{-3}$	$76 \cdot 10^{-3}$	$38 \cdot 10^{-3}$
Tegl, tung massiv	0,68	$136 \cdot 10^{-3}$	$54,4 \cdot 10^{-3}$	$27,2 \cdot 10^{-3}$
Tegl, let, mangelhul	0,36	$72 \cdot 10^{-3}$	$28,8 \cdot 10^{-3}$	$14,4 \cdot 10^{-3}$
Porebeton	0,20	$40 \cdot 10^{-3}$	$16,0 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$
Træ	0,12	$24 \cdot 10^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$

Fig. A1.1.8 Maksimal lagtykkelse Δx_{max} ved given maksimal sum af varmeovergangstal i W/m^2K , forudsat Fourier-tal på 1/2.

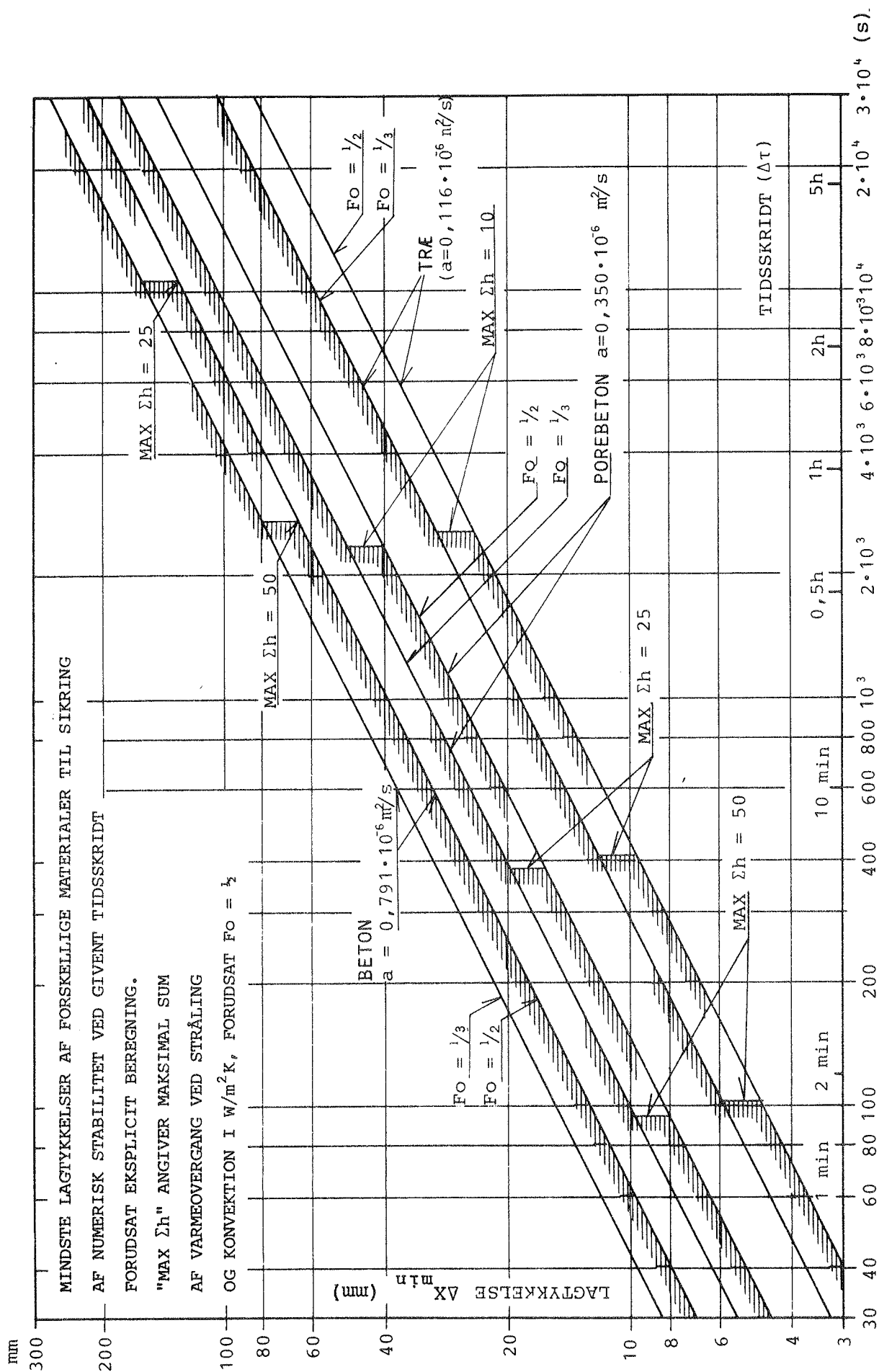


Fig. A1.1.9

Al.1.8 Sammenfattende om stabilitet

Ved et isotropt materiale, opdelt i lige tykke lag, vil en eksPLICIT beregning altid være stabil med Fouriertallet $Fo \leq 1/3$.

Er der 3 eller flere lag, vil der kunne opnås stabilitet i intervallet: $1/3 \leq Fo \leq 1/2$ i afhængighed af varmeovergangen ved overfladen.

Kendes den maksimale sum af varmeovergangstal, vil ulighed (Al.1.14) og evt. fig. Al.1.7 og fig. Al.1.8 give mulighed for at vise, om lagtykkelsen er på den sikre side. Er dette ikke tilfældet, men $1/3 \leq Fo \leq 1/2$, vil ulighed (Al.1.13) kunne vise, om der alligevel er numerisk stabilitet.

Ved 2 lag vil der i afhængighed af varmeovergangstallet kunne anvendes Fouriertal op til 1, forudsat at ulighed (Al.1.16) er opfyldt.

Ved 1 akkumulerende lag vil der altid være numerisk stabilitet, når $Fo \leq 1/2$. Er dette ikke tilfældet, kan numerisk stabilitet eftervises af ulighed (Al.1.16).

Ved hjælp af fig. Al.1.8 og Al.1.9 er det muligt, at man for et givet materiale hurtigt kan danne sig et indtryk af, om man er på sikker grund, eller om en nærmere undersøgelse er påkrævet.

Al.2 VARMEOVERGANG I EN LUFTSPALTE

I solvægge indgår luftspalter som et element, der både er varmeisolerende og gennemskinneligt for solstråling. Varmeovergangen i en spalte kan opdeles i stråling, ledning, konvektion og tab på grund af infiltration.

Al.2.1 Varmeovergang ved konvektion og ledning i en luftspalte

Varmeovergangstallet ved konvektion og ledning mellem to plan-parallele overflader med stor udstrækning i forhold til afstanden mellem overfladerne kan bestemmes af udtrykket:

$$h_{\text{konv}} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{L} \quad (\text{Al.2.1})$$

hvor λ er luftens varmeledningsevne
 L er afstanden mellem overfladerne.
 Nu er Nusselt-tallet

Fra referencerne (42),(43),(44) kan følgende udtryk benyttes til at finde Nusselt-tallet:

$$\text{Nu} = 1 + \frac{m \cdot \text{Ra}^r}{\text{Ra} + n} \quad (\text{Al.2.2})$$

Rayleigh tallet er bestemt ved: $\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr}$. For et hulrum med lodrette sider kan konstanterne sættes til:

$$\begin{aligned} m &= 0,024 \\ r &= 1,39 \\ n &= 1,01 \cdot 10^4 \end{aligned}$$

Det forudsættes, at hulrummet er lukket, og at udstrækningen er stor i forhold til tykkelsen. Endvidere forudsættes, at $\text{Ra} < 10^8$.

Grashofs tal kan findes af:

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \Delta T \cdot L^3}{T_{\text{mid}} \cdot \nu^2} \quad (\text{Al.2.3})$$

Her er g	tyngdeaccelerationen
ΔT	temperaturforskellen mellem luft og overflade
T_{mid}	den absolutte middeltemperatur af overflade og luft
L	karakteristisk længde
ν	kinematisk viskositet

Ved regressionsanalyse er følgende udtryk for Prandtl-tallet for luft fundet med den absolutte lufttemperatur som variabel:

$$\text{Pr} = 0,742 - a \cdot T_{\text{mid}}$$

hvor $a = 0,0001 \text{ K}^{-1}$ (A1.2.4)

Endvidere er den kinematiske viskositet for luft fundet til at være:

$$\nu = a \cdot T_{\text{mid}} - b$$

hvor $a = 0,0976 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s K}$
 $b = 13,34 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (A1.2.5)

For at sammenligne den anvendte formel med andre undersøgelser er fra ref. (45) og (46) optegnet kurver, der viser Nu-tallet som funktion af Ra-tallet (fig. A1.2.1). Ved solvægge med en afstand mellem glasset på 10-15 cm vil Ra-tallet ofte ligge mellem $5 \cdot 10^6$ og $2 \cdot 10^7$. Det er desværre et område, der er beskeden belyst, idet de udførte forsøg, som formlerne er baseret på, hovedsagelig er udført ved spalteaafstande mindre end 10 cm. Kurven viser forskelle mellem den konvektive varmeovergang på ca. 15% mellem de største og mindste værdier for et givet Rayleigh tal.

A1.2.2 Varmetab fra et hulrum på grund af termisk opdrift

For at bestemme luftskiftet i hulrummet foran solvæggen med mobil isolering er her gennemgået en metode til beregning af luftskiftet på grund af termisk opdrift.

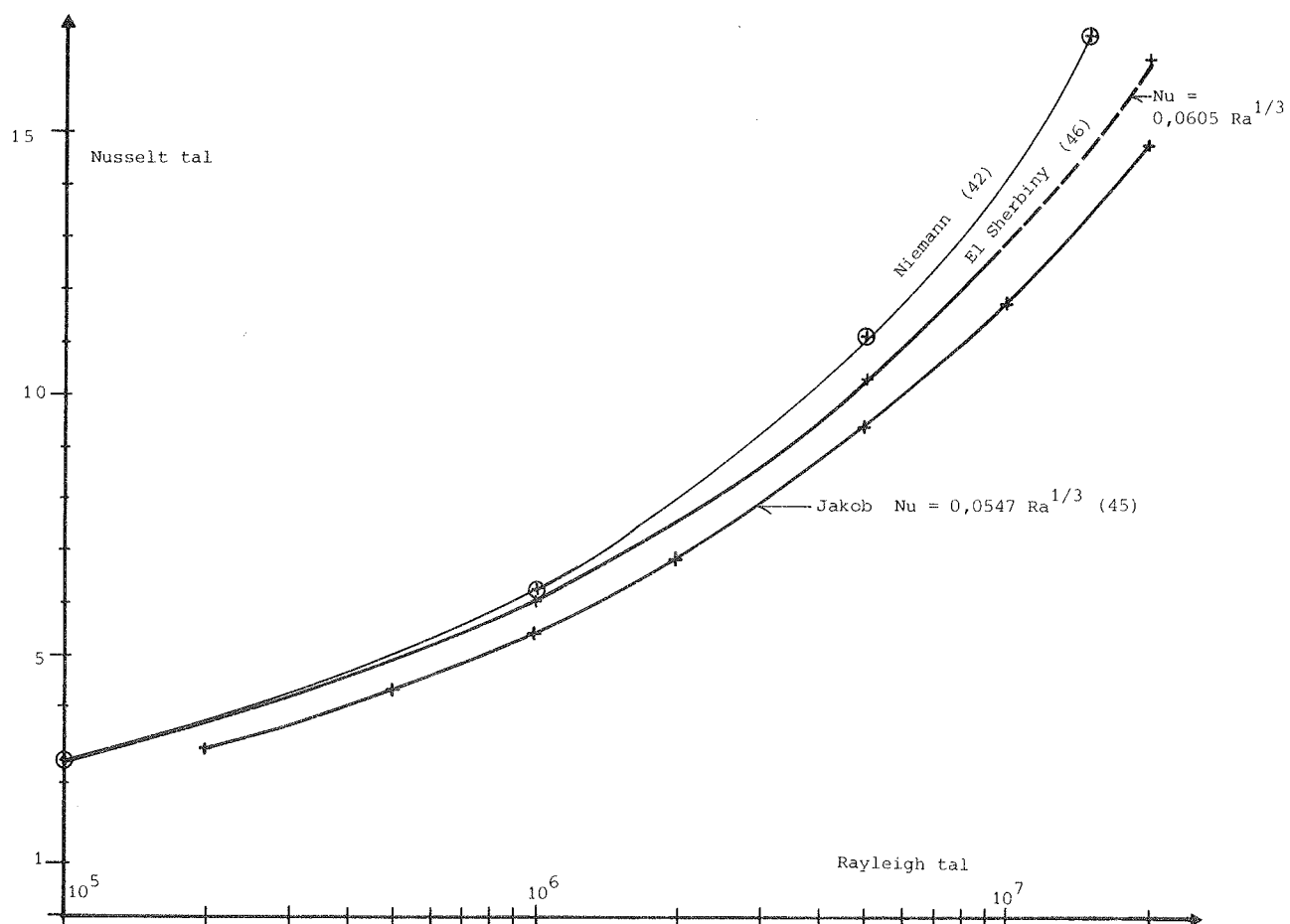


Fig. A1.2.1 Varmeovergang i en luftspalte. Nu-tallet som funktion af Ra-tallet (42), (45), (46). Forholdet mellem højde og bredde af spalten er 13.

I et lodret hulrum med en lufttemperatur forskellig fra den omgivende luft vil der gennem åbninger ske en ventilering af hulrummet forårsaget af forskelle i luftens massefylde. Til bestemmelse af luftskiftet i hulrummet kan Bernoullis sætning (47) benyttes, hvis der gøres visse forudsætninger.

Luftens sammentrykkelighed ved trykændringer ses der bort fra. Massefylden er derved uafhængig af højden, men afhængig af temperaturen. I hulrummet antages luften at have ensartet temperatur lig med middelloverfladetemperaturen. Forudsættes åbningerne foroven og forneden at være små i forhold til hulrummets vandrette tværsnitsareal, kan tryktabene tillades reduceret til indløbs- og udløbstab. Med de gjorte forudsætninger kan massefylden i hulrummet sættes konstant lig ρ_0 og udvendigt til ρ_1 (fig. A1.2.2).

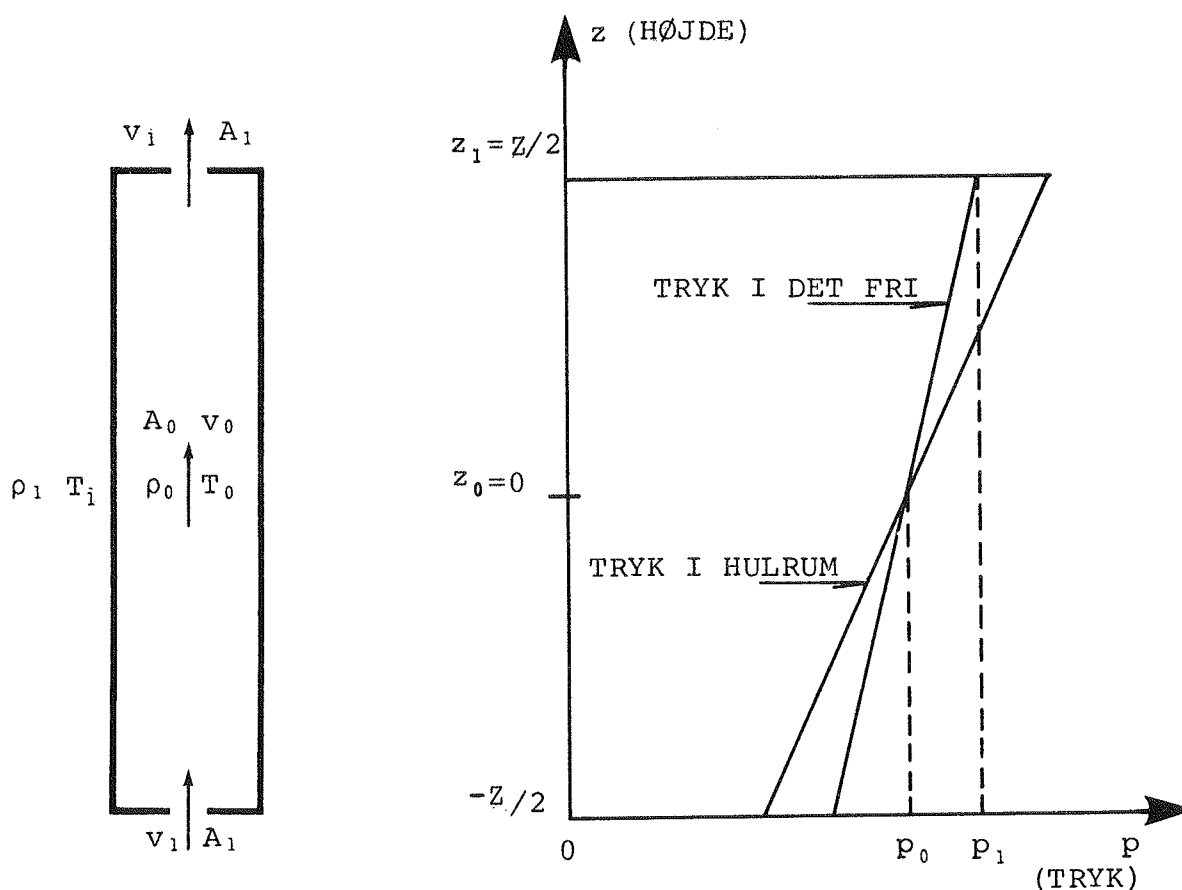


Fig. A1.2.2 Skematisk tegning af hulrum og trykfordeling i hulrum.

På fig. A1.2.2 er trykfordelingen i hulrummet skitseret. Er der kun åbninger i top og bund i hulrummet, kan trykket i hulrummet antages at variere lineært med højden. Med lige store åbningsarealer A_1 i top og bund fås at overtrykket over atmosfærelufttrykket i toppen af hulrummet vil være lige så stort som undertrykket i bunden af hulrummet.

Midten af hulrummet vil have samme tryk som i det fri i samme højde (p_0). Bernoullis ligning kan med disse forudsætninger opstilles for et snit midt i hulrummet og i en af åbningerne:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho_0 v_1^2 + \rho_0 g z_1 = p_0 + \frac{1}{2} \rho_0 v_0^2 + \rho_0 g z_0 \quad (\text{A1.2.6})$$

hvor p_1 er trykket ved øverste åbning, v_1 er lufthastigheden i det kontraherede tværsnit. v_0 er lufthastigheden midt i hulrummet. Denne kan med god tilnærmelse sættes til 0. Ved hjælp af fig. A1.2.2 fås:

$$p_1 = p_0 + \rho_1 g (z_0 - z_1) = p_0 - \rho_1 g z / 2 \quad (\text{A1.2.7})$$

Hastigheden i det kontraherede tværsnit kan dermed beregnes til

$$v_1 = \sqrt{\frac{|\rho_1 - \rho_0| g z}{\rho_0}} \quad (\text{A1.2.8})$$

Benyttes kontinuitetsligningen for strømmingen gennem hulrummet, fås:

$$v_0 A_0 = v_1 C_1 A_1 \quad (\text{A1.2.9})$$

hvor

A_0 er tværsnitsarealet i hulrummet

A_1 er åbningernes tværsnitsareal

C_1 er kontraktionskoefficienten

Dermed er volumenstrømmen

$$\begin{aligned} V_0 &= v_0 A_0 = v_1 C_1 A_1 \\ &= C_1 A_1 \sqrt{\left| \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0} \right| g \cdot z} \\ &= C_1 A_1 \sqrt{|T_0/T_1 - 1| g \cdot z} \end{aligned}$$

(A1.2.10)

idet:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (\text{A1.2.11})$$

hvor R er gaskonstanten for atmosfærisk luft. Formel (A1.2.10) er i overensstemmelse med ref. (48) og (49).

Ifølge forudsætningerne er lufttemperaturen lig middeltemperaturen af overfladerne. Varmeovergangen for hver af overfladerne i hulrummet:

$$\begin{aligned} H_{inf} &= \frac{1}{2} \rho_0 \cdot c_p \cdot V_0 \\ &= \frac{1}{2} \rho_0 \cdot c_p \cdot C_1 \cdot A_1 \sqrt{|T_0 - T_1| \cdot g \cdot z / T_1} \end{aligned} \quad (\text{A1.2.12})$$

- V_O Volumenstrømmen (m^3/s)
- c_p Varmefylde af atmosfærisk luft (1009 J/kg K)
- C_1 Kontraktionskoefficient sættes til 0,8 (-)
- A_1 Middelværdi af åbningsareal i top og bund
- T_O Absolut temperatur i hulrum, her benyttes middeltemperaturen af de to overfladers temperatur (K)
- T_1 Absolut temperatur af luft uden for hulrum, normalt udelufttemperaturen (K)
- g Tyngdeaccelerationen ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- Z Hulrummets højde (m)

Metoden forudsætter, at tryktabene sker i indløbs- og udløbsåbningerne, og dermed at åbningernes areal er lille i forhold til tværsnitsarealet i hulrummet. Er dette ikke tilfældet, er det nødvendigt at tage hensyn til tryktabet i hulrummet, se ref. (50) og (51).

Al.2.3 Varmeovergang ved stråling i et hulrum

Mellem overfladerne med forskellig temperatur overføres varme ved mørk varmestråling. Der forudsættes et lukket hulrum som vist på fig. Al.2.3 med to områder, der hver har en ensartet temperaturfordeling. Strålingsudvekslingens størrelse fra overflade 1 til 2 kan bestemmes af (50):

$$Q_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{(1-\epsilon_{h,1})/(\epsilon_{h,1}A_1) + 1/(A_1F_{12}) + (1-\epsilon_{h,2})/(\epsilon_{h,2}A_2)} \quad (\text{Al.2.13})$$

hvor T_1 og T_2 er de to overfladers temperatur

$\epsilon_{h,1}$ og $\epsilon_{h,2}$ Hemisfæriske emissionskoefficienter

A_1 og A_2 Arealerne

F_{12} Vinkelforholdet fra flade 1 til 2

σ Stefan/Boltzmanns konstant

Stefan/Boltzmanns konstant er sat lig $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$. Denne værdi er teoretisk bestemt (52). Stefan/Boltzmanns konstant kan også findes eksperimentelt, men her er bestemt en værdi, der er ca. 1% større.

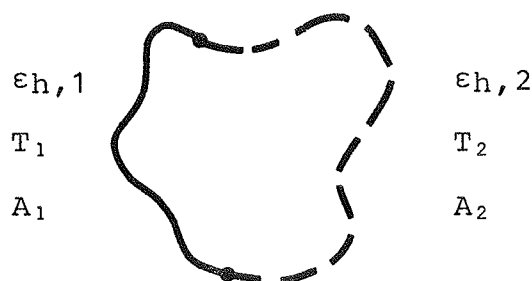


Fig. A1.2.3 To overflader i et lukket hulrum. Skematisk tegning af forudsætninger for formel (A1.2.13).

Forudsættes de to overflader at være siderne i en spalte med uendeligt store overfladearealer er:

$$A = A_1 = A_2 \quad \text{og} \quad F_{12} = 1$$

Varmeovergangstallet ved stråling kan dermed bestemmes af:

$$h_{\text{str}} = \frac{Q_{12}}{A (T_1 - T_2)} = \frac{\sigma (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2)}{1/\epsilon_{h,1} + 1/\epsilon_{h,2} - 1} \quad (\text{A1.2.14})$$

Ved beregning af solvægge (kapitel 2) anvendes emissionskoefficienterne 0,90 for acryl og 0,95 for maling.

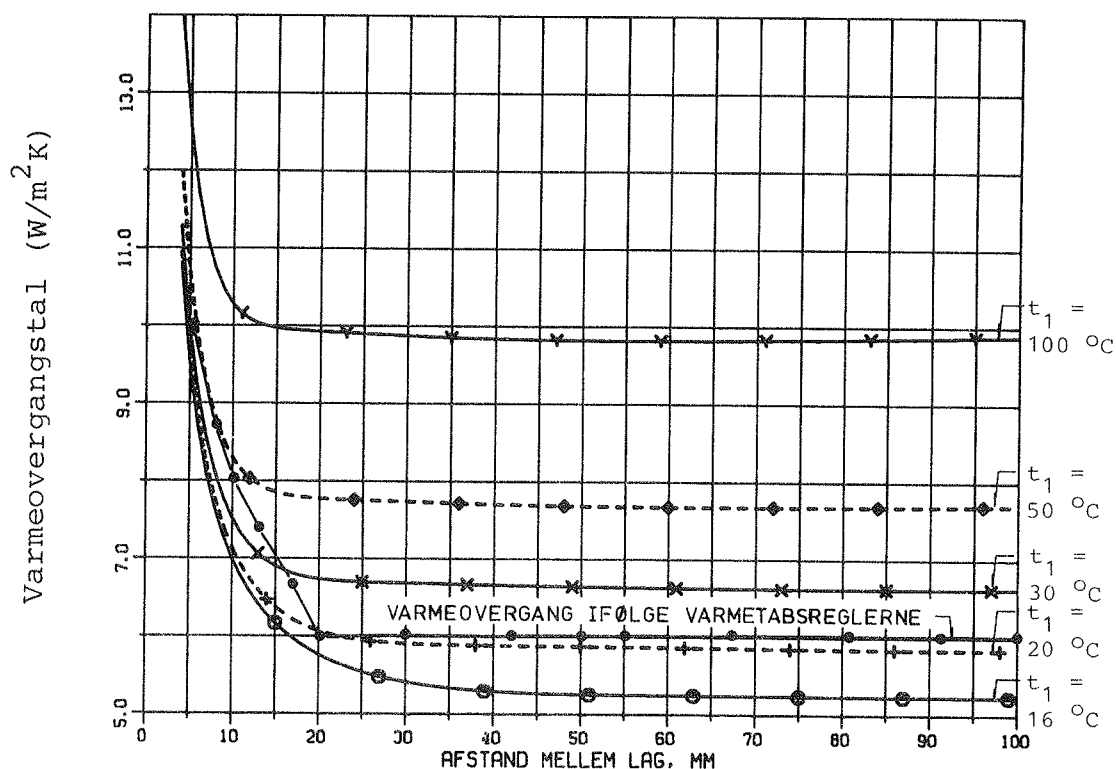


Fig. Al.2.4 Varmeovergangstallet mellem to lodrette planparallelle overflader med emissionskoefficienten $\epsilon_h = 0,95$. Overfladernes temperaturer er $t_2 = 15^\circ\text{C}$ og t_1 som vist.

For to overflader med emissionskoefficienter på 0,95 er på fig. Al.2.4 vist varmetransmissionskoefficienten ved ledning, konvektion og stråling i en spalte som funktion af spaltebredden (lign. (Al.2.1) og (Al.2.14)). Den ene overflades temperatur er fastholdt på 15°C . Af figuren ses, at varmetransmissionskoefficienten øges væsentligt ved en forøgelse af temperaturforskellen. Endvidere ses en formindskelse af varmeovergangen ved at øge spaltebredden indtil en vis størrelse. Forøgelse af spaltebredden ud over dette niveau medfører kun små ændringer i varmeovergangen. Dette niveau afhænger af overfladetemperaturerne og ligger for de viste kurver mellem ca. 15 og 30 mm.

Al.3 VARMEOVERGANG VED EN FRI OVERFLADE

En fri overflade udveksler varme ved konvektion og stråling. I det følgende afsnit behandles forholdene ved udvendige overflader, mens det efterfølgende afsnit behandler den indvendige overflade.

Al.3.1 Udvendig overflade

Varmeovergangen ved en udvendig overflade er sammensat af et bidrag, der bestemmes af konvektion til udeluften, og et der bestemmes af strålingsudveksling med himlen og terrænet. Strålingsudvekslingen foregår både ved langbølget temperaturstråling og ved kortbølget solstråling. I dette afsnit er den langbølgede strålingsudveksling behandlet, mens solstråling er behandlet i afsnittene Al.4-Al.7.

Den konvektive varmeovergang er afhængig af vindhastigheden. Vindhastigheden er afhængig af bl.a. læforhold og af overfladens højde over terrænet.

De fleste meteorologiske målestationer måler vindhastigheden. Målingerne foretages i forskellig højde. Korrigeres for højden, findes en middelværdi for vindhastigheden i 10 m højde på 4,5 m/s gældende for landstationer (34).

For at få gennemsnitsvindhastigheden i den aktuelle højde kan følgende formel benyttes (53).

$$\frac{V}{V_m} = KZ^a$$

(Al.3.1)

hvor V vindhastighed (m/s) i højden Z
 V_m vindhastighed i 10 m' højde (m/s)
 Z aktuel højde (m)
 K koefficient (se fig. Al.3.1)
 a eksponent (se fig. Al.3.1)

	K	a
Åbent fladt landskab	0,68	0,17
Landskab med spredte læhegn	0,52	0,20
Boligområde	0,40	0,25
Cityområde	0,31	0,33

Fig. A1.3.1 Faktorer til bestemmelse af middelvindhastigheden i forskellige typer terræn ved hjælp af den meteorologiske vindhastighed V_m målt i 10 m' højde i et åbent landskab.

I forsøgene (kapitel 3) er den aktuelle middelhøjde $Z = 3$ m. Med (A1.3.1) fås et groft skøn over middelvindhastigheden på:

$$V = K \cdot Z^a \cdot V_m = 0,40 \cdot 30,25 \cdot 5,4 = 2,4 \text{ m/s}$$

Ved udvendige overflader er den dominerende påvirkning tvungen konvektion. I ref. (50) er angivet forskellige metoder til bestemmelse af det konvektive varmeovergangstal, og det fremgår, at der er en del usikkerhed på bestemmelsen af denne størrelse. Det udvendige varmeovergangstal kan sættes til en lineær funktion af vindhastigheden V :

$$h_{\text{konv}} = a + bV$$

$$a = 5,7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$b = 3,8 \text{ Ws/m}^3 \text{ K}$$

(A1.3.2)

Er middelvindhastigheden $V = 2,4$ m/s findes det konvektive varmeovergangstal til i middel at være: $h_{\text{konv}} = 5,7 + 3,8 \cdot 2,4 = 14,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. I denne rapport benyttes dette konstante, udvendige, konvektive varmeovergangstal.

Ved den udvendige overflade sker der strålingsudveksling til himmelen, til jordoverfladen og til genstande, som overfladen kan "se". Antages vinkelforholdet fra en overflade til omgivelserne at være 1 og omgivelsernes areal at være uendelig stort i forhold til overfladearealet (A_1) gælder, at strålingsudvekslingen er:

$$\begin{aligned}
 Q &= A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma (T_{\text{omg}}^4 - T_1^4) \\
 &= A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma (T_{\text{omg}}^2 + T_1^2) \cdot (T_{\text{omg}}^2 - T_1^2)
 \end{aligned}
 \tag{A1.3.3}$$

hvor T_{omg} er omgivelsernes middelstrålingstemperatur og T_1 er overfladens temperatur.

Normeres med forskellen mellem overflade- og udelufttemperaturen, kan varmeovergangstallet bestemmes af:

$$h_{\text{str}} = \varepsilon_1 \cdot \sigma (T_{\text{omg}}^4 - T_1^4) / (T_u - T_1) \tag{A1.3.4}$$

hvor T_u er udelufttemperaturen.

Ifølge (54) kan omgivelsernes middelstrålingstemperatur for en lodret overflade bestemmes som en funktion af skydække og udelufttemperatur.

$$T_{\text{omg}} = \frac{9-N}{9} (0,1 t_u - 5) + T_u \tag{A1.3.5}$$

hvor N er skydækket i oktetter og $t_u = T_u - 273$ ($^{\circ}\text{C}$)

Benyttes middelværdien for skydækket i Referenceåret (34), fås $N = 4,9$.

Omgivelsernes middelstrålingstemperatur er i middel:

$$\begin{aligned}
 T_{\text{omg}} &= \frac{9-4,9}{9} (0,1 t_u - 5,0) + T_u \\
 &= 1,046 T_u - 14,9
 \end{aligned}
 \tag{K}$$

Indsættes værdier for udeluft- og overfladetemperaturer, hvor overfladens temperatur ligger mellem 1 og 5 K højere end udeluften fås, at den udvendige overgangsisolans bliver beregnet til værdier mellem 0,04 og 0,05 $\text{m}^2\text{K/W}$. Der er altså god overensstemmelse mellem den her beregnede og den i Varmetabsreglerne (30) anvendte værdi på 0,04 $\text{m}^2\text{K/W}$.

Ved de udvendige forsøg forekommer der dog meget store variationer i både vindhastighed og udstråling til rummelrummet.

Al.3.2 Varmeovergang ved indvendig overflade

Ved den indvendige overflade sker der en varmeovergang ved naturlig konvektion til rumluften og ved strålingsudveksling til rummets overflader.

Den naturlige konvektion ved den indvendige overflade er afhængig af overfladens (T_{ov}) og luftens (T_{luft}) temperatur. For en lodret, plan overflade kan, under forudsætning af $0,5 \leq Pr \leq 200$ følgende udtryk benyttes (41), (55), (56):

$$h_{konv} = a (T_{ov} - T_{luft})^{1/3} \quad (Al.3.6)$$

hvor $a = 1,49 \text{ W/m}^2\text{K}$

Formlen forudsætter endvidere varmeovergang ved turbulent strømning. Omslaget mellem laminar og turbulent strømning sker ifølge ref. (41), (55) ved $Ra = 10^9$, mens det ifølge ref. (56) sker ved 10^8 . På fig. Al.3.2 er optegnet forskellige kombinationer af temperaturforskelle mellem overflade og luft, Rayleightal og karakteristisk længde. Det ses, at antages omslag ved $Ra = 10^9$, svarer det ved en karakteristisk længde på 2 m og en middeltemperatur på 20°C til en temperaturforskel på 1,2 K. Varmeovergangen mellem solvæg og rumluft vil derved som regel ske ved turbulent strømning.

Mellem den indvendige side af solvæggens varmelager og rummet bag solvæggen sker der en strålingsudveksling. Størrelsen af denne kan bestemmes ved hjælp af teorien for strålingsudveksling i et lukket hulrum (afsnit Al.2.3), der er opdelt i et antal felter, hver med en ensartet temperaturfordeling. Ofte vil det være muligt at tilnærme rummets indvendige overfladers temperaturer til to temperaturer. Derved kan strålingsudvekslingen bestemmes af formel (Al.2.13).

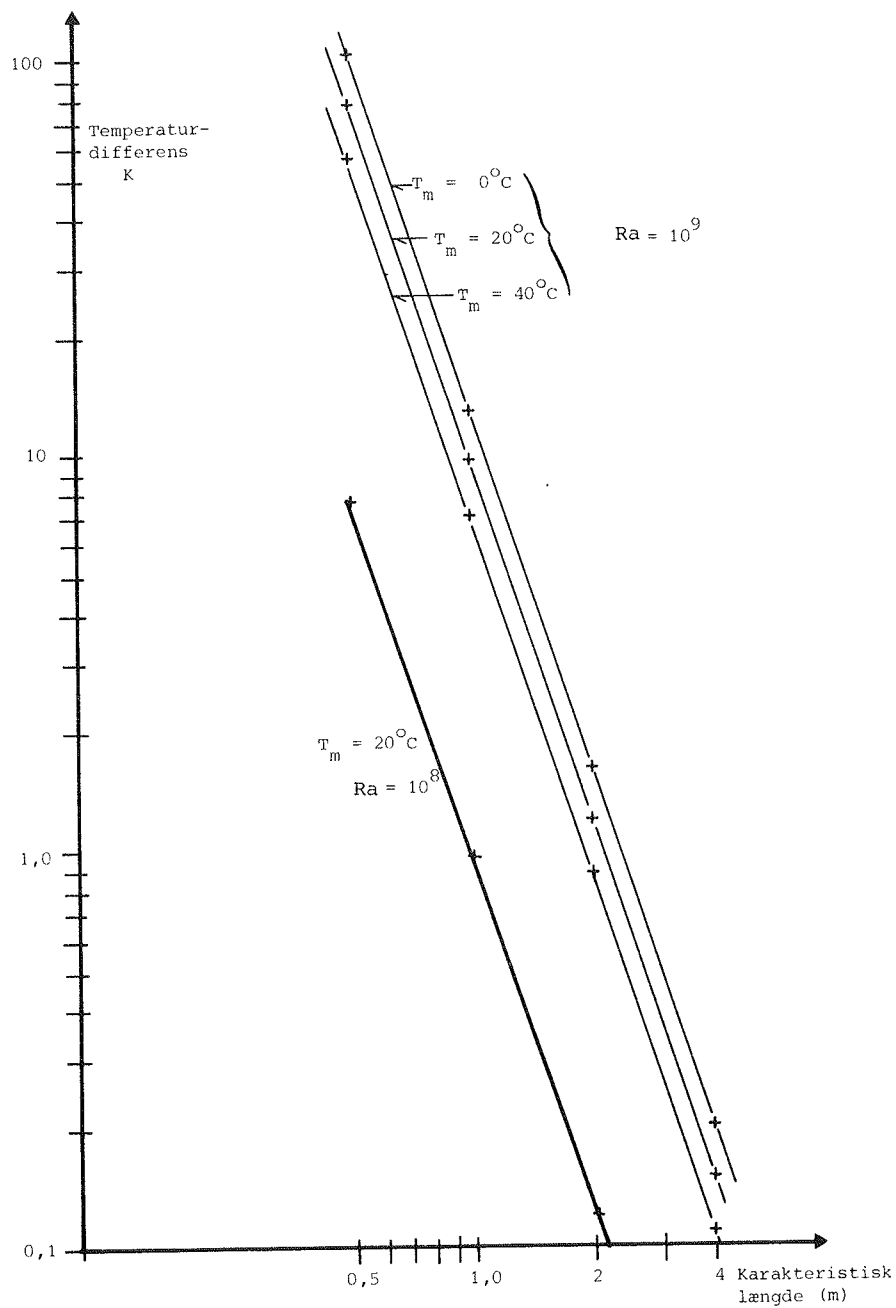


Fig. A1.3.2 Temperaturdifferens mellem overflade og luft med konvektiv varmeovergang, der svarer til en given karakteristisk længde, Rayleigh tal og middeltemperatur T_m .

Da varmelagerets indvendige overflade normalt er plan, er vinkelforholdet fra denne overflade til rummets øvrige overflader $F_{12} = 1$. Overfladens temperatur (T_1) kan tilnærmet regnes at være ensartet.

I beregningerne, hvor solvægsmodellen er koblet sammen med edb-programmet BA4's rummodel, benyttes den indvendige rumoverfladetemperatur (T_2) til bestemmelse af varmeovergangen ved stråling.

Ved forsøgene er rummets overfladetemperatur bestemt som en simpel middeltemperatur af de overflader solvæggen kan se. Dette vil være en god tilnærmelse til middelstrålingstemperaturen, som i virkeligheden er den størrelse, der ønskes bestemt.

Forsøgsrummets overfladeareal er $A_2 = 48,4 \text{ m}^2$ og varmelagerets areal er $A_1 = 3,1 \text{ m}^2$. Emissionskoefficienterne for overfladerne er svære at bestemme nøjagtigt ud fra det tilgængelige datamateriale.

De indvendige træpaneler er matlakerede. Emissionskoefficienten er fundet til at være 0,83 ifølge (57). Gulvet er af spånplader, hvis emissionskoefficient kan sættes til 0,90. Loftet er af gipsplader beklædt med papir, som har en emissionskoefficient på ca. 0,95.

Da disse emissionskoefficienters størrelse er usikker tilnærmes rummets emissionskoefficient med en simpel arealvægtet emissionskoefficient på $\epsilon_{n,1} = 0,87$.

Ved alle ovennævnte emissionskoefficienter er udstrålingen forudsat vinkelret på overfladen (ϵ_n). Til brug i formler anvendt i afsnit A1.2.3 skal den totale eller hemisfæriske emissionskoefficient (ϵ_h) benyttes. Ifølge (57) gælder, at for glatte overflader er forholdet mellem de to emissionskoefficienter:

$$\epsilon_h / \epsilon_n = 0,95$$

For de indvendige overflader bliver den totale emissionskoefficient:

$$\varepsilon_{h,1} = 0,87 \cdot 0,95 = 0,83$$

Kalksandstensvæggens emissionskoefficient er også vanskelig at bestemme. Til sammenligning er emissionskoefficienten for forskellige materialer nævnt.

Kalkmørtel:	0,92
Puds, rå kalk:	0,91
Kvarts:	0,78-0,93
Sand:	0,76
Brændt gips:	0,79-0,92

Kalksandstenen er fremstillet, ved at kalk og sand blandes og opvarmes i 8 timer i en autoklave ved 170 °C under mattede dampes tryk. Derved dannes calciumsilikatkrystaller og andre krystalliske forbindelser. Som middelværdi vælges $\varepsilon_{n,2} = 0,85$. For ru overflader fås ifølge (57), at $\varepsilon_h/\varepsilon_n = 0,98$. Dette giver for kalksandsten: $\varepsilon_{h,2} = 0,85 \cdot 0,98 = 0,83$.

Indsættes de fundne værdier i (A1.2.13), fås:

$$\begin{aligned}
 Q_{12} &= \frac{A_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{(1-\varepsilon_{h,1})/\varepsilon_{h,1} + 1/F_{12} + (1-\varepsilon_{h,2}) \cdot A_1/(\varepsilon_{h,2} \cdot A_2)} \\
 &= \frac{A_1 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (T_1^4 - T_2^4)}{(1-0,83)/0,83 + 1/1 + (1-0,83) \cdot 3,1/(0,83 \cdot 48,4)} \\
 &= 4,66 \cdot 10^{-8} \cdot A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4})
 \end{aligned}$$

Temperaturforskellen mellem overflade- og rumlufttemperaturen vil typisk variere mellem -5 K og 20 K. Ved fx en forskel på 5 K beregnes varmeovergangstallet ved konvektion til 2,5 W/m²K, og varmeovergangstallet ved stråling til 4,8 W/m²K, når over-

fladetemperaturerne er 20°C og solvæggens overfladetemperatur er 25°C. Summeres de to bidrag, og antages at de øvrige overflader i rummet, som solvæggen udstråler til, har samme temperatur som rumluften, er den samlede isolans mellem solvæg og rummet 0,137 m²K/W, hvilket svarer til den i varmetabsreglerne (30) anvendte indvendige overgangsisolans på 0,13 m²K/W.

Al.4 SOLSTRÅLING

Al.4.1 Ekstraterrestrial solstråling

Uden for atmosfæren er solstrålingen næsten konstant. De vigtigste parametre, der påvirker denne såkaldte ekstraterrestriale stråling er antallet af solpletter og afstanden mellem solen og jorden.

Middelværdien af den ekstraterrestriale solstråling kaldes solkonstanten og er ifølge ref. (58) $I_{sc} = 1365 \text{ W/m}^2$. Andre værdier for solkonstanten er anvendt, og ifølge (39) vil en værdi på 1377 W/m² blive anbefalet som ny solkonstant af den internationale belysningskomité (CIE, teknisk komité TC-4.2).

Variationen i solens afstand til jorden giver ændringer på ±3,3%: Middelværdien af den ekstraterrestriale stråling på dag N_{dn} i året kan findes af formlen (58):

$$I_0 = I_{sc} \cdot \left(1 + 0,033 \left(\cos \left(\frac{(N_{dn} - 3) \cdot 2\pi}{365} \right) \right) \right) \quad (\text{Al.4.1})$$

hvor argumentet til cosinus er angivet i rad.

Al.4.2 Solstrålingens retning

Den bane solen beskriver angives normalt ved solhøjden og azimutvinklen. Solhøjden α er vinklen mellem solens retning og horisontalt plan. Solens azimutvinkel γ_s er vinklen mellem retningen af solens projektion på vandret plan og nord regnet positivt fra nord i urets retning. En lodret flades azimut-

vinkel γ_v er vinklen mellem fladens normal og nord. En lodret vægs azimuthvinkel i forhold til solen kaldes væg-solazimutvinklen γ og kan findes som differensen (59):

$$\gamma = \gamma_s - \gamma_v \quad \text{hvor } -\pi < \gamma \leq \pi \quad (\text{A1.4.2})$$

Indfaldsvinklen θ_i for solstrålingen er vinklen mellem retningen til solen og fladens normal. For en lodret flade findes:

$$\cos \theta_{i,1} = \cos \alpha \cdot \cos \gamma \quad (\text{A1.4.3})$$

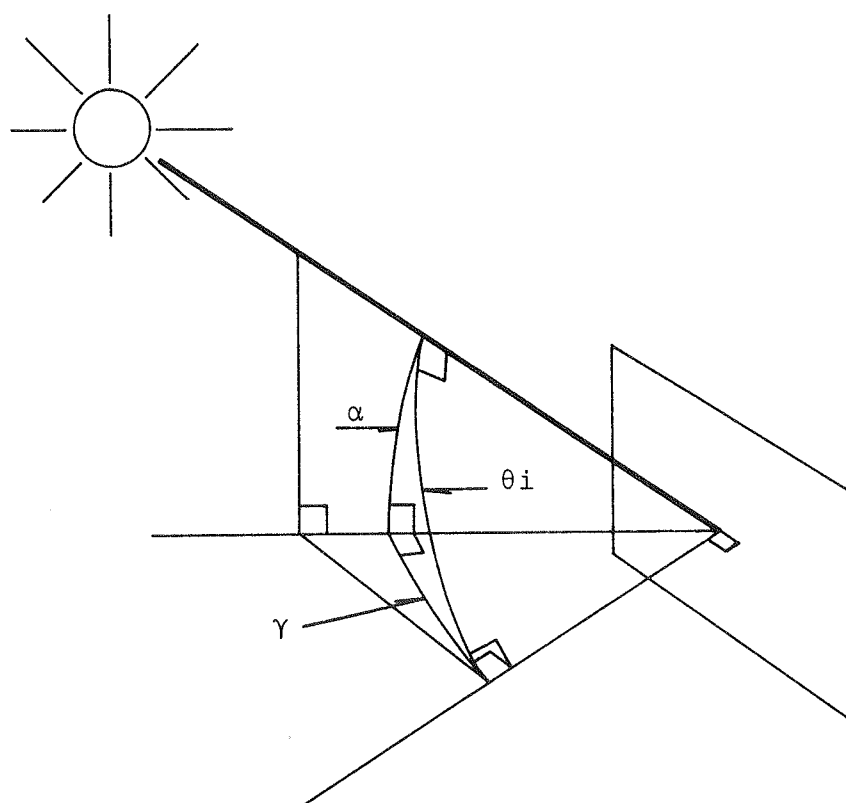


Fig. A1.4.1 Indfaldsvinkel ved en lodret overflade.

Er overfladen vandret, kan indfaldsvinklen for den direkte solstråling bestemmes af:

$$\theta_{i,v} = \pi/2 - \alpha \quad (\text{A1.4.4})$$

Retningsvinklen er vinklen mellem strålens projektion i fladens plan og en given retning i fladens plan. Vælges for en lodret, sydvendt overflade vandret som udgangspunkt, kan retningsvinklen ϕ bestemmes ved:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \phi &= \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \gamma} & \text{for } \gamma \neq 0 \\ \phi &= \pi/2 & \text{for } \gamma = 0 \end{aligned} \quad (\text{Al.4.5})$$

En stråles profilvinkel til en flade er vinklen mellem vandret og et plan udspændt af strålen og en vandret linie, der både skærer strålen og er parallel med fladen.

Profilvinklen φ kan for en lodret flade bestemmes ved hjælp af solhøjden og væg-solazimutvinklen:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \gamma} \quad \text{for } (\gamma \neq \pi/2) \wedge (\gamma \neq -\pi/2) \quad (\text{Al.4.6})$$

Al.4.3 Solindfald på en overflade

Ved passage gennem atmosfæren brydes og absorberes en del af solstrålingen. Den del der rammer en overflade kan opdeles i følgende bidrag:

- 1) Direkte stråling I_b
- 2) Diffus himmelstråling I_d
- 3) Diffus reflekteret stråling I_r

Oftentimes er ved klimadata angivet den direkte normalstråling $I_{b,n}$ og den diffuse himmelstråling $I_{d,h}$.

På grundlag af disse data kan solstrålingen på en vilkårligt hældende flade findes (60). Er fladen lodret, kan bestrålingsstyrken af den direkte stråling, der rammer overfladen bestemmes af:

$$I_b = I_{b,n} \cdot \cos \theta_i \quad (\text{Al.4.7})$$

hvor θ_i er indfaldsvinklen.

Bestrålingsstyrken af den diffuse himmelstråling er angivet i ref. (60) til:

$$I_d = I_{d,h} ((F - 0,5)(8 - N) / 8 + 0,5) \quad (A1.4.8)$$

Hvor N er skydækket i oktetter og ifølge (61):

$$\begin{aligned} F &= 0,55 + 0,437 \cos\theta_i + 0,0313 \cos^2\theta_i & \text{for } \cos\theta_i \geq -0,2 \\ F &= 0,45 & \text{for } \cos\theta_i < -0,2 \end{aligned} \quad (A1.4.9)$$

På grundlag af nyere målinger er andre omsætningsfaktorer fundet i ref. (39).

Globalstråling på vandret kan sammensættes af den direkte normalstråling og diffus himmelstråling:

$$I_h = I_{b,n} \cdot \sin\alpha + I_{d,h} \quad (A1.4.10)$$

Den reflekterede stråling har bestrålingsstyrken:

$$I_r = I_h \cdot F_v \cdot \rho_j \quad (A1.4.11)$$

hvor F_v er vinkelforholdet til terrænet, normalt 0,5, og ρ_j er jordens refleksionskoefficient for kortbølget stråling.

Bestrålingsstyrken af den totale indfaldende stråling er dermed:

$$I_{tot} = I_b + I_d + I_r \quad (A1.4.12)$$

Al.4.4 Bestemmelse af diffus andel af solindfald

Ved forsøgene i måleperiode 1 og 2 (kap. 3) er den totale indfaldende stråling på solvæggene målt ved hjælp af et solarimeter. Den diffuse strålingsandel af den indfaldende stråling kan ud fra denne måling ikke umiddelbart bestemmes. Da der i beregningerne (kap. 4.2.1 og 4.2.2) indgår den diffuse stråling, er der her søgt opstillet et udtryk til bestemmelse af den diffuse strålingsandel af den totale indfaldende stråling.

Med kendskab til reflektionskoefficienten for jorden og skydækket er det muligt ved hjælp af de i afsn. Al.4.3 angivne formler at bestemme fordelingen mellem de enkelte strålingsandele.

Ved hjælp af Referenceårets klimadata (34) er et udtryk for andelen af diffus stråling på en lodret, sydvendt flade bestemt.

I udtrykket indgår indfaldsvinklen θ_i for den direkte stråling og forholdet F_{glob} mellem den målte stråling og den ekstraterrestriale stråling på en overflade parallel med solvæggen:

$$F_{glob} = I_{m\ddot{a}lt} / I_o \cdot \cos \theta_i \quad (Al.4.13)$$

Jordens reflektionskoefficient for kortbølget solstråling er skønnet til $\rho_j = 0,25$. Ved hjælp af BA4 (26) er bestrålingsstyrken af solstrålingen fundet gennem de første 6 måneder i Referenceåret. Disse data er benyttet til en ulineær regressionsanalyse. Til analysen er anvendt statistik-programmeringssproget SAS (62). På grundlag af skønnede parametre beregnes den kvadratiske residuals sum for de forskellige parameterkombinationer. Kvadratet på residuals summerne vægtes med den totale solstråling for at mindske fejlen, på den i middel absorberede stråling, mest muligt. Den mindste sum af afvigelser danner grundlag for en Gauss/Newton iterationsproces, der optimerer ud fra de skønnede parametre.

Resultatet af beregningen er, at den diffuse strålings andel kan bestemmes af følgende udtryk:

$$F_{\text{dif}} = 0,049 + 0,284 (F_{\text{glob}})^{0,5} \cdot (\theta_i)^{1,5} \quad (\text{A1.4.14})$$

hvor θ_i indsættes i rad.

Følgende begrænsninger er anvendt:

$$0,05 \leq F_{\text{glob}} \leq 1$$

$$0,05 \leq \cos\theta_i \leq 1 \Rightarrow 0 \leq \theta_i \leq 87^\circ \frac{\pi}{180^\circ}$$

Ved beregningen er bestrålingsstyrker af den diffuse stråling mindre end 5 W/m² udeladt. Findes en værdi af F_{dif} større end 1, nedsættes størrelsen til 1.

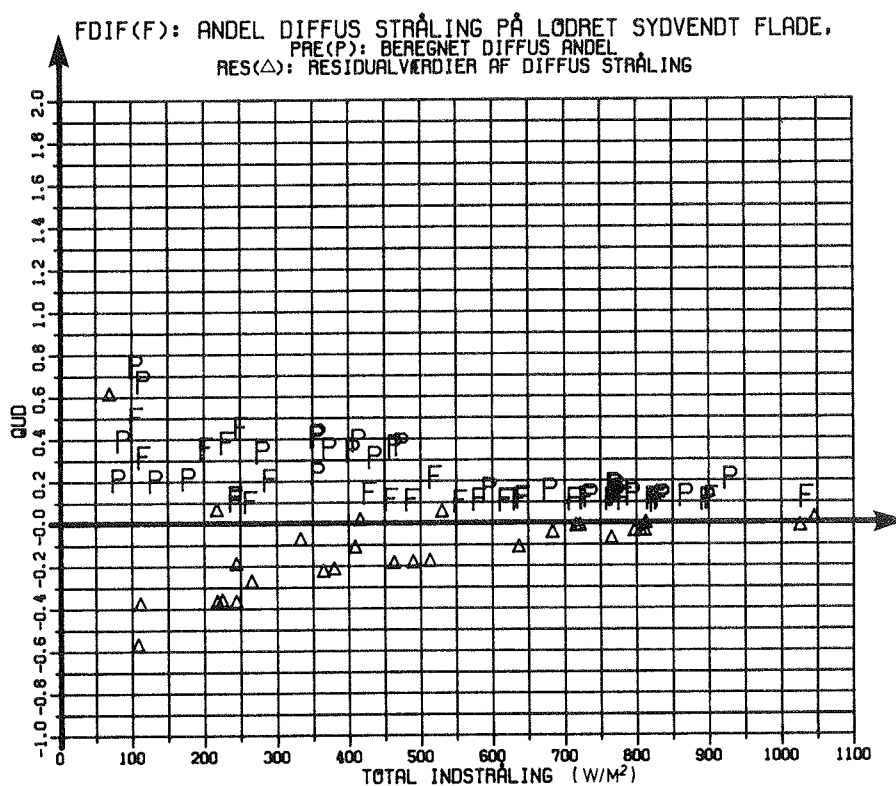


Fig. A1.4.2 Sammenligning for januar i Referenceåret.

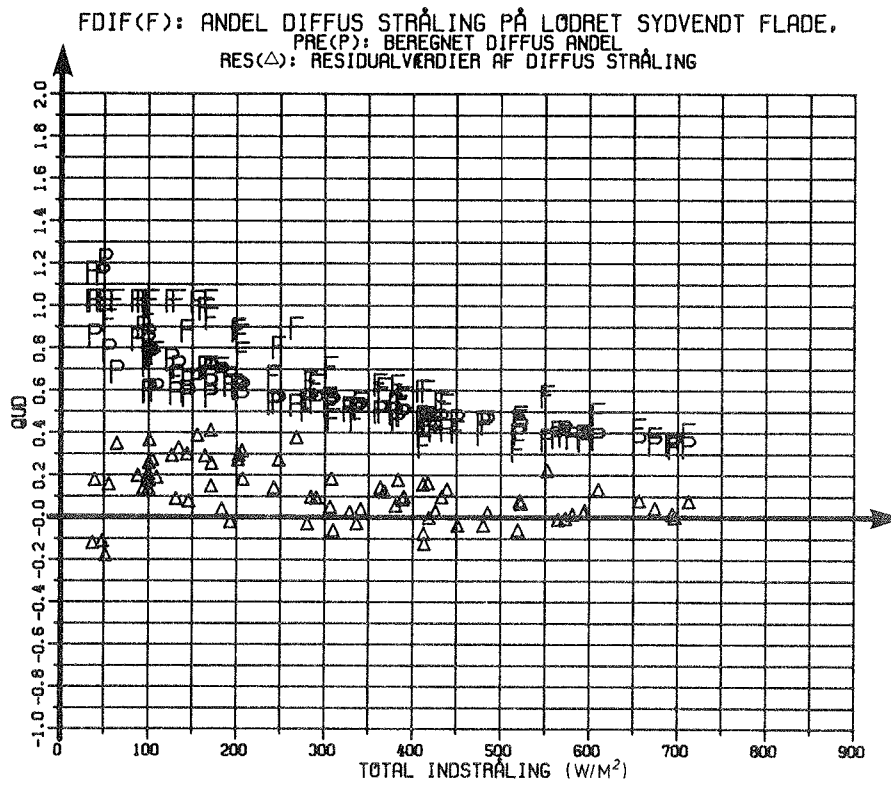


Fig. Al.4.3 Sammenligning for maj i Referenceåret.

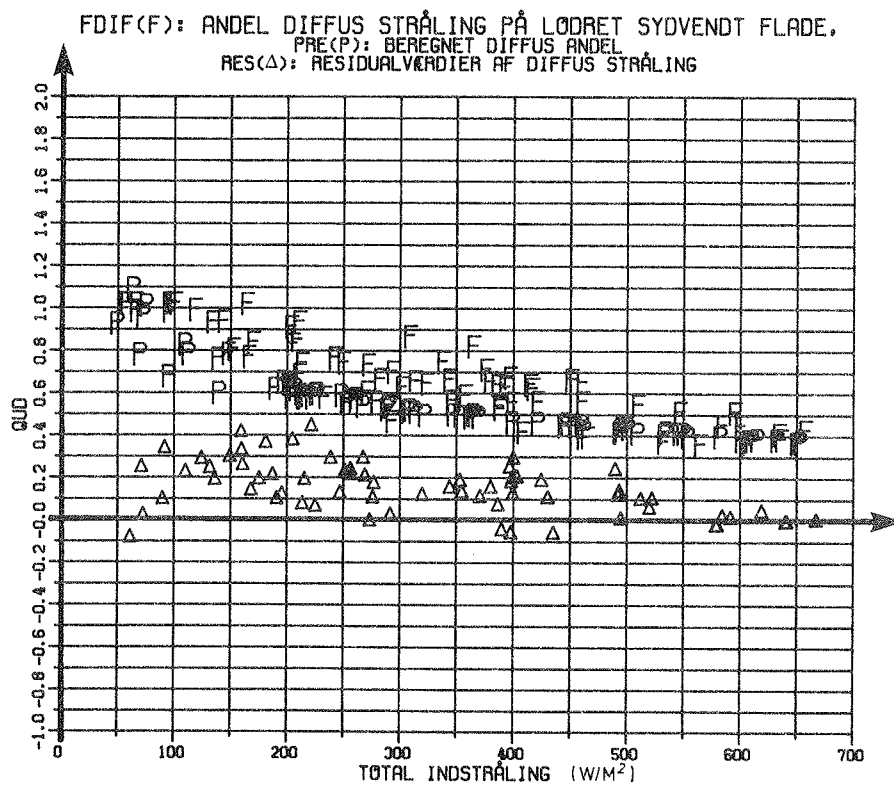


Fig. Al.4.4 Sammenligning for juni i Referenceåret.

Nøjagtigheden kan ses af fig. Al.4.2-Al.4.4, hvor den diffuse andel og residualværdierne er optegnet som funktion af den totale indfaldende stråling. Figurerne viser ved store bestrålingsstyrker en maksimal afvigelse mellem beregnet værdi af lign. (Al.4.14) og beregnet værdi fra BA4 på omkring 0,1, mens bestemmelsen for mindre bestrålingsstyrker er mere unøjagtig. Residualværdier numerisk større end 1 findes på figurerne ved små bestrålingsstyrker. Årsagen er, at F_{dif} værdien ikke, som ellers anvendt i beregningerne, er nedsat til 1.

For at kontrollere, at der er samme nøjagtighed for de sidste 6 måneder af året, er de vægtede residualssummer beregnet (fig. Al.4.5).

	Antal obser- vationer	Vægtet kvadrat- sum
Første 6 mdr. i Ref. år	2932	27400
Sidste 6 mdr. i Ref. år	2792	24600

Fig. Al.4.5 Kvadratsum af residualer vægtet med bestrålingsstyrken.

Det ses, at den sidste halvdel af året giver en vægtet kvadratsum, der svarer til den første halvdel af året, når der tages hensyn til antallet af observationer.

Al.5 TRANSMISSION GENNEM FORSKELLIGE MATERIALER

I afsnittene Al.5.1-Al.7.3 vises, hvordan transmission og absorption af solstråling kan bestemmes for de dæklagssystemer, der er benyttet i de udførte forsøg (se kap. 3). I afsnit Al.5.1 bestemmes transmission og absorption gennem et materialeg med planparallelle overflader. Dernæst (afsnit Al.6.1) beskrives, hvordan absorptions- og transmissionskoefficienter for et antal lag med forskellige egenskaber kan sammensættes

således, at den resulterende absorption i de enkelte lag kan bestemmes. Det vises (afsnit Al.6.2-Al.6.3), hvordan metoden kan anvendes ved et dæklagssystem bestående af en kanalplade og en absorberoverflade.

I afsnittene Al.7.1-Al.7.2 er absorptionen i de enkelte lag bestemt ved diffus stråling.

Al.5.1 Transmission, refleksion og absorption for et enkelt lag transparent materiale

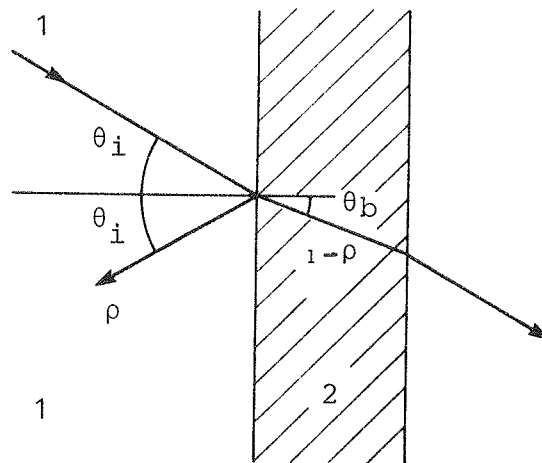


Fig. Al.5.1 Brydning ved overflade.

Betragtes en indfaldende stråle på et transparent materiale, vil en del af strålingen (ρ) blive reflekteret fra overfladen (fig. Al.5.1). Den resterende del af strålingen vil transmitteres ind i materialet. Forudsættes udelukkende spejlende refleksion, vil den transmitterede stråling, hvis indfaldsvinklen er θ_i , have brydningsvinklen θ_b , hvor denne størrelse kan beregnes af Snell's lov:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_b} = \frac{n_1}{n_2}$$

(Al.5.1)

hvor n_1 og n_2 er de to materialers relative brydningsindex (se fig. A1.5.2).

Materiale	Brydningsindex n
Luft	1,000
Silika aerogel (Airglass)	1,02-1,05
Teflon (Polytetrafluoroethylen)	1,343
Kynar (Polyvinylidene Fluorid)	1,413
Acryl (Plexiglas)	1,490
Polyethylen (Marlex)	1,500
Glas	1,518
Glasfiberarmeret polyester (Sunlite)	1,540
Polycarbonat (Lexan)	1,586
Polyester (Mylar)	1,640

Fig. A1.5.2 Forskellige transparente materialers relative brydningsindex (63), (64).

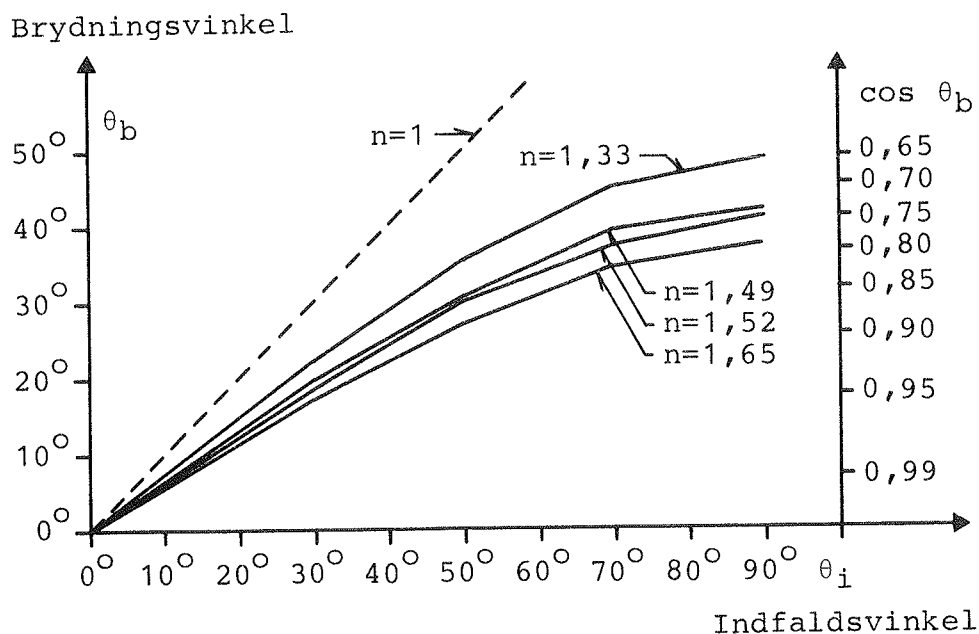


Fig. A1.5.3 Brydningsvinklens afhængighed af indfaldsvinkel (θ_i) og det relative brydningsindex n .

Refleksionen af strålingen kan beregnes ved hjælp af Fresnels formler (50). For stråling polariseret vinkelret på planen udspændt af fladenormalen og solstrålingens retning:

$$\rho_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_b)}{\sin^2(\theta_i + \theta_b)} \quad (\text{A1.5.2})$$

For stråling polariseret parallelt med stråleretningen gælder:

$$\rho_{\#} = \frac{\text{tg}^2(\theta_i - \theta_b)}{\text{tg}^2(\theta_i + \theta_b)} \quad (\text{A1.5.3})$$

For stråling med små indfaldsvinkler kan man, idet der i solstråling normalt er lige store andele fra de to polarisationsretninger, sætte middelrefleksionen til:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1}{2}(\rho_{\perp} + \rho_{\#}) \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\theta_i - \theta_b)}{\sin^2(\theta_i + \theta_b)} + \frac{\text{tg}^2(\theta_i - \theta_b)}{\text{tg}^2(\theta_i + \theta_b)} \right) \end{aligned} \quad (\text{A1.5.4})$$

Ved store indfaldsvinkler vil det ved beregninger som vist i det følgende (lign. (A1.5.9)-(A1.5.11)) være nødvendigt at benytte refleksionen for hver af de to polarisationsretninger i stedet for middelrefleksionen.

Når en stråle passerer et materiale, vil en del af strålingen blive absorberet. Størrelsen af den absorberede stråling (dI_{abs}) vil for et infinitesimalt element være proportionalt med den passerende vejlængde (dx), materialet og bestrålingsstyrken I_x :

$$dI_{\text{abs}} = K \cdot I_x \cdot dx \quad (\text{A1.5.5})$$

Størrelsen K kaldes materialets ekstinktionskoefficient.

Er elementet en del af et materiale (fig. A1.5.4) og sættes bestrålingsstyrken af strålingen umiddelbart efter passagen af yderste overflade til I_0 , vil bestrålingsstyrken (I) efter at have passeret vejlængden X igennem hele materialet kunne findes ved integration af (A1.5.5):

$$\int_{I_0}^I \frac{dI_{\text{abs}}}{I_x} = \int_0^X K dx$$

(A1.5.6)

$$I/I_0 = e^{-KX}$$

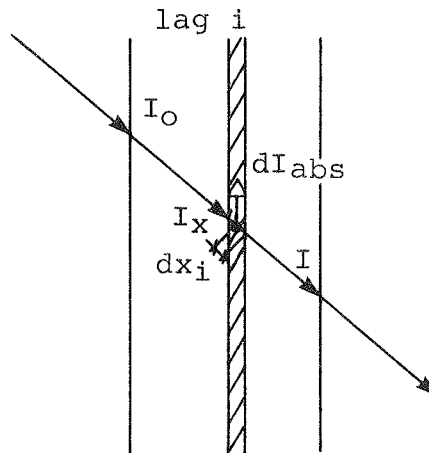


Fig. A1.5.4 Absorption i et materiale.

Er materialets tykkelse (L) og brydningsvinklen θ_b , fås at transmissionen gennem materialet, når der tages hensyn til absorption, er:

$$\tau_a = I/I_0 = e^{-KL/\cos\theta_b} \quad (\text{A1.5.7})$$

Den del af strålingen, der absorberes ved passage gennem laget, bestemmes af:

$$a = 1 - \tau_a = 1 - e^{-KL/\cos\theta_b} \quad (\text{A1.5.8})$$

Mellem overfladerne i et transparent lag vil der ske gentagne refleksioner af en indfaldende stråle. I princippet vil der ske uendelig mange refleksioner, men strålingens styrke klinger hurtigt ud (se fig. A1.5.5). Den indfaldende bestrålingsstyrke

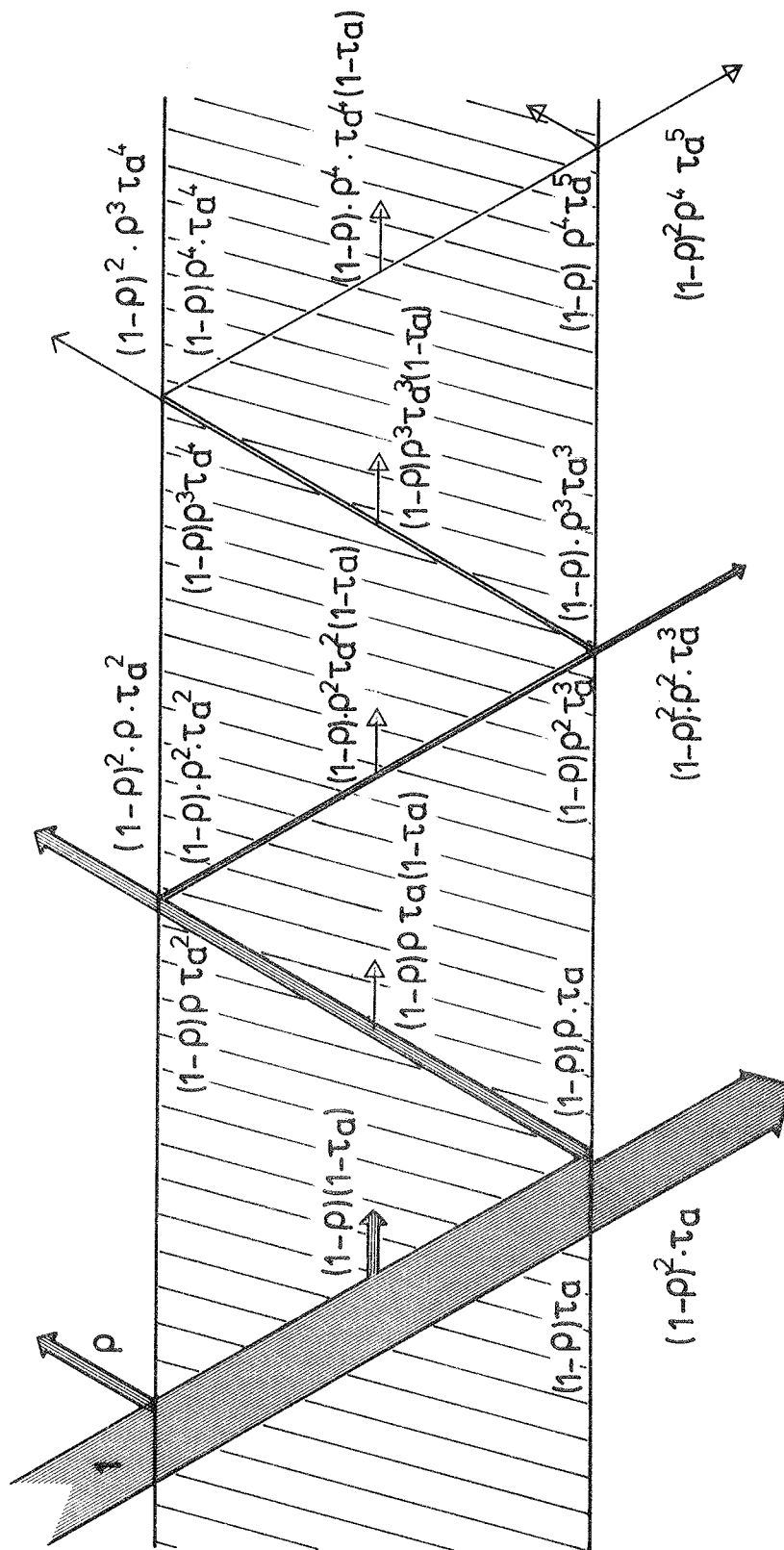


Fig. A1.5.5 Strålegang gennem et materiale.

forudsættes at være 1. Foretages en summation af de enkelte bidrag, der har passeret materialelaget kan transmissionskoefficienten for hele laget bestemmes af:

$$\begin{aligned} T &= (1 - \rho)^2 \cdot \tau_a \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (\rho \tau_a)^{2n} \\ &= \tau_a \frac{(1-\rho)^2}{1-(\rho \tau_a)^2} \end{aligned} \quad (\text{A1.5.9})$$

På tilsvarende måde findes absorptions- (A) og reflektionskoefficienten (R) for hele laget:

$$A = \frac{(1-\rho) (1-\tau_a)}{1-\rho \tau_a} \quad (\text{A1.5.10})$$

$$R = \frac{\rho(1+\tau_a^2 (1-2\rho))}{1 - (\rho \tau_a)^2} \quad (\text{A1.5.11})$$

A1.5.2 Transmission gennem acryl

Transmissionskoefficienten for plexiglas er vanskelig at bestemme ud fra foreliggende målinger, da disse afviger noget fra hinanden.

For en 3 mm acrylplade er transmissionsevnen målt (64) ved en spektrofotometermåling og en monokromatormåling med bølgelængdeintervallerne henholdsvis 0,29 μm -3 μm og 3 μm -7 μm . Transmissionskoefficienten er målt kontinuert for stråling vinkelret på overfladen. Dette giver en kurve, der kan danne grundlag for bestemmelsen af transmissionskoefficienten for et bestemt solspektrum:

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} I_{\lambda,i} \cdot \tau_{\lambda} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda,i} \cdot d\lambda} \quad (\text{A1.5.12})$$

hvor τ_λ og $I_{\lambda,i}$ er henholdsvis transmissionskoefficienten og bestrålingsstyrken ved bølgelængden λ .

Solspektret, der anvendes som udgangspunkt, (65), svarer til en byatmosfære. Solspektret afhænger af hvor meget atmosfære solstrålingen skal passere. Størrelsen, den relative luftmasse (m), er forholdet mellem den længde, solstrålingen skal passere gennem atmosfæren og den længde solstrålingen skulle passere, hvis solen stod i zenit. I (64) er der interpoleret lineært mellem bestrålingsstyrken ved en relativ luftmasse på $m = 1$ og $m = 4$ for at bestemme bestrålingsstyrken ved $m = 2$. Beregningsmetoden er ændret, idet der forudsættes en eksponentielt faldende bestrålingsstyrke ved en øgning af den relative luftmasse:

$$I_{\lambda,i} = k_1 e^{-k_2 m}$$

(Al.5.13)

hvor k_1 og k_2 er konstanter, der kan bestemmes på grundlag af samhørende værdier af m og $I_{\lambda,i}$.

Det herved fremkomne solspektrum er anvendt til beregning af transmissionskoefficienten for plexiglas efter ovennævnte integrationsmetode.

Med disse forudsætninger er transmissionskoefficienten for en 3 mm acrylplade beregnet ved forskellige værdier af den relative luftmasse. Fig. Al.5.6 viser, at der er en vis afhængighed af den relative luftmasse, solstrålingen skal passere gennem atmosfæren.

	Relativ luftmasse m		
	$m=1$	$m=2$	$m=3$
3 mm acryl	0,813	0,826	0,831

Fig. Al.5.6 Transmissionskoefficienter for acryl ved forskellige solspektre.

Spektrofotometermålingen antages at have en transmissionskoefficient en anelse større end målt, da udenlandske målinger (66) af den spektrale transmission her har et maksimum på 0,92, mens den aktuelle måling har et maksimum på 0,90. Den aktuelle acrylplade er ligeledes målt ved en solarimetermåling, hvor bestrålingsstyrken er målt med og uden acrylplade foran. Denne måling må antages at give for store transmissionskoefficienter, da en del af solstrålingen, der rammer fladen bag solarimetret bliver reflekteret tilbage til acrylpladen og til solarimetret. For at mindske denne refleksion er målingen blevet gentaget med en sortmalet overflade bag solarimetret. Dette gav en reduktion i transmissionskoefficienten fra 0,88 til 0,87.

Det skønnes, at en middelværdi af transmissionskoefficienten fundet ved ovennævnte solarimetermåling og den beregnede værdi ved relativ luftmasse 3 (fig. A1.5.6) vil give det mest korrekte resultat: $T = 0,85$.

Den totale transmissionskoefficient indeholder et bidrag fra reduktion af strålingen på grund af refleksion ved materialets overflader og absorption i materialet.

Antages at acryl har et brydningsindex på $n = 1,49$ som angivet i (65) kan refleksionskoefficienten ved indfald vinkelret på overfladen beregnes:

$$\rho = \left(\frac{1 - n}{1 + n} \right)^2 \quad (\text{A1.5.14})$$

Indsættes $n = 1,49$ i formlen, fås $\rho = 0,039$. Transmissionskoefficienten fra refleksion er

$$\tau_r = \frac{1 - \rho}{1 + \rho} \quad (\text{A1.5.15})$$

Transmissionskoefficienten m.h.t absorption kan da beregnes til

$$\tau_a = \frac{T}{\tau_r} \quad (\text{A1.5.16})$$

Indsættes $\rho = 0,039$, kan τ_r bestemmes til 0,925 og τ_a til 0,919. Antages at transmissionskoefficienten med hensyntagen til absorption kan bestemmes ved hjælp af (A1.5.7), kan ekstinktionskoefficienten for acryl sættes til

$$K = \frac{-\ln \tau_a}{L} = \frac{-\ln 0,919}{0,003} = 28 \text{ m}^{-1} \quad (\text{A1.5.17})$$

A1.5.3 Beregning af ekstinktionskoefficient for hvid glasuld

Hvid glasuld er et materiale, der er opbygget af lange, tynde glasfibre. De optiske egenskaber vil være domineret af et antal refleksioner mellem fiberoverfladerne, før solstrålingen bliver absorberet i fibrene, reflekteret til det fri eller transmitteret gennem fiberlaget.

Forudsættes en ensartet struktur i materialet, dvs. en konstant koncentration af fibre pr. volumenenhed, konstant fibertykkelse og længde samt en ensartet fordeling af fiberorienteringen, kan det ventes at de optiske egenskaber for et lag af materialet kun er afhængig af tykkelsen af laget. Egenskaberne kan dermed også udtrykkes som en funktion af massen pr. arealenhed af laget.

Da fiberorienteringen fortrinsvis er parallel med materialelagets plan, vil variationen af de optiske egenskaber for et givet antal fibre formodes at være begrænset, når volumenkoncentrationen varieres inden for rimelige grænser.

Anvendes hvid glasuld i store tykkelser, vil størrelsen af refleksionen til det fri være domineret af interrefleksioner mellem de fibre, der er nærmest den udvendige overflade. Det må derfor ventes, at refleksionen fra den udvendige overflade kun i begrænset omfang vil være afhængig af materialelagets samlede tykkelse forudsat relativt store tykkelser af materialelaget.

Transmissionen vil snarere være domineret af interrefleksioner end ubrudt transmitteret solstråling. Dette indikerer, at den transmitterede stråling vil være uafhængig af den indfaldende strålings indfaldsvinkel forudsat uændret indstråling og relativt store tykkelser.

Benyttes den i afsnit A1.5.1 udledte teori, vil transmissionen kunne bestemmes efter formlen (50):

$$T = \tau_0 e^{-K_m \rho L} = \tau_0 e^{-K_m \cdot m} \quad (\text{A1.5.18})$$

Hvor

τ_0 er førstegangstransmission ved at gå fra luft til glasulds materiale

K_m er ekstinktionskoefficienten pr. massefyldeenhed (m^2/kg)

L er tykkelsen af laget (m)

ρ er massefylden (kg/m^3)

m er massen pr. m^2 (kg/m^2)

Ønskes den del af strålingen, der er absorberet i glasulden (a) bestemt mellem dybderne x_1 og x_2 regnet fra udvendig overflade, gælder iflg. (A1.5.18):

$$\begin{aligned} a &= ((1 - T_{x_1}) - (1 - T_{x_2})) \\ &= \tau_0 \left(e^{-K_m \rho x_2} - e^{-K_m \rho x_1} \right) \end{aligned} \quad (\text{A1.5.19})$$

For at bestemme konstanterne i formel (A1.5.19) er der udført målinger med et Baum-Gartner fotometer (67). Som en kontrol er transmissionen for solstråling gennem den i forsøgene (kap. 3) benyttede hvide glasuld målt ved hjælp af et solarimeter.

Resultaterne fra begge målinger er blevet indtegnet på figur Al.5.7, idet der som abscisse er anvendt glasuldens masse pr. arealenhed.

Målingerne viser stor spredning, hvilket kan skyldes glasuldens inhomogene struktur, og at prøvningerne med Baum-Gartner fotometret er usikre på grund af den benyttede pæres spektralfordeling.

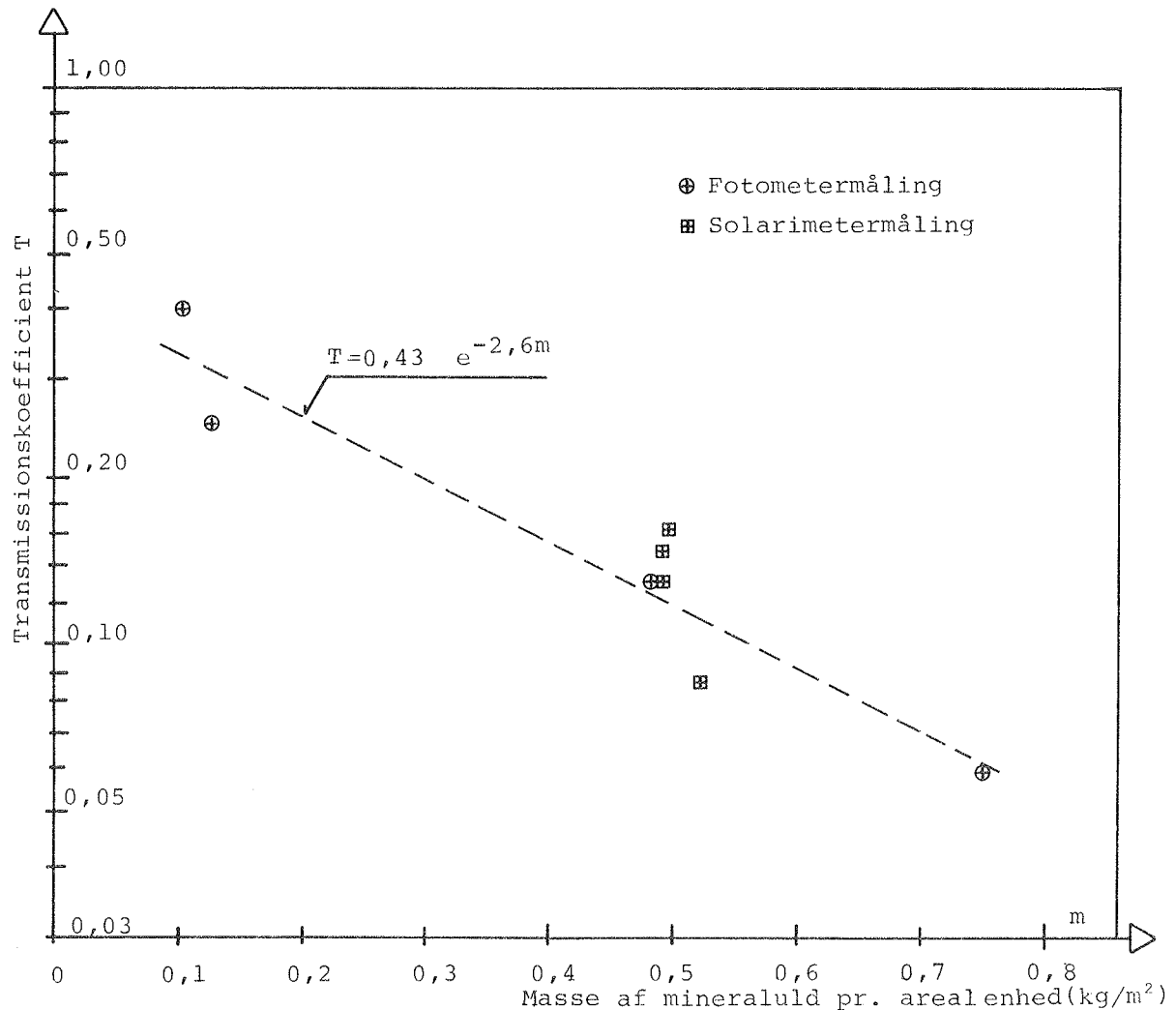


Fig. Al.5.7 Målinger af transmissionskoefficienten for hvid glasuld.

Foretages for de i (67) fundne målinger en lineær regression af ligningen:

$$y = \ln T = \ln \tau_0 - K_m \cdot m \quad (\text{Al.5.20})$$

findes følgende konstanter til lign. (Al.5.18):

$$\tau_0 = 0,43 \text{ og } K_m = 2,6 \text{ m}^2/\text{kg}$$

Ekstinktionskoefficienten er:

$$K = K_m \cdot \rho = 2,6 \cdot \rho \quad (\text{m}^{-1}) \quad (\text{A1.5.21})$$

Benyttes de fra forsøgene fundne massefylde (se afsnit 3.1.6), fås følgende ekstinktionskoefficienter, der er benyttet i beregningerne i afsn. 2.2.4.

Måleperiode	Massefylde	Ekstinktions- koefficient
	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$K (\text{m}^{-1})$
1	32	83
2	14	37

Fig. A1.5.8 Ekstinktionskoefficienter for hvid glasuld i de to måleperioder.

Resultaterne viser endvidere, at glasulden reflekterer 57% af den indfaldende solstråling.

Al.6 BEREGNING AF ABSORPTION I ET DÆKLAGSSYSTEM

Al.6.1 Generel teori

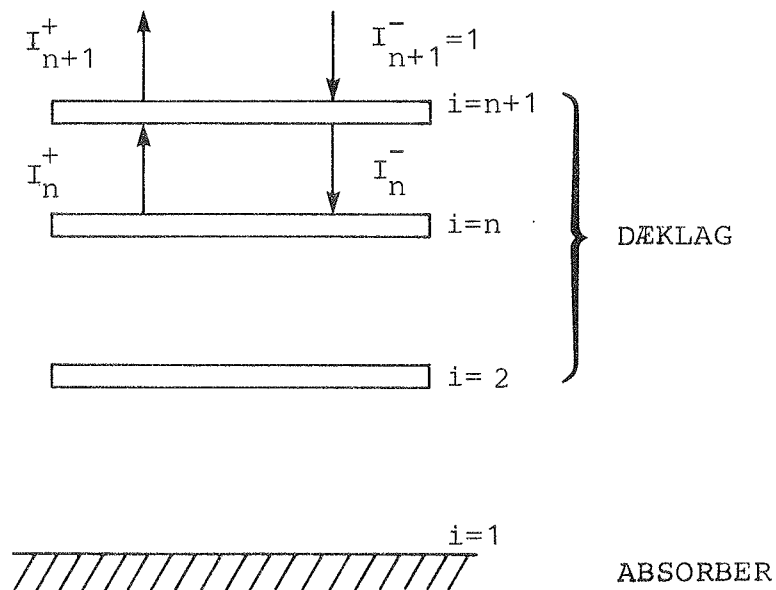


Fig. Al.6.1 Dæklagssystem med tilhørende størrelser af transmitteret stråling.

I beregningerne i kapitel 2.1 er regnet på et antal glas som dæklag. Ønskes absorptionen i disse samt i absorberen bestemt, kan dette ske ved løsning af et ligningssystem. En anden løsningsmulighed er at benytte en algoritme, der bestemmer absorptionen. Denne metode er beskrevet i ref. (68) og er vist i det følgende.

Der forudsættes en dæklagskonstruktion med n elementer, hvor element nr. 1 er absorberen, og de resterende $n-1$ elementer er dæklag. For denne dæklagskonstruktion forudsættes den samlede reflektion $R_{n,tot}$ at være kendt. Det antages, at der tilføjes endnu et dæklag med element nr. $n+1$ (fig. Al.6.1). I det følgende vises hvorledes absorptionen i dette lag og refleksionen fra den ændrede dæklagskonstruktion kan bestemmes.

Refleksionen for det enkelte element (i) i systemet sættes til R_i^i og R_i for stråling, der kommer henholdsvis indefra og udefra. Transmissionen for det i 'te element kaldes T_i . Størrelsen er ens set fra den udvendige og indvendige side. For element nr. i er absorptionen ved stråling fra indvendige side:

$$A_i' = 1 - R_i' - T_i$$

og den udvendige side:

$$A_i = 1 - R_i - T_i$$

Som vist på fig. Al.6.1 er den udgående bestrålingsstyrke fra det n'te element I_n^+ og den indgående bestrålingsstyrke I_n^- . Den indkommende bestrålingsstyrke på lag nr. n+1 sættes til:

$$I_{n+1}^- = 1 \quad (\text{Al.6.1})$$

Dermed er: $I_{n+1}^+ = R_{n+1, \text{tot}}$

For element nr. n vil det gælde, at

$$I_n^+ = R_{n, \text{tot}} I_n^- \quad (\text{Al.6.2})$$

$$I_n^- = T_{n+1} + R_{n+1}' \cdot I_n^+ \quad (\text{Al.6.3})$$

Af (Al.6.2) og (Al.6.3) fås den indadgående stråling:

$$I_n^- = \frac{T_{n+1}}{1 - R_{n+1}' R_{n, \text{tot}}} \quad (\text{Al.6.4})$$

Den udadgående stråling for element n bestemmes til:

$$I_n^+ = \frac{R_{n, \text{tot}} \cdot T_{n+1}}{1 - R_{n+1}' \cdot R_{n, \text{tot}}} \quad (\text{Al.6.5})$$

For element n+1 kan den udadgående stråling bestemmes til:

$$I_{n+1}^+ = R_{n+1} \cdot I_{n+1}^- + T_{n+1} \cdot I_n^+ = R_{n+1} + T_{n+1} \cdot I_n^+ \quad (\text{Al.6.6})$$

Ligning (Al.6.1), (Al.6.5) og (Al.6.6) giver:

$$R_{n+1,tot} = R_{n+1} + \frac{T_{n+1}^2 \cdot R_{n,tot}}{1 - R_{n+1}' \cdot R_{n,tot}} \quad (A1.6.7)$$

Denne ligning giver mulighed for bestemmelse af den samlede refleksion af de $n+1$ inderste elementer.

For at lette de efterfølgende beregninger indføres en hjælpestørrelse, kaldet toptransmissionen, defineret ved:

$$t_{n+1} = I_n^- / I_{n+1}^- \quad (A1.6.8)$$

Ved hjælp af (A1.6.4) og da $I_{n+1}^- = 1$ fås:

$$t_{n+1} = I_n^- = \frac{T_{n+1}}{1 - R_{n+1}' \cdot R_{n,tot}} \quad (A1.6.9)$$

En anden hjælpestørrelse, kaldet topabsorptionen indføres:

$$a_{n+1} = A_n' I_n^+ + A_{n+1} \cdot I_{n+1}^- \quad (A1.6.10)$$

Fra (A1.6.5) og (A1.6.10) fås, idet $I_{n+1}^- = 1$:

$$a_{n+1} = A_{n+1}' \frac{R_{n,tot} \cdot T_{n+1}}{1 - R_{n+1}' \cdot R_{n,tot}} + A_{n+1} \quad (A1.6.11)$$

Ønskes den indadgående stråling bestemt gælder:

$$I_{n-1}^- = t_n I_n^- \quad (A1.6.12)$$

Den resulterende absorption for lag nr. n kan bestemmes af:

$$A_{n,res} = a_n \cdot I_n^- \quad (A1.6.13)$$

Ovenstående ligninger kan benyttes til at bestemme de optiske konstanter for den aktuelle dæklagskonstruktion. Pr. definition gælder for absorberoverfladen, at:

$$R_1, tot = R_1, \quad T_1 = 0 \quad \text{og} \quad a_1 = A_1.$$

Ved hjælp af ligningerne (Al.5.9) og (Al.5.11) kan transmissionen T_i og refleksionen R_i for de enkelte lag bestemmes. Ved hjælp af (Al.6.7), (Al.6.9) og (Al.6.11) kan de øvrige konstanter bestemmes successivt, startende med inderste dæklag, idet n varieres mellem 1 og det aktuelle antal elementer i dæklagskonstruktionen.

Den nedadgående stråling kan bestemmes successivt ved hjælp af (Al.6.12), startende ved yderste dæklag.

Dermed er det muligt at bestemme den resulterende absorption i de enkelte lag ved hjælp af (Al.6.13). For absorberer kaldes denne størrelse for det resulterende transmissions-absorptionsprodukt.

Forudsætningen for metoden er, at refleksionen sker ved spejlende refleksion. Dette er ofte ikke tilfældet for absorberer, hvor refleksionen er diffus. Der kan evt. korrigeres delvis for dette ved at justere reflektions- og absorptionskoefficienterne på den side af dæklagene, der vender mod absorberer.

Al.6.2 Transmissions- og absorptionskoefficient for en dobbeltplade

I forsøgene (kap. 3) er anvendt en plexiglas dobbeltplade som dæklag. I dette og følgende afsnit er vist en metode, der er udviklet til beregning af transmissionen gennem et sådant dæklagssystem.

Transmissionskoefficienten ved solstråling for en dobbeltplade er ikke alene afhængig af indfaldsvinklen θ_i , men også af pladens retningsvinkel (ϕ) dvs. vinklen mellem projektionen af solstrålingen på pladens plan og ribbernes retning.

For at kunne beregne transmissionskoefficienten deles dobbeltpladen op i segmenter som vist på fig. Al.6.2. Al refleksion antages at være spejlende. Pladen deles op i 3 lag: De to yderste lag og ribberne. For en given indfalds- og retningsvin-

kel kan transmissionen og absorptionen beregnes som vist i afsnit Al.6.1 på grundlag af transmissions- og absorptionskoefficienten for det enkelte lag. Beregningen af disse størrelser er vist i afsnit Al.5.1 for top- og bundlaget. For ribberne er beregningsgangen vist i følgende afsnit.

Al.6.3 Beregning af optiske data for ribber i dobbeltplade

Brydningsvinklen $\theta_{b,v}$ kan, da ribbernes plan er vandret, findes som en funktion af solhøjden α og materialets brydningsindex n_2 . ((Al.4.4) og (Al.5.1)).

$$\begin{aligned}\theta_{b,v} &= \arcsin (\sin \theta_i / n_2) \\ &= \arcsin (\sin(\pi/2 - \alpha) / n_2) \\ &= \arcsin (\cos \alpha / n_2)\end{aligned}\tag{Al.6.14}$$

Betragtes et lag af ribber uden top og bundplade, vil (se fig. Al.6.2) andelen af strålingen, der rammer en ribbes overflade, udgøre:

$$n_{rib} = Z/L_{høj} = \frac{L_{rib} \cdot \operatorname{tg} \varphi}{L_{høj}}$$

Benyttes ligning (Al.4.6), gælder:

$$n_{rib} = \frac{L_{rib} \cdot \operatorname{tg} \alpha}{L_{høj} \cdot \cos \gamma}\tag{Al.6.15}$$

For små profilvinkler φ vil (Al.6.15) give for små værdier.

Den andel af strålingen, der passerer en ribbe, vil minimum være:

$$n_{rib,min} = L_{tyk}/L_{høj}\tag{Al.6.16}$$

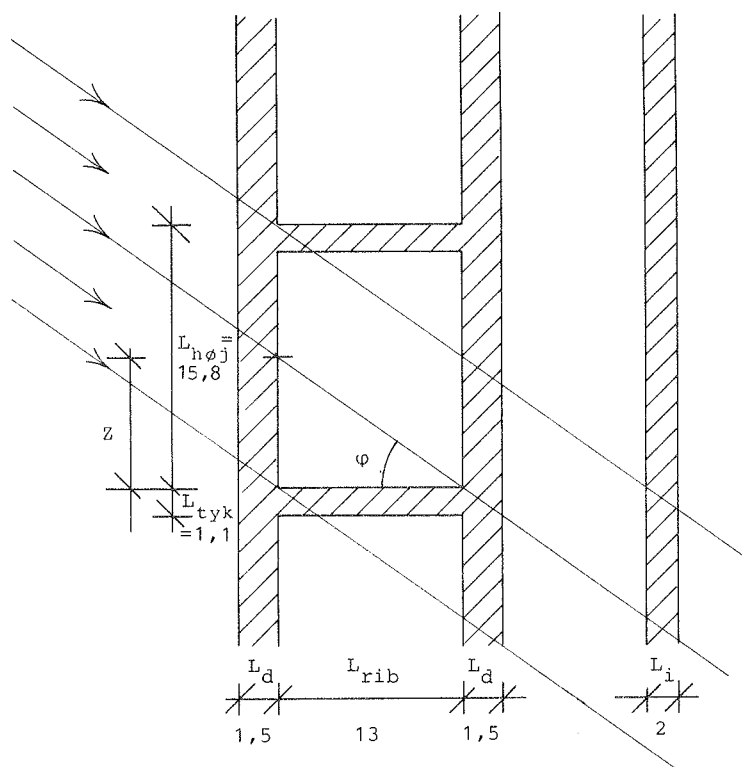


Fig. A1.6.2 Snit i dobbeltplade og ekstra dæklag. Alle mål i mm.

For et parallelt strålebundt vil den del af strålerne, der rammer ribbens top (se fig. A1.6.3) og passerer bagsiden, ikke i middel have passeret så stor en vejlængde i ribben som stråler, der rammer toppen og passerer ud gennem bunden.

Dette forhold kompenseres af at en del af strålerne rammer forsiden af ribben og passerer ud gennem bunden. Fejlen ved denne compensation stammer fra, at strålingen, der rammer forsiden, er brudt ved en lodret overflade, mens de øvrige stråler, der rammer ribben, brydes ved en vandret overflade.

Da ribbernes tværsnitsareal udgør 7% af hele arealet, er fejlen fra den øgede vejlængde gennem materialet begrænset.

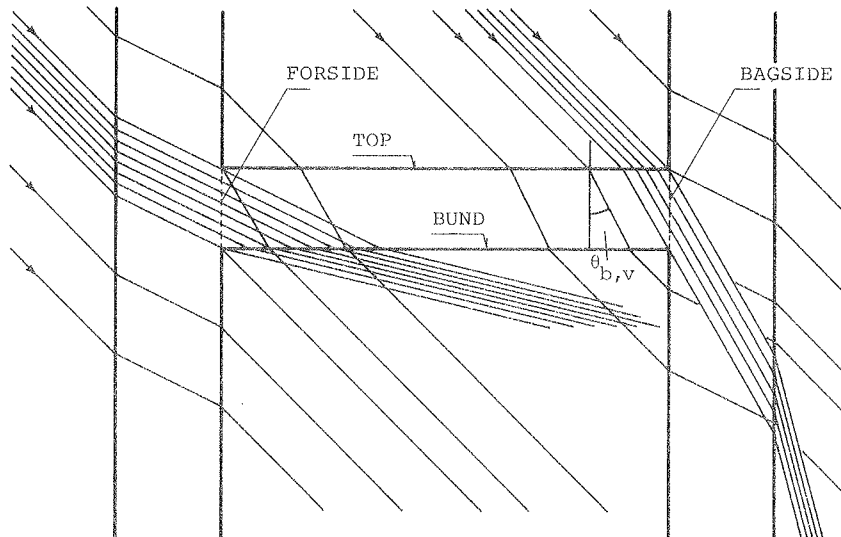


Fig. Al.6.3 Skematisk tegning af strålegang gennem dobbeltplade uden hensyntagen til refleksion mellem overfladerne.

Formel (Al.6.15) vil også være korrekt, med ovennævnte begrænsninger, selvom profilvinklen er så stor at strålerne i gennemsnit passerer mere end én ribbe.

Ved passage gennem én ribbe kan en stråles vejlængde gennem ribben bestemmes ud fra brydningsvinklen $\theta_{b,v}$ efter passage af ribbens top:

$$L_{pas} = L_{tyk} / \cos \theta_{b,v}$$

(Al.6.17)

Denne værdi kan benyttes ved beregning af, hvor meget af strålingen der bliver absorberet i ribben. På begge overflader sker en refleksion af strålingen (se fig. Al.6.4). Den stråling, der reflekteres før passage af ribben, giver ikke noget bidrag til absorptionen. Dette udlignes af, at den stråling, der er reflekteret efter passage af ribben (a fig. Al.6.4) næsten har samme størrelse som strålingen, der reflekteres før. Denne refleksion medfører en øgning af absorptionen med næsten lige så stort et bidrag som refleksion b, hvis denne stråling havde passeret ribben.

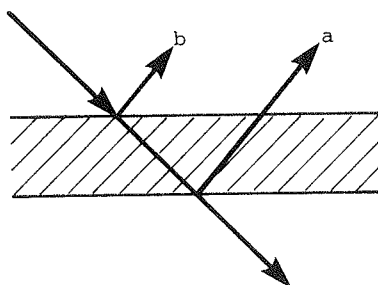


Fig. A1.6.4 Refleksion ved ribbeoverflade.

Den gennemsnitlige vejlængde, som strålingen passerer i ribberne, er:

$$\begin{aligned} L_{\text{res}} &= n_{\text{rib}} \cdot L_{\text{pas}} \\ &= \frac{n_{\text{rib}} \cdot L_{\text{tyk}}}{\cos \theta_{b,v}} \end{aligned} \quad (\text{A1.6.18})$$

Transmissionskoefficient med hensyn til absorption for ribberne betragtet som et lag parallelt med top og bundplade vil være:

$$\tau_{a,\text{rib}} = e^{-KL_{\text{res}}} \quad (\text{A1.6.19})$$

Transmissionskoefficienten med hensyn til refleksion vil være:

$$\tau_{r,\text{rib}} = 1 \quad (\text{A1.6.20})$$

Årsagen er, at ribbernes overflader er vinkelret på top- og bundplade. Dette medfører, da der er forudsat kun spejlende refleksion, at strålingen, der reflekteres af ribberne, vil blive kastet videre ind i dobbeltpladen. Den totale transmissionskoefficient for ribberne er:

$$T_{\text{rib}} = \tau_{a,\text{rib}} \cdot \tau_{r,\text{rib}} = e^{-KL_{\text{res}}} \quad (\text{A1.6.21})$$

Al.7 TRANSMISSION VED DIFFUS SOLSTRÅLING

Al.7.1 Absorption af diffus stråling i dæklagssystem med retningsafhængig transmission

I kapitel Al.6 er en metode til beregning af transmissionskoefficienten ved stråling i en bestemt retning beskrevet. Normalt vil der ved solindfald være en del af strålingen, der er diffus. Med forudsætning af en bestemt retningsafhængig stråling kan transmissionen for diffus stråling bestemmes ved integration over det halvrum overfladen kan se.

I det følgende antages, at overfladen er lodret sydvendt, og at de optiske egenskaber er uafhængige af bølgelængden. Strålingen, der absorberes fra et strålebundt, vil være proportional med den retningsafhængige absorptionskoefficient for laget $A(\alpha, \gamma)$, den indfaldende retningsbestemte strålings radians $I_i(\alpha, \gamma)$, cosinus til indfaldsvinklen $\cos \theta_i$ og rumvinklen fra strålebundtets skæringspunkt med overfladen til det areal strålebundtet afskærer på en imaginær halvkugle anbragt med centrum i skæringspunktet ($d\omega$). (Se fig. Al.7.1).

$$dq_{\text{abs}} = I_i(\alpha, \gamma) \cdot A(\alpha, \gamma) \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega \quad (\text{Al.7.1})$$

Opdeles halvkuglen i delementer efter solhøjden α og væg-solazimutvinklen γ , kan et delements areal udtrykkes som: (Fig. Al.7.2).

$$\Delta A = (r \cdot d\alpha)(r \cdot \cos \alpha \cdot d\gamma) \quad (\text{Al.7.2})$$

Rumvinklen til overfladeelementet er:

$$d\omega = \frac{\Delta A}{r^2} = \cos \alpha \, d\alpha \, d\gamma \quad (\text{Al.7.3})$$



VANDRET PLAN

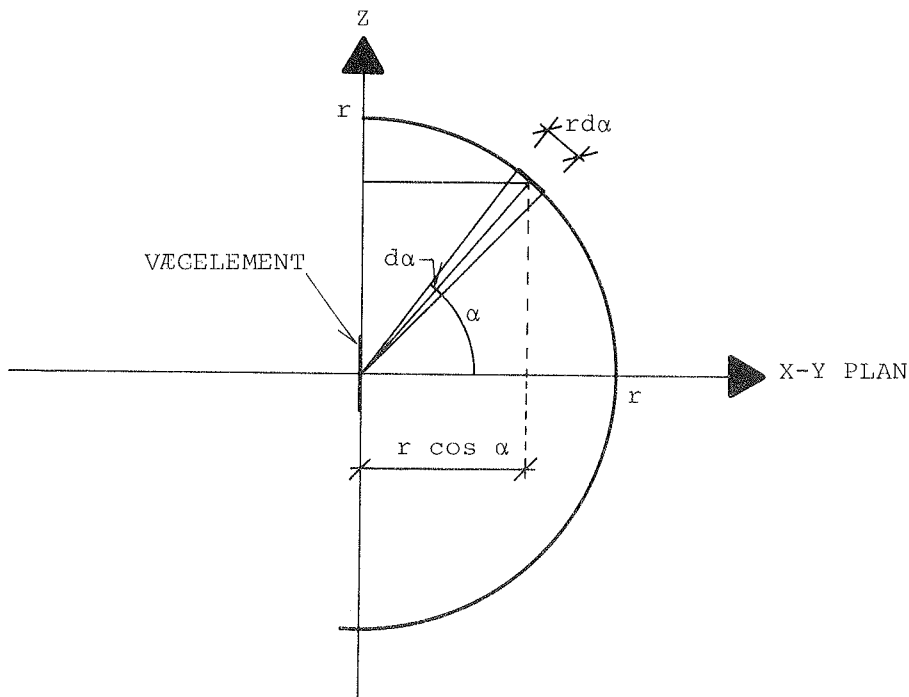


Fig. A1.7.2 Lodret snit i halvkugle.

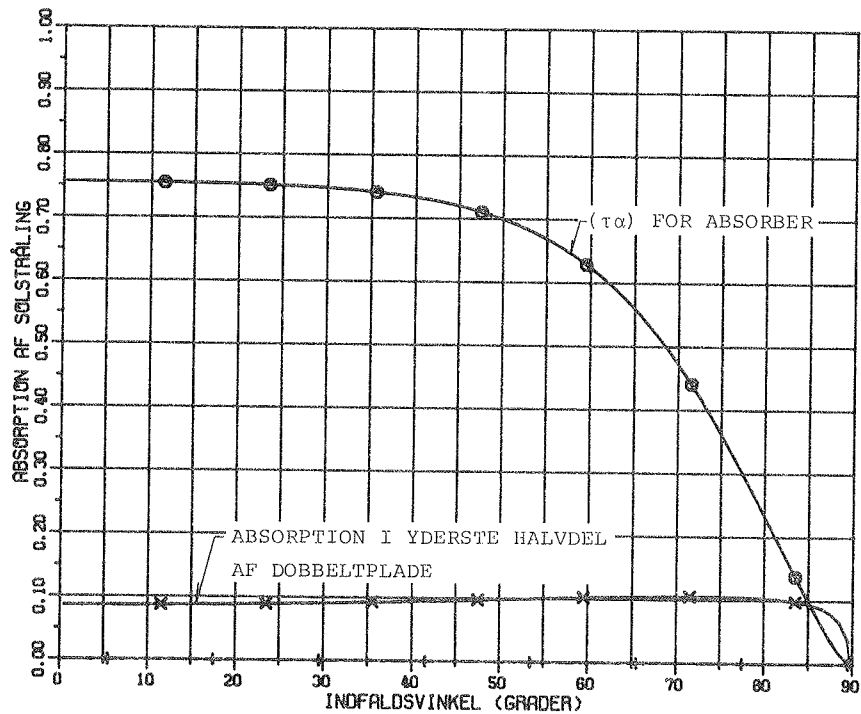


Fig. A1.7.3 Resulterende transmissions-absorptionsprodukt for absorber og absorption i dæklag. Dæklagskonstruktion af plexi-glas dobbeltplade. Solindfald ved forskellige azimutvinkler og solhøjde = 0. Vandrette ribber i dobbeltplade.

Fra (A1.7.1), (A1.7.3) og (A1.4.3) fås, at den absorberede stråling fra strålebundtet er:

$$dq_{\text{abs}} = I_i(\alpha, \gamma) \cdot A(\alpha, \gamma) \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos \gamma \cdot d\alpha \cdot d\gamma \quad (\text{A1.7.4})$$

Antages materialets optiske egenskaber at være uafhængig af bølgelængden, kan absorptionskoefficienten for den diffuse stråling bestemmes ved integration af den absorberede stråling over alle retninger:

$$A_{\text{dif}} = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_i(\alpha, \gamma) \cdot A(\alpha, \gamma) \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos \gamma \cdot d\alpha \cdot d\gamma}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_i(\alpha, \gamma) \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos \gamma \cdot d\alpha \cdot d\gamma} \quad (\text{A1.7.5})$$

Antages den indfaldende stråling at være retningsuafhængig diffus stråling med radiansen 1, og at overfladens egenskaber er dobbeltsymmetriske, kan integrationen over væg-sol azimutvinklen udføres over en vinkel på $\pi/2$ i overfladens plan:

$$A_{\text{dif}} = \frac{1}{(\pi/4)} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} A(\alpha, \gamma) \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos \gamma \cdot d\alpha \cdot d\gamma \quad (\text{A1.7.6})$$

Denne formel kan tilnærmes en summationsformel, idet vinklerne opdeles i 90 lige store delvinkler:

$$A_{\text{dif}} = \frac{1}{(\pi/4)} \left(\frac{(\pi/2)}{90^\circ} \right)^2 \sum_{\gamma=0,5^\circ}^{89,5^\circ} \sum_{\alpha=0,5^\circ}^{89,5^\circ} (A(\alpha, \gamma) \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos \gamma \cdot 1^\circ \cdot 1^\circ)$$

$$A_{\text{dif}} = \frac{\pi}{(90)^2} \sum_{\gamma=0,5^\circ}^{89,5^\circ} \sum_{\alpha=0,5^\circ}^{89,5^\circ} (A(\alpha, \gamma) \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos \gamma)$$

(A1.7.7)

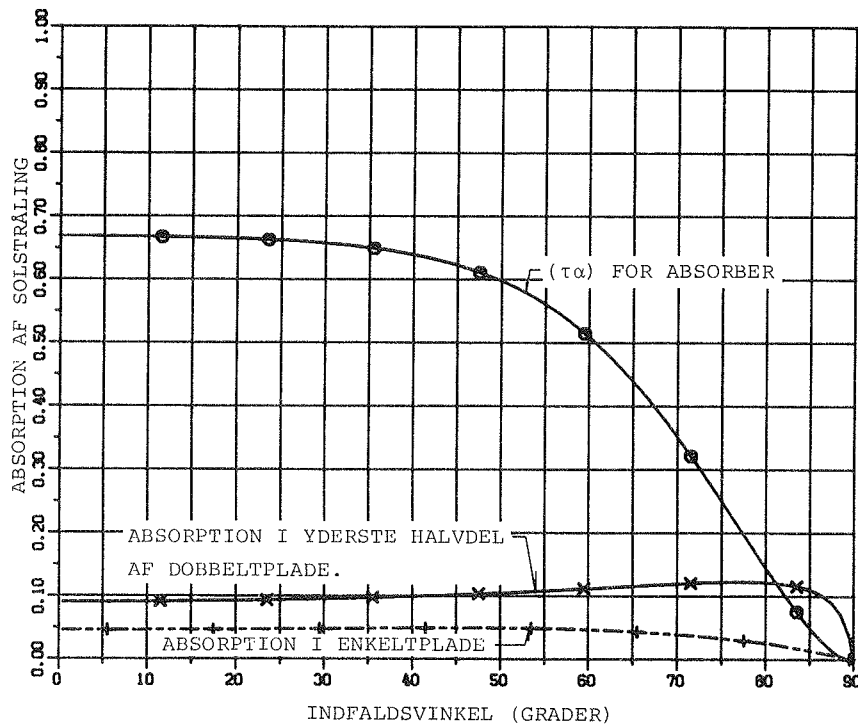


Fig. A1.7.4 Resulterende transmissions-absorptionsprodukt for absorber og absorption i dæklag. Dæklagskonstruktion af plexi-glas dobbelt- og enkeltplade. Solindfald ved forskellige azi-mutvinkler, solhøjde = 0. Vandrette ribber i dobbeltplade.

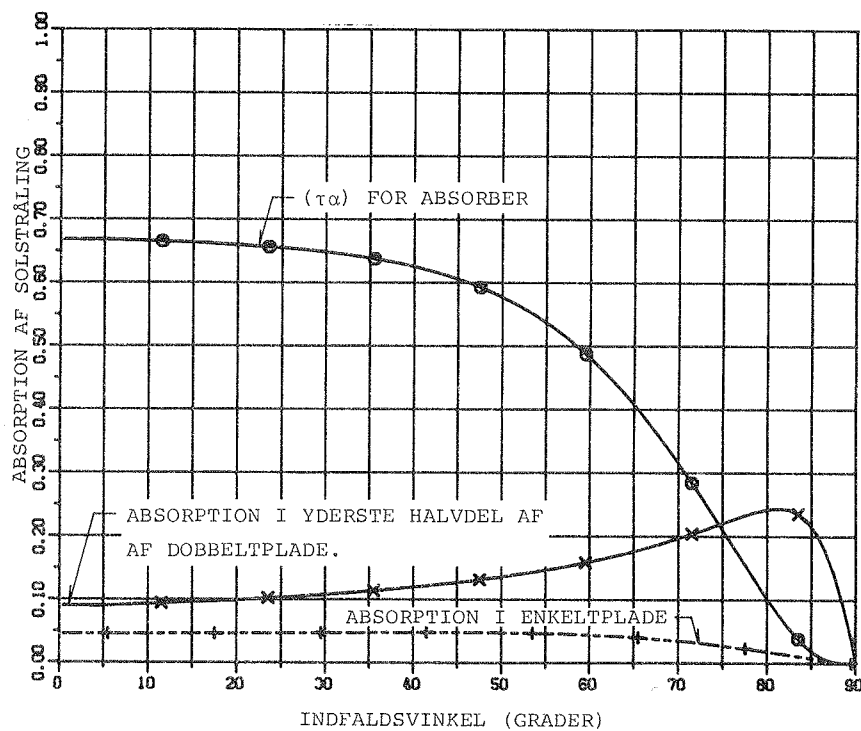


Fig. A1.7.5 Resulterende transmissions-absorptionsprodukt for absorber og absorption i dæklag. Dæklagskonstruktion af plexi-glas dobbelt- og enkeltplade. Solindfald ved forskellige sol-højder, azimut = 0. Vandrette ribber i dobbeltplade.

Formlen er benyttet til at finde absorption for diffus stråling i dæklagssystemet med plexiglasdobbeltpladen. Den resulterende retningsafhængige absorption i det enkelte lag kan bestemmes ved hjælp af teorien fra afsnit Al.6.2 og Al.6.3. Som materialedata er benyttet resultater fra afsnit Al.5.2 samt at absorptionskoefficienten for absorberen er 0,95. På dette grundlag er den resulterende absorption for det enkelte dæklag samt det resulterende transmissions-absorptionsprodukt for absorberen beregnet som funktion af retningen (fig. Al.7.3-Al.7.5) og totalt ved jævnt fordelt indfaldende diffus stråling (fig. Al.7.6).

	Yderste halvdel af dobbeltplade	Inderste halvdel af dobbeltplade	Inderste acrylplade	Absorber
Ingen acrylplade inderst (1. måleperiode)	0,065	0,051	0,000	0,640
Med acrylplade ved væg 2. måleperiode	0,068	0,056	0,044	0,543

Fig. Al.7.6 Absorption af diffus solstråling i dæklagssystem ved solvæg i de to måleperioder.

Al.7.2 Absorption af diffus stråling i dæklagssystem med indfaldsvinkelafhængig transmission

I stedet for integration over solhøjde og azimutvinkel som i afsnit Al.7.1 kan integrationen foretages over indfaldsvinkel θ_i og retningsvinkel ϕ .

Analogt med foregående udledning findes i (50) lign. (4.1.5) at den monokromatiske absorptionskoefficient er:

$$A_\lambda = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^1 A_\lambda(\mu, \phi) \cdot I_{\lambda, i}(\mu, \phi) \cdot d\mu \cdot d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^1 I_{\lambda, i}(\mu, \phi) \cdot \mu \cdot d\mu \cdot d\phi} \quad (\text{Al.7.8})$$

hvor $\mu = \cos \theta_i$

Antages uafhængighed af bølgelængde λ og retningsvinkel ϕ , kan absorptionskoefficienten for indfaldende diffus stråling bestemmes ved:

$$A_{\text{dif}} = \frac{\int_0^1 A(\mu) \cdot I_i(\mu) \cdot \mu \cdot d\mu}{\int_0^1 I_i(\mu) \cdot \mu \cdot d\mu} \quad (\text{A1.7.9})$$

Er radiansen af den indfaldende stråling retningsuafhængig $I_i(\mu) = 1$:

$$A_{\text{dif}} = 2 \cdot \int_0^1 A(\mu) \cdot \mu \cdot d\mu \quad (\text{A1.7.10})$$

Benyttes at $\mu = \cos\theta_i$:

$$A_{\text{dif}} = 2 \int_0^{\pi/2} A(\cos\theta_i) \cdot \cos\theta_i \cdot \sin\theta_i \cdot d\theta_i \quad (\text{A1.7.11})$$

Benyttes en summationsformel:

$$\begin{aligned} A_{\text{dif}} &\approx 2 \frac{\pi/2}{90^\circ} \sum_{j=0,5^\circ}^{89,5^\circ} (A(\cos j) \cdot \sin j \cdot \cos j) \cdot 1^\circ \\ &= \frac{\pi}{90} \sum_{j=0,5^\circ}^{89,5^\circ} (A(\cos j) \cdot \sin j \cdot \cos j) \end{aligned} \quad (\text{A1.7.12})$$

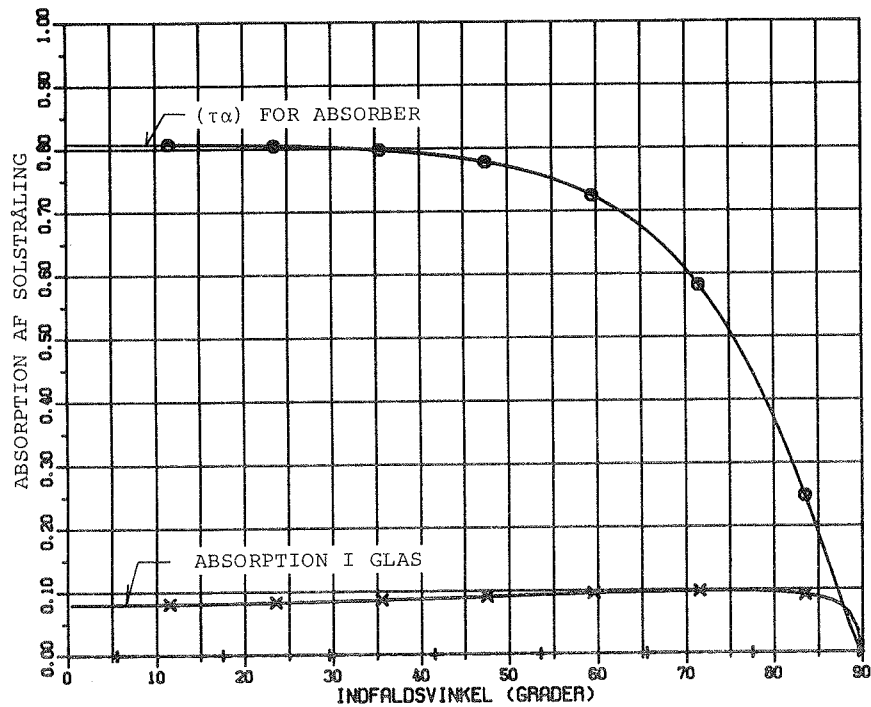


Fig. Al.7.7 Resulterende transmissions-absorptionsprodukt for absorber og absorption i dæklag. Dæklagskonstruktion af 1 lag almindeligt glas. Solindfald ved forskellige indfaldsvinkler.

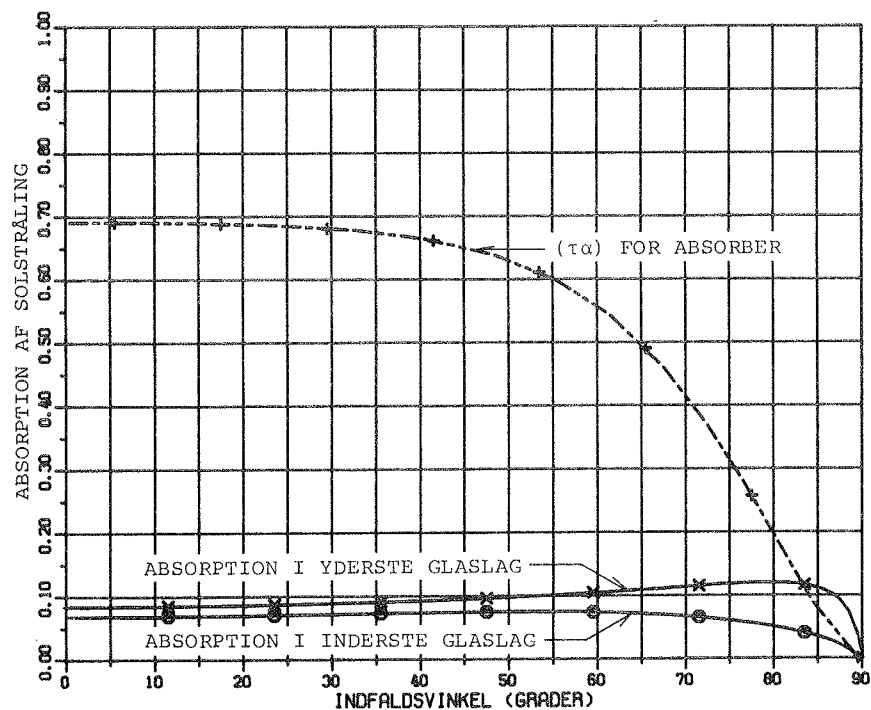


Fig. Al.7.8 Resulterende transmissions-absorptionsprodukt for absorber og absorption i dæklag. Dæklagskonstruktion af 2 lag almindeligt glas. Solindfald ved forskellige indfaldsvinkler.

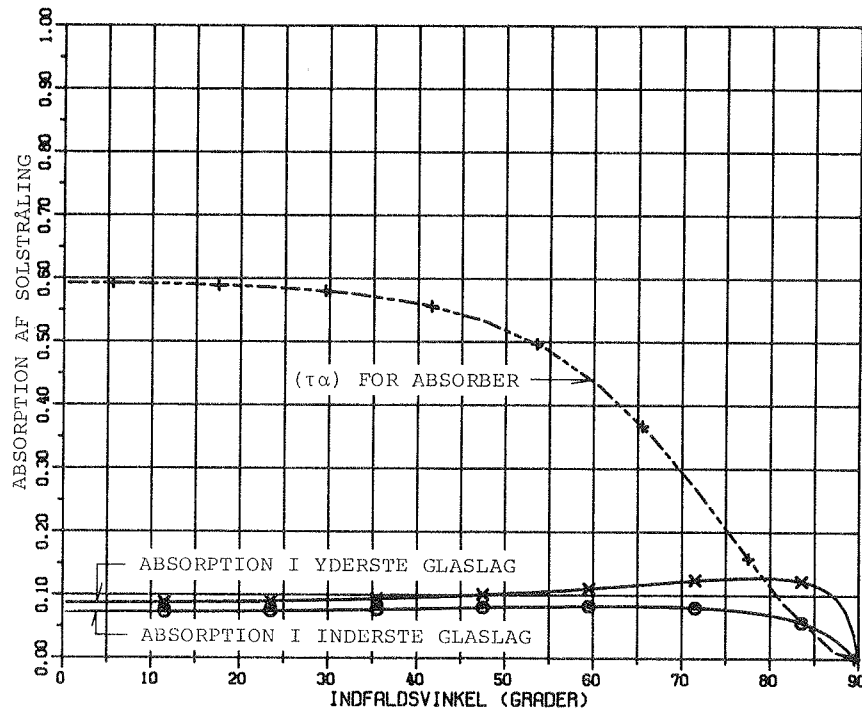


Fig. A1.7.9 Resulterende transmissions-absorptionsprodukt for absorber og absorption i dæklag med dæklagskonstruktion af 3 lag almindeligt glas. Solindfald ved forskellige indfaldsvinkler.

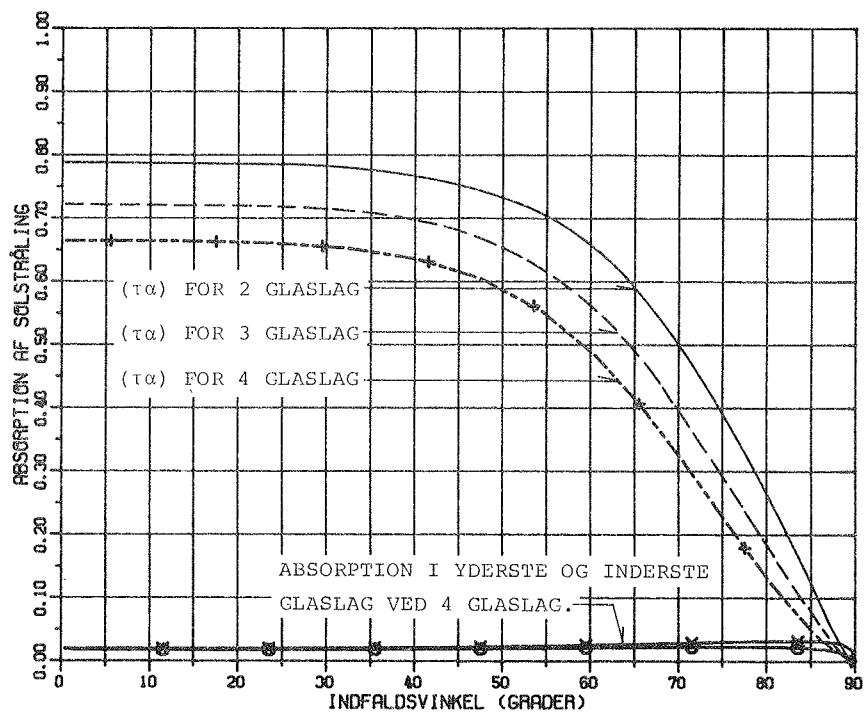


Fig. A1.7.10 Resulterende transmissions-absorptionsprodukt for solvæg med dæklagskonstruktion af 2-4 lag jernfrit glas ved forskellige indfaldsvinkler og absorption i glaslaget.

For et dæklagssystem er absorptionen af solstråling i glasset og på absorberen (A) beregnet som funktion af indfaldsvinklen. Der forudsættes en glastykkelse på 4 mm og en absorptionskoefficient for absorberen på 0,95.

Med dæklag af almindeligt glas med en ekstinktionskoefficient på 20 m^{-1} er der beregnet absorption for 1, 2 og 3 dæklag (fig. Al.7.7-Al.7.9). Endvidere er absorptionen for dæklagssystemet med 3 og 4 dæklag af glas med lavt jernindhold beregnet (fig. Al.7.10). Ekstinktionskoefficienten er sat til 4 m^{-1} .

På grundlag af disse kurver er der foretaget en beregning af absorptionen i dæklagssystemerne ved jævnt fordelt diffus stråling. (Fig. Al.7.11 og Al.7.12). Beregningen er foretaget ved hjælp af summationen angivet i lign. (Al.7.11).

	1. lag	2. lag	3. lag	Absorber
1 dæklag	0,09	-	-	0,73
2 dæklag	0,10	0,07	-	0,59
3 dæklag	0,10	0,08	0,06	0,48

Fig. Al.7.11 Transmissions-absorptionsproduktet og absorption i glas ved forskellige antal dæklag af almindeligt glas for diffus indstråling. Ekstinktionskoefficient for glas: 20 m^{-1} og absorptionskoefficient for absorber: 0,95. Glastykkelse 4 mm.

	1. lag	2. lag	3. lag	4. lag	Absorber
2 lag glas	0,02	0,02	-	-	0,69
3 lag glas	0,02	0,02	0,01	-	0,61
4 lag glas	0,02	0,02	0,02	0,01	0,55

Fig. Al.7.12 Absorption af jævnt fordelt diffus solstråling i dæklagssystem af glas med lavt jernindhold. Forudsætninger som fig. Al.7.11, dog ekstinktionskoefficient 4 m^{-1} .

Al.7.3 Transmission gennem glasfiberarmeret polyesterplade

Transmissionen gennem den aktuelle plade er ikke målt, men fra (69) er transmissionskoefficienten i afhængighed af indfaldsvinklen opgivet. På grundlag af kurven bestemmes et 4. grads polynomium, der tilnærmer kurven.

$$T = C_0 + C_1\theta_i + C_2\theta_i^2 + C_3\theta_i^3 + C_4\theta_i^4 \quad (\text{Al.7.13})$$

hvor θ_i = indfaldsvinkel (rad)
 C_0 = 0,8734 (-)
 C_1 = 0,0145 (rad⁻¹)
 C_2 = -0,1542 (rad⁻²)
 C_3 = 0,2208 (rad⁻³)
 C_4 = -0,2256 (rad⁻⁴)

Den maksimale fejl ved tilnærmelsen til dette polynomium er 0,007. Kurven er vist på fig. Al.7.13.

Ved retningsuafhængigt, diffust solindfald kan transmissionen bestemmes ved integration over alle indfaldsvinkler. Benyttes metoden som angivet i afsnit Al.7.2, bestemmes transmissionen til 0,749.

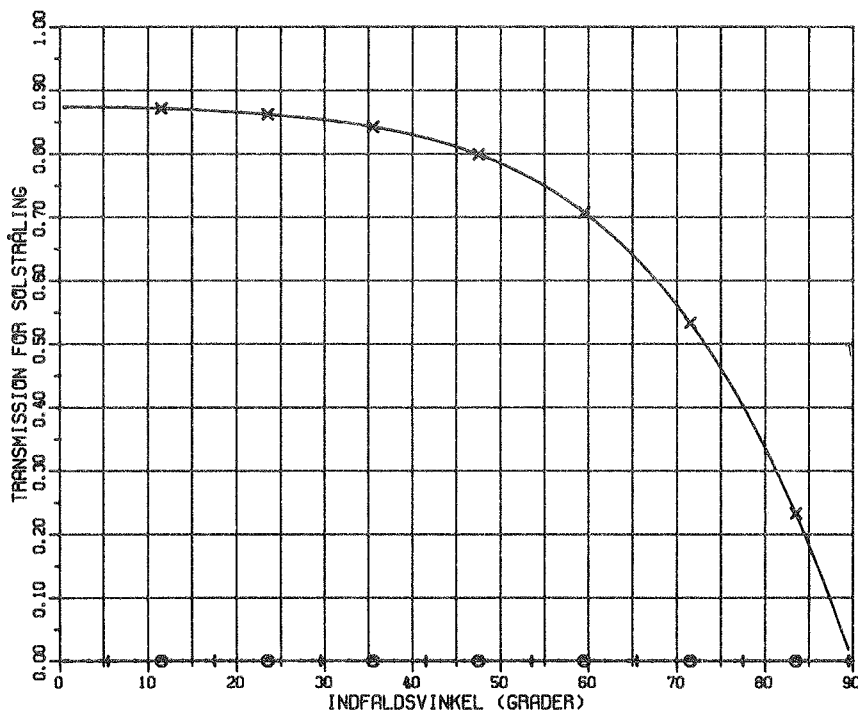


Fig. Al.7.13 Transmission for glasfiberarmeret polyesterplade.

Al.8 OPSTILLING AF LIGNINGSSYSTEMER TIL BESTEMMELSE AF TEMPERATURER

I det følgende gennemgås først ligningerne ved solvæg med mobil isolering og dernæst ligninger ved solvæg med hvid glasuld.

Al.8.1 Bestemmelse af temperaturer ved mobil isolering

For at finde varmestrømmen gennem dæklaget bestemmes temperaturen i et antal knudepunkter. Følgende punkter vælges: Ind- og udvendigt dæktag i dobbeltplade, i enkelt plade ved væg og udvendig overflade af væg. Se fig. Al.8.1. Temperaturen i knude-

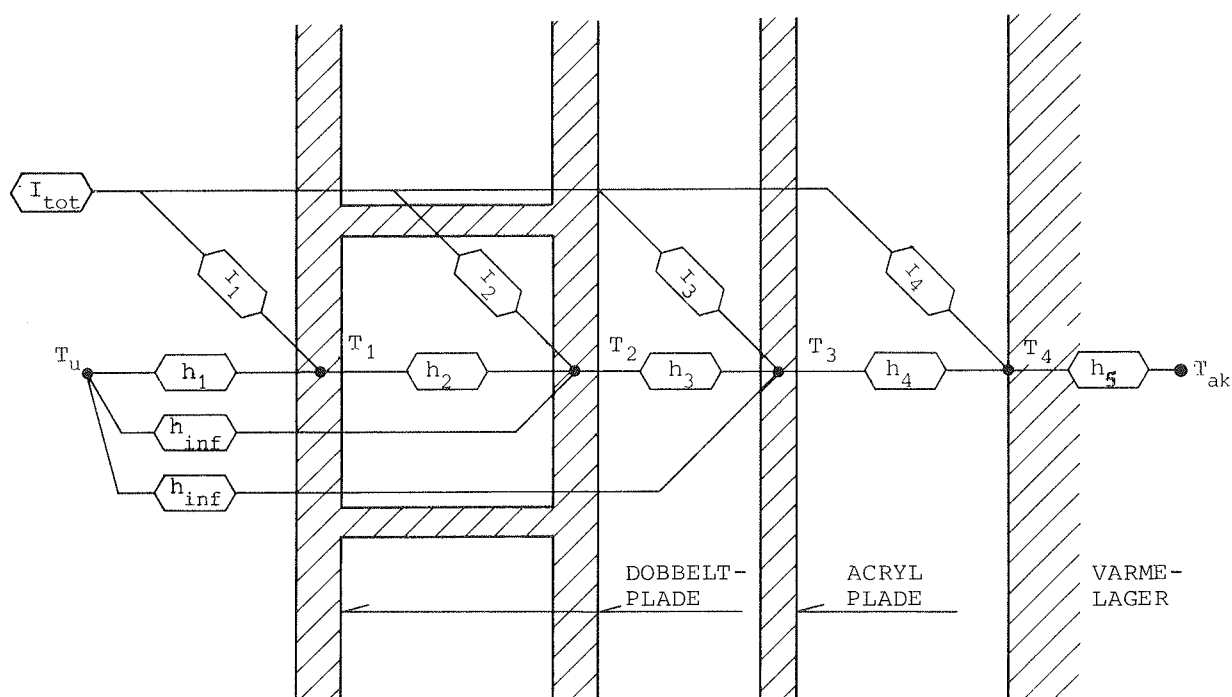


Fig. Al.8.1 Opdeling i knudepunkter af dæktag i solvæg med mobil isolering.

punkterne bestemmes på grundlag af temperaturen i yderste akkumulerende lag (T_{ak}) og udelufttemperaturen (T_u). De enkelte knudepunkter absorberer stråling ved solindfald (I_1 , I_2 , I_3 , I_4). Den absorberede stråling er bestemt ved metoden beskrevet i afsnit Al.6.2, Al.6.3 og Al.7.1. Varmeovergangen mellem de enkelte knudepunkter er bestemt i afsnittene Al.2 til Al.3. Varmeovergangstallet som følge af infiltration af udeluft mellem dæklagene (h_{inf}) kan bestemmes som vist i afsnit Al.2.2. Ved den udvendige overflade (afsnit Al.3.1) er der taget hensyn til konvektion og stråling til omgivelserne.

Følgende ligningssystem kan opstilles, idet der ses bort fra varmekapaciteten i dæklagene:

$$\begin{aligned}
 (T_1 - T_u) \cdot h_1 + (T_1 - T_2) \cdot h_2 & - I_1 = 0 \\
 (T_2 - T_1) \cdot h_2 + (T_2 - T_3) \cdot h_3 + (T_2 - T_u) \cdot h_{inf} & - I_2 = 0 \\
 (T_3 - T_2) \cdot h_3 + (T_3 - T_4) \cdot h_4 + (T_3 - T_u) \cdot h_{inf} & - I_3 = 0 \\
 (T_4 - T_3) \cdot h_4 + (T_4 - T_{ak}) \cdot h_5 & - I_4 = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} h_1 + h_2 & -h_2 & 0 & 0 \\ -h_2 & h_2 + h_3 + h_{inf} & -h_3 & 0 \\ 0 & -h_3 & h_3 + h_4 + h_{inf} & -h_4 \\ 0 & 0 & -h_4 & h_4 + h_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} h_1 \cdot T_u + I_1 \\ h_{inf} \cdot T_u + I_2 \\ h_{inf} \cdot T_u + I_3 \\ h_5 \cdot T_{ak} + I_4 \end{bmatrix} \quad (A1.8.1)
 \end{aligned}$$

Ligningssystemet løses ved hjælp af en subrutine, der løser et lineært ligningssystem for en positivt definit symmetrisk båndmatrix (70). Iteration foretages for at forbedre nøjagtigheden.

Ved beregninger uden et dæklag ved varmelageret sættes varmeovergangskoefficienten mellem overflade af varmelager og acrylplade til en værdi, der i praksis er uendelig stor. Ud fra temperaturerne bestemmes den varmestrøm, som tilføres lageret.

Ved mobilisolering i hulrummet ændres varmeovergangen svarende til udelukkende varmeledning i mobilisoleringen. Samtidig sættes infiltrationstabet og absorptionen i lagene af eventuel solstråling til 0.

Ved solvæggen med selektiv overflade er benyttet en tilsvarende fremgangsmåde som beskrevet ovenfor.

Al.8.2 Forudsætninger ved bestemmelse af temperaturfordeling i glasuld

Glasulden opdeles i lag, der hver antages at have konstant temperatur. De enkelte lags tykkelse varierer med mindst tykkelse ved udvendig side og størst tykkelse ved væggen. Dette giver, sammenlignet med en model med lige tykke lag, mulighed for et begrænset antal knudepunkter, uden at beregningsmodellens nøjagtighed mindskes.

De største temperaturgradienter findes ved udvendig overflade med solindfald på denne. Da glasulden har en lille massefylde, er der ikke taget hensyn til lagenes varmekapacitet. For at sammenligne målte og beregnede temperaturer i glasulden foretages en lineær interpolation af temperaturerne i beregningsknudepunkterne. Derved kan de beregnede temperaturer i målepunkterne bestemmes.

Al.8.3 Varmeovergang ved element med glasuld

Varmeledningsevnen for glasuld kan ifølge (71) ved en middeltemperatur på 20°C sættes til værdierne angivet i fig. Al.8.2.

Massefylde	Varmeledningsevne
ρ kg/m ³	λ W/mK
10	0,058
15	0,043
20	0,039
30	0,035
40	0,032
50	0,031
70	0,031
14,2	0,044
31,9	0,034

Fig. Al.8.2 Varmeledningsevne for mineraluld i afhængighed af rumvægt ved 20°C (71).

Ændringen af varmeledningsevnen kan ifølge (30) sættes til 0,8% pr. K ved temperaturændringer i området 0-100°C. Varmeovergangen ved udvendig overflade sker ved konvektion og stråling til terræn og himmel. Da der ikke er målt vindhastighed, benyttes strålingsudveksling med det fri og konvektion som angivet i afsnit Al.3.1. Varmeovergangstallet mellem yderste knudepunkt i glasulden og udelufttemperaturen bliver:

$$\begin{aligned} h_1 &= \left(\frac{1}{h_{\text{konv}} + h_{\text{str}}} + \frac{1}{h_{\text{ledn},g}} \right)^{-1} \\ &= \left(\frac{1}{h_{\text{konv}} + h_{\text{str}}} + \frac{\Delta x_1}{2\lambda_1} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (\text{Al.8.2})$$

hvor h_{konv} konvektivt varmeovergangstal iflg. (Al.3.2)

h_{str} varmeovergangstal ved stråling iflg. (Al.3.4)

$h_{\text{ledn},g}$ varmeoverføringstal ved ledning i glasuld iflg. ligning (Al.1.10)

Δx_1 yderste knudepunkts lags tykkelse

λ_1 varmeledningsevnen for glasulden i laget

Ved den indvendige side af glasuldelementet er der et hulrum på 10 mm. Isolansen M_h for dette hulrum er bestemt på grundlag af varmeovergang ved stråling og konvektion i et hulrum med lodrette planparallelle overflader (afsn. Al.2.1 og Al.2.3). Varmeovergangstallet mellem det knudepunkt (n) i glasulden, der er nærmest væggen og den udvendige overflade af væggen, kan bestemmes som:

$$\begin{aligned} h_{n+1} &= \left(M_h + \frac{1}{h_{\text{ledn}}} \right)^{-1} \\ &= \left(\frac{1}{h_{\text{konv}} + h_{\text{str}}} + \frac{2 \Delta x_n}{\lambda_n} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (\text{Al.8.3})$$

hvor	M_h	isolansen af hulrummet
	h_{ledn}	varmeovergangstallet mellem inderste lag i glasuld og overflade af glasuld
	Δx_n	er tykkelsen af isoleringslaget tættest ved væggen
	λ_n	varmeledningsevnen af isoleringen
	h_{konv}	varmeovergangstal ved konvektion (A1.2.1)
	h_{str}	varmeovergangstal ved stråling (A1.2.14)

A1.8.4 Lagdeling i hvid glasuld

Lagenes tykkelse bestemmes ved hjælp af en differensrække, således at mindste lag har tykkelsen a , og de næste lag vokser med tykkelsen d . Hele isoleringens tykkelse er:

$$\begin{aligned}
 L &= a + (a+d) + (a+2d) + (a + 3d) + \dots + (a + (n-1)d) \\
 &= \frac{a + (a + (n-1)d)}{2} n
 \end{aligned}
 \tag{A1.8.4}$$

For en given mindste tykkelse a og et givet antal intervaller n og samlet tykkelse L fås differensen til:

$$d = 2 \left(\frac{L}{n} - a \right) / (n - 1)
 \tag{A1.8.5}$$

I edb-programmet er a valgt til 5 mm og antal lag er valgt til 8 lag. Dette giver en differenstykkelse d på: 2,1 mm og en maksimal lagtykkelse på: 20 mm.

Al.8.5 Ligningssystem til beregning af temperaturer i hvid glasuld

Benyttes de i afsnit Al.5.3 fundne konstanter kan bestrålingsstyrken i overfladens plan i dybden x fra denne bestemmes som:

$$I_x = I_{t,i} \cdot \tau_0 \cdot e^{-Kx} \quad (\text{Al.8.6})$$

hvor $I_{t,i}$ er bestrålingsstyrken af den indfaldende stråling. Den absorberede stråling i lag nr. j , der afgrænses af overflader, der ligger i dybderne x_1 og x_2 fra udvendig overflade, vil være:

$$\begin{aligned} I_j &= I_{x_1} - I_{x_2} \\ &= I_{t,i} \cdot \tau_0 (e^{-Kx_1} - e^{-Kx_2}) \end{aligned} \quad (\text{Al.8.7})$$

Opstilles en ligning med temperaturligevægt for laget, fås at:

$$I_j + h_{(j-1)-j} \cdot (T_{j-1} - T_j) + h_{(j+1)-j} \cdot (T_{j+1} - T_j) = 0 \quad (\text{Al.8.8})$$

hvor $h_{(j-1)-j}$ og $h_{(j+1)-j}$ er varmeoverføringstallene til de omgivende lag med temperaturerne henholdsvis T_{j-1} og T_{j+1} .

Til bestemmelse af temperaturforløbet mellem udelufttemperaturen og yderste akkumulerende lag kan der opstilles et lineært ligningssystem. Lagenes numre er skitseret på fig. Al.8.3.

$$\begin{aligned} (h_1 + h_2) \cdot T_1 - h_2 \cdot T_2 &= I_1 + h_1 T_u \\ -h_2 \cdot T_1 + (h_2 + h_3) \cdot T_2 - h_3 \cdot T_3 &= I_2 \\ -h_3 \cdot T_2 + (h_3 + h_4) \cdot T_3 - h_4 \cdot T_4 &= I_3 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ -h_{n-1} \cdot T_{n-2} + (h_{n-1} + h_n) \cdot T_{n-1} - h_n \cdot T_n &= I_{n-1} \\ -h_n \cdot T_{n-1} + (h_n + h_{n+1}) \cdot T_n - h_{n+1} \cdot T_{n+1} &= I_n \\ -h_{n+1} \cdot T_n + (h_{n+1} + h_{n+2}) \cdot T_{n+1} &= I_{n+1} + h_{n+2} \cdot T_{ak} \end{aligned} \quad (\text{Al.8.9})$$

Ligningssystemet kan skrives på matrixform:

$$\underline{\underline{H}} \underline{T} = \underline{B}$$

(A1.8.10)

hvor

$$\underline{\underline{H}} = \begin{bmatrix} h_1 + h_2 & -h_2 & 0 & 0 \\ -h_2 & (h_2 + h_3) & -h_3 & 0 \\ 0 & -h_3 & (h_3 + h_4) & -h_4 \\ & & & - \\ & & & - \\ & & & -h_{n-1} & h_{n-1} + h_n & -h_n & 0 \\ & & & 0 & -h_n & h_n + h_{n+1} & -h_{n+1} \\ & & & 0 & 0 & -h_{n+1} & h_{n+1} + h_{n+2} \end{bmatrix}$$

$$\underline{T} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{n-1} \\ T_n \\ T_{n+1} \end{bmatrix} \quad \underline{B} = \begin{bmatrix} I_1 + h_1 \cdot T_u \\ I_2 \\ I_3 \\ I_{n-1} \\ I_n \\ I_{n+1} + h_{n+2} \cdot T_{ak} \end{bmatrix}$$

Her er $\underline{\underline{H}}$ en symmetrisk båndmatrix, hvilket udnyttes ved valg af FORTRAN subrutine til løsning af ligningssystemet. Der benyttes IMSL subrutinen LEQ2PB (70).

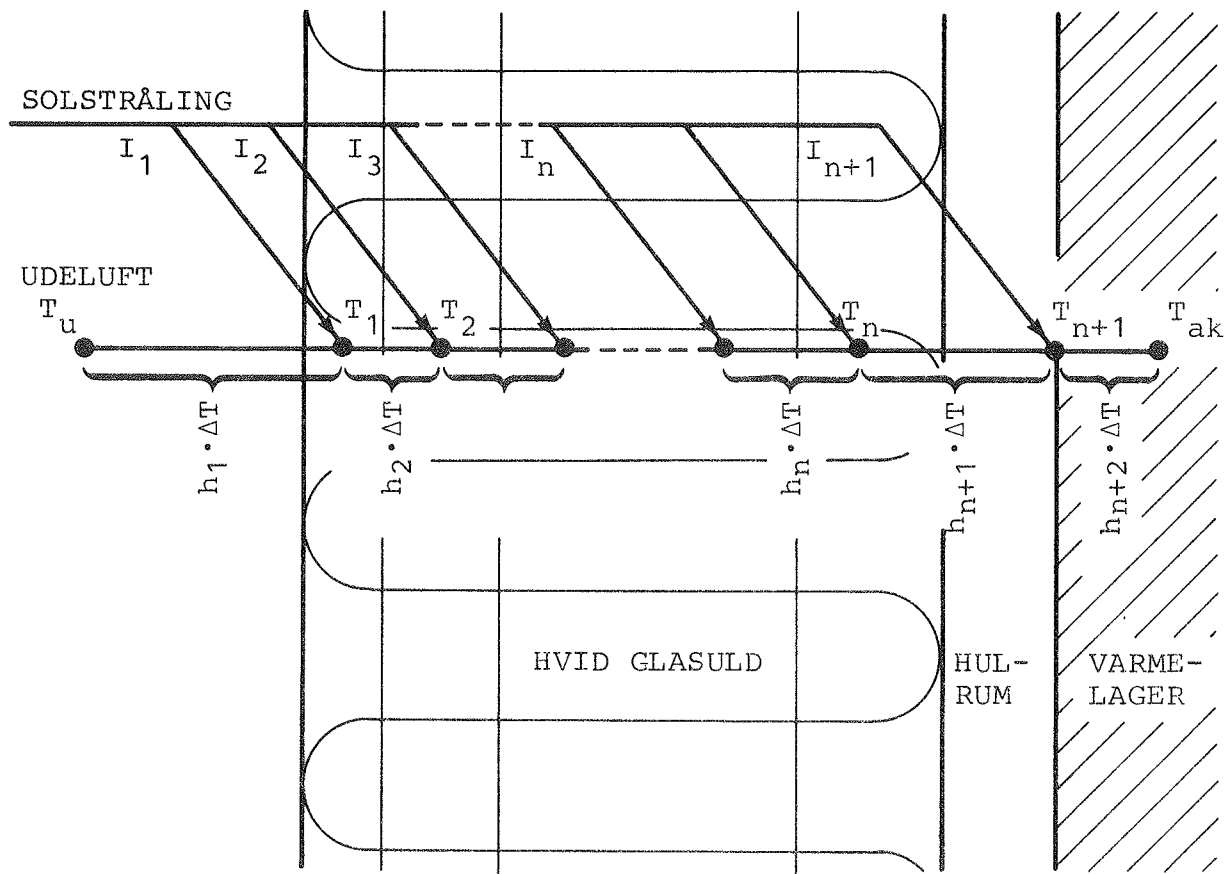


Fig. Al.8.3 Skematisk tegning af lagdeling i glasuld.

Al.8.6 Ligningssystem til beregning af temperaturer i varmelageret

Solvæggens varmelager er beregnet ved den eksplicitte beregningsmetode, der er angivet i afsnit Al.1. Ved den indvendige overflade er der regnet med varmeovergang ved konvektion og stråling som beskrevet i afsnittet Al.3.2. Størrelsen af varmeovergangene bestemmes ved målingerne af den målte rumlufttemperatur og overfladetemperatur.

Ved beregninger, hvor solvæggen er inkorporeret i edb-programmet BA4's rummodel, er denne models overflade- og rumlufttemperatur benyttet til at bestemme varmestrømmen mellem BA4-rummodellen og varmelagerets inderste akkumulerende lag. Varmeud-

vekslingen tilføres BA4-rummodellen fordelt på et konvektions- og et strålingsbidrag til varmebalancen. For den udvendige overflade er beregningsmetoden som beskrevet i afsnittene A1.8.1 og A1.8.5 for henholdsvis solvæggene med mobil isolering og hvid glasuld. Ved disse metoder beregnes en varmestrøm, der tilføres eller afgives til varmelagerets yderste akkumulerende lag.

Beregningsmodellen er anvendt til sammenligning af beregninger med målinger (kap. 2). Ved disse beregninger er benyttet en inddeling af lageret i 6 lige tykke lag og et tidsskridt på $1/6$ time.

Ved beregninger med solvæggen anvendt i parcelhus (kap. 2) er antallet af lag sat til 3 og tidsskridtet sat til $1/2$ time. Denne ændring medførte kun ubetydelige ændringer af det beregnede årsudbytte for solvæggen.

A2 USIKKERHEDSBESTEMMELSE

Usikkerheden på temperaturer, varmestrømsmålinger, solindfald, udbytte og effektivitet bestemmes i det følgende.

A2.1 Usikkerhedsoverslag for måling af temperaturer

Termoelementerne er placeret således, at loddestedet må antages at have den korrekte temperatur. Alle tilledninger har en længde på ca. 50 cm med samme temperaturforhold som loddestedet.

Temperaturreferencen har haft en maksimal afvigelse på $\pm 0,3$ K i løbet af måleperioderne.

Fra måleresultaterne ses spring i temperaturen på 0,6 K, der skyldes, at temperaturreguleringen er mindre præcis end oprindeligt ønsket. Svingningerne har forplantet sig til de sekundære referenceboxe til trods for deres store indvendige varmekapacitet. Dette har givet en uensartet temperaturfordeling i referenceboxen. Usikkerheden i den sekundære referencebox's temperatur skønnes at være $\pm 0,3$ K.

Måleusikkerheden på dataloggeren er ifølge manualen $\pm 0,04\%$ af fuldt udslag på 40 mV. Dette svarer til $\pm 0,4$ K. Omsætningen fra mV til K er ifølge (36) behæftet med en usikkerhed på $\pm 0,1$ K. Sammenfattende skønnes usikkerheden på temperaturmålingen at være $\pm 0,6$ K.

A2.2 Usikkerhedsoverslag for måling af varmemstrøm

Varmestrømmen i en periode bestemmes som en middelværdi af n målinger:

$$q_v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (K_v \cdot P_i \cdot (1 - (t_i - 20) \cdot 0,002))$$

$$\approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (K_v \cdot P_i) = K_v P \quad (\text{A2.1})$$

hvor K_v er kalibreringskonstanten for varmemstrømsmåleren ($\text{W}/(\text{m}^2 \text{ mV})$)

P_i er spændingen (mV) i i 'te måling

P er middelspændingen

t_i er overfladetemperaturen i i 'te måling

Ved usikkerhedsoverslaget ses bort fra usikkerhed på temperaturkorrektionen, da dennes relative ubestemthed er omkring 1%. Afvigelsen på kalibreringskonstanten må anses for at være uafhængig af målingen.

Ifølge (38) er den relative usikkerhed på K_v :

$$\frac{S_{K_v}}{K_v} = 0,05 \quad (\text{A2.2})$$

Usikkerheden på spændingsmålingen er 0,04% af fuldt udslag, der er 40 mV: $S_{P_i} = 0,04 \cdot 10^{-2} \cdot 40 = 0,016 \text{ mV}$.

Da den målte spænding typisk er omkring 1 mV, vil den relative usikkerhed på varmemstrømsmålingen være lig med 5%, der er den relative usikkerhed på kalibreringskonstanten.

A2.3 Usikkerhedsoverslag for måling af solindfald

Solarimetret af mærket Kipp & Zonen har ifølge fabrikken en ubestemthed på $\pm 5\%$. Det analoge signal integreres i en halvtime, hvorefter dataloggeren scanner alle kanaler og nulstiller integratoren.

Ved hvert scan "tabes" et tidsrum, hvor der ikke integreres. Scannes hver halve time, fås en fejl på 1% .

Ubestemtheden på integratoren er ifølge manualen (72) $\pm 1\%$ af fuldt udslag (10 mV):

$$S_{P_i} = 0,01 \times 10 = 0,1 \text{ mV.}$$

Integratoren har en integrationstid på 1 time. Da der scannes hver halve time, kan omregningsfaktoren (K) fra integratorspænding (P_i) til bestrålingsstyrken (I_i) bestemmes af ligning (3.2.3):

$$I_i = K P_i$$

hvor

$$K = \frac{2}{12,9 \cdot 10^{-3}} = 155 \text{ W/(m}^2 \text{ mV)}$$

Det antages, at der i gennemsnit var 2 halvtimer pr. dag, hvori mobilisoleringen blev flyttet, og at bestrålingsstyrken på disse tidspunkter var det halve af middelbestrålingsstyrken. Ubestemtheden på varigheden af solindfaldet på disse tidspunkter er $S_{\Delta\tau_i} = 1/2 \text{ h} = 1800 \text{ s}$.

Det målte solindfald er bestemt ved:

$$Q = \sum_{i=1}^n (I_i \cdot \Delta\tau_i) = K \sum_{i=1}^n (P_i \cdot \Delta\tau_i)$$

(A2.3)

Forudsættes den enkelte måleperiodes længde ($\Delta\tau_i$) at være konstant gælder:

$$Q = n \cdot K \cdot P_m \cdot \Delta\tau_i = n \cdot I_m \cdot \Delta\tau_i \quad (\text{A2.4})$$

hvor P_m er middelspændingen og I_m middelbestrålingsstyrken for et antal måleperioder.

De afledede er:

$$\frac{\partial Q}{\partial K} = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot \Delta\tau_i) \quad (\text{A2.5})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial P_i} = K \cdot \Delta\tau_i \quad (\text{A2.6})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \Delta\tau_i} = K \cdot P_i \quad (\text{A2.7})$$

Den relative usikkerhed kan bestemmes af:

$$\begin{aligned} \frac{s_Q}{Q} &= \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial K} \cdot s_K\right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Q}{\partial P_i} \cdot s_{P_i}\right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Q}{\partial \Delta\tau_i} \cdot s_{\Delta\tau_i}\right)^2}}{Q} \\ &= \sqrt{\left(\frac{s_K}{K}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\tau_i \cdot s_{P_i})^2}{\left(\sum_{i=1}^n (P_i \cdot \Delta\tau_i)\right)^2} + \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \cdot s_{\Delta\tau_i})^2}{\left(\sum_{i=1}^n (P_i \cdot \Delta\tau_i)\right)^2}} \quad (\text{A2.8}) \end{aligned}$$

I oktober 1979 var der solindfald på absorberen i $n = 169$ halvtimer med en middelbestrålingsstyrke på 593 W/m^2 . Antal halvtimer, hvor kuglerne flyttedes, skønnes at være: $n_f = 2 \cdot 31 = 62$. Den relative usikkerhed i denne periode kan bestemmes til:

$$\begin{aligned}
\frac{s_Q}{Q} &= \sqrt{\left(\frac{s_K}{K}\right)^2 + \frac{n \cdot (\Delta\tau_i \cdot s_{P_i})^2}{(n \cdot P_m \cdot \Delta\tau_i)^2} + \frac{n_f (P_m/2 \cdot s_{\Delta\tau_i})^2}{(n \cdot P_m \cdot \Delta\tau_i)^2}} \\
&= \sqrt{\left(\frac{s_K}{K}\right)^2 + \frac{1}{n} \left(\frac{s_{P_i}}{I_m/K}\right)^2 + \frac{n_f}{4n^2} \left(\frac{s_{\Delta\tau_i}}{\Delta\tau_i}\right)^2} \\
&= \sqrt{(0,05)^2 + \frac{1}{169} \left(\frac{0,1}{593/155}\right)^2 + \frac{62}{4(169)^2} \left(\frac{1/2}{1/2}\right)^2} \\
&= \sqrt{0,0025 + 0,000004 + 0,00054} \\
&= 0,055 \approx 6\%
\end{aligned} \tag{A2.9}$$

A2.4 Usikkerhedsoverslag for måling af udbyttet

Udbyttet af solvæggen bestemmes som differensen mellem den målte varmestromstæthed (q_v) og varmetabet gennem en normalt isoleret solvæg (q_y).

$$q_{udb} = q_v - q_y \tag{A2.10}$$

idet varme, der tilføres rummet, regnes positivt. Varmestrommene beregnes som middelværdier af perioder på 1 måned.

Varmetabet gennem en normalt isoleret ydervæg er beregnet ved hjælp af et edb-program på grundlag af det målte solindfald, rum- og udelufttemperaturer, der benytter samme metode som beskrevet i appendix A1.3. For at få et overslagsmæssigt billede af usikkerheden undersøges, hvorledes varmebalancen for en normalt isoleret væg kan bestemmes ved simple udtryk. Varmestrommen kan opdeles i et bidrag, der skyldes varmetransmission fra rummet til det fri og et bidrag, der skyldes solindfaldet.

Bidraget fra varmetransmission på grund af temperaturforskelle kan bestemmes ved hjælp af:

$$q_o = - \frac{1}{n} k \sum_{i=1}^n \Delta T_i \quad (\text{A2.11})$$

hvor ΔT_i er temperaturforskellen mellem rumluft og udeluft og n er antal måleperioder.

For at finde det andet bidrag bestemmes først middelbestrålingsstyrken af den absorberede solstråling:

$$q_{abs} = \frac{1}{n} \cdot \alpha \cdot \sum_{i=1}^n I_i \quad (\text{A2.12})$$

hvor α er absorptionskoefficienten og I_i er bestrålingsstyrken af solindfaldet. Af den absorberede solstråling afgives en del til det fri og en del til rummet. Antages konstante varmeovergangskoefficienter, vil den del af den absorberede stråling, der ledes til rummet, være lig varmeoverføringstallet mellem den udvendige overflade og rummet (h_2) divideret med summen af varmeoverføringstallet fra udvendig overflade til henholdsvis det fri (h_1) og rummet:

$$C = \frac{h_1}{h_1 + h_2} = \frac{1/h_2}{1/h_2 + 1/h_1} = m_u \cdot k \quad (\text{A2.13})$$

hvor m_u er udvendig varmeovergangsisolans og k er varme-transmissionskoefficienten for hele væggen. Den absorberede solstråling, der tilføres rummet, kan bestemmes af

$$\begin{aligned} q_a &= C \cdot q_{abs} \\ &= m_u \cdot k \cdot \alpha \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \\ &= m_u \cdot k \cdot \alpha \cdot K \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \end{aligned} \quad (\text{A2.14})$$

hvor K er kalibreringskonstanten for solarimetret og P_i er den målte spænding. Varmetabet gennem den normalt isolerede ydervæg kan dermed bestemmes af:

$$q_y = q_o + q_a \quad (\text{A2.15})$$

Udbyttet kan dermed bestemmes som:

$$q_{udb} = q_v - (q_o + q_a) \quad (\text{A2.16})$$

Til bestemmelse af udbyttet kan lign. (A2.1), (A2.11) og (A2.14) benyttes.

Det forudsættes, at der ikke er ubestemthed af materialeverdierne for den normalt isolerede ydervæg. Dermed kan usikkerheden bestemmes som funktion af K_v , ΔT_i og K . Følgende størrelser beregnes:

$$\frac{\partial q_{udb}}{\partial K_v} = \frac{q_v}{K_v} \quad (\text{A2.17})$$

$$\frac{\partial q_{udb}}{\partial \Delta T_i} = \frac{k}{n} \quad (\text{A2.18})$$

$$\frac{\partial q_{udb}}{\partial K} = \frac{-q_a}{K} \quad (\text{A2.19})$$

Den relative ubestemthed kan dermed bestemmes til:

$$\begin{aligned} \frac{s_{q_{udb}}}{q_{udb}} &= \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial q_{udb}}{\partial K_v} \cdot S_{K_v}\right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial q_{udb}}{\partial \Delta T_i} \cdot S_{\Delta T_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{udb}}{\partial K} \cdot S_K\right)^2}}{q_{udb}} \\ &= \frac{\sqrt{\left(\frac{q_v}{K_v} \cdot S_{K_v}\right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{k}{n} \cdot S_{\Delta T_i}\right)^2 + \left(\frac{q_a}{K} \cdot S_K\right)^2}}{q_{udb}} \\ &= \frac{\sqrt{\left(0,05 \cdot q_v\right)^2 + \frac{1}{n} \left(\sqrt{2} \cdot 0,6 k\right)^2 + \left(0,06 \cdot q_a\right)^2}}{q_{udb}} \end{aligned}$$

(A2.20)

Indsætttes talværdier, fås i de fire måneder, hvor der er målt, at den relative ubestemthed er fundet til at være mellem 0,04 og 0,05 for solvæggen med mobil isolering. Ved solvæggen med hvid glasuld, er den relative usikkerhed bestemt til at ligge mellem 6 og 11%.

Det er hovedsagelig usikkerheden på varmestrømsmåleren, der er af betydning, mens usikkerheden på temperaturforskellen helt er uden betydning.

A2.5 Usikkerhedsoverslag for måling af effektiviteten

For solvæggen med mobil isolering er effektiviteten f beregnet som forholdet mellem udbyttet og solindfaldet.

Til beregning af usikkerhed kan f bestemmes af:

$$f = \frac{q_{udb}}{q_s} \approx \frac{q_v - (q_o + q_a)}{q_s} \quad (A2.21)$$

Følgende størrelser benyttes:

$$\frac{\partial f}{\partial K_v} = \frac{q_v}{q_s \cdot K_v} \quad (A2.22)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \Delta T_i} = \frac{k}{n \cdot q_s} \quad (A2.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial K} &= - q_{udb} \cdot q_s^{-2} \frac{\partial q_s}{\partial K} + \frac{\partial q_{udb}}{\partial K} q_s^{-1} \\ &= - q_{udb} \cdot q_s^{-2} \frac{q_s}{K} - \frac{q_a}{K} \cdot q_s^{-1} \\ &= - \frac{1}{K \cdot q_s} \cdot (q_a + q_{udb}) \end{aligned} \quad (A2.24)$$

Den relative usikkerhed kan dermed bestemmes af:

$$\begin{aligned}
 \frac{s_f}{f} &= \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial K_v} \cdot s_{K_v}\right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial \Delta T_i} \cdot s_{\Delta T_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial K} \cdot s_K\right)^2}}{f} \\
 &= \frac{\sqrt{\left(\frac{q_v}{q_s \cdot K_v} \cdot s_{K_v}\right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{k}{n \cdot q_s} \cdot s_{\Delta T_i}\right)^2 + \left(\frac{(q_a + q_{udb})}{K \cdot q_s} \cdot s_K\right)^2}}{f} \\
 &= \frac{1}{q_{udb}} \sqrt{\left(q_v \frac{s_{K_v}}{K_v}\right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{k}{n} \cdot s_{\Delta T_i}\right)^2 + \left((q_a + q_{udb}) \cdot \frac{s_K}{K}\right)^2} \\
 &= \frac{1}{q_{udb}} \sqrt{(0,05 q_v)^2 + \frac{1}{n} (\sqrt{2} \cdot 0,6 k)^2 + (0,06 \cdot (q_a + q_{udb}))^2} \quad (A2.25)
 \end{aligned}$$

Ved at indsætte værdierne for de fire måneder, fås en relativ usikkerhed på mellem 7 og 8%. Både usikkerheden på måling af varmestrøm og solindfald har betydning.

A3 KONTROL AF MOBILISOLERINGENS FUNKTION

A3.1 Bestemmelse af tidspunkt for flytning af mobil isolering

Til at måle om der er mobil isolering i hulrummet er der opsat en indikator, der måler en styrespænding i reguleringskredsløbet. Styrespændingen er vekselstrøm, og ved at anvende den på fig. A3.1 viste kreds opnås, at når mobilisoleringen er i hulrummet, vil spændingen være konstant, mens, når hulrummet er tømt, falder målespændingen, idet den opladede kondensator aflades gennem dataloggerens voltmeter.

Styrespænding fra relæ

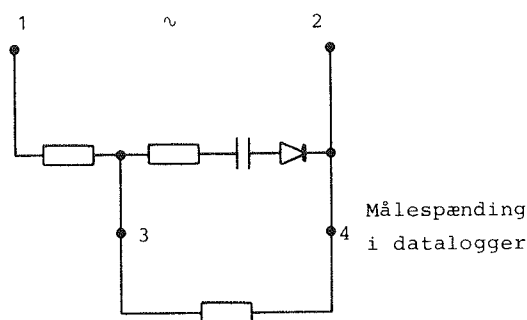


Fig. A3.1 Målekredsløb til indikation af mobilisoleringens position.

Spændingen falder tilnærmelsesvis eksponentielt (se fig. A3.2), således at spændingen y kan beskrives som en funktion af tiden τ :

$$\ln(y) = k_1 + k_2 \cdot \tau \quad (\text{A3.1})$$

Hvis spændingen y kendes til tidspunkterne τ_2 og τ_3 , kan konstanten k_2 findes:

$$k_2 = \frac{\ln(y_3/y_2)}{\tau_3 - \tau_2} \quad (\text{A3.2})$$

Sættes tidsintervallet mellem τ_2 og τ_3 til 1, fås:

$$k_2 = \ln(y_3/y_2) \quad (\text{A3.3})$$

Måles to spændinger y_1 og y_2 , kan tidsrummet mellem målingerne bestemmes:

$$\begin{aligned} \Delta\tau &= \tau_2 - \tau_1 \\ &= \frac{\ln(y_2) - k_1}{k_2} - \frac{\ln(y_1) - k_1}{k_2} = \frac{\ln\left(\frac{y_2}{y_1}\right)}{k_2} \end{aligned} \quad (\text{A3.4})$$

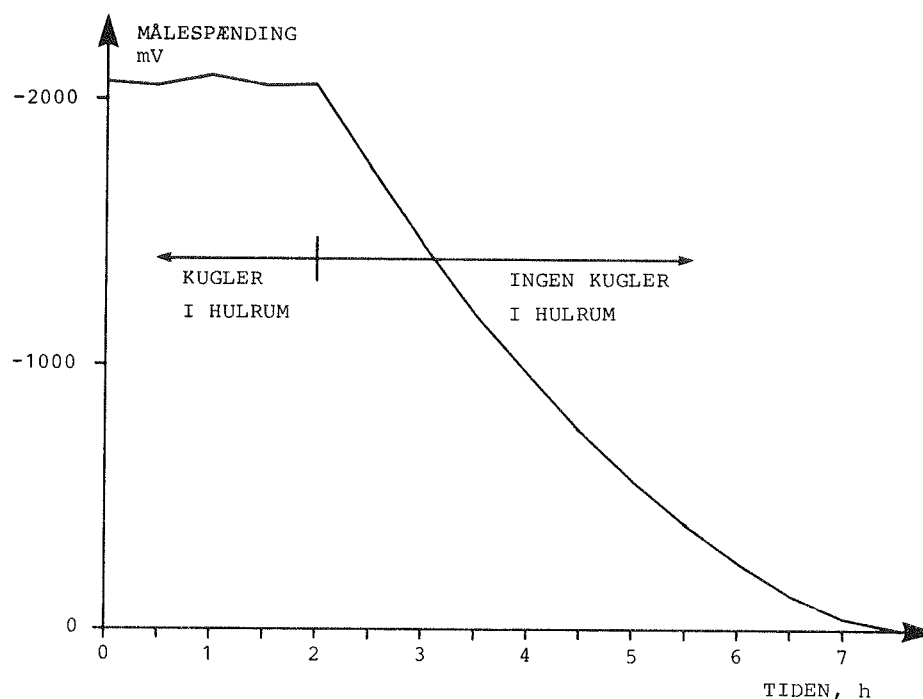


Fig. A3.2 Målespænding til indikation af om der er mobil isolering i hulrum. Data fra 18/8-79.

Værdien af k_2 er konstant for den enkelte måling. I fig. A3.3 er 5 dage med stabilt solskin ved solopgang udvalgt. I tabellen findes konstanten k_2 for hver dag og ligeledes andelen af scanneintervallet fra flytning af mobil isolering til nærmeste efterfølgende scan. Som gennemsnitsværdi findes $k_{2,\text{middel}} = -0,1429 (1/2 \text{ h})^{-1}$.

A3.2 Kontrol af differenstermostat

Styringen af mobilisoleringen foregår ved hjælp af differenstermostaten. Når temperaturen i kontrolboxen overstiger den udvendige overfladetemperatur af væggen plus den indstillede

differenstemperatur, tømmes de ekspanderede polystyrenkugler fra solvæggen (se fig. A3.4).

Under forudsætning af lineær temperaturændring kan kontrolboxens temperatur ($t_{k,start}$) findes ved starttidspunktet:

$$t_{k,start} = t_{k,2} + (1 - \Delta\tau)(t_{k,3} - t_{k,2}) \quad (A3.5)$$

hvor $t_{k,3}$ og $t_{k,2}$ er kontrolboxens temperatur, henholdsvis efter og før starttidspunktet.

Den udvendige vægoverflades temperatur ($t_{ov,start}$) kan findes ved ekstrapolation af temperaturerne $t_{ov,1}$ og $t_{ov,2}$ før starttidspunktet:

$$t_{ov,start} = t_{ov,1} + (2 - \Delta\tau)(t_{ov,2} - t_{ov,1}) \quad (A3.6)$$

Startdifferenstemperaturen er dermed:

$$\begin{aligned} \Delta T &= t_{k,start} - t_{ov,start} \\ &= t_{k,2} + (1 - \Delta\tau)(t_{k,3} - t_{k,2}) \\ &\quad - (t_{ov,1} + (2 - \Delta\tau)(t_{ov,2} - t_{ov,1})) \end{aligned} \quad (A3.7)$$

Dato	Tids- punkt	y_1	y_2	y_3	k_2	$\Delta\tau$
		mV	mV	mV		$\frac{1}{2}$ h
AUG 10	9.00	2056	1862	1655	-0,1179	0,841
AUG 12	8.30	2055	1963	1728	-0,1275	0,359
AUG 13	9.00	2018	1821	1549	-0,1618	0,635
AUG 17	8.30	2060	1749	1463	-0,1786	0,916
AUG 23	8.30	2046	1976	1737	-0,1289	0,270

Fig. A3.3 Beregning af tidsrum mellem flytning af mobilisole-
ring og nærmeste efterfølgende i scannetidspunkt.

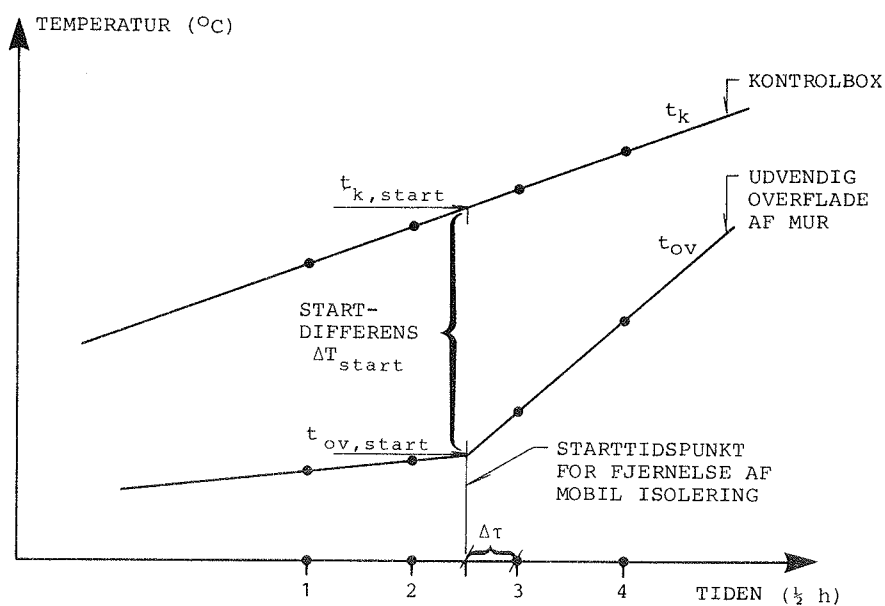


Fig. A3.4 Temperaturforløb om morgenen i kontrolbox og på ud-
vendig overflade af mur. Scannetidspunkt er markeret med *.

Benyttes de i fig. A3.3 viste temperaturer, kan startdifferen-
serne findes som vist i fig. A3.5.

Det ses, at middelstartdifferenstemperaturen svarer godt til
den indstillede værdi på 10 K.

	$\Delta\tau$	$t_{k,2}$	$t_{k,3}$	$t_{k,start}$	$t_{ov,1}$	$t_{ov,2}$	$t_{ov,start}$	ΔT_{start}
Dato	$\frac{1}{2}$ h	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	K
Aug 10	0,841	27,3	33,0	28,2	20,0	20,2	20,2	8,0
Aug 12	0,359	28,2	37,7	34,3	25,5	25,3	25,2	9,1
Aug 13	0,635	35,6	47,3	30,2	29,9	39,9	29,8	10,1
Aug 17	0,916	42,1	55,4	33,5	33,5	43,2	33,5	9,7
Aug 23	0,270	30,2	39,3	26,7	26,6	36,8	26,5	10,3
Middelværdi								9,4

Fig. A3.5 Tabel over startdifferenstemperaturer (ΔT_{start}).

LICENTIATAFHANDLINGER FRA LABORATORIET FOR VARMEISOLERING

Rubinstein, Axel:

Metoder til bestemmelse af varmeledningstal, med særlig vægt på teorien for de instationære metoder samt nogle målinger med en termosonde af egen konstruktion. 1963.

Petersen, Erwin:

Solindfald gennem vinduer. 1966.

Lund-Hansen, Per:

Fugttransport i Byggematerialer. 1967.

Nicolajsen, Asta:

Fugttransportkoefficienter fra gasbeton. 1973.

Nielsen, A.F.:

Fugtfordelinger i gasbeton under varme- og fugttransport. 1974.

Nielsen, Peter V.:

Strømningsforhold i luftkonditionerede lokaler. 1974.

Ravn-Jensen, Lars:

Vinduer og energi. 1977.

Lawaetz, Henrik:

Solindfald og solvarmeanlæg. Beregnet og målt. 1980.

Svendsen, S.:

Solfangeres effektivitet. Målt og beregnet. 1981.

Kielsgaard Hansen, Kurt:

Luftsolfangere og varmelagring i jord. 1982.

Furbo, Simon:

Varmelagring til solvarmeanlæg. 1984.

Mørck, Ove:

Modelling and Simulation of Solar Heating Systems. 1985.

