

**VINDUER OG SOLVÆGGE MED
MONOLITISK SILICA AEROGEL**

Karsten Ingerslev Jensen

VINDUER OG SOLVÆGGE MED MONOLITISK SILICA AEROGEL

Karsten Ingerslev Jensen

FORORD

Denne rapport har to funktioner. Den er afslutningen på mit licentiatarbejde, som er udført i årene 1989-1991 ved Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole, under vejledning af lektor Svend Svendsen. Desuden er den slutrapport på LfV's delprojekt af fællesprojektet: "Transparente isoleringsmaterialers fremstilling og anvendelse i bygninger", journalnr.: 1213/88-1. Projektet er finansieret af "Energiforskningsprogram 88, område 5: Energianvendelse i bygninger" under Energiministeriet.

Delresultater fra projektet er beskrevet i et paper: "Transparent cover based on evacuated monolithic silica aerogel". Dette paper vil blive præsenteret på ISES 1991 Solar World Congress i Denver, Colorado, USA, i august 1991, og er medtaget som appendiks 2.

Endelig vil jeg gerne takke Svend Svendsen for vejledning, Bodil Fauerskov for skrivning af rapporten og Martin Dandanell for håndværkerassistance. Desuden tak til en stor del af det øvrige personale ved Laboratoriet for hjælp på forskellige stadier af forløbet.

INDHOLDSFORTEGNELSE

Side

| | | |
|----|--|----|
| | Resumé | 1 |
| | Summary | 2 |
| 1. | Indledning | 3 |
| | 1.1 Projektets formål | 3 |
| 2. | Baggrund for projektet | 5 |
| | 2.1 Passive solvarmesystemer | 5 |
| | 2.2 Transparente isoleringsmaterialer (TIM) | 6 |
| | 2.3 Om aerogel | 7 |
| 3. | Vinduer og dæklag med aerogel | 9 |
| | 3.1 Opbygning | 9 |
| | 3.2 Soltransmittans | 10 |
| | 3.3 Varmetab | 11 |
| | 3.3.1 Varmetransport i aerogel | 11 |
| | 3.3.2 Kuldebroeffekt af kantforsegling | 16 |
| 4. | Prototyper | 17 |
| | 4.1 Kantudformning | 17 |
| | 4.1.1 Kantdesign I | 17 |
| | 4.1.2 Kantdesign II | 18 |
| | 4.1.3 Kantdesign III | 19 |
| | 4.1.4 Kantdesign IV | 19 |
| | 4.2 Fremstilling | 20 |
| | 4.3 Generelle erfaringer | 22 |
| 5. | Eksperimentelle undersøgelser | 25 |
| | 5.1 Forsøgsopstillinger og måleprincipper | 25 |
| | 5.2 Forsøgsresultater | 32 |
| 6. | Teoretiske undersøgelser | 41 |
| | 6.1 Beregning af U-værdi | 41 |
| | 6.2 Sammenligning af målte og beregnede værdier | 45 |
| | 6.3 Forslag til ramme- og karmsystemer | 49 |
| 7. | Beregnet udbytte | 53 |
| | 7.1 Forudsætninger | 53 |
| | 7.2 Beregningsresultater | 55 |
| | 7.3 Dagslysvægge | 58 |
| | 7.4 Fremtidige teknikker | 60 |
| 8. | Holdbarhed og økonomi | 61 |
| | 8.1 Holdbarhed | 61 |
| | 8.2 Økonomi | 61 |
| | Konklusion | 65 |
| | Referencer | 67 |
| | Symbolliste | 69 |
| | Figurliste | 73 |
| | Tabelliste | 75 |
| | Licentiaafhandlinger fra Laboratoriet for Varmeisolering | 77 |
| | Appendiks 1 | 79 |
| | Appendiks 2 | 81 |

RESUMÉ

Rapporten beskriver et eksperimentelt og teoretisk arbejde vedrørende anvendelsen af evakueret monolitisk silica aerogel som transparent isoleringsmateriale i ruder til vinduer og i dæklag til solvægge.

Modeller til bestemmelse af varmetransporten gennem aerogel er omtalt, og formler til samme er vist. På grund af materialets egenskaber må det beskyttes i en termorudelignende konstruktion. Fire prototyper i størrelser op til 1 m x 1 m er fremstillet med forskellige kantforseglinger, og de er undersøgt teoretisk og eksperimentelt. Specielt kantforseglingens kuldebrovirkning, hvor resultaterne fra en analytisk model og målinger stemmer godt overens. Kuldebroeffekten kan være meget betydelig i denne sammenhæng. Den sidste og største prototype blev forsynet med karm, og målinger blev foretaget i en guarded hot-box opstilling. Desuden er der udført simuleringer på årsbasis med aerogelkonstruktionen anvendt dels som dæklag i solvægge på en ældre lejlighed og på et nyt lavenergihus, og dels som ruder i vinduer i et almindeligt parcelhus. En aerogelrude forventes at få en total varmetabskoefficient på ca. $0,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ og en soltransmittans på op til 75%. Da silica aerogels nuværende udsynskvalitet ikke er høj nok til at erstatte traditionelle vinduer, er der foretaget beregninger på aerogelkonstruktionens energibalance ved anvendelse som en dagslysvæg, der er orienteret mod nord. Sluttelig er der foretaget beregninger på aerogelkonstruktionens højst tilladelige pris, hvis en anvendelse som rude eller solvæggsdæklag skal være privatøkonomisk lønsom, og det viser sig, at en aerogelrude kan koste op til 2700 kr./m² betinget af energibesparelsen.

SUMMARY

Windows and solar walls with monolithic silica aerogel

This report deals with the experimental and theoretical work concerning application of evacuated monolithic silica aerogel as a transparent insulating material for window panes and covers for solar walls.

Models for determination of the heat transfer through the aerogel have been mentioned and the relevant equations given. Because of the nature of the material it will have to be protected in a construction similar to that of an insulating glazing. Four prototypes of up to 1 m x 1 m have been made with 4 different kinds of sealing of the edge, and they have been investigated both theoretically and experimentally with special interest to the cold bridge effect of the sealing of the edge for which the results of an analytical model and measurements correspond very well. The cold bridge effect can be important in this context. For the last and biggest prototype a frame was mounted and measurements were made in a guarded hot-box. Furthermore, simulations have been made for a period of 12 months of the aerogel construction both used as a cover for solar walls for an old appartement and a new low-energy house and as windows in an ordinary house. The expected total heat loss of an insulated glazing window with aerogel will be about $0.5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ and the solar transmittance will be 75%. As the visibility through an aerogel window is not good enough for the time being to replace ordinary windows, calculations have been made of the energy balance of the aerogel window when used as a daylight wall facing north. Finally an estimate has been made of the price of the aerogel window when used in a window or as a cover for a solar wall. The result is that the price of an aerogel window may be as high as 2700 dkr./m² to be profitable for private houses dependent of the energy saving.

1. INDLEDNING

Som følge af de sidste to årtiers skiftende energikriser og senest de miljørelaterede betænkeligheder ved anvendelse af fossile brændstoffer er der både talt meget om - og gjort en del for - at øge udnyttelsen af solvarme. Gennembruddet ser imidlertid ud til at lade vente på sig. Årsagen hertil kan ses som værende af økonomisk art. Grunden er givetvis, at anvendelse af solvarme ikke er økonomisk optimal, i modsat fald ville valget være oplagt.

En måde til at forbedre økonomien i aktive og passive solvarmesystemer kan være at øge udnyttelsesgraden af den indfaldende solstråling. En undersøgelse af en almindelig solfanger vil vise, at det kritiske sted i termisk henseende er det transparente areal, da siderne og bagsiden kan beklædes med en rimelig mængde traditionelt isoleringsmateriale. Dæklaget vil derimod være det kritiske sted idet det indeholder en konflikt mellem ønskerne om så høj soltransmittans som mulig og så lille varmetab som muligt. De måder, hvorpå varmetabet reduceres gennem dæklaget, bevirker typisk, at soltransmittansen reduceres.

Denne modsætning vil nu kunne løses et langt stykke hen ad vejen ved anvendelse af materialer, der under ét betegnes som transparente isoleringsmaterialer (TIM). Der er sket en stor udvikling af disse materialer i løbet af firserne, og det mest spændende materiale ser ud til at være monolitisk silica aerogel. Silica Aerogel er et finporet, højporøst kvartsmateriale, som pga. opbygningen er gennemsigtig. Soltransmittansen er høj, og ved et groft vakuum (ca. 90%) er varmeledningsevnen usædvanlig lille. Det ser ud til at være et virkelig lovende materiale til i hvert fald delvist at lukke det termiske hul i det transparente areal.

I håb om at øge læsevenligheden vil navnet monolitisk silica aerogel her blive benævnt aerogel. I tilfælde hvor den granulerede form af silica aerogel optræder, vil betegnelsen dog blive skrevet fuldt ud for at undgå misforståelser.

1.1 Projektets formål

Projektet omhandler brugen af monolitisk silica aerogel som transparent isolering til solvarmeformål. Inden for dette brede felt er der lavet en afgrænsning til området termoruder og solvægge. Konstruktioner hertil er, eksperimentelt og teoretisk, undersøgt mht. varmetab. Specielt kuldebroerne kan være meget kritiske pga. aerogelens store termiske isolans. Der er opbygget prototyper i flere størrelser, så der har været mulighed for at undersøge kuldebroer i realistiske størrelser. Når den højisolierende komponent skal monteres, det være sig som rude eller dæklag, vil eksisterende ramme-/karmsystemer have en for ringe isolans. Denne er måske op til flere gange lavere end for det transparente areal. Der er derfor teoretisk udarbejdet og undersøgt forslag til ramme-/karmsystemer. Ved hjælp af EDB-simuleringer er der givet et bud på det termiske udbytte af brugen af aerogel i ruder og dæklag. Sluttelig vurderes holdbarhed og økonomi.

2. BAGGRUND FOR PROJEKTET

2.1 Passive solvarmesystemer

Solvarmesystemer deles som regel op i to hovedgrupper, nemlig aktive og passive systemer. De aktive systemer er indrettet med mekaniske og elektroniske komponenter til regulering og transport af det varmbærende medium. Derimod er passive systemer karakteriseret ved at varmetransporten kun foregår ved naturlige processer så som konvektion, ledning og evt. stråling. Denne opdeling er dog ikke skarpere, end at den overskrides, hvorved man får et såkaldt "hybridt solvarmesystem". Det kan fx være en solvæg med elektronisk styret solafskærmning.

I gruppen af passive solvarmesystemer kan der skelnes mellem tre hovedtyper: 1) vinduer, 2) glastilbygninger og 3) solvægge.

Vinduer tilfører bygningen solvarme ved transmission af solstråling som direkte tilskud. Det giver primært et bidrag til dækning af det øjeblikkelige varmebehov. En bevidst udnyttelse af det direkte tilskud kan være, at bygningens vinduer fortrinsvis placeres sydvendt. Samtidig har rummene bag vinduerne stor termisk masse, hvorved svingningerne i rumtemperaturen dæmpes.

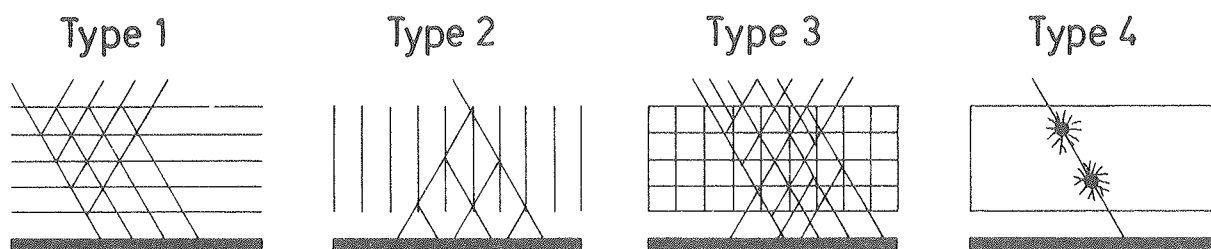
Glastilbygninger er kendetegnet ved, at klimaskærmen stort set består af ruder, fx enkelt- eller to-lags. Den termiske masse kan være et betongulv og en tung væg, der adskiller rummet fra resten af bygningen. Rummet bør ikke tilføres varme fra andre kilder ud over evt. transmissionstab fra tilstødende rum, således at det faktisk kun er den tilførte solenergi, der benyttes. Rummet kan benyttes til ophold en stor del af året. Derved kan den samlede bygning ses som delvis zoneopdelt.

En solvæg er en ydervæg, hvor en del af den indfaldende solstråling nyttiggøres i det bagvedliggende rum. Yderst er der placeret et transparent dæklagssystem foran en absorber. Denne er typisk overfladen af en sortmalet mur. Den absorberede solstråling lagres i muren og kan fx ved ledning transporteres til det bagvedliggende rum. Tidsforskellen mellem solindfaldet og rummets varmetilførsel afhænger af murens udformning.

I dette projekt behandles glastilbygninger ikke specielt i modsætning til vinduer og solvægge. Dog kan den undersøgte aerogelrudeudformning også benyttes til glastilbygninger. Traditionelt kan ruder og dæklag, anvendt i de ovennævnte tre hovedtyper, karakteriseres ved en stor soltransmittans og samtidig en ringe isolans i forhold til resten af klimaskærmen. For at bøde på den ringe isolans er der benyttet flere teknikker. Først og fremmest ved at bruge flere lag glas, og endvidere lavemissionsbelægninger og gasfyldninger. Problemet med de to første er, at soltransmittansen reduceres, til tider meget. En anden vej er de såkaldte transparente isoleringsmaterialer, på engelsk forkortet til TIM.

2.2 Transparente isoleringsmaterialer (TIM)

Denne samling af materialer kan karakteriseres ved, at den traditionelle modsætning mellem høj soltransmittans og stor termisk isolans søges overvundet. Ikke alle materialer er relativt nye, nogle har været fremme i mange år, men det nye ligger mere i grupperingen og fokusering på en målrettet anvendelse af disse materialer. En af drivkræfterne inden for TIM-området er Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme i Freiburg, Tyskland, hvor der har været afholdt flere workshops om emnet (/1/, /2/). Derfra er der foreslået en opdeling af TIM i fire hovedtyper (/3/): 1) Absorber parallel, 2) absorber normal, 3) cellestruktur og 4) homogen (se figur 2.1).



Figur 2.1 De fire hovedtyper af transparente isoleringsmaterialer. 1) absorber parallel, 2) absorber normal, 3) cellestruktur og 4) homogen

Den første hovedtype, absorber parallel, dækker bl.a. flere lag glas eller plastfilm samt glas med lavemissionsbelægning. Stor optisk refleksion begrænser antallet af lag. Den "absorber normale" type omfatter fx honeycomb- og kapillarmaterialer (Arel). Her kan de optiske tab reduceres, idet den indkommende stråling bliver reflekteret og transmitteret af materialet indad. Det optiske tab er begrænset til lidt spredning og absorption i det faste stof. En kombination af de to første typer resulterer i den tredje type eller struktur. Det kan være ribbeplader, acrylskum eller flerlags bølget celluloseacetatfolie (Isoflex). Den sidste type, homogene, ligner type tre, men de optiske egenskaber er resultatet af andre fysiske mekanismer, nemlig absorption og spredning grundet Rayleigh-effekter. Her findes aerogelerne både i den monolitiske og i den granulerede udgave. For sidstnævntes vedkommende er der mere tale om et kvasihomogent materiale, da det er kugler i størrelsen 1-10 mm af silica aerogel.

Ud over at ovennævnte inddeling kan være for firkantet både for eksisterende og fremtidige materialer, kan selve betegnelsen virke misvisende om ikke andet så her i landet. Ved transparent forstås normalt gennemsigtigt, dvs. uforstyrret udsyn dog måske med en farvetoning. Dette er kun tilfældet for klare flerlags glas eller plastfilm (type 1) og delvist for monolitisk silica aerogel (type 4). For hovedparten af materialerne i de 4 hovedtyper er udsyn praktisk taget umulig. Derfor ville betegnelsen gennemskinskelig eller translucent nok være mere korrekt. Herved vil den transparente gruppe også være dækket. En skelnen mellem transparent og

translucent vil selvfølgelig kun være påkrævet, når der er tale om vinduer, hvor der kræves fuldt udsyn. Idet betegnelsen transparent er den, der benyttes internationalt, har det nok lange udsigter at få indført den mere korrekte betegnelse translucent.

2.3 Om aerogel

Silica aerogel er et materiale, der er meget porøst og skørt. Der er to forskellige udgaver, nemlig den monolitiske og den granulerede eller kugleformede. Det faste stof består næsten 100% rent af silicadioxid, også kendt som kvarts. Fremstillingen er forskellig for de to former. Den monolitiske silica aerogel begynder med en sol-gel-proces, heri opbygges silicadioxid molekyler, som går sammen og danner klynger. Man mener, at disse kædes sammen, grener sig ud og får kontakt med andre kæder. Således er der dannet en gel bestående af skelettet og alkohol. Fjernelsen af alkohol sker enten ved superkritisk tørring eller ved en substitution med kuldioxid, som så fjernes ved superkritisk tørring. Denne er nødvendig, idet gelstrukturen ellers ville ødelægges pga. overfladespændinger i porerne. For den granulerede type sker fremstillingen ved at sprøjte kemikalierne ind i en beholder, hvor kuglerne dannes, vaskes og tørres superkritisk. Sidstnævnte fremstillingsproces er enklere og billigere.

Fremstilling af silica aerogel i de to former sker på pilot- og forsøgsanlæg hovedsagelig tre steder i verden. Airglass AB i Sverige fremstiller skiver i størrelser op til 60 cm x 60 cm. Den superkritiske tørring fjerner alkohol fra gelen. På Lawrence Berkley Laboratoriet i Californien fremstilles skiver med en diameter på op til et par og tyve centimeter. Her er det kuldioxid, der fjernes superkritisk. Endelig fremstiller BASF i Tyskland silica aerogel kugler med diametre op til ca. 10 mm.

Aerogel er som tidligere nævnt porøst. Det kan fremstilles med en porøsitet i området fra 86% til 97% svarende til en densitet i området 70-300 kg m⁻³. For den granulerede type er densiteten 200 kg m⁻³ og afhængig af kornstørrelsesfordelingen er bulkdensiteten ca. 140 kg m⁻³. Kernerne er typisk 4-7 nm store og porediameteren er typisk 10-20 nm. Materialet har en trykbrudstyrke på ca. 3 bar, hvorimod trækbrudstyrken er forsvindende. Ud over træk kan aerogel også ødelægges af flydende vand, hvis nedbrydende effekt skyldes overfladespændinger i porerne. Materialets kontakflade med vand bliver hvid og dermed uigennemsigtig. Almindelig rumlufts fugtindhold ser ikke ud til at påvirke materialet irreversibelt. Det kan tilføjes, at for den granulerede silica aerogel har BASF udviklet en delvis hydrofobisk udgave. Holdbarhed og levetid for denne foreligger der ikke i øjeblikket oplysninger om.

For silica aerogel er de to nøgleegenskaber soltransmittans og termisk isolans. Med hensyn til den monolitiske form behandles disse egenskaber nærmere i kapitel 3, så her bliver begge udgaver kun kort skitseret. Soltransmittansen for monolitisk silica aerogel er her på Laboratoriet for Varmeisolering målt til 90% for en tykkelse på 2 cm. For granuleret silica aerogel er soltransmittansen ikke så entydig, da den afhænger af fx kornstørrelsesfordelingen, kornmiddeldiameteren etc. Men en typisk værdi for et lag alene på 1 cm er ca. 80%. Et materiales isoleringsevne karakteriseres normalt ved en varmeledningsevne, λ . Det er nok ikke helt korrekt at

gøre det samme med silica aerogel, fordi en varmeledningsevne her ikke kun afhænger af materialet men fx også af begrænsningsfladernes emissivitet, og derfor betegnes varmeledningsevnen ofte som tilsyneladende. I det byggetekniske temperaturområde kan man dog for det meste med sindsro benytte en fast værdi svarende til λ_{10} -værdien for traditionelle isoleringsmaterialer. Monolitisk silica aerogel med en densitet på 100 kg m^{-3} vil have en λ -værdi på $20 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$, og granuleret silica aerogels λ -værdi er $23 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Hvis aerogelen evakueres således, at der ikke sker varmeledning gennem luften men kun gennem skelettet samt varmestråling, reduceres λ -værdien betragteligt. For monolitisk silica aerogel med densiteter på 200 kg m^{-3} , 150 kg m^{-3} og 100 kg m^{-3} vil de tilsvarende λ -værdier være $12 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $10 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ og $8 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$. For at eliminere luftledning skal lufttrykket være under ca. 100 mbar, hvilket er betinget af porediametre i materialet. Det kritiske lufttryk for granuleret silica aerogel er ca. 0,1 mbar, og det skyldes de hulrum, der bliver mellem de enkelte aerogelkugler. Dette langt lavere tryk og dermed mere besværlige forsegling i forhold til den monolitiske type er nok årsagen til, at der ikke rigtig er set forslag til anvendelser af evakueret granuleret silica aerogel.

Ved brug af monolitisk silica aerogel i vinduer er den nuværende kvalitet en hindring. Materialet udviser effekt af Rayleigh-spredning. Det kommer af inhomogeniteter i materialet. Disse er mindre end det synlige lys' bølgelængder men afbøjer de korteste bølgelængder mest. Resultatet er, at udsynet gennem materialet er gulfarvet mod en lys baggrund og blåfarvet mod en mørk baggrund. Der er delte meninger om, hvorvidt det er muligt at fremstille monolitisk silica aerogel, som ikke udviser effekter af Rayleigh-spredning, så det må tiden vise. Endvidere kan der forekomme sløring af udsynet. Det ser ud til at afhænge af forholdene, når gelen dannes. Det er tilsyneladende relativt simpelt at slippe af med dette. Farvningen af udsynet vil have betydning for udbredelsen af aerogelvinduer. Ved den nuværende kvalitet vil anvendelsen nok være begrænset til såkaldte "sekundære vinduer". Hermed menes vinduer, hvor der ikke kræves frit udsyn fx i badeværelser, ovenlys etc. Det er således klart, at en optisk kvalitet af aerogel på niveau med almindeligt vinduesglas er ønskelig.

Den for tiden mest udbredte anvendelse af aerogel er i Cerenkov-detektorer. Det er et apparatur, som benyttes til detektering af elementarpartikler, som er accelereret op til meget høje hastigheder. En anden laboratorieanvendelse er i fusionsforskningen. Her bruges aerogel til at holde sammen på brint i et magnetfelt samtidig med, at det beskydes med store lasereffekter. Der er endvidere tanker om aerogel som katalysatorbærer, idet dets indre overflade er i størrelsesordenen $600\text{-}800 \text{ m}^2/\text{g}$. Det nok mest kuriøse forslag hidtil er at bruge knust aerogel til termitbekæmpelse. Forholdet skulle være det, at termitter ånder gennem huller i skjoldet. Det område er belagt med et lag vand. Da aerogel er stærkt vandsugende, skal det knuste materiale drysses ud over termitterne, som derved får udtørret åndedrætsorganerne og kvæles. Det skulle ikke være muligt for termitterne at udvikle resistens over for denne metode, som det er tilfældet med de kemiske systemer. Desuden vil affaldet fra metoden være kvarts, som i forvejen findes i store mængder i naturen. Teknikken vil altså være helt økologisk - helt i tidens ånd.

3. VINDUER OG DÆKLAGE MED AEROGEL

3.1 Opbygning

Aerogel i den monolitiske udgave har, som tidligere nævnt, nogle egenskaber, der bliver dimensionerende, når materialet skal tages i praktisk anvendelse. Det drejer sig om den meget lille trækbrudstyrke og følsomheden over for flydende vand. Disse kan overkommes ved at indeslutte aerogelen i en termorudelignende konstruktion. Materialet er herved mekanisk beskyttet af glas på hver side, som sammen med en kantforsegling giver vandtætheden. Kantforseglingen skal ud over den umiddelbare vandtæthed selvfølgelig også være tæt over for vanddamp. Det er fordi, det kan tænkes, at luftfugtigheden i konstruktionen bliver så høj, at der i nattetimerne kan ske kondensation på det kolde glas imod aerogelen, som derved nedbrydes.

Forholdet med kantforseglingens tæthed over for vand og fugtig luft giver sig selv, da aerogelen her skal være evakueret. Fordelene er herved flere, bl.a. vil komponenten blive et stift sandwichelement, da aerogelen virker som afstandsmateriale over hele arealet. Herved bliver aerogel udsat for en slags forspænding og er mindre udsat for ødelæggende trækspændinger. Kantforseglingen er mindre mekanisk belastet end i en almindelig termorude, som normalt består af et aluminiumprofil og fugemateriale, der både skal holde glassene sammen og fra hinanden. Det klares her af henholdsvis atmosfæretryk og aerogelen. Tilbage er alene funktionen som lufttætning, det medfører, at kantforseglingen kan raffineres, så den tilhørende kuldebrovirkning kan minimeres. Den helt store gevinst ved evakuering af aerogelen er en mere end halvering af varmetabskoefficientens centerværdi. For en rude med 20 mm aerogel, densitet lig 100 kgm^{-3} , betyder det en reduktion af varmetabskoefficientens centerværdi fra $0,85 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ til $0,37 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Endelig vil en evakuering af aerogelen have den fordel, at glassene ikke bøjer ud pga. den indespærrede lufts udvidelse ved temperaturstigninger. Derimod holdes glassene i deres plan af aerogelen og atmosfæretrykket. Herved bliver fugematerialet i kantforseglingen udsat for at optage mindre bevægelser vinkelret på rudens plan, end hvis aerogelen ikke evakueres.

Princippet i kantforseglingen kan vælges ud fra to forskellige hovedmuligheder. Den første er at lave en fuldstændig hermetisk forsegling, og så er valget begrænset til en kantforsegling helt af glas eller metal. Det betyder, at der skal laves glas-glas- eller glas-metal-samlinger i kanten. Disse er omstændelige og besværlige at udføre og måske bedre, end det kræves ved det aktuelle vakuum. En anden mulighed er at anvende en kantforsegling med en begrænset utæthed. Det kan ske ved, at aerogelen evakueres ned til fx 1 mbar. Lufttrykket i aerogelen vil derefter stige i løbet af konstruktionens levetid, fx 20 år, til ca. 100 mbar pga. kantforseglingens utæthed. Det åbner for andre materialer end glas og metal såsom plast, fugemasser etc. Dog opstår der et problem ved dimensionering af kantforseglingens lufttæthed, og da der mangler værdier for de forskellige materials lufttæthed. Det har faktisk kun været muligt at fremskaffe tal for ét materiale nemlig butylfugemasse.

Kantforseglingen er her valgt udført med en begrænset utæthed. Opbygningen af kantforseglingen er et rustfrit stålprofil, som forbindes til de to glas med butylfugemasse, se fx figur 4.1, s. 17. Det betyder, at utætheden er begrænset til fugen og med kendskab til materialets specifikke lufttæthed, kan fugen dimensioneres til en levetid for konstruktionen mht. porelufttryk.

For en 1 m x 1 m konstruktion med 20 mm aerogel er der i /4/ beregnet dimensionerne for butylfugerne ved et begyndelseslufttryk i aerogelen på 1 mbar og et slutlufttryk på 100 mbar, da det er niveauet, hvor der begynder at optræde varmeledning i aerogelens poreluft. Resultatet er, at for en fugebredde på 10 mm og en samlet tykkelse for de to fuger på 2,5 mm vil trykforøgelsen tage mere end 30 år. For disse fugedimensioner vil tidsrummet afhænge af konstruktionens areal. Fx vil det tage ca. 37 år, inden den samme trykstigning er sket ved et areal på 1 m x 2 m.

Den anden del af kantforseglingen er, som nævnt, valgt som et rustfrit stålprofil. Da utætheden er begrænset til fugerne, skal materialet være glas eller metal, da disse materialer kan regnes for at være vanddamp- og lufttætte på betingelse af, at de er fejl- og porefri. Glas er valgt fra, fordi trækbrudstyrken er lille, og fordi det er besværligt at udforme et fornuftigt profil i termisk henseende og mht. fugerne. Af metallerne har rustfrit stål den laveste varmeledningsevne og samtidig en termisk udvidelseskoefficient, der er tæt på den for glas. Det sidste har betydning for højere temperaturer, idet der ellers kan optræde store forskelle mellem udvidelserne af glas og kantprofil. Mht. den termiske udvidelseskoefficient for aerogel, anses den for at være omtrent som for glas, men det ser ikke ud til at være undersøgt til bunds på nuværende tidspunkt.

Udformningen af kantforseglingen giver mulighed for at optage i hvert fald noget af den termisk betingede differensudvidelse mellem de to glas. Samtidig vil anvendelsen af butyl give en begrænsning på arbejdstemperaturen på op til 80-100°C. Andre fugemasser har meget højere temperaturbestandighed, op til 200°C, men generelt er forholdet det, at jo højere temperaturbestandighed for en fugemasse desto mindre lufttæthed, og butyl er den mest lufttætte af fugemasserne.

3.2 Soltransmittans

Den solstråling, som rammer monolitisk silica aerogel, bliver dæmpet på forskellig vis i materialet. En stor del af den indfaldende stråling bliver transmitteret såkaldt direkte-direkte. En anden del bliver absorberet, og en del bliver spredt. Heraf bliver en del spredt bagud og en del fremad. Denne del er direkte-diffust transmitteret. Den overfladereflekterede del af strålingen er forsvindende, idet brydningsindekset for aerogelen er meget tæt på 1.

Måling og beregning af monolitisk silica aerogels soltransmittans har ikke fået samme opmærksomhed, som det er tilfældet med dets termiske isolans. Under IEA-samarbejdet Task 10, subtask C, er der i de deltagende lande bl.a. målt soltransmittans på aerogel. Dette var 12 mm tykt og fremstillet af Airglass AB. For en tykkelse på 20 mm er der tilsyneladende kun to kilder. Den første /5/ går ud fra målinger af den spektrale transmittans for aerogel fremstillet på Lawrence Berkley Laboratories. På grundlag af disse målinger opstilles en model for soltransmittansen i aerogel. Et af resultaterne er, at soltransmittansen, ved 20 mm tykkelse og normal indstråling, er beregnet til 86%. Dette er for direkte-total-transmittans. Den anden kilde er, at der på Laboratoriet for Varmeisolering er foretaget målinger på flere aerogelskiver, ca. 20 mm tykke, fra Airglass AB. Målingerne er foretaget i solsimulatoren, og resultaterne blev en direkte-total-soltransmittans på 90% i gennemsnit med afvigelser på op til 2%.

Soltransmittansen for aerogelkonstruktionen afhænger af de tre lag, aerogelen og 2 lag glas. Hvis der anvendes 4 mm tykke glas, som typisk kan have en ekstinktionskoefficient på 20 m^{-1} , vil soltransmittansen for et enkelt lag være 84,5%. Ud fra målingerne på aerogel fra Airglass AB, vil den resulterende soltransmittans for konstruktionen være ca. 64% ved en indfaldsvinkel på 0° . Hvis der i stedet blev benyttet såkaldt jernfrit glas, vil den samlede soltransmittans kunne øges betragteligt. Fx vil et 4 mm glas med en ekstinktionskoefficient på $2,5 \text{ m}^{-1}$ have en soltransmittans på ca. 91%. Hermed opnås en soltransmittans for konstruktionen på ca. 75%. Det ses klart, at jernfrit glas er at foretrække samtidig med, at det kan købes i udlandet til en konkurrencedygtig pris.

3.3 Varmetab

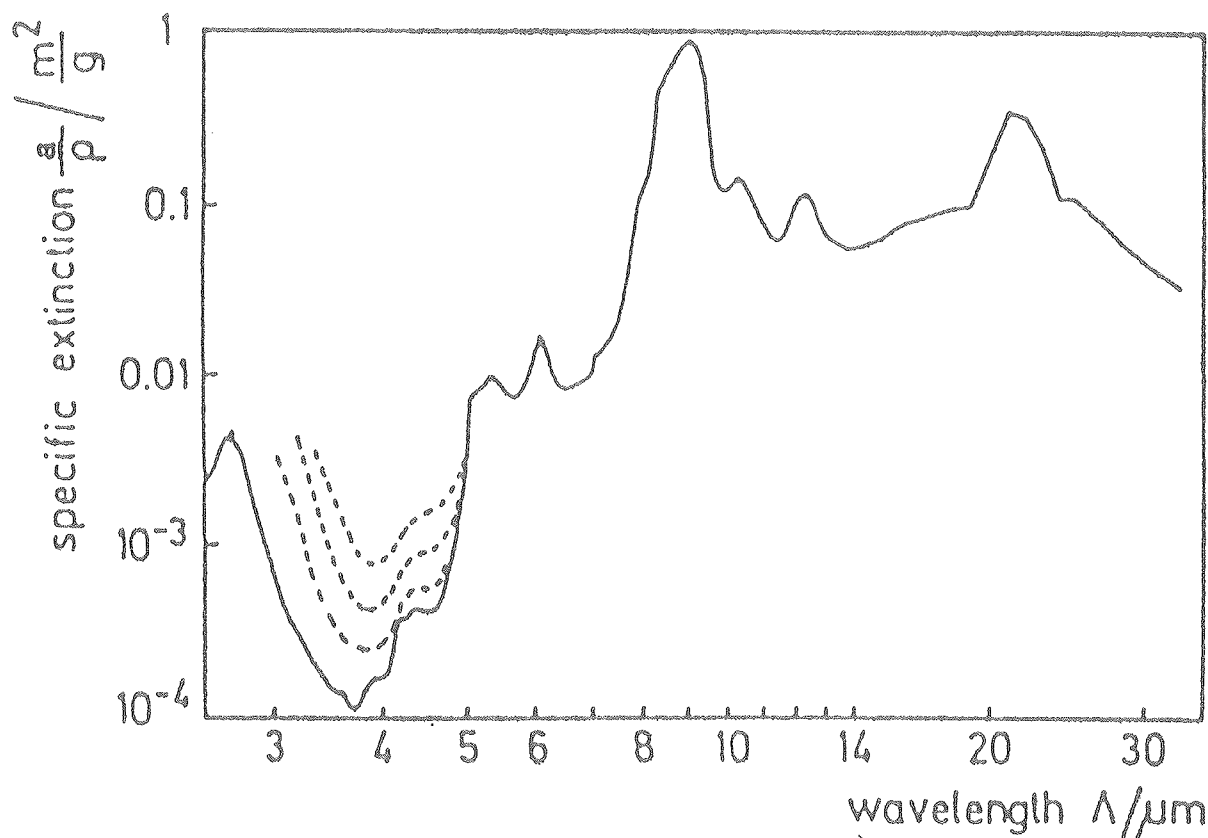
Varmestrømmene gennem en aerogelkonstruktion sker på lignende måde, som tilfældet er for en almindelig termorude. Der er først og fremmest en én-dimensional varmemstrøm vinkelret på konstruktionens plan. I gængse ruder i dag er det den dominerende varmemstrøm, men det ser ud som om, det er den eneste, der tages alvorligt. Det bør nok ændres efterhånden, som rudernes isolans forbedres. Det skyldes kantforseglingens kuldebrovirkning, som øges i takt med, at isolansen mellem de to glas vokser. Desuden vil glassene virke som finner for kuldebroen og lede varmen til og fra kantforseglingen. Kuldebroens indflydelse på rudens varmetabskoefficient, U-værdi, afhænger af flere ting. Det er fx udformningen af selve kantkonstruktionen altså isolansen deri. Desuden forholdet mellem rudens omkreds og areal, idet jo større rude jo mindre forhold og dermed mindre effekt af kuldebrovirkningen. Samtidig med denne to-dimensionale varmemstrøm er der en tre-dimensional, som finder sted i hjørnerne af ruden. Dens indflydelse på rudens totale U-værdi er i endnu højere grad bestemt af forholdet mellem rudens omkreds og areal, end det er tilfældet for den to-dimensionale varmemstrøm. Dog ser det ud til, at der normalt kan ses bort fra den tre-dimensionale varmemstrøm.

3.3.1 Varmetransport i aerogel

Varmetransporten gennem aerogel kan foregå på tre måder: 1) ledning i skelettet, 2) ledning i poreluften og 3) stråling. Der kan ikke forekomme konvektion, da porediametrene er for små. Som tidligere nævnt, anvendes aerogelen her evakueret. Det kan dog tilføjes, at i /6/ er det vist, at poreluftens tilsyneladende varmeledningsevne, λ -værdi, kan anses for at være konstant i området $20\text{-}380^\circ\text{C}$. Værdierne er de samme for de to undersøgte densiteter, 110 kgm^{-3} og 270 kgm^{-3} .

Ledningen i aerogelskelettet afhænger af densiteten og er meget lidt temperaturfølsom. Bidraget er meget lille, og det menes at være betinget af strukturen, som vist er lange kæder med indbyrdes punktvis kontakt. I /6/ er varmeledningsevnen bestemt for aerogelskelettet, λ_s , ved ca. -120°C , og resultatet blev en λ_s på $3 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ for densiteterne 70 og 110 kgm^{-3} samt $10 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ for en densitet på 270 kgm^{-3} . I /7/ bestemmes λ_s for densiteterne 75, 105 og 270 kgm^{-3} i temperaturområdet $0\text{-}100^\circ\text{C}$ til 4, 4 og $13 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$, respektive. Det er disse værdier, der vil blive anvendt her.

Modsat ledning i poreluft og skelet er varmetransporten ved stråling meget kompleks. Arten af strålingen er infrarød, og i det aktuelle temperaturområde er aerogel op til et par cm i tykkelse at betrage som et optisk tyndt materiale. Det resulterer i, at varmetransporten gennem aerogel ikke kun er bestemt af materialet selv men også af dets tykkelse og grænsefladernes emissivitet. Dæmpningen af den infrarøde stråling gennem materialet sker kun ved absorption, idet spredning kun forekommer i det synlige lys' bølglængdeområde, jf. afsnit 3.2. Den til absorptionen korresponderende ekstinktionskoefficient er kraftigt bølglængdeafhængig, som det ses på figur 3.1, hvor den specifikke ekstinktionskoefficient, α/ρ , er vist som funktion af bølglængden.

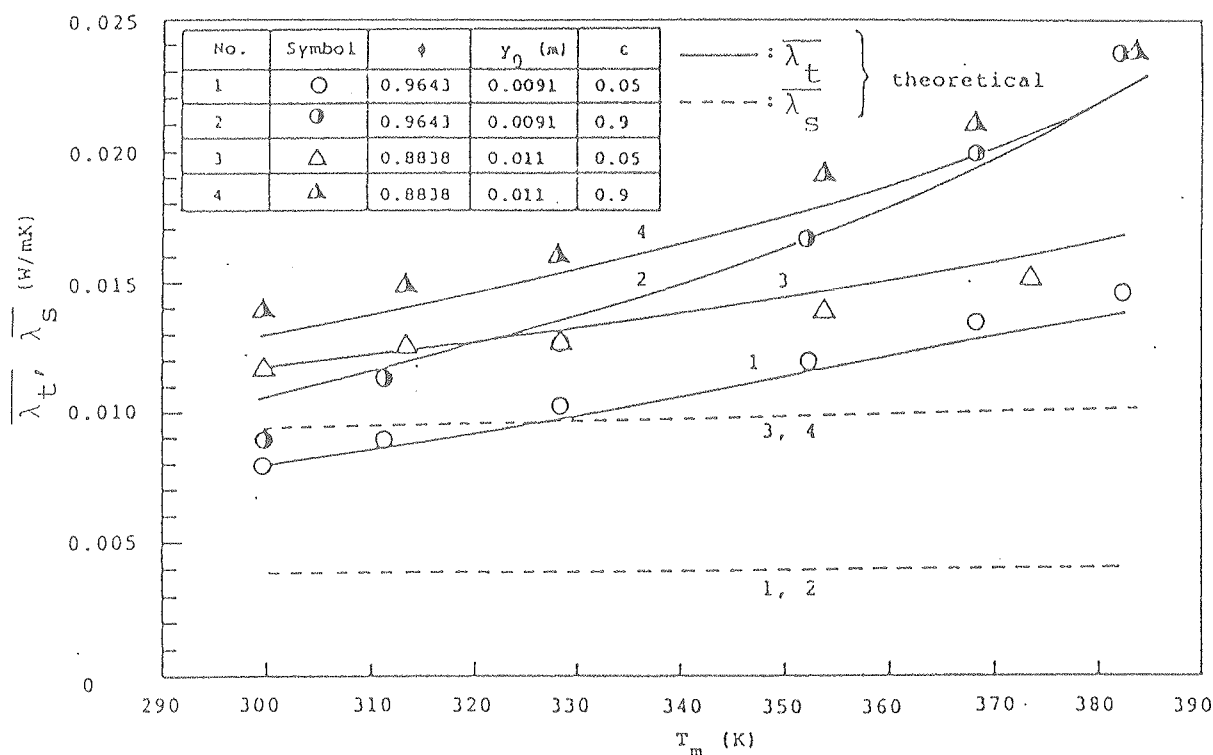


Figur 3.1 Den specifikke ekstinktionskoefficient som funktion af bølglængden for monolitisk silica aerogel opvarmet til 400°C i 3 timer under vakuum (—). (---) materialet udsat for atmosfærisk luft i 1/2 time, 12 timer, 2 døgn. Fra [8/].

Af figur 3.1 ses, at den specifikke ekstinktionskoefficient har to markante bånd. For bølglængder over ca. 8 μm er absorptionen stor. Ved ca. 20°C har det infrarøde spektrum sit maksimum omkring 10 μm , så der er varmetransporten ved stråling godt dæmpet. For stigende temperaturer går strålingens maksimum mod mindre bølglængder. Det andet bånd for absorptionen er mellem 3 og 5 μm også betegnet "transmissionsvinduet". Her vil der kunne forekomme en direkte strålingsudveksling mellem de to begrænsningsflader, som er de to lag glas. Som det ses af figur 3.1 kan det tilsyneladende "lukkes" vha. fugtig luft. Dog vil "transmissionsvinduet" ikke få nogen særlig betydning i det aktuelle temperaturområde.

Varmestrålingen gennem aerogel afhænger altså af tykkelsen og grænsefladernes emissivitet. Da aerogelen er at betragte som et optisk tyndt materiale, vil der være en kobling mellem stråling og ledning. Hvis der er grænseflader med lav emissivitet, vil strålingsfluxen tæt på være lille og stige længere inde i aerogelen pga. infrarød emission. Når den totale termiske flux er konstant gennem aerogelen, betyder det, at temperaturgradienten nær grænsefladerne er store og mindskes mod midten. Det giver en stor ledningsflux ud af den totale nær grænsefladerne og en relativ mindre mod midten. Størrelsen af den samlede varmetransport ved kombineret stråling og ledning afhænger generelt af begrænsningsfladernes temperatur og emissivitet, forholdet mellem lednings- og strålingsfluxen og den optiske tykkelse.

Beregninger af varmetransporten gennem aerogel valideres med målinger, der langt overvejende er udført af prof. J. Fricke og hans gruppe på Würzburg Universitet - se fx /6/, /7/ og /8/. K. Kamiuto har i /9/ præsenteret en teoretisk model for varmetransporten i aerogel. Beregningsresultater bliver sammenlignet med måleresultater fra Würzburg (/7/ og /10/) og viser god overensstemmelse, jvf. figur 3.2.



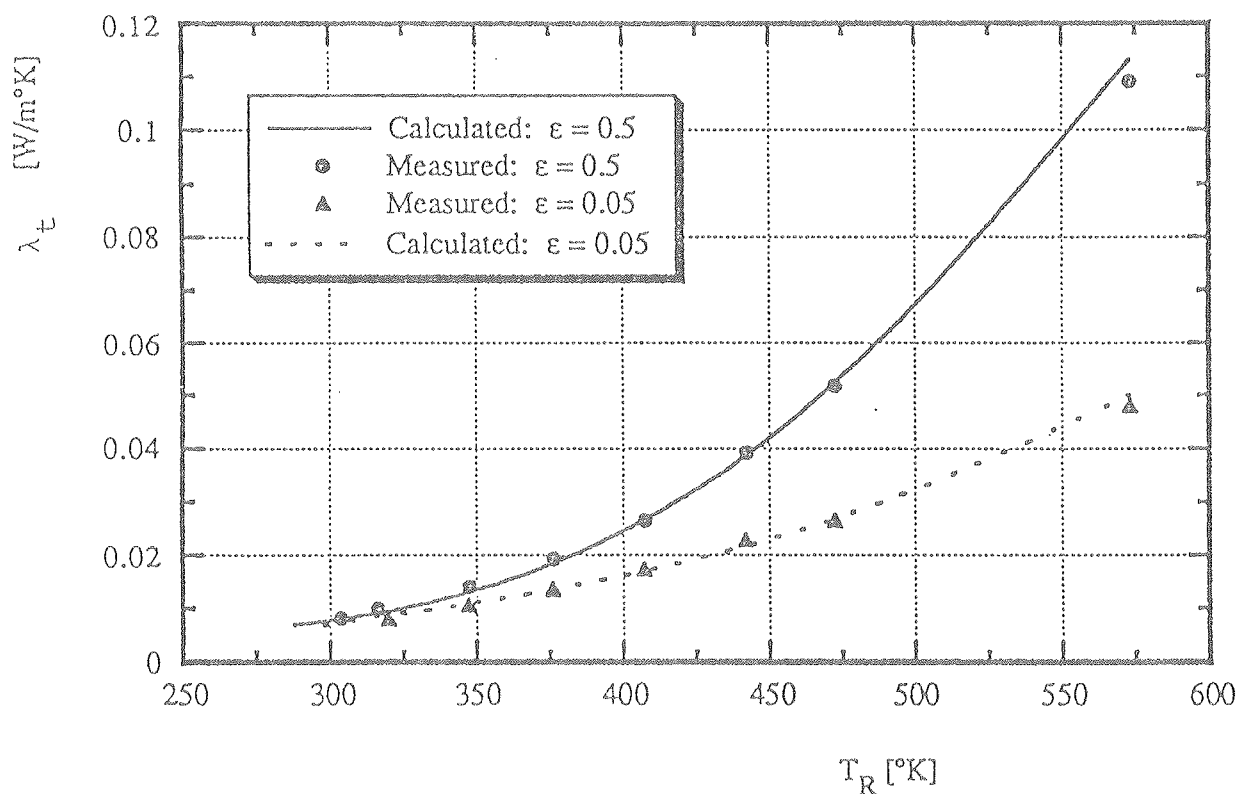
Figur 3.2 Sammenligning af målte og beregnede λ -værdier for evakueret aerogel. λ_t : tilsyneladende (total) varmeledningsevne, λ_s : varmeledningsevne for skelettet, y_0 : tykkelse, ϕ : porøsitet, ϵ : emittans af grænseflader og T_m : middeltemperatur. Fra /9/, sammenligning er foretaget med målinger fra /7/ og /10/.

A. Nordgaard har i /5/ ligeledes opstillet en beregningsmodel, hvor det er muligt at benytte meget forskellige emissionstal for de to grænseflader. Det vil fx være aktuelt ved en aerogelrude med en lav-emissionsbelægning. Bl.a. denne facilitet fremhæves i forhold til den model, der er

foreslået af Würzburg-gruppen, /8/. Nordgaard sammenligner beregningsresultater med måleresultater fra /8/, og der opnås god overensstemmelse, jvf. figur 3.3. Ordinaten, T_R , i figur 3.3 er fundet af formlen

$$T_R = \left[\frac{1}{4} (T_1^2 + T_2^2) \cdot (T_1 + T_2) \right]^{\frac{1}{3}}$$

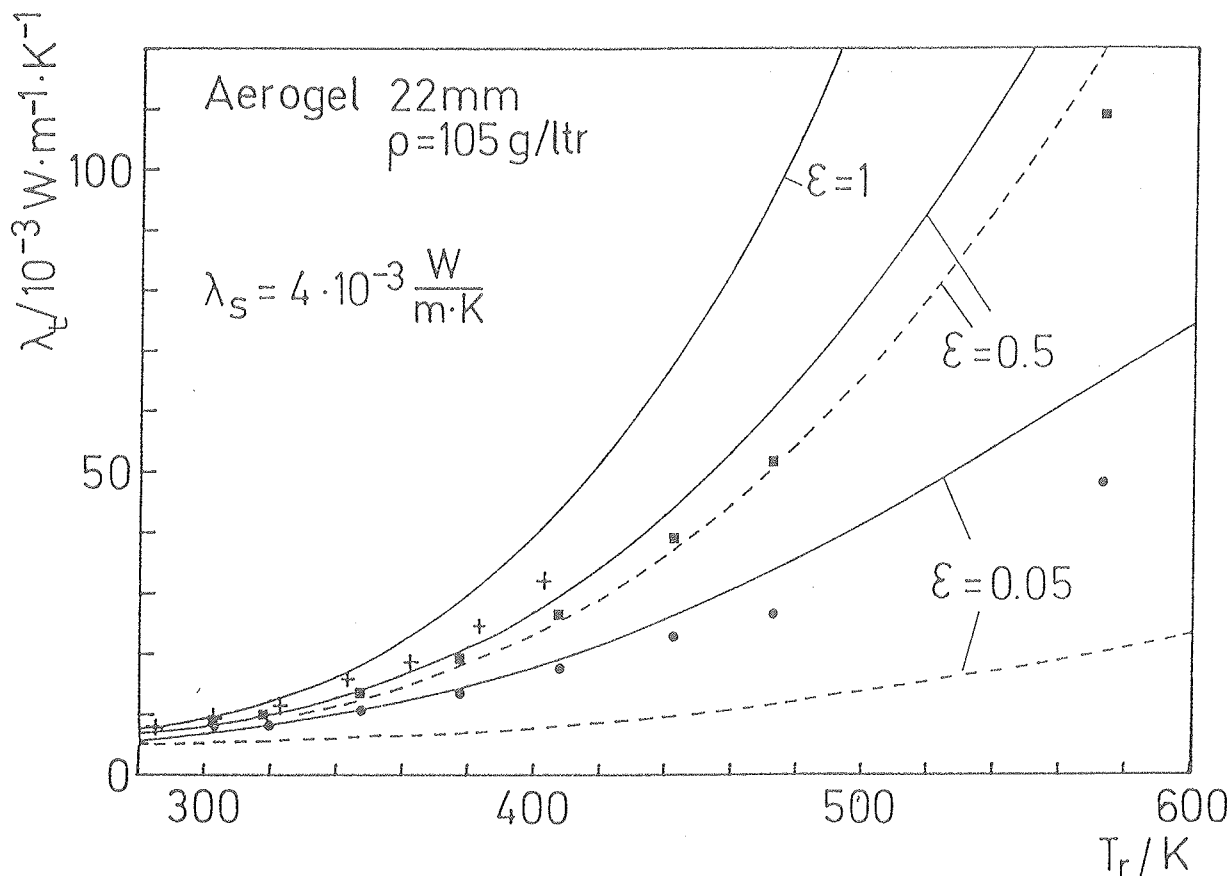
hvor T_1 og T_2 er grænsefladernes kelvintemperaturer.



Figur 3.3 Sammenligning af beregnede og målte λ -værdier for aerogel. λ_t : tilsyneladende varmeledningsevne, T_R : middelstrålningstemperatur. Aerogeltykkelsen er 22 mm og densiteten er 105 kgm⁻³. Fra /5/, måleresultaterne er fra /8/.

Den førømtalte model fra Würzburg-gruppen /8/ tager som de to foregående hensyn til koblingen mellem lednings- og strålingsfluxen. Det sker ved at anvende en såkaldt effektiv emittans, der afhænger af den optiske dybde og forholdet mellem lednings- og strålingsfluxen. Begrænsningen er, at grænsefladernes emittans skal være om ikke ens så meget tæt på hinanden, og at temperaturforskellen over aerogelen ikke er over ca. 30 K. Fordelen ved metoden er, at for aerogeldensiteter i området 95-140 kgm⁻³, kan modellen håndregnes. Den er blevet sammenlignet med numeriske beregninger med følgende parametre: variationer i den optiske dybde varierede mellem 0,1 og 10, emittanserne mellem 0,01 og 1,0 og lednings-/strålingsfluxforholdet var enten 10, 1, 0,1 eller 0,01. Resultatet var en fejl i gennemsnit på 5% og en største afvigelse på 15%. En sammenligning mellem målte og beregnede λ_t -værdier er vist i figur 3.4

(fra /8/), og der ser ud til at være en fornuftig overensstemmelse i hvert fald op til en middelstrålingstemperatur på over 400 K. Dermed er det aktuelle temperaturområde klart dækket ind. Middelstrålingstemperaturen, T_R , er bestemt ved samme formel som i figur 3.3.



Figur 3.4 Sammenligning af beregnede og målte λ_T -værdier. (—): beregnede λ_T -værdier med effektiv emittans, (---): beregnede λ_T -værdier uden effektiv emittans. λ_i : tilsyneladende varmeledningsevne, T_R : middelstrålingstemperatur, ■: emittans lig 0,5, ●: emittans lig 0,05, +: måleresultater fra /11/. Fra /8/.

Om de tre beregningsmodeller kan siges følgende. De to EDB-baserede modeller (Kamiuto, Nordgaard) kræver et stort programmeringsarbejde, og Nordgaards kom endvidere på et sent tidspunkt i dette projekts forløb. De ser ud til at give gode muligheder for at undersøge aerogels isolans især ved højere temperaturer, end det er tilfældet her. Til daglig brug er de måske for omstændelige at benytte, så derfor skulle der måske på grundlag af disse to modeller udvikles fx en relativ simpel potensformel egnet til håndregning. Würzburg-gruppens model er let at anvende og giver rimelige resultater. Desuden er der for anvendelse af aerogel i ruder og det tilhørende temperaturniveau stor enighed i referencerne om λ -værdien. Würzburg modellen benyttes videre frem, og i kapitel 6 er formlerne opstillet.

3.3.2 Kuldebroeffekt af kantforsegling

Til teoretisk undersøgelse af den to-dimensionale varmetransport i en aerogelkonstruktion, hidrørende fra kantforseglingens kuldebrovirkning, benyttes en tidligere udviklet analytisk model, /4/. Ideen i modellen er at betragte kantforseglingen som et legeme med en kendt isolans pr. længdeenhed. Dette legeme har i begge ender kontakt med to finner, dvs. glassene, som leder varme til og fra kantforseglingen. Samtidig hermed foregår en varmetransport vinkelret på finernes udstrækning. Modellen er nem at arbejde med og specielt velegnet til sammenligning af forskellige udformninger af kantforseglingen. Formlerne er vist i kapitel 6.

Modellen er blevet sammenlignet med numeriske beregninger fra /20/. Undersøgelser er foretaget på en almindelig 4-12-4 termorude i fire størrelse fra 0,25 m x 0,25 m til 1 m x 1 m og med en almindelig kantforsegling, hvis kuldebrovirkning er beregnet som en relativ forøgelse af rudens U-værdi. Dvs. den relative forøgelse af rudens center U-værdi der skal til for at blive lig rudens totale eller resulterende U-værdi. Resultaterne er vist i tabel 3.1, hvoraf det fremgår, at der er meget god overensstemmelse mellem den analytiske og den numeriske models resultater.

Tabel 3.1 Beregnet effekt af kantforseglingens kuldebrovirkning. Forøgelse af center U-værdi til resulterende U-værdi for en 4-12-4 termorude beregnet med analytisk model og numerisk model.

| Rudestørrelse (m x m) | 0,25 x 0,25 | 0,5 x 0,5 | 1 x 0,5 | 1 x 1 |
|-----------------------|-------------|-----------|---------|-------|
| Forøgelse (%) | | | | |
| Analytisk model | 40 | 20 | 15 | 10 |
| Numerisk model | 42 | 21 | 16 | 10 |

4. PROTOTYPER

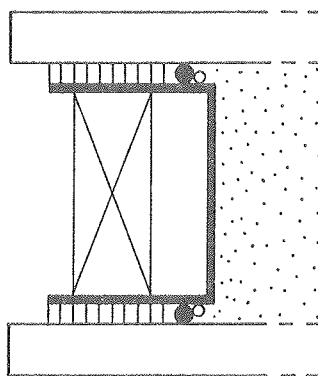
Til brug for de eksperimentelle undersøgelser er der fremstillet fem prototyper på aerogelkonstruktioner, hvoraf de fire kunne bruges. De tre første har ydre mål og dermed glasmål på 60 cm x 60 cm, og den sidste er af størrelsen 1 m x 1 m. Deres formål har været at give mulighed for dels praktiske erfaringer med fremstilling af forskellige udformninger af kantforseglingen og dels termiske undersøgelser af især kantforseglingens kuldebrovirkning.

Det, der adskiller de fire prototyper i konstruktionsmæssig henseende, er selve udformningen af kantforseglingen eller kantdesignet. De øvrige komponenter er så at sige givet nemlig to lag glas 4 mm tykke og aerogelen ca. 20 mm tyk. Endelig er der indsat to 10/8 mm kobberør til brug under evakuering af aerogel samt trykmåling i konstruktionen.

4.1 Kantudformning

Som tidligere nævnt er årsagen til interessen for kantudformningen (kantdesignet), at isolansen er bestemmende for kuldebroeffekten. Udformningen er begrænset til butylfuger og et rustfrit stålprofil. Fugerne skal overholde nogle mål af hensyn til lufttætheden, dvs. de hver må være ca. 1 mm tykke, og skal være mindst 10 mm brede. Så vil en 1 m x 1 m konstruktion med 20 mm aerogel og et startporelufttryk på 1 mbar være mere end 30 år om at nå et porelufttryk på 100 mbar, jvf. /4/. Der er altså kun det rustfri stålprofil at spille på, når kantforseglingens isolans skal forøges. Det kan gøres dels ved at reducere godstykkelsen og dels ved at øge vejlængden, som varmen skal tilbagelægge for at komme fra det varme glas til det kolde glas. Sidstnævnte mulighed er til stede, fordi luften og evt. støttematerialer har en meget lavere varmeledningsevne end rustfrit stål (rfs), som så er langt den dominerende varmeleder. I det følgende bliver de fire prototyper og deres tilhørende kantdesign benævnt med romertallene I, II, III og IV.

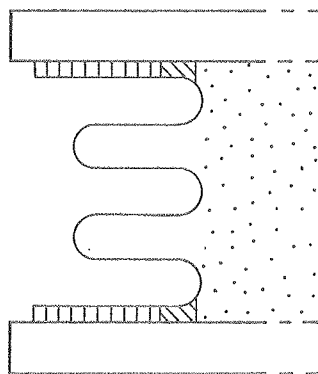
4.1.1 Kantdesign I



Figur 4.1 Kantdesign I. Rfs-U-profil, 13 mm x 16,5 mm, godstykkelse lig 0,75 mm og støtteliste af træ, 15 mm x 6 mm. Bagstopning: gummirundsnor Ø 1,3 mm og rfs-tråd, Ø 0,8 mm.

Det første kantdesign var et U-profil, 13 mm x 16,5 mm, af rustfrit stål med en godstykkelse på 0,75 mm. I hjørnerne er U-profilerne stødt sammen og svejset. Da det ikke var stærkt nok til at holde geometrien under samlingen og evakueringen, blev det afstivet med en træliste, 15 mm x 6 mm. Fugen har tidligere givet anledning til problemer, jvf. /4/, da butylen kunne blive suget ind på enkelte steder under evakueringen af aerogelen, hvorved tætningen var gået tabt. Derfor er en løsning med en bagstopning forsøgt fundet, som har til formål at stoppe butylen mekanisk. Det er en rundsnor, Ø 1,3 mm, af gummi, der under evakuering trykkes oval mellem glas og U-profil. Til styring af rundsnoren indtil evakueringen er der loddet en rfs-tråd, Ø 0,8 mm, fast på U-profilet. Bagstopningen virker efter hensigten, og det kan konstateres, at der ikke er nogen steder rundt langs kanten, hvor butylen er trængt ind over rundsnoren. Dog er bagstopning besværlig at lave, og rundsnoren hopper nemt af. Derfor er der også benyttet en langt enklere metode ved de næste prototyper.

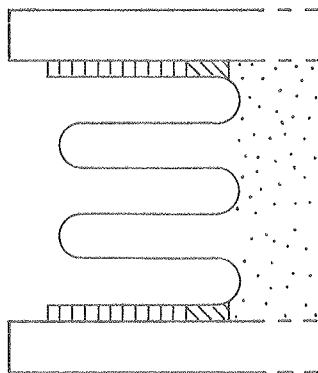
4.1.2 Kantdesign II



Figur 4.2 Kantdesign II. Rfs-bælg-profil, vejlængde lig 50 mm, bølgehøjde lig 8 mm, godstykkelse lig 0,2 mm. Bagstopningen er en 3 mm x 1,6 mm PUR-liste.

I forhold til kantdesign I er der her dels en mindre godstykkelse, 0,2 mm, og dels en øget vejlængde, metallængden fra fuge til fuge, så den er kommet op på 50 mm. Som bagstopning benyttes i stedet for rundsnor og tråd en klæbende elastisk 3 mm x 1,6 mm PUR-skumliste. Den er meget nem at have med at gøre og klæber tilstrækkelig til at holde butylen på plads. Som det ses af figur 4.2 har rfs-profilet et bælglignende tværsnit. Princippet i tværsnittet fastholdes videre frem. Her fastlægges i øvrigt betegnelsen bølgehøjde, som er den vandrette dimension på bælgtværsnittet, jvf. figur 4.2. Den er i dette tilfælde 8 mm. Det, der har bestemt udformningen, er måden, hvorpå hjørnesamlingerne er udført. Der er brugt 90° cirkeludsnit af en metalbælg fra en kompensator til varmerør. Disse udsnit og de rette rfs-profillængder er blevet loddet sammen. Det er således metalbælgens tværsnit, der har bestemt profilernes tværsnit. Som kantforsegling virkede det godt nok, men en aerogelrude med de runde hjørner kan nok ikke anvendes, da det kunne give vinduet et maritimt look, som er for aparte til at blive accepteret.

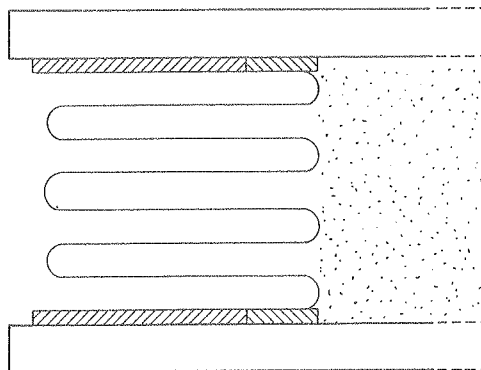
4.1.3 Kantdesign III



Figur 4.3 Kantdesign III. Rfs-bælgprofil, vejlængde lig 65 mm, bølgehøjde lig 12 mm og godstykkelse på 0,2 mm. PUR-liste på 3 m x 1,6 mm.

Som det ses, er kant-design III meget lig kantdesign II. Bagstopning, fuger og godstykkelse er uforandret. Vejlængden er øget til 65 mm, og bølgehøjden er 12 mm. Dette har kunnet lade sig gøre, fordi der er anvendt en anden hjørnesamlingsmetode end i det foregående. Bælgprofil-længderne er skåret i smig, stødt sammen og samlet med et plastprofil. Dette er lavet ved udfræsning i en plastklods, således at tværsnittet er et dobbelt E-profil, og klodsen er desuden skåret ud retvinklet. Derved passer det ind i de to bælgprofiler og dækker deres samling. Inden monteringen af plastprofilet fyldes en passende mængde butyl i, således at mellemrummet mellem bælg- og plastprofil er helt udfyldt med butyl. Udformningen af kantdesignet gav ikke anledning til problemer under fremstillingen. Dog er der et problem mht. lufttætheden, da det kan være noget usikkert, hvordan butylfugerne mellem plastklods og bælgprofil ser ud og dermed den ekstra lækage. Men hjørnesamlingsmetoden kan ses som et alternativ til lodning og svejsning, som måtte opgives i den aktuelle godstykkelse, da passende udstyr ikke var til rådighed.

4.1.4 Kantdesign IV



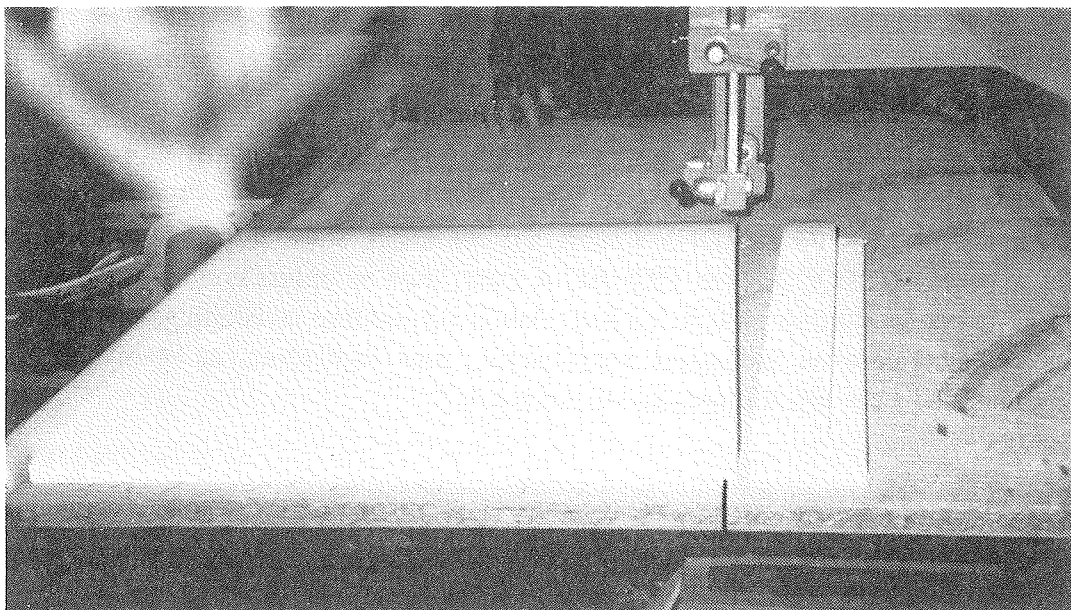
Figur 4.4 Kantdesign IV. Rfs-bælgprofil, vejlængde lig 114 mm, bølgehøjde lig 16 mm og godstykkelse på 0,2 mm. PUR-liste på 5 mm x 1,6 mm.

Det sidst realiserede kantdesign har i forhold til II og III fået en ekstra bølge. Et forsøg blev gjort med en godstykkelse på 0,1 mm, men den kvalitet båndstål, der blev benyttet, var for fjedrende. Så da profilet var blevet foldet, ville det ikke holde faconen. Det er muligt, det var gået med en anden kvalitet, men i hvert fald er det tidligere benyttede 0,2 mm båndstål valgt. Vejlængden og bølgehøjden er øget til hhv. 114 mm og 16 mm. Bagstopningen er også gjort større nu 5 mm x 1,6 mm. I de enkelte bølger er der desuden lagt strimler á 1 og 2 mm tykkelse som støttemateriale. Dette materialet er lavet af fibre og har udseende som filt. Det bruges normalt til teknisk isolering og kaldes KERLANE 50 papir. Samlingen af hjørnerne blev forsøgt loddet. Der blev lavet en lille prøve på en aerogelkonstruktion med målene 20 cm x 20 cm. Bælgprofilerne blev skåret i smig og tildannet, så der blev et overlap på 1-2 mm. Lodningerne så ud til ved visuel inspektion at være i orden, men prøven var ikke tæt. Metoden har den fordel, at hjørnerne ligesom bælgprofilerne er fleksible. For at være sikker på helt tætte hjørnesamlinger blev profilerne også tildannet med smig og overlap. Men i stedet for lodning blev profilerne sat i et fikstur og trykket sammen til endelig højde. Derefter blev hvert hjørne dyppet i flydende loddetin og faktisk støbt ud. Sluttelig blev der med en minifræser fjernet loddetin, så udstøbningen strækker sig 7-8 mm ud over overlappet. Resultatet blev tætte men ufleksible hjørner og en større kuldebro i forhold til loddede hjørner.

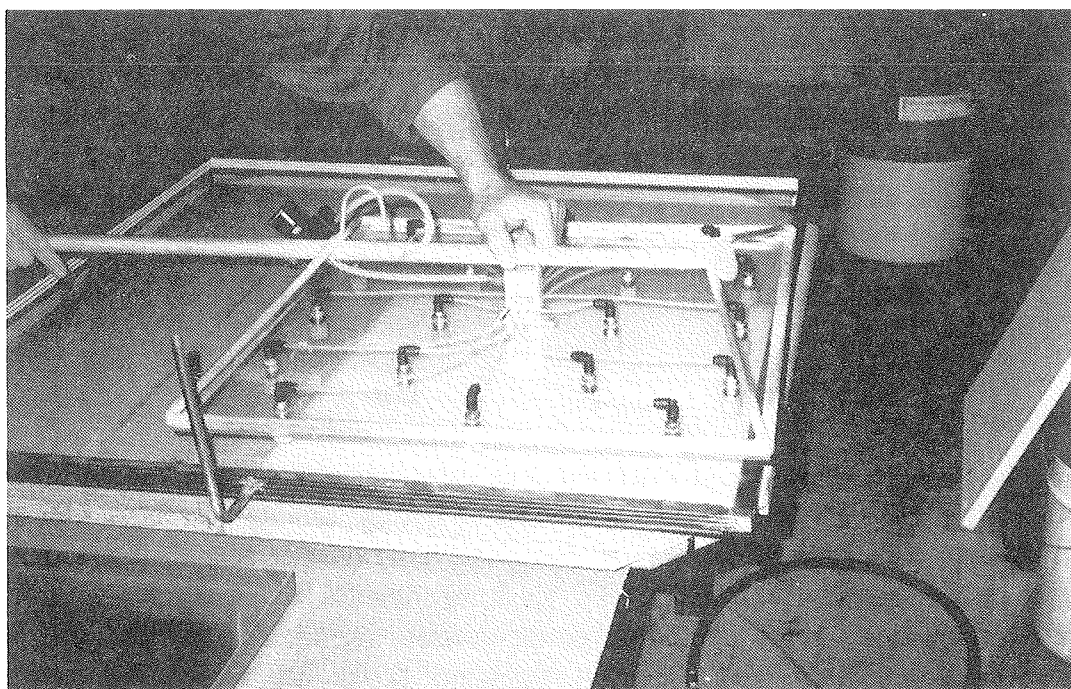
4.2 Fremstilling

Ved fremstilling af prototyperne blev metalprofilrammen først lavet og monteret med de to 10/8 mm kobberør. Dernæst blev rammen affedt med opløsningsmiddel, og butylen lagt på. Derefter blev det første glas affedt rundt langs kanten, hvor fugen vedhæfter, og rammen blev presset let ned mod glasset. Derved sikredes, at butylen havde en vis vedhæftning til ramme og glas. Aerogelen havde været i en ovn ved ca. 140°C i mindst 24 timer inden samling af konstruktionen for at drive evt. fysisk bundet vand ud af materialet. Tildannelsen af aerogelen skete umiddelbart efter, at det var taget ud af ovnen. Som regel skulle kanterne rettes af, og for prototype IV blev fire skiver skåret til og lagt ind i konstruktionen. Der er brugt en almindelig båndsav ved tilskæring af aerogelskiverne. For at undgå ridser i overfladen af skiven, når den skubbes hen over landet, blev skiven lagt på en 10 mm polystyrenplade, som så også blev skåret igennem, jvf. figur 4.5. Metoden er meget enkel og giver pæne snitflader.

Håndtering af aerogelskiven, fx når den skal lægges i konstruktionen, sker ved hjælp af et løfteværktøj med håndtag og en plade, hvorpå der er monteret nogle små plastbælge. Værktøjet har endvidere monteret en trykluftdrevet vakuumpumpe, som suger på bælgene, og en reduktionsventil til justering af trykket i bælgene. Ved at lade bælgene suge på aerogelskiven, kan denne herved løftes op og flyttes rundt, se figur 4.6. Sugetrykket skal nøje afpasses, da skiven ellers falder af under flytningen, eller bælgene efterlader ringformede aftryk på aerogelen.



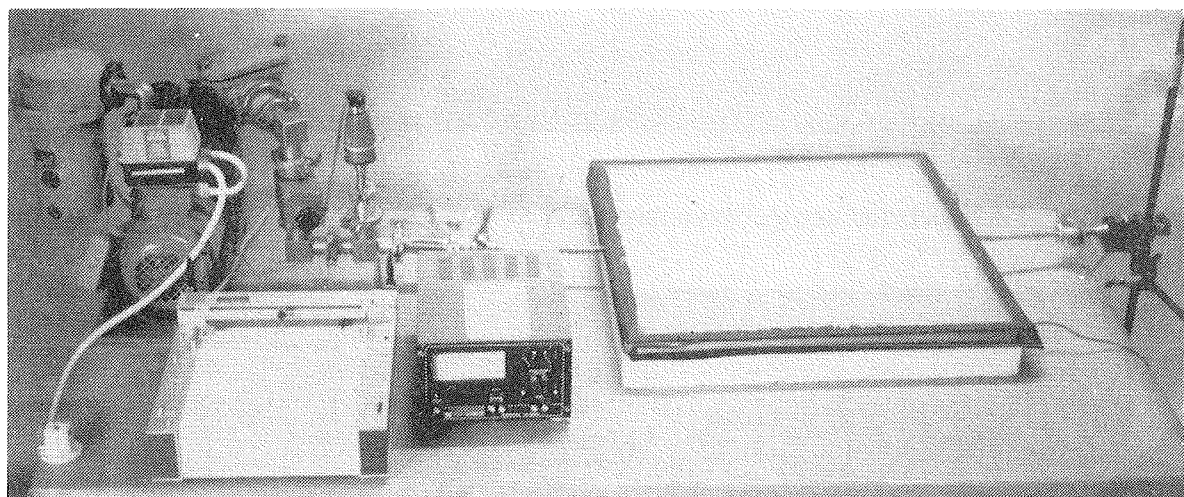
Figur 4.5 Tildannelse af aerogelskive med båndsav.



Figur 4.6 Ved hjælp af løfteværktøjet placeres den første tildannede aerogelskive i prototype IV.

Efter ilægning af aerogelen affedtes metalrammen og kanten af glasset, butylen lægges på metalrammen, og glasset monteres. Derefter blev det sidste glas trykket lidt ned langs hele kanten, så butylen havde rimeligt fat under transporten af aerogelkonstruktionen til det sted, hvor evakueringen fandt sted. Som det ses på figur 4.6, er de to studse monteret i metalrammen midt på siden og modsat hinanden.

På den ene studs monteredes et LEYBOLD, type TR 201, målerør, som tilsluttedes et viserinstrument, LEYBOLD type THERMOVAC TM 220 S2, hvorpå der var en 10 V udgang til skriver. Denne var en KIPP & ZONEN BD9. Til den anden studs sluttedes en lamelvakuumpumpe af mærket LEYBOLD, type TRIVAC A DB8, med en oplyst nominel pumpehastighed på $10 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ og et sluttryk på 0,013 mbar. Den er påmonteret udstødnings- og indsugningsfilter og har endvidere en indbygget kontraventil, som forhindrer, at olien slår tilbage i konstruktionen ved stop. Opstillingen er vist i figur 4.7.



Figur 4.7 Evakuering af prototype I.

4.3 Generelle erfaringer

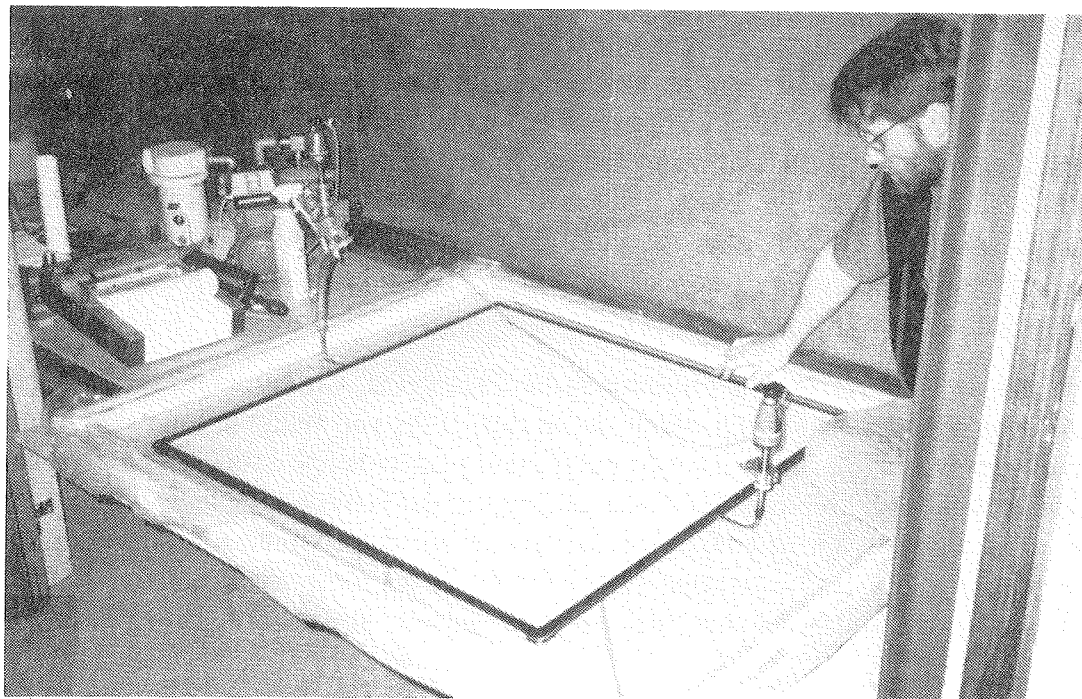
Når aerogelskiverne modtages fra producenten er de svagt dobbeltkrumme forstået på den måde, at de yderste par cm på skiven bukker opad. Det er lidt det samme udseende, som en skive rugbrød har, når det er blevet for tørt. At aerogelskiverne ikke er helt plane betyder, at der opstår revner i materialet under evakueringen typisk et par cm fra kanten hele vejen rundt. Andre revner i prototypernes aerogel kunne forekomme overalt i materialet. De kom, hvis porelufttrykket efter evakuering igen steg for hurtigt. Det kunne fx ske, når studsene, der var forbundet med vakuumpumpen, skulle loddes til. Så blev der sat et klemmeverktøj på studsene, og slangen blev taget af. Flere gange skete det, at kobberrøret ikke var trykket fuldstændigt sammen, der blev suget luft ind, og aerogelen begyndte at revne hørligt. Årsagen hertil må være, at pga. de

små porediametre kan trykket ikke fordele sig hurtigt nok med spændingsforskelle i aerogelen til følge. Da aerogels trækbrudstyrke er meget lille, opstår revnerne. Disse skønnedes i øvrigt at være uden betydning for undersøgelserne.

Når man første gang har et stykke ubeskyttet aerogel mellem hænderne, kommer man til at ødelægge det i mindst ni af ti tilfælde, det er i hvert fald erfaringen her på Laboratoriet. Det kan derfor være med bange anelser, at man påbegynder arbejdet med aerogelskiver i størrelsen 60 cm x 60 cm. Ikke bare skal de flyttes rundt men også skæres til. Så det er på sin vis overraskende, hvor smertefrit det går. Som nævnt er aerogelskiver blevet skåret til i de ønskede mål med en almindelig båndsav. Endvidere er der tidligere boret med et almindeligt 8 mm metalbor ind i aerogelen uden problemer.

Ud over lækager, som resulterede i revnedannelse i aerogelen, var der under arbejdet med prototyperne også mindre lækager. En enkelt var så stor, at det var muligt at lytte sig frem til den. Ellers blev der fx brugt en lille mængde butyl, som placeredes på kritiske steder, som kunne være loddede samlinger. Metoden er meget usikker, og det virkede tilfældigt, om lækagen blev lokaliseret. Et særligt svagt sted var, hvor studsene er sat på metalrammen specielt de bælgeformede kantdesign. Som det kan tænkes var kantdesign IV det mest problematiske. Det lykkedes dog til sidst at ordne studsproblemet, men det siger sig selv, at en bedre løsning er ønskelig videre frem.

For prototype IV's vedkommende blev en noget speciel lækagesøgningsmetode anvendt, som på en måde kan betegnes som destruktiv. Problemet var, at lækagen var målelig men ikke til at finde. Som den sidste udvej blev prototypen lagt i et kar, som blev fyldt med vand, jvf. figur 4.8.



Figur 4.8 Lækagesøgning på prototype IV.

Prototypen blev trykket ned under vandet, og reaktionen kom øjeblikkelig. Ude ved metalrammen groede nogle hvide popcornlignende gevækster ind i aerogelen. Prototypen blev trukket op med det samme, men alligevel nåede noget af aerogelen, op til ca. 1 cm ind fra rammen og ca. 5 cm langs denne, at blive ødelagt. Det var en fejl i båndstålet, der var årsagen til lækagen, og det var det sidste sted, det var ventet. Fejlen i båndstålet kan enten være sket under fabrikationen eller være en følge af bukkeprocessen, da bælgprofilet skulle laves. Ved sidstnævnte mulighed kunne det måske forventes, at samme fejl også optrådte på de andre sider i rammen, da de var fremstillet på samme måde og med det samme værktøj. Skaden blev udbedret med butyl, men det var besværligt pga. kantdesignet. Det så dog ud til, at lukningen var tilstrækkelig til, at de termiske undersøgelser kunne udføres.

5. EKSPERIMENTELLE UNDERSØGELSER

De eksperimentelle undersøgelser falder i to dele. Den første er en undersøgelse af prototyperne I-III. Disse typer er blevet undersøgt mht. center varmetabskoefficient, herefter benævnt U-værdi, og kuldebroeffekt af kantkonstruktionen. Den anden del drejer sig om prototype IV. Denne type er også undersøgt mht. center U-værdi samt soltransmittans. Desuden er den blevet monteret i en trækarm og undersøgt for kuldebroeffekt af kantkonstruktionen samt total U-værdi. En måling af den totale U-værdi er blevet foretrukket på prototype IV i stedet for en af de andre, fordi størrelsen, ca. 1 m x 1 m, er nærmere en typisk vinduesstørrelse end prototyperne i størrelsen 60 cm x 60 cm er. Dermed er de forskellige varmestrømme måske også i et mere naturligt indbyrdes forhold.

5.1 Forsøgsopstillinger og måleprincipper

Center U-værdi. Den første prototype blev testet i Laboratoriets λ -apparat, /12/, hvor den lige passede i størrelsen. For prototyperne II og III's vedkommende kunne de ikke gå i apparatet, da studsene var blevet bukket af hensyn til evakueringen, og prototype IV er meget større end λ -apparatets prøvestørrelse. En mere fleksibel metode blev derfor anvendt. I dette tilfælde blev prototypen lagt på en elektrisk varmemefolie, der blev reguleret med en variotrafo, og oven på prototypen placeredes et isoleringsmateriale med omtrent samme isolans som prototypen. Endvidere blev nogle termoelementer monteret, således at temperaturforskellene over de to emner kunne måles. En passende effekt afsættes i varmemefolien, og når der er stationære forhold, er varmestrømmen gennem prototypen og isoleringsmaterialet den samme. Med kendskab til ovennævnte temperaturforskelle og isoleringsmaterialets isolans kan prototypens isolans bestemmes.

Soltransmittans. Til brug for soltransmittansmålinger indendørs i den kunstige sol eller udendørs benyttes en opstilling som beskrevet i /12/. Det er et stativ med en ramme på 60 cm x 60 cm, som kan drejes om en lodret og en vandret akse. Under rammen i en afstand af ca. 5 cm fra måleemnet er et Kipp & Zonen CM 10 pyranometerer monteret. Først indstilles stativet, så indfaldsvinklen ved målingen bliver som ønsket. Først måles solbestrålingsstyrken, og når udslaget har været stabilt i en passende tid, lægges prototypen på rammen, og der måles, indtil udslaget har været stabilt i ca. samme tidsrum som før. Derefter tages prototypen af, og der måles igen en passende tid med stabilt udslag. De målte bestrålingsstyrker før og efter måling på prototypen skal stort set være ens, så det kan ses, om bestrålingsstyrken ser ud til at være konstant. Målingerne med og uden prototypen kan gentages et passende antal gange, hvilket giver et bedre indtryk af, hvor konstant bestrålingsstyrken er.

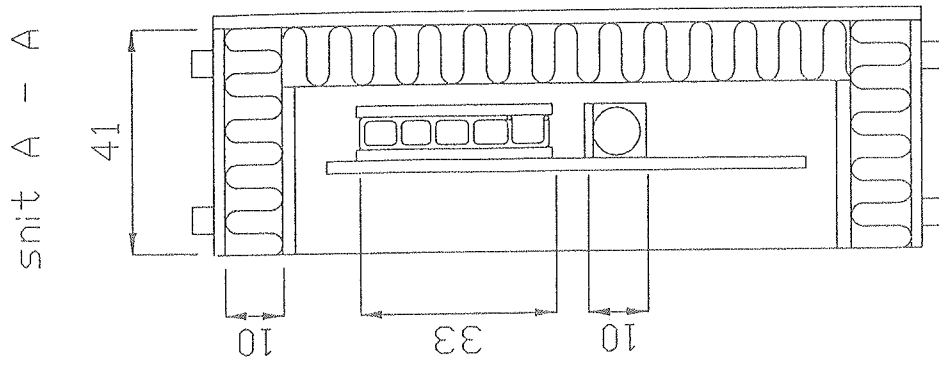
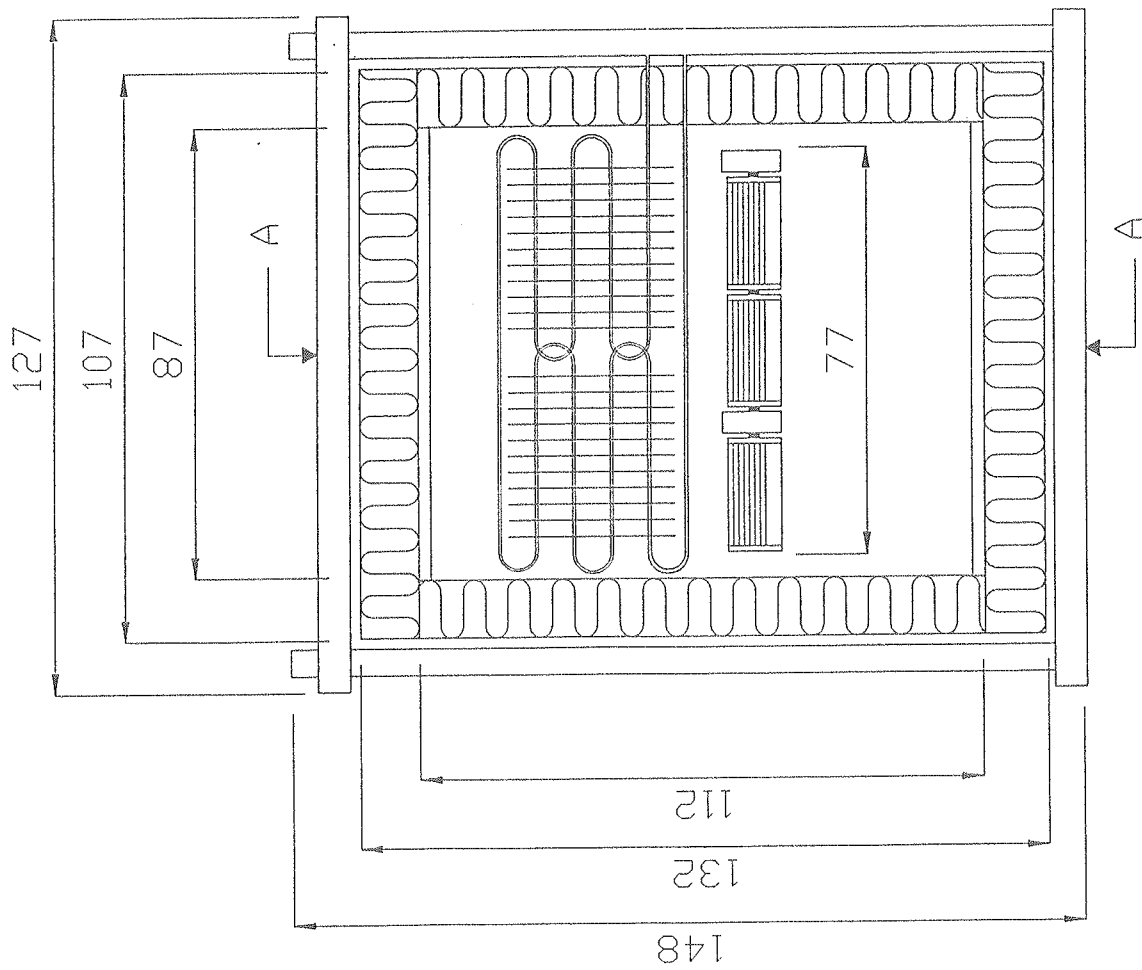
Kuldebroeffekt. Princippet i undersøgelsen er det, at kantforseglingens kuldebrovirkning bestemmes ud fra temperaturgradienten i glasset. Prototypen udsættes for forskellige temperaturer på hver side, og når stationære forhold er opnået, registreres temperaturfordelingen, jvf. s. 27 og 28, i fx det varme glas. Herved kan temperaturgradienten i glasset ved kantforseglingen bestemmes og dermed varmestrømmen i glasset til kantforseglingen. Med antagelse af passende adiabatisk flader og måling af temperaturforskellen over kantforseglingen kan kantforseglingens isolans bestemmes.

I realiteten drejer disse forsøg sig om fastlæggelse af temperaturerne i prototypernes varme glas fra kantforseglingen og ind mod midten. For at opnå temperaturdifferens i prototyperne, er de placeret i væggen til et kuldekammer. Registreringen af temperaturfordelingen i det varme glas er sket på én måde for prototyperne I-III og på en anden måde for prototype IV.

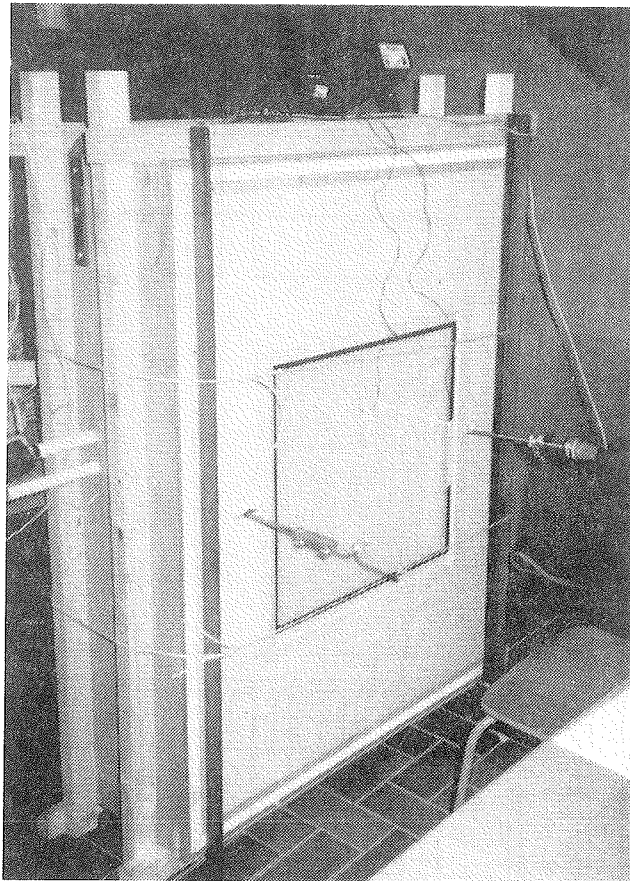
En kølekasse er blevet fremstillet til undersøgelserne af prototyperne I-III. Den er udstyret med en køleflade, som sluttet til en kølemaskine og ventilatorer til cirkulering af luften. Prototypen monteres i et hul i frontpladen, således at det ene glas køles af luften i kassen, og det andet glas er i kontakt med rumluften. Kølekassen er vist i figur 5.1.

Kølekassen er en boks lavet af 12 mm krydsfinér og med ydre dimensioner på 0,41 m x 1,07 m x 1,32 m. Indvendigt er fladerne beklædt med 100 mm polystyren. Frontpladen er lavet af 12 mm krydsfinér, som er beklædt udvendigt med 20 mm polystyren. Midt i frontpladen er der et hul på 60 cm x 60 cm, hvori prototyperne monteredes. Prototyperne og frontpladen er således omtrent lige tykke. Sprækken mellem prototypens og frontpladens kantflader var meget lille og dækket af tape. På bagvæggens øverste halvdel i kølekassen er to serieforbundne køleflader monteret, som blev sluttet til en kølemaskine af mærket HETOFRIG model CB8. Under kølefladerne er to tværstrømsventilatorer placeret, som kan reguleres vha. en variotrafo, jvf. figur 5.1. Foran kølefladerne og ventilatorerne er der sat en skillevæg, så der er en 5 cm spalte ved bund og top. Luften bliver således af ventilatorerne ført ned gennem kølefladerne og op langs frontpladen og prototypen.

Gennem boksens topplade er ti kobber-konstantan termoelementledninger ført igennem. Termoelementerne tilsluttedes et FLUKE 2176A digital termometer. Alle gennemføringer er forseglet med polyuretanskum. Bestemmelsen af kant- og centertemperaturerne på den varme og kolde side skete ved termoelementer. Temperaturfordelingen blev registreret med termovisionsudstyr. Dette er et AGA THERMOVISION 782, som har indbygget en 3 1/2" sort-hvid monitor, der har en noget begrænset billedkvalitet. For at bøde på dette er der tilsluttet en AGA DISCON, som kan overføre signalet til en 12" farvemonitor. Da det ønskede billede fremkom på monitoren, blev det frosset, og affotograferet med et almindeligt spejlreflek-skamera med makrolinse. Der blev brugt en diasfilm, så billedet kunne projiceres op på et lærred. Derfra blev temperaturintervallerne opnået. Metoden virkede efter hensigten, men det er et større apparat at få op, når termovisionsudstyret skal anvendes. Desuden er der en vis ventetid med at få fremkaldt diasfilmen, og det er en usikker fornemmelse, man har af måleresultaterne i mellemtiden. Derfor blev det besluttet at anvende en anden teknik ved undersøgelsen af prototype IV.

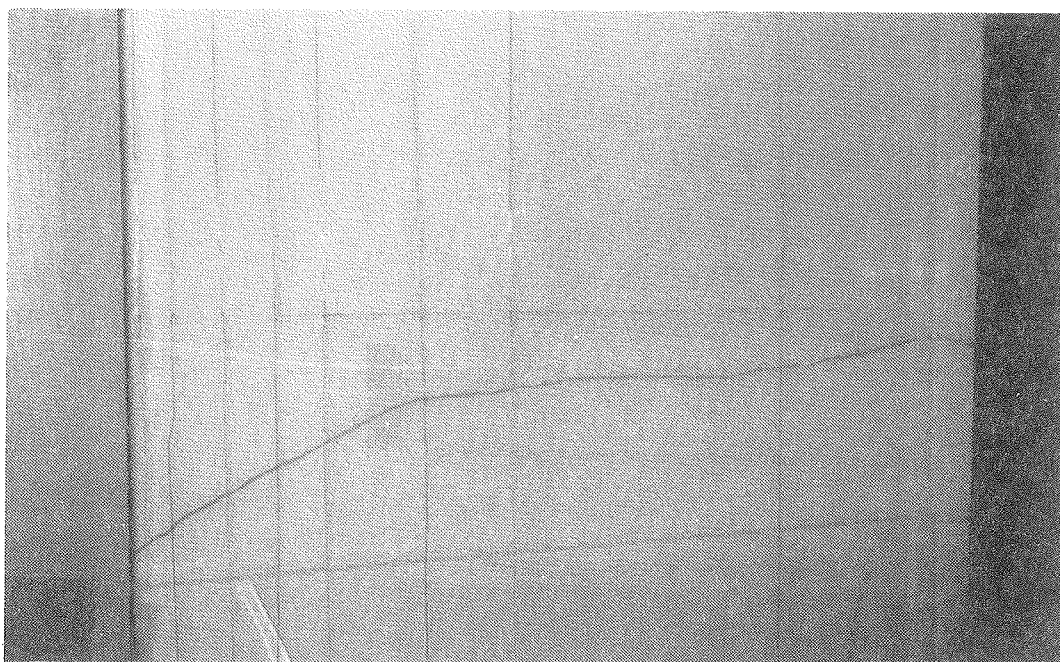


Figur 5.1 Snit i kølekasse. Boksen der blev benyttet ved undersøgelse af kantforseglingens kuldebroeffekt. Målene er i cm.



Figur 5.2 Prototype monteret i kølekassen.

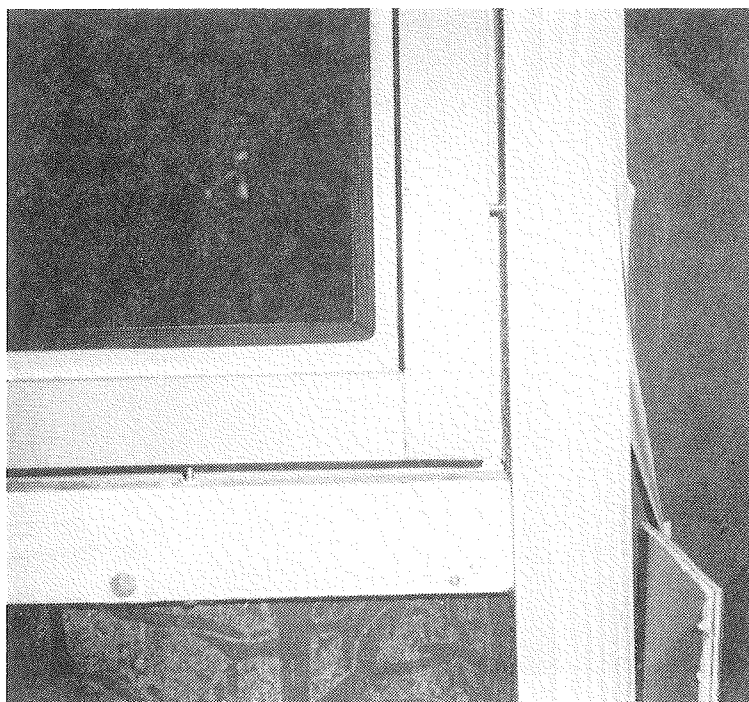
På grund af prototype IV's størrelse kunne kølekassen ikke bruges til undersøgelse af kantforseglingens kuldebroeffekt her. Laboratoriets solvægsprøvestand blev i stedet benyttet, beskrevet i /13/. Opstillingen består af tre mobile sektioner, som er en kold boks, en isoleret ramme og en varm boks. Ved denne undersøgelse blev kun de to første sektioner benyttet, idet prototypen med karm blev monteret i den isolerede ramme, som blev koblet sammen med den kolde boks. Så også her var prototypens varme glas vendt mod rumluften. Målingen af temperaturfordelingen blev foretaget ved hjælp af kobber-konstantantermoelementer. For at påvirke varmestrømmene mindst muligt, blev der brugt konstantantråd med en diameter på 0,25 mm og kobbertråd med en diameter på 0,22 mm. Termoelementerne blev limet fast på glasset for at opnå bedst mulig termisk kontakt. Der blev monteret otte termoelementer i afstande på 0-20 cm fra kantforseglingen. Endvidere blev der målt temperaturer på den kolde side af kantforseglingen samt midt på prototypen og af den kolde og varme luft. Termoelementerne blev tilsluttet to FLUKE 2176A digital termometre. I forhold til at benytte termovisionsudstyret var målingen nemmere og hurtigere, når først termoelementerne var monteret. Dog skal der udvises en del omhu, når termoelementerne limes på glasset, da der registreres for høje temperaturer, hvis den termiske kontakt er dårlig.



Figur 5.3 Termoelementer limet på prototype IV's varme glas.

Total U-værdi. For at bestemme den totale eller resulterende U-værdi for prototype IV, blev den placeret i karmen i den isolerede ramme i solvægsprøvestanden. Derudover blev der fremstillet en såkaldt målekasse, som præcist dækkede prototypen med karm. Forsøget blev udført som en guarded hot box-teknik, idet der blev afsat en effekt i målekassen, således at temperaturen i målekassen var den samme som i den varme boks. Herved var den afsatte effekt i målekassen lig den effekt, som gik gennem prototypen med karm.

Karmen, som prototypen blev sat i, er lavet af træ og har et tværsnit på 67 mm x 42 mm. Det ydre mål er 1092 mm x 1092 mm. Glaslisterne har et tværsnit på 17 mm x 25 mm, og tætningslisterne er 10 mm x 4 mm. Som afstandsklodser er benyttet plaststykker med en tykkelse på 3 mm. Samlingerne i karmen og den ene glasliste blev af hensyn til lufttæthed påført ekspanderende polyuretanlim. I den isolerede ramme var der sat en træfiberbetonplade som skillevæg, centralt i denne blev der skåret et hul med en kantlængde, som var 20 mm større end karmen. På den kolde side af pladen blev der rundt om hullet sat en lægteramme. Karmen blev sat i hullet og holdt af otte træskrue, som blev skruet gennem lægterammen og ind i karmen. Denne sad nu plant med pladen på den varme side. Luftspalten mellem karm og pladen/lægterammen blev skummet ud med polyuretan. Efter det var hærdet af, blev skrueene fjernet, og hullerne ligeledes skummet ud. Den kolde side af træfiberbetonpladen blev beklædt med 50 mm polystyren. Der blev lavet udsparringer i karmen og i lægterammen til studsene, og prototypen blev sat i karmen. Derpå blev den sidste glasliste med tætningsliste monteret.



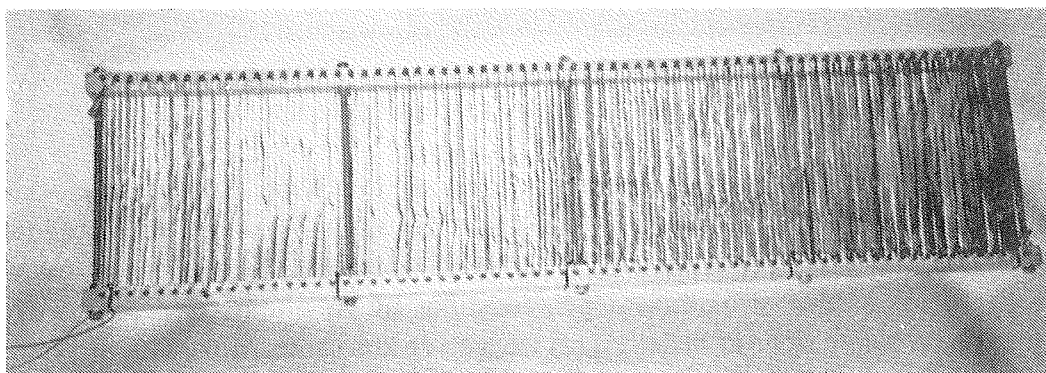
Figur 5.4 Fiksering af karmen i lægterammen inden udskumning af luftspalten.

Målekassen er fremstillet af 50 mm polystyrenskum og med indvendige mål: 400 mm x 1082 mm x 1082 mm. Alle samlinger og gennemføringer er tætnet med ekspanderende polyuretanlim. Kanten rundt langs kassens åbning er skåret under en vinkel på 45° , således at kanten mod karmen kun er 10 mm bred. For at minimere infiltrationen er der påsat en tætningsliste på 5 mm x 10 mm. Kanten træder således 5 mm ind på karmen og 5 mm ud på polyuretanudskumningen. For at spænde målekassen ind mod karmen er der rundt langs kanten af målekassen sat stige træ, 21 mm x 42 mm. Med otte øskner i træet og tilsvarende i pladen kunne målekassen ved hjælp af 8 vantskruer spændes jævnt ind mod prototypen, så den ønskede tæthed kunne opnås. To slanger var ført igennem kassens bagside. Den ene blev sluttet til en gasmåler og en støvsuger, som reguleredes med en variotrafo. Den anden slange blev sluttet til et U-rørsmanometer. Der kan således findes samhørende værdier af flow og trykforskel mellem målekassen og den varme boks.

Varmelegemet er placeret i bunden af målekassen og helt ud mod bagvæggen. Det har en vinkel i forhold til bunden på ca. 40° . Det består af to trælistor, 22 mm x 22 mm x 1078 mm med en indbyrdes afstand på 225 mm, som ovenpå har en række tætsiddende papsøm. Frem og tilbage mellem disse søm er selve varmelegemet vundet, dette varmelegeme er af rustfrit båndstål, 0,1 mm x 15 mm med en total længde på ca. 34 m. Varmerlegemets samlede overflade er således godt 1 m². Gennem de to trælistor er der sat 5 stk. 8 mm gevindstænger med møtrikker. Derved kunne afstanden mellem de to trælistor øges, så der ikke var nogen kontakt mellem de enkelte vindinger. Båndstålets dimensioner gjorde, at varmelegemets elektriske modstand var

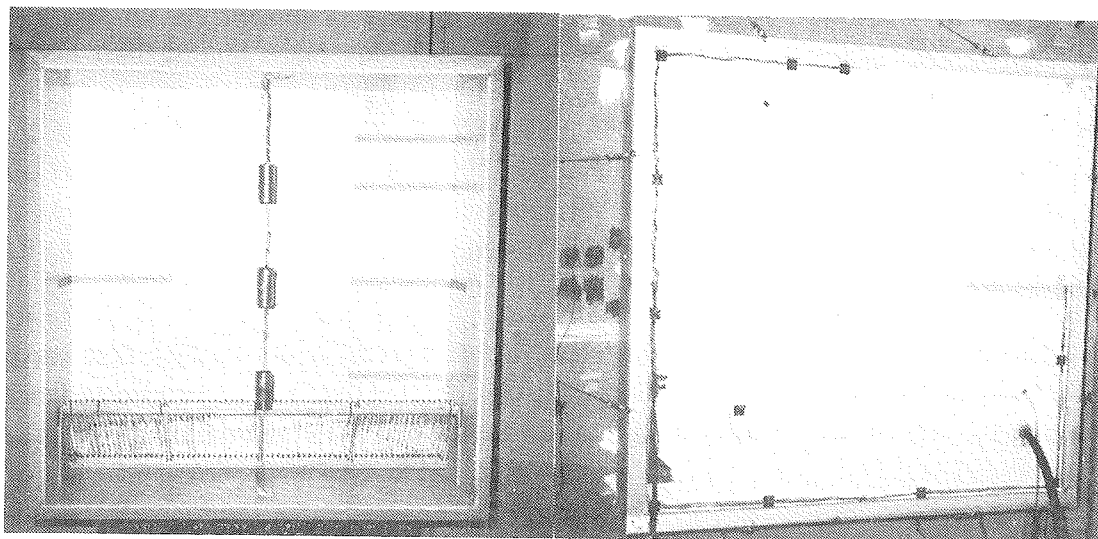
tilstrækkelig til, at lavvoltage kunne benyttes. Strømforsyningen var en HH Electronic Power Supply 03P. Spændingsfaldet over varmelegemet blev målt, umiddelbart hvor ledningerne kom ud på ydersiden af målekassen, og der blev brugt en Kipp & Zonen BD9-skriver. Strømstyrken blev målt med et DATA PRECISION 2480R-multimeter. I forhold til at benytte netspænding var den afsatte effekt meget stabil her. Fordelen ved varmelegemets store overflade er, at der er god mulighed for en jævn varmeoverføring til luften. Derved undgås de store overtemperaturer på varmelegemet i forhold til resten af målekassens indre, der kunne forårsage urealistiske strålingsforhold.

Udformningen og placeringen af varmelegemet var betinget af, at der termisk ikke var plads til ventilatorer til omrøring af luften i målekassen, da effektbehovet var i størrelsesordenen 20 W ved forsøgene. Det var derfor nødvendigt, at lufttransporten skete ved naturlig konvektion.



Figur 5.5 Varmelegemet til målekassen.

Al temperaturregistrering foregik ved hjælp af kobber-konstantan termoelementer. De kan deles op i to grupper efter deres funktion. Den første er måling af temperaturforskellen over målekassens vægge. Ideelt skulle der være samme temperatur i målekassen og i den varme boks, altså målekassens vægge skulle være adiabatisk, således at den afsatte effekt i varmelegemet var lig varmestrømmen gennem prototype og karm. Dette blev dog aldrig opnået, men varmelegemets effekt blev styret mod mindst mulig temperaturforskel over målekassens vægge. Der var placeret et termoelement på begge sider af målekassens side-, bund- og topvægge. På bagvæggen blev midt mellem bund og top og en fjerdedel fra sidevæggene sat to termoelementer på hver side. I alt blev altså tolv termoelementer placeret til måling over målekassens vægge. Termoelementerne til måling af lufttemperaturen i målekassen var strålingsbeskyttede med et blankt metalrør, der var 45 mm i diameter og 95 mm langt. Sådanne tre var ophængt i en snor 30 cm fra bagvæggen og midt for. Termoelementerne blev sat i fjerdedelspunkterne. Sluttelig var der sat et termoelement på hver side af prototypen og et i den kolde boks til måling af den kolde lufttemperatur.



Figur 5.6 Målekassen set forfra og monteret i den isolerede ramme.

Måling af temperaturforskellen over prototypen skete med en Kipp & Zonen BD9-skriver, og resten af temperaturerne blev målt med to FLUKE 2176A digitaltermometre. Proceduren for at nå stationære forhold var den, at først blev der valgt temperaturniveauer i den kolde og den varme boks, dernæst blev strømforsyningen indstillet til en effekt efter bedste evne. Når temperaturerne på begge sider af målekassens vægge var konstante, blev strømforsyningens effekt justeret, som regel flere gange, for at opnå mindst mulig temperaturforskel over målekassens vægge. Når dette syntes opnået, blev den endelige måling foretaget, når temperaturfaldet over prototypen var konstant.

5.2 Forsøgsresultater

Center U-værdi. Bestemmelsen af center U-værdien foregik som beskrevet i 5.1, side 25. Polystyrenpladen, som blev benyttet til målingerne, var 50 mm tyk, og dens varmeledningsevne var blevet målt til $33 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ i λ -apparatet. Middeltemperaturen var 15°C . Ifølge [14] kan materialets λ -værdi anses for at vokse med 0,4-0,5% pr. $^\circ\text{C}$. Her er regnet med 0,5% pr. $^\circ\text{C}$. Resultaterne fra forsøgene er vist i tabel 5.1. U_0 er bestemt af den fundne isolans for prototyperne og med tillæg af de sædvanlige ind- og udvendige overgansisolanser.

Tabel 5.1 Målte værdier af prototypernes center U-værdi. d_a : aerogelens tykkelse. ρ_a : aerogelens densitet. λ_a : aerogelens varmeledningsevne. U_o : prototypens center U-værdi.

| Prototype nr. (-) | d_a (mm) | ρ_a (kgm ⁻³) | λ_a (mWm ⁻¹ K ⁻¹) | U_o (Wm ⁻² K ⁻¹) |
|----------------------|---------------|----------------------------------|---|--|
| I | 17,3 | 200 | 11,6 | 0,60 |
| II | 19,3 | 200 | 12,4 | 0,58 |
| III | 19,7 | 200 | 11,5 | 0,53 |
| IV | 18,1 | 150 | 10,4 | 0,52 |

Det fremgår, at λ -værdien bestemt for prototyperne I-III er ca. 12 mWm⁻¹K⁻¹, hvilket også er det forventede /15/. Med hensyn til målingen på prototype I, blev den også foretaget i λ -apparatet med næsten samme værdi som i tabellen, så den er ikke medtaget. Det er altså samme metode for alle fire prototyper.

Soltransmittans. Målingerne blev udført udendørs i solskin på en skyfri dag. Der blev anvendt et Kipp & Zonen CM11 pyranometer. Prototype IV's soltransmittans blev målt ved at sætte den ind foran og fjerne den fra pyranometeret ved forskellige indfaldsvinkler. Solstrålingens intensitet var ca. 1020 W/m² med ca. 10 % diffus stråling. Glassene på prototypen er 4 mm hærdet glas fra ScanGlas. I solsimulatoren blev den direkte-total-soltransmittans for et glas målt til 84,4% for normal indstråling. Resultaterne fra den udendørs prøvning er vist i tabel 5.2.

Tabel 5.2 Målt soltransmittans for prototype IV ved forskellige indfaldsvinkler.

| Indfaldsvinkel (grader) | Soltransmittans (%) |
|----------------------------|------------------------|
| 0 | 62,9 |
| 15 | 62,9 |
| 30 | 62,1 |
| 45 | 60,1 |
| 60 | 54,0 |

Under forudsætning af at den diffuse stråling er isotropisk, vil dens transmittans svare til transmittansen for direkte stråling ved en indfaldsvinkel, i , på 60°. De i tabel 5.2 målte værdier for i lig 0 og i lig 60° kan da benyttes til at bestemme transmittansen for direkte stråling, T_o , renset for den diffuse indstråling. Idet den diffuse andel var 10% bruges udtrykket:

$$T = T_o \cdot 0,9 + T_{60} \cdot 0,1$$

↓

$$T_o = \frac{T - T_{60} \cdot 0,1}{0,9}$$

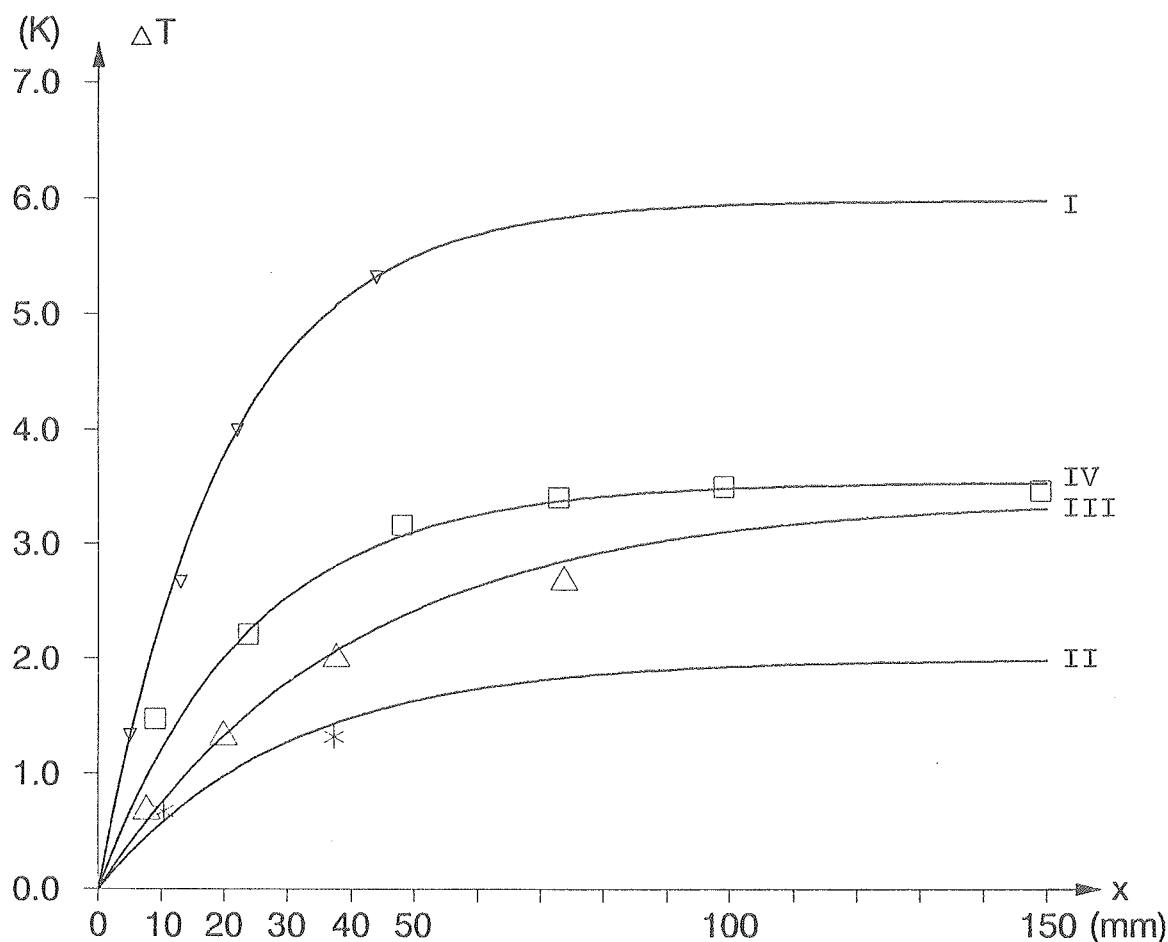
T_o bliver dermed lig 63,8%. For at bestemme transmittansen af aerogelen er der gjort følgende. Da brydningsindekset for den anvendte aerogel er omtrent 1, beregnes transmittansen mht. refleksion som for en to-lagsrude. Den bliver med de benyttede glas 84,5%. Herudfra og fra T_o bliver transmittansen mht. absorption så lig 75,5% for prototypen. Glassenes ekstinktion-skoefficient er 20,4 m⁻¹, og for aerogelen kan den beregnes til 6,5 m⁻¹. Dvs. at transmittansen for aerogelen er 88,9%.

Kuldebroeffekt. De temperaturer, som blev målt ud over temperaturfordelingen i glasset fra kantforseglingen mod midten, var: den varme luft, T_{lv} , midt på det varme glas, T_{gv} , den varme kant (lig glastemperaturen oven på kantforseglingen), T_{kv} , den kolde kant, T_{kk} , midt på det kolde glas, T_{gk} , og den kolde luft, T_{lk} . Der ses bort fra glassets isolans normalt på dets udstrækning. Temperaturen anses for at være uniform i den retning, og det er rimeligt, da glassenes isolans er forsvindende i forhold til aerogelens. De målte værdier af ovennævnte temperaturer er vist i tabel 5.3

Tabel 5.3 Temperaturmålinger ved kantundersøgelse.

| Prototype nr. (-) | I | II | III | IV |
|--------------------|------|------|------|------|
| Temperaturer (°C): | | | | |
| T_{lv} | 27,5 | 23,2 | 23,5 | 22,8 |
| T_{gv} | 25,4 | 20,8 | 21,2 | 20,9 |
| T_{kv} | 19,4 | 18,8 | 17,8 | 17,3 |
| T_{kk} | 14,0 | 0,1 | 1,3 | 3,9 |
| T_{gk} | 0,0 | -0,8 | -2,2 | 1,60 |
| T_{lk} | -1,4 | -2,6 | -4,2 | 1,10 |

Som tidligere nævnt, er temperaturfordelingen i det varme glas registreret ved hjælp af termovisionsudstyr for prototyperne I, II og III. Termovisionsbillederne viser forskellige områder inden for temperaturintervaller, som her typisk var 0,5 K. Dette er dog ikke det sande temperaturspænd, så for at korrigere er udgangspunktet de målte temperaturer på glasset oven på kant og midt på og så forøge temperaturintervaller. Det viste sig, at hvis disse blev udvidet med 1/3, fx i stedet for 1°C så 1 1/3°C, var der fin overensstemmelse mellem de målte temperaturforskelle fra midt på glasset og ud til kanten, og antallet af temperaturintervaller på termovisionsbillederne. Dette gælder alle tre prototyper. Disse problemer var der ikke med prototype IV, da der blev målt i et antal faste punkter. Temperaturmålingerne med tilhørende kurvefit er vist i figur 5.7.



Figur 5.7 Målte glastemperaturer på prototyperne. x : afstand fra kantforsegling.
 $\Delta T = T_{gv}(x) - T_{kv}$

Kurvefitene er af formen $T_{gv}(x) = Y1 (1 - \exp(-Y2 \cdot x))$, hvor $T_g(x)$ er glastemperaturen til stedet x , som er afstanden til kantforseglingen. $Y1$ og $Y2$ er konstanter. Den første afledte bliver da:

$$(5.1) \quad \frac{dT_{gv}(x)}{dx} = Y1 \cdot Y2 \exp(-Y2 \cdot x) \quad (K m^{-1})$$

Varmestrømmen i det varme glas ud til kanten bliver da:

$$(5.2) \quad q_v = -\lambda_g \cdot e_g \left. \frac{dT_{gv}(x)}{dx} \right|_{x=0} \quad (W m^{-1})$$

λ_g er glas' varmeledningsevne som sættes til $0,8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, e_g er glassets tykkelse, som er lig 4 mm. Med (5.1) i (5.2) for $x = 0$ fås:

$$q_v = -\lambda_g \cdot e_g \cdot Y_1 \cdot Y_2 \exp(-Y_2 \cdot 0)$$

↓

$$(5.3) \quad q_v = \lambda_g \cdot e_g \cdot Y_1 \cdot Y_2 \quad (Wm^{-1})$$

q_v for de fire kurvefit blev som følger:

| | | |
|-----------|---|------------------|
| Prototype | I: $q_v = 0,8 \cdot 0,004 \cdot 6,0 \cdot 50$ | $= 0,96 Wm^{-1}$ |
| Prototype | II: $q_v = 0,0032 \cdot 2,0 \cdot 34$ | $= 0,22 Wm^{-1}$ |
| Prototype | III: $q_v = 0,0032 \cdot 3,4 \cdot 25$ | $= 0,27 Wm^{-1}$ |
| Prototype | IV: $q_v = 0,0032 \cdot 3,55 \cdot 42$ | $= 0,48 Wm^{-1}$ |

For I-II gælder, at glasriben over kantforseglingen ikke var dækket af glaslister el. lign. under forsøgene. Der sker derfor også en varmeoverføring fra rumluften til kantforseglingen den vej. Hvis samme varmeovergangstal antages over hele ruden, kan glasribens bidrag, q_s , beregnes. Resultaterne er vist i tabel 5.4.

Tabel 5.4 Bidrag til kuldebroeffekt på grund af uisoleret glas over kant. R_k og R_v er overgangsmodstandene på den kolde og den varme side. Δb_g er glasribens bredde, dvs. fra aerogelen til kanten af glasset. q_s er varmestrømmen, der overføres fra rumluften til glasriben.

| Prototype nr. | (-) | I | II | III |
|---------------|------------------------------------|------|------|------|
| T_{lv} | (°C) | 27,5 | 23,2 | 23,5 |
| T_{kv} | (°C) | 19,4 | 18,8 | 17,8 |
| R_k | (m ² KW ⁻¹) | 0,08 | 0,13 | 0,15 |
| R_v | (m ² KW ⁻¹) | 0,12 | 0,17 | 0,17 |
| Δb_g | (mm) | 10 | 22 | 12 |
| q_s | (Wm ⁻¹) | 0,66 | 0,56 | 0,41 |
| q_v | (Wm ⁻¹) | 0,96 | 0,22 | 0,27 |
| $q_s + q_v$ | (Wm ⁻¹) | 1,62 | 0,78 | 0,68 |

Som det ses af tabel 5.4, er det betydelige bidrag fra den uisolerede glasstriben. Som aerogelrude vil glasriben være dækket af en glasliste, og dermed vil q_s være praktisk taget nul, medens q_v vil stige markant formentlig svarende til q_s .

For at kunne give et fingerpeg om kantforseglingernes kuldebroeffekt, kan man se på isolansen pr. længdeenhed, her kaldet r_k . Den bestemmes som forholdet mellem temperaturforskellen over kanten og varmestrømmen gennem denne. Temperaturforskellen er her mellem det varme og det kolde glas på skillefladen mellem kantforsegling og aerogel.

Tabel 5.5 Kantforseglingens isolans. q er lig $q_s + q_v$ for I - III og q_v for IV.

| Prototype nr. (-) | T_{kv} (°C) | T_{kk} (°C) | q (Wm ⁻¹ K ⁻¹) | r_k (mKW ⁻¹) |
|-------------------|------------------|------------------|--|-------------------------------|
| I | 19,4 | 14,0 | 1,62 | 3,33 |
| II | 18,8 | 0,1 | 0,78 | 23,97 |
| III | 17,8 | 1,3 | 0,68 | 24,26 |
| IV | 17,3 | 3,9 | 0,48 | 27,92 |

Det ses, at r -værdien er næsten tidoblet fra prototype I til prototype IV. At r for II og III begge er ca. 24 er på sin vis skuffende, da der ikke er nogen særlig effekt af den øgede vejlængde for kantdesign III i forhold til kantdesign II. Årsagen til dette er nok, at på prototype II er glasribben næsten dobbelt så bred som på prototype III, og det giver så et noget andet forhold mellem q_s og q_v . Det kan betyde noget, da q_v er bedre bestemt end q_s . Endvidere er bestemmelsen af q_v for prototype II, den mest usikre af de fire på grund af de få målepunkter, jvf. figur 5.7.

Total U-værdi. Ved brug af guarded hot-box opstillingen må to fejlmuligheder holdes for øje. Den ene er infiltration for målekassen, og den anden er korrektion for ikke adiabatisk flader i målekassens vægge.

Målekassens lufttæthed blev først undersøgt inden montering i den isolerede ramme. Det skete ved at spænde målekassen op mod en termorude, der var større end målekassens åbning. Med gasmåler, manometer og variotrafo-reguleret støvsuger blev der sat overtryk på målekassen. Der blev valgt overtryk, da det er værste tilfælde af over- og undertryk. Undertryk vil i nogle tilfælde kunne forårsage reduktion af utætheder, fx. klemme målekassens tætningsliste mod anlægget. Med røgprøvningsudstyr blev der lokaliseret to utætheder, som skyldtes for dårlig udsukning af gennemføringer. Disse fejl blev udbedret, og fem samhörørende værdier af trykforskel og luftflow blev målt. Den mindste trykforskel var 11 mmVS og gav et flow på 54,63 lh⁻¹. Den største trykforskel var på 59,5 mmVS, som resulterede i et flow på 175,50 lh⁻¹. Da målekassens volumen er godt 450 l, vil det største flow svare til et luftskifte på ca. 1/3 h⁻¹. Hvis der antages laminart flow og følgende lineære sammenhæng mellem flow og trykforskel: $\dot{V} = k \cdot \Delta p$, hvor k er en konstant, så fås denne til 3,3 lh⁻¹ mmVS⁻¹. Da ruden, som målekassen var sat op imod, var plan og tør, gav målingerne en idé om det opnåelige niveau for lufttætheden. Efter montering i den isolerede ramme, over prototype IV med karm, blev lufttæthedsforsøget gentaget. Der blev lavet syv målinger med mindste og største trykforskel på hhv. 22 mmVS og 63 mmVS, og det resulterede i minimum- og maksimumflow på 57,85 lh⁻¹ og 143,64 lh⁻¹. Her fås k lig 2,3 lh⁻¹ mmVS⁻¹. At der blev en bedre lufttæthed ved den endelige montering, må skyldes en bedre mulighed for ensartet opspænding samt hårdere opspænding af målekassen.

Betydningen af målekassens lufttæthed er forbundet med infiltrationens størrelse. Hvis lufttemperaturen i målekassen fx er 1 K over lufttemperaturen i den varme boks, og der samtidig er utætheder i toppen og bunden af måleboksen, er der mulighed for skorstenseffekt. Højden er lig

målekassens højde, 1,08 m, og det resulterer i en trykforskel på 0,0043 mmVS /17/. Med førnævnte k-værdi på $2,3 \text{ lh}^{-1} \text{ mmVS}^{-1}$ giver det et flow på $0,010 \text{ lh}^{-1}$ eller $2,7 \cdot 10^{-6} \text{ l s}^{-1}$. Det svarer til et varmetab fra målekassen på

$$\Delta T \cdot \rho \cdot c \cdot V = 1 \cdot 1,205 \cdot 1,005 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ W} = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ W}.$$

Hvis utæthederne havde været fra og til den kolde boks i stedet, ville temperaturforskellen være af størrelsesordenen 25 K, og det resulterer i et varmetab på 2,3 mW. Den afsatte effekt i målekassen er af størrelsesordenen 20 W, så de to varmetab vil udgøre hhv $1,7 \cdot 10^{-5}\%$ og 0,01%. Der ses derfor bort fra infiltrationen ved disse forsøg.

Transmissionsarealet for måleboksen regnes lig $1,092 \text{ m} \times 1,092 \text{ m}$, som er karmens udvendige mål, da målekassens åbning er $1,082 \text{ m} \times 1,082 \text{ m}$, og den 10 mm brede kant gik 5 mm ind på karmen og 5 mm ud på den udskummede fuge. Som varm lufttemperatur benyttes midelværdien af de tre målte lufttemperaturer i målekassen. Der var kun ét målepunkt for den kolde lufttemperatur, og det var placeret midt ud for prototypen. Resultaterne fra forsøgene er vist i tabel 5.6.

Tabel 5.6 Måling med guarded hot-box på prototype IV med karm. E_s er den målte spænding, I er strømstyrken, og P er den afsatte effekt. U_m er varmetabskoefficienten bestemt ud fra målingerne uden korrektion.

| Måling nr. (-) | E_s (V) | I (A) | $P=E_s \cdot I$ (W) | T_{gv} (°C) | T_{gk} (°C) | T_{lv} (°C) | T_{lk} (°C) | U_m (Wm ⁻² K ⁻¹) |
|-------------------|--------------|----------|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--|
| 1 | 19,44 | 1,053 | 20,47 | 23,0 | 2,3 | 25,6 | 1,6 | 0,72 |
| 2 | 19,34 | 1,041 | 20,13 | 27,0 | 6,3 | 29,3 | 6,1 | 0,73 |
| 3 | 18,6 | 1,017 | 19,28 | 31,2 | 11,5 | 33,6 | 10,7 | 0,71 |

Korrektionen for ikke adiabatisk flader i målekassens findes ved hjælp af arealet og temperaturforskellen. Væggene er 50 mm tykke undtagen langs åbningen, hvor de er skåret i smig under en vinkel på 45° ned til 10 mm tykkelse. De 40 mm i bredden det drejer sig om, regnes i stedet som 24 mm med en tykkelse på 50 mm. Kassens indvendige mål bliver da $0,384 \text{ m} \times 1,082 \text{ m} \times 1,082 \text{ m}$. Arealet splittes op i seks elementer: to sidevægge, en bund- og en topvæg samt to bagvægge, som er bagvæggen delt lodret. Hver af delarealerne har centralt på hver side monteret et termoelement, og det antages, at de målte temperaturer er repræsentative for deres respektive vægflader. Målekassens indvendige areal er efter kantkorrektionen $2,83 \text{ m}^2$, og det udvendige areal er $3,45 \text{ m}^2$. For at kompensere for de store hjørnearealer i forhold til fladerne, vælges et areal svarende til midt i målekassens vægge med en størrelse på $3,13 \text{ m}^2$. Hver del i bagvæggen er da $0,641 \text{ m}^2$, og de resterende er hver $0,463 \text{ m}^2$. Idet alle samlinger er tætte og limede, kan polystyrenens λ_{10} -værdi sættes lig $30 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$, jvf. /16/, og temperaturafhængigheden sættes lig $0,5\% \text{ K}^{-1}$.

Korrektionen for ikke adiabatisk vægge i målekassen foretages efter formelen:

$$\Delta P = \frac{\lambda_p}{d} (\Sigma T_s \cdot A_s + \Sigma T_b \cdot A_b) \quad (W)$$

hvor ΔP er korrektionen af den elektrisk afsatte effekt i målekassen. λ_p er varmeledningsevnen i polystyrenen temperaturkorrigeret. d er vægtykkelsen, 50 mm. A_s og A_b er arealet af fx en sidevæg hhv en bagvæg, 0,463 m² og 0,641 m². Da de fire delarealer, bund-, top- og de to sidevægge er lige store, og de to bagvægge også er lige store, summeres temperaturforskellene i de to grupper. Derved fås ΣT_s og ΣT_b . Resultaterne af korrektionerne er vist i tabel 5.7.

Tabel 5.7 Korrektion for ikke-adiabatiske flader i målekassen. \bar{T}_p er middeltemperaturen af væggen i målekassen.

| Måling nr. | (-) | I | II | III |
|----------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|
| P | (W) | 20,47 | 20,13 | 19,28 |
| \bar{T}_p | (°C) | 25 | 28 | 33 |
| λ_p | (mWm ⁻¹ K ⁻¹) | 32,3 | 32,7 | 33,5 |
| ΣT_s | (°C) | -1,7 | -1,1 | -0,1 |
| ΣT_b | (°C) | 0,2 | 0,5 | 1,2 |
| ΔP | (W) | -0,43 | -0,12 | 0,48 |
| $P_k = P + \Delta P$ | (W) | 20,04 | 20,01 | 19,76 |
| ΔT_l | (°C) | 24,0 | 23,2 | 22,9 |
| U_k | (Wm ⁻² K ⁻¹) | 0,70 | 0,72 | 0,72 |

Det ses, at den største korrektion er 0,48 W, hvilket er under 2 1/2%, så ved disse forsøg har det ikke været nødvendigt. En sidste korrektion er for overgangsisolanser, R_i og R_u , som ud fra forsøgene er beregnet til noget højere værdier end de sædvanlige. U-værdien efter korrektion til de normale overgangsmodstande er vist i tabel 5.8.

Tabel 5.8 U-værdien korrigeret til de sædvanlige overgangsisolanser

| Måling nr. | U_k | R_u | R_i | U |
|------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| (-) | (mWm ⁻² K ⁻¹) | (mWm ⁻² K ⁻¹) | (mWm ⁻² K ⁻¹) | (mWm ⁻² K ⁻¹) |
| 1 | 0,70 | 0,06 | 0,22 | 0,76 |
| 2 | 0,72 | 0,05 | 0,19 | 0,76 |
| 3 | 0,72 | 0,07 | 0,21 | 0,79 |

6. TEORETISKE UNDERSØGELSER

6.1 Beregning af U-værdi

Bestemmelsen af U-værdien inkluderer flere varmemstrømme. For en aerogelkonstruktion alene er det varmemstrømmen vinkelret gennem aerogelen og varmemstrømmen som følge af kantforseglingens kuldebrovirkning. For det færdige element, aerogelkonstruktionen monteret, skal der naturligvis inkluderes varmemstrømmen gennem karmen eller rammesystemet.

Varmetransport gennem evakueret aerogel. Som tidligere nævnt benyttes her termen tilsyneladende varmeledningsevne, λ_t , for aerogel. Den kan findes ved at addere varmeledningsevnen for skelettet, λ_s , og en korrigeret for stråling. I det aktuelle temperaturområde er λ_s på 4 mWm⁻¹K⁻¹ for densiteter, ρ , lig 75 og 105 kgm⁻³ og λ_s lig 13 mWm⁻¹K⁻¹ for ρ lig 270 kgm⁻³, /7/. λ_s er proportional med densiteten i en potens, β , større end 1. I /10/ er β foreslået til ca. 1,7. Ud fra de ovennævnte tal i /7/ giver β lig 1,8 det bedste kurve-fit, og følgende formel kan da opstilles:

$$(6.1) \quad \lambda_s = 4,44 \cdot 10^{-4} \cdot \rho^{1,8} + 2,57 \quad (\text{mWm}^{-1}\text{K}^{-1})$$

Varmestrømmen ved stråling findes af formelen (fra /8/):

$$(6.2) \quad q_{st} = n^2 \sigma (T_v^4 - T_k^4) / (2/\epsilon' - 1 + \tau_o/3/4) \quad (\text{Wm}^{-2})$$

n er aerogels brydningsindeks, og det er i /8/ vist, at n afhænger af densiteten:

$$(6.3) \quad n = 1 + 0,21 \cdot \rho \cdot 10^{-3} \quad (-)$$

σ er Stefan-Boltzmanns konstant. T_v og T_k er kelvintemperaturerne af den varme og den kolde begrænsningsflade. ϵ' er det effektive emissionstal, som er indført for at tage højde for den tidligere omtalte kobling mellem lednings- og strålingstransport. Udtrykket for ϵ' er også fra /8/:

$$(6.4) \quad \epsilon' = 1 - (1 - \epsilon) \exp \left(-N(2N + 0,04) \cdot \arctan \left(\tau_o \left(1 + \frac{0,02}{N} \right) \right) \right) \quad (-)$$

ϵ er begrænsningsfladernes emissionstal.

I (6.4) indgår N , som en parameter, der beskriver forholdet mellem ledning og stråling.

$$(6.5) \quad N = \frac{\lambda_s \bar{\alpha}}{4\sigma T_v^3} \quad (-)$$

$\bar{\alpha}$ er middelektstinktionskoefficienten, som omtales senere. Hvis N er større end 0,1, er det i /8/ angivet, at ϵ' kan skrives som:

$$(6.6) \quad \epsilon' = 1 - (1 - \epsilon) \exp(-\arctan(\tau_o/2)) \quad (-)$$

τ_o der indgår i (6.2), (6.4) og (6.6) er den optiske dybde, der er givet ved:

$$(6.7) \quad \tau_o = \bar{\alpha} \cdot d \quad (-)$$

d er aerogelens tykkelse. Aerogel er et ikke-gråt materiale i strålingshenseende, altså ekstinktionskoefficienten er stærkt bølgelængdeafhængigt og dermed temperaturafhængigt, jvf. figur 3.1, s. 12. I /18/ er den bølgelængdeafhængige, specifikke ekstinktionskoefficient transformeret til specifik middelextinktionskoefficient, $\bar{\alpha}$, som afhænger af en middelstrålingstemperatur, T_r .

I /4/ er følgende udtryk bestemt for $\bar{\alpha}$:

$$(6.8) \quad \bar{\alpha}(T_r) = 20 \cdot \rho \cdot \left(\frac{T_r}{319} \right)^{-2,6} \quad (m^{-1})$$

Udtrykket gælder for brydningsindeks mellem 1,020 og 1,030, dvs. densiteter i området 95-143 kgm⁻³ (jvf. 6.3).

Middelstrålingstemperaturen er givet i /18/ som:

$$(6.9) \quad T_r^{5,6} = \frac{T_v^{6,6} - T_k^{6,6}}{6,6(T_v - T_k)} \quad (K^{5,6})$$

I det byggetekniske temperaturområde vil T_r være meget tæt på middelværdien af T_v og T_k , T_m . For T_m mellem 270 K og 370 K er forskellen mellem T_r og T_m kun 0,2 - 0,3 K for $T_v - T_k$ lig 20 K. For $T_v - T_k$ lig 60 K er $T_r - T_m$ steget til 1,8 - 2,5 K i området.

Kantforseglingens kuldebrovirkning. Princippet i denne mekanisme er en varmestrøm, som foregår samtidig med varmetransporten gennem aerogelen. På den varme side af aerogelkonstruktionen overføres varmen fra luften til det varme glas. Hovedparten ledes videre gennem aerogelen, men på grund af at kantforseglingen er termisk bedre ledende end aerogelen, vil en del af varmen i det varme glas ledes ud imod randen. Her ledes den igennem kantforseglingen til det kolde glas, som derved varmes op langs randen i forhold til resten af glasset. Afgivelsen til luften sker så samtidig med, at der sker en ledning mod centrum af glasset.

For at forenkle opstilling og løsning af model for kantforseglingens kuldebrovirkning er der lagt et skilleplan ind i aerogelen, som derved deles i to lige tykke stykker. Dette plan har temperaturen T_m , som er middeltemperaturen af T_{gv} og T_{gk} . Begge glas har tykkelsen e_g og varmeledningsevnen λ_g . For det varme glas modtages varmen fra lufttemperaturen T_{lv} ved varmeoverføringskoefficienten h_i , der er lig $1/R_i$. Varmen, der ledes ud i aerogelen fra glasset, bestemmes af varmetransmissionskoefficienten h_f og modtagelsestemperaturen er T_m . h_f er lig $2/R_a$, altså det dobbelte af den reciprokke aerogelisolans. Glastemperaturen varierer i stedet x regnet fra kantforseglingen og benævnes $T_{gv}(x)$. Det antages, at den er konstant langs med kantforseglingen og i glassets tykkelse. x er lig nul i glasset over skillefladen mellem aerogel og

kantforsegling og midt på glasset er x lig $b/2$, som er den halve afstand mellem kantforseglingerne. $T_{gv}(0)$ er lig T_{kv} og $T_{gv}(b/2)$ er lig T_{gv} . Tilsvarende gælder for det kolde glas, at der fra midt i aerogelen ledes varme til glasset fra temperaturen T_m og med varmetransmissionskoefficienten h_t lig h_f lig $2/R_a$. Og fra glasset med varmeoverføringskoefficienten h_u , lig $1/R_u$, til den kolde luft med temperaturen T_{lk} . Sluttelig er $T_{gk}(0)$ lig T_{kk} og $T_{gk}(b/2)$ lig T_{gk} . Kantforseglingen leder varme fra det varme glas, som har temperaturen T_{kv} , til det kolde glas, der har temperaturen T_{kk} , og modstanden i kantforseglingen er r_k . Vinkelret herpå ledes varme fra aerogelen og gennem kantforseglingen. Sidstnævnte ses der bort fra her, således at der parallelt med kantforseglingen og ved glassenes frie ender er en adiabatisk flade. Af ovenstående ses, at den adiabatisk flade udstrækkes til også at dække glasriben over kantforseglingen. Varmestrømmen i det varme glas til kantforseglingen kaldes q_v . Den gennem kantforseglingen kaldes q_r , og varmemstrømmen fra kantforseglingen ud i det kolde glas kaldes q_k . Det antages, at h_i , h_f , h_t og h_u er konstante og ikke varierer med stedet.

I /4/ er modellen opstillet, og der er fundet en analytisk løsning. Resultatet blev for varmemstrømmen i det varme glas til kantforseglingen:

$$(6.10) \quad q_v = -b/2[(h_i + h_f)T_{kv} - h_i T_{lv} - h_f T_m] F_v \quad (Wm^{-1})$$

$$\text{hvor } F_v = \frac{\tanh(m_v \cdot b/2)}{m_v \cdot b/2} \quad (-)$$

$$\text{og } m_v^2 = \frac{h_i + h_f}{\lambda_g \cdot e_g} \quad (m^{-2})$$

For det kolde glas fandtes q_k til:

$$(6.11) \quad q_k = b/2[(h_t + h_u)T_{kk} - h_t T_m - h_u T_{lk}] F_k \quad (Wm^{-1})$$

$$\text{hvor } F_k = \frac{\tanh(m_k \cdot b/2)}{m_k \cdot b/2} \quad (-)$$

$$\text{og } m_k^2 = \frac{h_t + h_u}{\lambda_g e_g} \quad (m^{-2})$$

Varmestrømmen gennem kantforseglingen findes af:

$$(6.12) \quad q_r = \frac{T_{kv} - T_{kk}}{r_k} \quad (Wm^{-1})$$

F_v og F_k kan opfattes som finnefaktorer.

Hvis man ser på (6.10), er tælleren i F_v af formen $\tanh y$. I denne forbindelse kan tælleren sættes lig 1, da fejlen herved er mindre end 0,01%. Det ses af, at 0,01% giver $\tanh y$ lig 0,9999, og så er y lig med $m_v \cdot b/2$ lig 4,952. Det værste tilfælde her er $b/2$ lig 0,28 m (prototype II) og $\lambda_g \cdot e_g$ er 0,0032 WK⁻¹ så der fås:

$$\tanh(m_v \cdot b/2) \geq 0,9999$$

$$\Downarrow$$

$$m_v \cdot b/2 \geq 4,95$$

$$\Downarrow$$

$$m_v \geq 17,69$$

$$\Downarrow$$

$$m_v^2 \geq 312,78$$

$$\Downarrow$$

$$h_i + h_j \geq 1,00$$

Da h_i er lig $1/R_i$, og R_i typisk er $0,13 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$, er substitutionen i orden. Ligningen bliver da:

$$q_v = -b/2[(h_i + h_f)T_{kv} - h_i T_{lv} - h_f T_m]F_v$$

$$\Downarrow$$

$$q_v = -b/2[(h_i + h_f)T_{kv} - h_i T_{lv} - h_f T_m] \frac{1}{m_v \cdot b/2}$$

$$\Downarrow$$

$$(6.13) \quad q_v = -\sqrt{\frac{\lambda_g e_g}{h_i + h_f}}[(h_i + h_f)T_{kv} - h_i T_{lv} - h_f T_m] \quad (\text{Wm}^{-1})$$

Og tilsvarende for (6.11)'s vedkommende:

$$(6.14) \quad q_k = \sqrt{\frac{\lambda_g e_g}{h_t + h_u}}[(h_t + h_u)T_{kk} - h_t T_m - h_u T_{lk}] \quad (\text{Wm}^{-1})$$

De ovennævnte forudsætninger gør, at de tre varmestrømme er lige store.

$$(6.15) \quad q_v = q_r = q_k \quad (\text{Wm}^{-1})$$

Ud over varmestrømmene er T_{kv} og T_{kk} ubekendte. Hvis (6.13), (6.12) og (6.14) skrives som:

$$q_v = -AT_{kv} + B$$

$$q_r = C(T_{kv} - T_{kk})$$

$$q_k = DT_{kk} - E,$$

kan T_{kv} og T_{kk} bestemmes ved:

$$(6.16) \quad T_{kk} = \frac{\frac{B+E}{A} + \frac{E}{C}}{1 + \frac{D}{C} + \frac{D}{A}} \quad (K)$$

$$(6.17) \quad T_{kv} = \frac{(C+D)T_{kk} - E}{C} \quad (K)$$

Ud fra aerogelkonstruktionens energibalance kan dens resulterende varmetabskoefficient, U_r , findes på følgende vis, når der tages hensyn til kantforseglingens kuldebrovirkning:

$$Q_r = Q_a + Q_k$$

↓

$$U_r \cdot A_t \cdot (T_{lv} - T_{lk}) = U_o A_a (T_{lv} + T_{lk}) + P \cdot q_r$$

↓

$$(6.18) \quad U_r = U_o \frac{A_a}{A_t} + \frac{P \cdot q_r}{A_t (T_{lv} - T_{lk})} \quad (W m^{-2} K^{-1})$$

6.2 Sammenligning af målte og beregnede værdier

Tilsyneladende varmeledningsevne. For en aerogeldensitet på 100 kgm^{-3} er den tilsyneladende varmeledningsevne $8 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$, hvoraf de $4 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ er λ_s , i det aktuelle temperaturområde. Den i afsnit 6.1 omtalte model er kun gældende op til en densitet på 143 kgm^{-3} og dækker derfor ikke de i prototyperne anvendte densiteter på hhv. 200 og 150 kgm^{-3} . Dog er der formel 6.1 for λ_s , som giver $6,2 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ for ρ_a lig 150 kgm^{-3} og λ_s lig $8,7 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ for en ρ_a på 200 kgm^{-3} . Så hvis den strålingsbetingede varmeledningsevne, λ_r , forventes faldende ved øget densitet, da ser det ud til, at den tilsyneladende varmeledningsevne for aerogelen, λ_a , er ca 10 og $12 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ for ρ_a lig 150 og 200 kgm^{-3} som bestemt ved forsøgene, jvf. afsnit 5.2.

Kantforseglingens isolans. Beregningen af isolansen sker på to måder. Generelt bliver kantforseglingen betragtet som en isolans per længdeenhed, der har kontakt med begge glas. Forskellen på de to måder er, hvordan kantforseglingens isolans i praksis fremkommer. På den ene måde ses rfs-profilet som den dominerende leder, og der ses bort fra ledning i luft og evt. støttematerialer. Metallens isolans regnes fra fuge til fuge. Den anden måde medtager luftens og evt. støttematerialers isolans. Det sker ved at se modstandene for luft, træliste og rustfrit stål i kantdesign I, som parallelle modstande i serie med modstandene for fugerne. Ved kantdesign II - IV er der to parallelle modstande, som er for metallet og for luften/KERLANE. I sidstnævnte tilfælde regnes med samme λ -værdi i vakuum som udenfor. Dimensionerne er bølgebredden og afstanden mellem flangerne på profilet. Der er altså set bort fra, at metallet går på tværs et antal gange, fordi dets isolans på den led er forsvindende.

De benyttede λ -værdier for materialerne der indgår i prototypernes kantforsegling er følgende: butyl: 0,2 Wm⁻¹K⁻¹; PUR-liste: 0,2 Wm⁻¹K⁻¹; rustfrit stål: 14 Wm⁻¹K⁻¹; træ: 0,12 Wm⁻¹K⁻¹ (I); KERLANE 50-papir: 0,022 Wm⁻¹K⁻¹ (IV) og luftisolans på 0,7 m²KW⁻¹. De beregnede r_k -værdier, når der kun tages hensyn til stålprofilet, metode 1, er vist i tabel 6.1 og efter metode 2 i tabel 6.2.

Tabel 6.1 Beregnet r -værdi for kantforsegling, metode 1.

| Kantdesign nr. (-) | Fuger (mm x mm) | r_f (mKW ⁻¹) | rfs-profil e x l (mm x mm) | r_s (mKW ⁻¹) | $r_k = r_s + r_f$ (mKW ⁻¹) |
|--------------------------|--------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|---|
| I | 1 x 12 | 0,83 | 0,75x16,5 | 1,57 | 2,40 |
| II | 1 x 11 | 0,91 | 0,2x50,0 | 17,86 | 18,77 |
| II | 1 x 13 | 0,77 | 0,2x65,0 | 23,21 | 23,98 |
| IV | 1 x 18 | 0,56 | 0,2x114,0 | 40,71 | 41,27 |

Tabel 6.2 Beregnet r -værdi for kantforsegling, metode 2.

| Kantdesign nr. | Luft | | Materiale nr. 2 | | $\left(\frac{1}{r_s} + \frac{1}{r_l} + \frac{1}{r_2}\right)^{-1}$ | r_k |
|-------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|---|----------------------|
| (-) | dim. (mmxmm) | r_1 (mKW ⁻¹) | dim (mmxmm) | r_2 (mKW ⁻¹) | (mKW ⁻¹) | (mKW ⁻¹) |
| I | 7x15 | 89,29 | 6x15 | 20,83 | 1,44 | 2,27 |
| II | 13x17 | 54,49 | - | - | 13,45 | 14,36 |
| III | 14x18 | 53,57 | - | - | 16,19 | 16,96 |
| IV | 2x16 | 333,33 | 16x13 | 36,93 | 18,30 | 18,86 |

De beregnede r -værdier kan så benyttes i beregningen af prototypernes resulterende U -værdier ved hjælp af formlerne i afsnit 6.1. Der anvendes de under forsøgene gældende forhold, og r_k -værdi fra både tabel 6.1 og 6.2 samt de målte værdier. Endvidere er U -værdien fundet korrigeret til de sædvanlige ind- og udvendige overgansmodstande. Kuldebroeffekten fra hjørnefeltene skønnes her at være uden betydning. Mellemlresultaterne er vist i appendiks 1.

Tabel 6.3 Beregnet U-værdi for prototyperne ved beregnet og målt isolans for kantforsegling.

| Prototype nr. (-) | | I | II | III | IV |
|-------------------|-------------------------------------|------|-------|-------|-------|
| U_0 | (Wm ⁻² K ⁻¹) | 0,60 | 0,58 | 0,53 | 0,52 |
| Metode 1: | | | | | |
| r_k | (mKW ⁻¹) | 2,40 | 18,77 | 23,98 | 41,47 |
| U_r | (Wm ⁻² K ⁻¹) | 1,00 | 0,66 | 0,63 | 0,55 |
| U | (Wm ⁻² K ⁻¹) | 1,03 | 0,72 | 0,70 | 0,56 |
| Metode 2: | | | | | |
| r_k | (mKW ⁻¹) | 2,27 | 14,36 | 16,96 | 18,86 |
| U_r | (Wm ⁻² K ⁻¹) | 1,01 | 0,69 | 0,67 | 0,60 |
| U | (Wm ⁻² K ⁻¹) | 1,04 | 0,76 | 0,74 | 0,61 |
| Målt: | | | | | |
| r_k | (mKW ⁻¹) | 3,33 | 23,97 | 24,26 | 27,92 |
| U_r | (Wm ⁻² K ⁻¹) | 0,97 | 0,64 | 0,63 | 0,57 |
| U | (Wm ⁻² K ⁻¹) | 1,00 | 0,70 | 0,70 | 0,58 |

Ved en sammenligning af de tre U_r -værdier for hver prototype er det ikke samme billede, der går igen. For I er der ikke stor forskel på de tre værdier, men den målte værdi er lavere end begge de beregnede. Når r_k -værdien er så lav, har selv relativt store ændringer ikke den voldsomme indflydelse på U -værdien, hvilket også ses af tallene. Angående prototype II er der målt en meget højere r_k -værdi end beregnet. Årsagen hertil bør søges i, at målingen ikke har været udført særlig godt. Mere lid kan der nok fæstes til resultaterne for prototype III, da der kom et rimeligt antal målepunkter ved forsøget. Den herved fundne isolans er faktisk lig den beregnede ved metode 1, altså at stålprofilet er den dominerende varmeleder. Desuden er antagelsen om luftmodstand ækvivalent med et rektangulært tværsnit måske ikke holdbar, da en vis overgangsmodstand kan forventes for luften inde mellem bølgerne i profilet. Derved bliver modstanden for luften endnu større, og den resulterende modstand for parallelkoblingen nærmer sig værdien for metallet. I kantdesign IV er der som nævnt lagt filtmateriale ind mellem bølgerne, og under evakueringen blev det klemmt i profilet. Det vil givetvis forhindre direkte kontakt mellem enkelte bølger, men på den anden side har det givet en god termisk kontakt mellem filt og metal. Samtidig vil den klemte filt nok få en større λ -værdi end opgivet. Derved har der været en delvis termisk kortslutning i bælg tværsnittet, og det forklarer, hvorfor den eksperimentelt fundne r_k ligger midt mellem de beregnede ved metode 1 og 2.

Kantdesign IV's stærkt øgede vejlængde i forhold til III bliver ikke belønnet i form af en markant forbedret kantforseglingsisolans. Den store fordel ved IV sammenlignet med II og III

er så, at flagerne mod fugerne meget bedre holdes parallelt. Samme støttemateriale kan anvendes i II og III, men det betyder så formentlig en reduktion i kantforseglingens isolans, jvf. ovenstående.

Med udgangspunkt i den målte r_k på 28 mKW^{-1} på prototype IV så vil det give følgende kuldebrobidrag på en $1 \times 1 \text{ m}^2$ rude med 20 mm evakueret aerogel, der har densiteten 100 kgm^{-3} . U_o bliver $0,37 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. T_{lk} sættes lig 0°C og T_{lv} lig 20°C . Det giver T_{gk} lig $0,3^\circ\text{C}$ og T_{gv} på 19°C . U bliver da $0,44 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, og det er 18% højere end U_o .

Total U-værdi. Som i kapitel 5 blev der målt total U-værdi på prototype IV med karm ved tre forskellige temperaturniveauer. Kantforseglingens r_k -værdi sættes lig $28 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ som ovenfor, og resultatet af beregningerne er vist i tabel 6.4.

Tabel 6.4 Beregnet U-værdi for prototype IV, korrigeret for kuldebroeffekt. Temperaturforhold som ved total-U-værdimålinger.

| Måling nr. (-) | ΔT_1 $^\circ\text{C}$ | T_m $^\circ\text{C}$ | $R_i + R_u$ (m^2KW^{-1}) | U_o ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) | U_r $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|---|--|--|
| 1 | 24,0 | 12,7 | 0,28 | 0,50 | 0,54 |
| 2 | 23,2 | 16,7 | 0,24 | 0,51 | 0,55 |
| 3 | 22,9 | 21,4 | 0,28 | 0,50 | 0,54 |

Tværsnittet af karmen var $67 \text{ mm} \times 42 \text{ mm}$, og en λ -værdi på $0,12 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ giver en U-værdi på $1,63 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ for måling 1 og 3, og U lig $1,74 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ for måling 2. Prototypen er klodset op, så der er en luftspalte rundt langs prototypen, i snit 3 mm bred og 33 mm dyb. Spalten afgrænses af de to 17 mm tykke glaslister. Det giver en U-værdi for dette delareal på $0,55 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (1&3) og $0,56 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (2) for en isolans for luften på $1,3 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$. Den totale U-værdi bestemmes ved at arealvægte U-værdierne. De tre arealer er: $0,176 \text{ m}^2$, $0,016 \text{ m}^2$ og $1,00 \text{ m}^2$. De beregnede og målte totale U-værdier for de tre målinger er vist i tabel 6.5.

Tabel 6.5 Målte og beregnede totale U-værdier for prototype IV med trækarm.

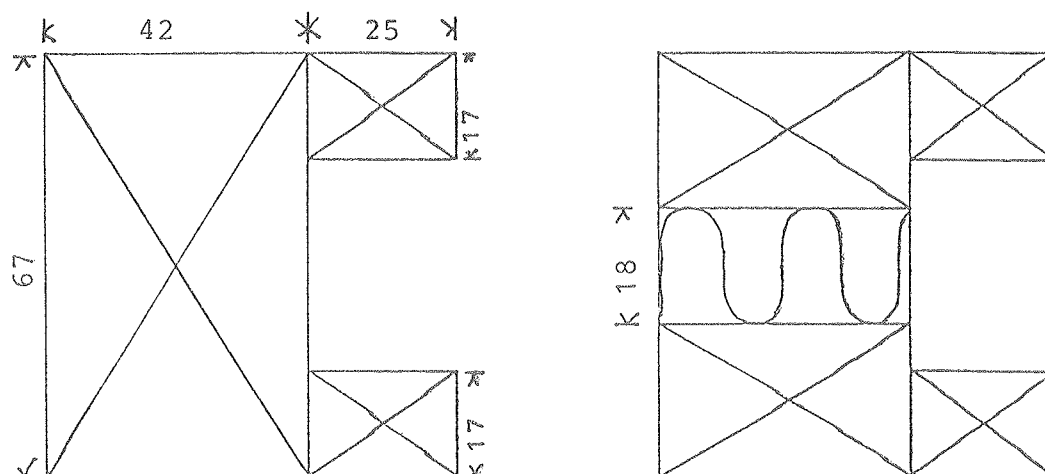
| Måling nr. | U-værdi | | | |
|---------------|---|---|--|--|
| | beregnet | | | målt |
| | center ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) | incl. kant ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) | total ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) | total ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) |
| 1 | 0,51 | 0,54 | 0,70 | 0,72 |
| 2 | 0,50 | 0,55 | 0,73 | 0,73 |
| 3 | 0,51 | 0,54 | 0,70 | 0,71 |

Det fremgår, at overensstemmelsen mellem de målte og beregnede værdier er meget fin. De forskelle, der opstræder, er ikke større, end at de kan skyldes variationer i overgangsmodstandene. Resultaterne viser altså, at det er muligt med den anvendte model at give et kvalificeret bud på kantforseglingens kuldebrovirkning. Desuden ser guarded hot-box opstillingen også ud til at fungere efter hensigten.

6.3 Forslag til ramme- og karmsystemer

Når aerogelkonstruktionen er færdig med en kantforsegling med en moderat kuldebrovirkning, må karmen eller rammesystemet, hvori ruden eller dæklaget skal monteres ikke glemmes. Hvis man ser på måling 2 i tabel 6.5, viser det sig, at kuldebrovirkningen af kantforseglingen er ca. 7% af den totale U-værdi. Karmens bidrag derimod er 25%, selv om den arealmæssigt kun udgør ca. 15%. Mere generelt kan man sige, at når der er tale om superisolerende ruder eller dæklag og tilhørende karm- og rammesystemer, er det de sidstnævnte, der pludselig er det termiske hul i klimaskærmen. Hvis man ser på vinduessiden, er det kun ruden, der har været under udvikling. Med hensyn til karmen er der benyttet plast i stedet for træ, men det lader til kun at være af vedligeholdeshensyn. I termisk henseende har karmen måske været bedre end eller på niveau med ruden, men det er ved at være slut med den nye generation af ruder. Desværre ser det ikke ud til at være nogen videre udvikling i gang på dette område.

Med udgangspunkt i karmen til prototype IV kunne der måske udvikles en bedre isolerende udgave. Der kunne fx indføres en kuldebroafbrydelse i form af PUR-skum, jvf. figur 6.1.



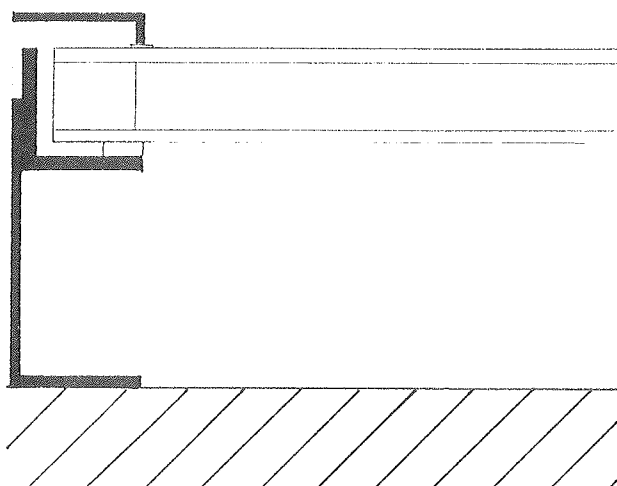
Figur 6.1 Snit i karm, prototype IV samt forbedringsforslag. Kuldebroafbrydelsen er Pur-skum. Alle målene er i mm.

Med de sædvanlig ind- og udvendige overgangsisolanser og en varmeledningsevne for træ på $0,12 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, har karmen en U-værdi på $1,98 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Prototype IV med karm har så en total U-værdi på $0,76 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, når der vægtes efter areal, jvf. afsnit 6.2. Hvis det antages, at forbedringsforslaget i figur 6.1 kan virke statisk, og λ -værdien for PUR-skummet sættes lig $25 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$, bliver U-værdien for prototype IV med karm lig $0,60 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Altså en reduktion

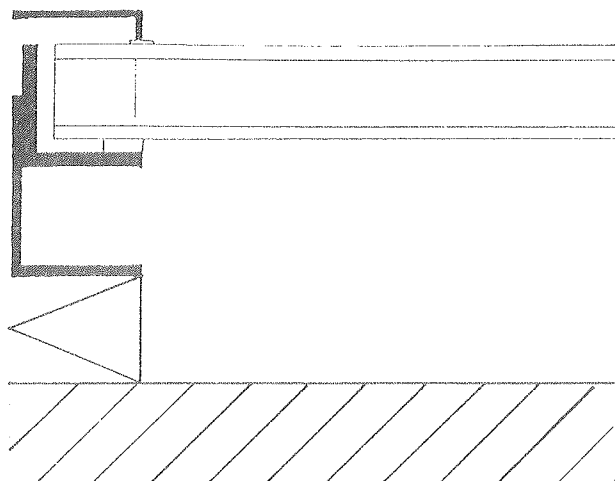
over 20%. At PUR-striben kun er 18 mm tyk, lig aerogeltykkelsen, skyldes, at så kan op-
 odsningen til aerogelruden hvile af på træet. Der bliver et problem ved montering af karmen i
 ndueshullet, idet PUR-skummet kan vise sig for svagt til at bære de sædvanlige skruer.
 esuden vil der være de tilfælde, hvor vinduet har en gående ramme, som kræver beslag mon-
 et midt i karmen. Disse problemer skal løses, før udformningen kan anvendes. Men som
 lene indikerer, er der måske en del at hente ved en beskeden raffinering af karmdelen, og det
 nok være low-tech udvikling i forhold til rudedelen. Endelig ville der være en fordel ved
 skiftning af karme, da den synlige del stadig er af træ, så der ændres ikke ved karmenes
 kitektoniske udtryk.

odsat vinduessiden er der ikke for solvægge et standard rammesystem. Det hænger
 ivfølgelig sammen med, at udbredelsen af solvægge er noget begrænset. Derved mangler
 undlaget for udvikling og industriel fremstilling af rammesystemer. I stedet er der typisk be-
 ttet profilsystemer til drivhuse og glastilbygninger, som er af aluminium og med tilhørende
 aftig kuldebrovirkning. Sammenlignet med vinduer er der den fordel ved solvægdæk-
 lag, at det
 nsparente areal ofte er en del større, hvorved rammesystemet kommer til at udgøre en relativ
 ndre del af det samlede areal.

ed udgangspunkt i et profilsystem til glastilbygning er der forsøgt givet et bud på størrelses-
 den af kuldebrobidraget for rammesystemet til solvægsdæk-
 lag. En modificeret udgave af
 ofilet er vist i figur 6.2. Det er lavet af aluminium og består af et I-profil med en udkraget del
 oppen. Heri kan dæklisten skrues fast. Dæklaget, der benyttes, er et aerogeldæk-
 lag, 1,20 m x
 40 m, med 20 mm evakueret aerogel, $\rho = 100 \text{ kgm}^{-3}$, og en kantforsegling med en r_k -værdi
 28 mKW⁻¹. Afstanden mellem mur og dæk-
 lag er 73 mm. En termisk forbedring af profil-
 stemet er vist i figur 6.3.



ur 6.2 Snit i standardprofil til to-lags ruder. Modificeret til EDB-beregning. Kun et halvt
 profil er vist.



Figur 6.3 Dæklagsprofil med brudt kuldebro. Kun et halvt profil er vist.

For at bryde kuldebroen i profilet fra mur til dæklag, er det sat op på en trælægte. Det er desuden den fordel, at hvis der er tale om opsætning af solvæg på en ældre mur, kan rammesystemet få et plant underlag ved at rette lægterne op.

Til undersøgelserne er det to-dimensionale beregningsprogram Kobru86, /22/, anvendt. Det er sket ved, at dæklaget med rammesystem er delt op i et center- og et kantareal. For centerarealet er varmemstrømmen en-dimensional og beregnes på normal vis. For kantarealet er varmemstrømmen forudsat at være to-dimensional, idet de tre-dimensionale varmemstrømme i hjørnerne negligeres, og her benyttes beregningsprogrammet. Af hensyn til dette er det nødvendigt at bestemme en ækvivalent λ -værdi for luftspalten mellem dæklag og mur. Ud fra beregning af varmetransporten ved konvektion og stråling ved en middeltemperatur på 40°C og forskellige temperaturspænd, blev en ækvivalent varmeledningsevne på ca. $40 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ bestemt. Som reference blev benyttet et tværsnit helt uden profilsystem. Den beregnede varmetransportkoefficient fra muren og ud til den omgivende luft blev for referencen, profilet i figur 6.3 og profilet i figur 6.2 (1, 2 & 3): $0,27 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, $0,61 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ og $0,86 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Centerværdien for dæklaget bliver $0,23 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Efter vægtning efter areal, hvor arealet langs kanten og centerarealet er hhv. $1,12 \text{ m}^2$ og $1,83 \text{ m}^2$, fås følgende varmetransportkoefficienter: (1) $0,24 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, (2) $0,37 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ og (3) $0,47 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Det giver en relativ forøgelse fra center- til totalværdien på: (1) 6%, (2) 63% og (3) 104%. Hvis det antages, at disse værdier kan relateres direkte til dæklagets center U-værdi giver det følgende totale U-værdier for de to profiler og dæklag: (2) $0,61 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ og (3) $0,76 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Det ser altså ud til at have en betydning, at kuldebroen brydes. Samtidig er det klart, at der bør ske en udvikling af rammesystemer, således at den termiske isolans kommer på niveau med dæklaget.

7. BEREGNET UDBYTTE

For at få en idé om, hvad anvendelsen af aerogel som transparent isolering i vinduer og solvægsdæklag vil betyde energiøkonomisk, er det ideelt at foretage målinger i fuld skala i passende tidsrum. Det er desværre uden for dette projekts budget- og tidsramme. I stedet for er der brugt et EDB-baseret beregningsprogram og udført simuleringer på årsbasis. Desuden er der sammenlignet med mere almindeligt benyttede komponenter og teknikker, således at det relative udbytte af aerogelkonstruktionerne kan bedømmes.

7.1 Forudsætninger

Beregningsprogrammet SUNCODE /21/, som kan simulere de termiske forhold i en bygning, er benyttet. Det danske referenceår, TRY, er brugt som referenceår. Tre forskellige boliger er blevet undersøgt. Den første er en ældre lejlighed i et ældre etagebyggeri med massive ydermure. De to sidste er principielt det samme parcelhus, hvor blot isoleringsgraden er forskellig. Det ene er, hvad der måske kunne være et typisk parcelhus fra begyndelsen af firserne, hvori- mod det andet er et lavenergihus med større isoleringstykkelser og lavenergiruder. En undersøgelse er foretaget af solvægge anvendt på lejligheden og lavenergihuset, og af forskellige vinduer anvendt i standard parcelhuset. Endvidere sammenlignes med en udvendig efterisolering for lejlighedens vedkommende.

Boligbeskrivelser. Lejligheden er beliggende i en vestvendt gavl med vinduer, to-lags, i nord- og sydfacaden. Den er placeret over stueetagen og under øverste etage. Etageadskillelserne er af træ, og ydermuren er 1 1/2-stens teglmur med en tykkelse på 36 mm. Brutto- og nettoetagearealet er hhv. 70 og 61 m². Beregningsmæssigt er lejligheden delt op i en nord- og sydzone, som er lige store og adskilles af en 1/2-stens teglmur. Solvæggene og efterisoleringen placeres på sydfacaden. Vinduesarealet er 11,2 m² fordelt med 6,7 m² i sydfacaden og 4,5 m² i nordfacaden og en glasprocent på 65. Der er natsænkning på varmesystemet. Det dimensionerende varmetab for lejligheden er 4048 W.

Parcelhuset er orienteret øst-vest og er i ét plan med et bruttoetageareal på 210 m² og et nettoetageareal på 167 m². I beregningerne er huset delt op i fire lige store zoner. Skillevæggene er 1/2-stens tegl. Vinduerne udgør 25,3 m², som er fordelt med 10,4 m² mod syd, 4,3 m² både mod øst og vest samt 6,3 m² mod nord. I det normale parcelhus er vinduerne med almindelige to-lags termoruder, og i lavenergihuset er det to-lags ruder med en lav-emissionsbelægning og gasfyldning. Væggene er isolerede teglhulmure, gulvet er trægulv på strøer, og loftet er isoleret mellem spærbjælkerne. I lavenergihuset er der natsænkning på varmesystemet. Det dimensionerende varmetab for det almindelige parcelhus er 6928 W og for lavenergihuset 4586 W.

I simuleringerne er flere ting fælles for de tre boliger. Fyringssæsonen går fra 15. september til 15. maj. Varmetabskoefficienten for vindueskarmene er sat til 1,6 Wm⁻²K⁻¹. Der er regnet med en horisontafskæring på 15° hele vejen rundt. Soltransmittansen for vinduerne er reduceret med 10% som kompensation for gardiner og pottedplanter. Infiltrationen er sat til 0,5 h⁻¹, dog er der

for lavenergihusets vedkommende mekanisk ventilation, som i fyringssæsonen er tilkoblet genvinding, hvorved det effektive luftskifte bliver $0,3 \text{ h}^{-1}$. Endelig er det forudsat, at overtemperaturer i lejligheden bortventileres med udeluft, hvis dennes temperatur er lavere end rumluftens. Det sker ved, at vinduerne forudsættes åbnet ved rumtemperaturer over 24°C . Luftskiftet, der opnås herved, er sat til $3,0 \text{ h}^{-1}$.

Solvægsbeskrivelser. Der sammenlignes med tre forskellige dæklagssystemer, og solvæggene er konstrueret som uventilerede solvægge. For lejlighedens vedkommende bruges ydermuren som absorber, og der sammenlignes desuden med udvendig efterisolering i form af 100 mm mineraluld. Det transparente areal for dæklagene og arealet af efterisoleringen er 7 m^2 , således at de beregnede energibesparelser kan sammenlignes direkte. I lavenergihuset er hele sydfacaden undtagen vinduerne solvæg med et transparent areal på $36,7 \text{ m}^2$. Muren i solvæggen er 15 cm beton. Uden solvægge er sydfacaden en teglhulmur med 150 mm mineraluld som de tre andre facader.

Da solvægge er meget lidt udbredt her i landet, er der skelet til udlandet med hensyn til valg af dæklagssystemer. Den første solvæg er et enkelt lag glas med selektiv absorber. Den er valgt, fordi det lader til at være en af de mest anvendte konstruktioner. Den anden solvæg har ét lag glas, 100 mm honeycombs som transparent isolering og sortmalet absorber. Det er en af de højstydende udformninger, og for ikke så længe siden er salget begyndt i Tyskland af dæklaget som en færdig konstruktion. Den sidste solvægstype har et dæklag med 20 mm evakueret aerogel (densitet lig ca. 100 kgm^{-3}) jernfrit glas og en sortmalet absorber.

Der er i simuleringerne anvendt en varmetabskoefficient, som har fået et tillæg for rammesystemets varmetab. De benyttede U-værdier og effektive transmittans-absorptans-produkter, $(\tau\alpha)_e$ for indfaldsvinkel, i , lig 0° og 60° for de tre dæklagssystemer er vist i tabel 7.1.

Tabel 7.1 Værdier for de tre dæklagssystemer.

| Dæklag | | U | $(\tau\alpha)_e$ | |
|------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------|-----------------------|
| nr. (-) | type (-) | $(\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1})$ | $i = 0^\circ$ (-) | $i = 60^\circ$ (-) |
| 1 | ét lag glas + sel. absorber | 2,8 | 0,86 | 0,76 |
| 2 | 100 mm honeycomb | 1,2 | 0,77 | 0,52 |
| 3 | 20 mm evak. aerogel | 0,6 | 0,72 | 0,58 |

Rudebeskrivelser. Der foretages en sammenligning af tre principielt forskellige ruder. Udgangspunktet er almindelige to-lags termoruder, som nok er den mest brugte type her i landet. Varmetabskoefficienten er givet et tillæg for kantforseglingens kuldebrovirkning, og U-værdien er sat til $3,3 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, ud fra tabel 3.1, for alle termoruderne. Transmittansen er sat til 76%. Den anden rudetype er en tre-lags rude med to lav-emissionsbelægninger og kryptonfyldning. En sådan rude skulle være introduceret på det tyske marked. Den er valgt, fordi det er den bedste, der kan købes i dag. Efter korrektion for kantforseglingens kuldebrovirkning er U-værdien sat

til $1,0 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Dette er et skøn, da konstruktionen ikke kendes i detaljer endnu. Transmittansen skulle være 51%, og denne værdi er benyttet. Den tredje rude består af 20 mm tykt, evakueret aerogel, og den korrigerede U-værdi er sat til $0,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Det forudsættes, at udsynskvaliteten af aerogelruderne er på højde med de to ovennævnte typer, således at de kan anvendes i hele huset. Der simuleres med to udgaver af aerogelruden, og det er dels med almindeligt jernholdigt glas og dels med såkaldt jernfrit glas. Transmittansen for de to ruder er hhv. 67,5% og 75%.

7.2 Beregningsresultater

Solvægge. Resultaterne fra simuleringerne på lejligheden er vist i tabel 7.2. Det årlige energibehov til rumopvarmning er beregnet for de fem situationer: reference, dæklag 1, 2 og 3 samt udvendig efterisolering. Desuden er der vist den årlige besparelse per m^2 solvæg/efterisolering og den relative samlede besparelse.

Tabel 7.2 Beregnet energibesparelser for lejlighed.

| | Årlig energiforbr. | Årlig besparelse | |
|----------------|--------------------|------------------------|-----|
| | (kWh) | (kWh m^{-2}) | (%) |
| Reference | 6795 | 0 | 0 |
| Dæklag 1 | 6106 | 98 | 10 |
| Dæklag 2 | 5609 | 169 | 17 |
| Dæklag 3 | 5522 | 182 | 19 |
| Efterisolering | 6095 | 100 | 10 |

Tilsvarende værdier er fundet for solvæggene på lavenergihusets sydfacade og vist i tabel 7.3.

Tabel 7.3 Beregnet energibesparelser for lavenergihus.

| | Årlig energiforbr. | Årlig besparelse | |
|-----------|--------------------|------------------------|-----|
| | (kWh) | (kWh m^{-2}) | (%) |
| Reference | 7748 | 0 | 0 |
| Dæklag 1 | 8771 | -28 | -13 |
| Dæklag 2 | 6149 | 44 | 21 |
| Dæklag 3 | 5548 | 60 | 28 |

Det fremgår af tabel 7.2 og 7.3, at solvæggen med ét lag glas og selektiv absorber giver klart laveste udbytte. I lejligheden er udbyttet af samme størrelse som den udvendige efterisolering, hvorimod der i lavenergihuset er et direkte tab. Det skyldes, at U-værdien for dæklaget er for høj, og det kan ikke opvejes her af den høje transmittans. Det kunne tyde på, at dæklaget har ringe muligheder i fremtidigt boligbyggeri. Med hensyn til anvendelse i den eksisterende, ældre

boligmasse lader det til at solvægstypen skal kunne konkurrere med den traditionelle efterisolering på anlægsprisen. Hvis der ses på honeycomb og aerogeldæklaget i lejligheden, er der ikke stor forskel på ydelsen, som er op til ca. 180 kWhm⁻². For lavenergihusets vedkommende er aerogeldæklagets ydelse ca. 1/3-del højere end for honeycomb dæklaget. Men de specifikke ydelser er kun 1/3-1/4-del af ydelserne for dæklagene i lejligheden. Årsagen til dette er at for lejlighedens vedkommende er klimaskærmens isolans ringe, og dæklagene vil derfor øge isolansen markant lokalt. Samtidig er det transparente areal beskedent i forhold til boligens effektbehov, så varmen fra solvæggene kan nyttiggøres fuldt ud i en stor del af tiden. Derved kan den højere U-værdi for dæklag 2 næsten helt kompenseres med den højere transmittans sammenlignet med aerogeldæklaget. I lavenergihuset er situationen den, at den resterende del af klimaskærmen har en meget lavere U-værdi end honeycombdæklaget. Aerogeldæklaget når en større del af vejen ind med hensyn til U-værdi, og derved øges den relative forskel på de to dæklag. Ud fra en økonomisk betragtning er de specifikke udbytter, der er vist i tabel 7.3 nok for små til at være rentable. Det beror på det store solvægsareal i forhold til husets energibehov. Så ved en reduktion af solvægsarealet øges det specifikke udbytte medens dækningsgraden mindskes. I forbindelse med honeycombdæklaget kan det bemærkes, at der ved udførte projekter flere steder i udlandet er observeret problemer med kondens i og tilsmudsning af honeycomb-materialet. Der er vist endnu ikke fundet en endelig løsning på disse forhold, som formentlig vil påvirke solvæggenes ydelse negativt.

Der er i simuleringerne ikke regnet med nogen som helst form for solafskærmning af solvæggene ud over den konstante 15°'s horisontafskæring. Resultatet er som forventet, at en del overskudsvarme skal fjernes. De varmemængder, som er forudsat bortventileret ved åbning af vinduer, er vist i tabel 7.4.

Tabel 7.4 Beregnet overskudsvarme for lejlighed og lavenergihus.

| | Lejlighed | Lavenergihus |
|----------------|------------------------|------------------------|
| | (kWhår ⁻¹) | (kWhår ⁻¹) |
| Reference | 676 | 2664 |
| Dæklag 1 | 1216 | 8952 |
| Dæklag 2 | 1853 | 13638 |
| Dæklag 3 | 1758 | 11376 |
| Efterisolering | 735 | - |

Det valgte luftskifte ved åbne vinduer på 3,0 h⁻¹ er ikke nok til at holde rumlufttemperaturen på højst 24°C i lejligheden. Til illustration af de problemer, der skabes ved de store mængder overskudsvarme, er de største og mindste rumlufttemperaturer i løbet af et døgn i hhv. sydzone i lejligheden og sydvestzonen i huset vist i tabel 7.5. Det døgn, der er valg, er den 8. juni i referenceåret, da det ligger i en både varm og solrig periode.

Tabel 7.5 Rumlufttemperaturer for lejlighed og lavenergihus den 8. juni.

| T _i (°C) | Lejlighed | | Lavenergihus | |
|------------------------|-----------|-------|--------------|-------|
| | min. | maks. | min. | maks. |
| Reference | 23,7 | 25,2 | 18,1 | 23,6 |
| Dæklag 1 | 24,0 | 25,2 | 21,5 | 29,4 |
| Dæklag 2 | 24,0 | 25,2 | 23,3 | 31,1 |
| Dæklag 3 | 24,0 | 25,2 | 22,4 | 29,6 |
| Efterisol. | 23,7 | 25,2 | - | - |

Minimumtemperaturerne forekommer ca. kl. 3-4 i lejligheden og omtrent kl. 5 i lavenergihuset. Maksimumtemperaturerne ligger ca. 1/2 døgn senere. Af tabel 7.5 fremgår det, at det er langt alvorligst med overtemperaturer i lavenergihuset, og det skyldes selvfølgelig forudsætningen om lukkede vinduer og døre i modsætning til lejligheden, den manglende solafskærmning, at forholdet mellem solvægge og boligareal er mere end dobbelt så stort i huset som i lejligheden, samt forskellen i specifikt, dimensionerende varmetab. Det er klart, at rumlufttemperaturer på 30°C er uacceptable, og det bør kunne undgås på to måder. Dels vil en detaljeret projektering af solvægudformningen øge mulighederne for en optimal konstruktion. Dels kan en effektiv solafskærmning til solvægge nedbringe overskudsvarmen. Den sidste foranstaltning har endnu ikke været genstand for den store udviklingsindsats, men der er ingen tvivl om, at der må gøres noget på et tidspunkt, da solvæggene bliver stadig mere effektive. En solafskærmning, der er i brug nu, er nærmest et motordrevet rullegardin, som er elektronisk styret. På langt sigt kunne elektro-, opto- og termokromiske teknikker tænkes anvendt, men det bliver selvfølgelig også et økonomisk spørgsmål. En sidste form for solafskærmning kunne være løvfældende træer og planter, som netop har stor skyggevirksomhed, hvor problemerne med overtemperaturer topper.

Vinduer. Resultaterne fra simuleringerne på det typiske parcelhus er vist i tabel 7.6. Som for solvæggene vedkommende er husets årlige energiforbrug samt den samlede relative besparelse vist. Endelig er besparelsen pr. m² rude angivet. Der er regnet med en glasprocent i vinduerne på 78, og da vinduesarealet er 25 m² bliver rudearealet 19,7 m². I tabel 7.6 kaldes aerogelruden med almindeligt glas aerogel 1, og tilsvarende kaldes aerogelruden med jernfrit glas aerogel 2.

Tabel 7.6 Beregnet årligt energiforbrug samt besparelser pr. m² rude og relativt for de fire rudetyper i parcelhus.

| Rudetype | Årligt forbrug (kWh) | Årlig besparelse | |
|---------------|-------------------------|-----------------------|-----|
| | | (kWhm ⁻²) | (%) |
| Alm.termorude | 16498 | 0 | 0 |
| Lavenergirude | 13615 | 146 | 17 |
| Aerogel 1 | 11883 | 234 | 28 |
| Aerogel 2 | 11693 | 244 | 29 |

Som det fremgår af tabel 7.6 er der her tale om betydelige besparelser ved udskiftning af almindelige termoruder med lavenergiruder eller aerogelruder. En forøgelse af besparelsen på over 60% vil blive opnået ved at gå fra lavenergiruder til en af de to aerogelrudetyper. At der kun er 1 procentpoint forskel i den relative besparelse mellem aerogelruder med og uden jernfrit glas, skyldes orienteringen af vinduesarealerne. Der er større vinduesareal mod nord end mod øst og vest, og det har selvfølgelig indflydelse på mængden af direkte solindfald.

Temperaturvariationen over døgnet den 8. juni repræsenteret ved minimum- og maksimumtemperaturerne for parcelhusets sydvestzone ved de fire forskellige rudetyper er vist i tabel 7.7.

Tabel 7.7 Rumlufttemperatur for sydvestzonen i parcelhus den 8. juni.

| Rudetype | T _l | |
|---------------|----------------|---------------|
| | min. (°C) | maks. (°C) |
| Alm.termorude | 24,6 | 28,1 |
| Lavenergirude | 23,4 | 25,6 |
| Aerogel 1 | 25,2 | 28,0 |
| Aerogel 2 | 25,7 | 28,6 |

Svingningerne i temperaturerne er meget lig hinanden, og minimumtemperaturerne ligger alle omkring kl. 4-5, og maksimumtemperaturerne forekommer et halvt døgn senere. Det ses af tabel 7.7, at med almindelige termoruder stiger temperaturen op over 28°C, hvis der ikke skabes yderligere ventilation ved fx åbning af vinduer, som det normal vil ske. Lavenergiruden har en maksimal værdi, der er 2,5°C lavere end i reference-situationen. Her er årsagen den lave transmittans, der altså virker som solafskærmning. For aerogelrudernes vedkommende er der kun en forøgelse i tilfældet med jernfrit glas og det kun på ca. 0,5°C. Så der bliver tilsyneladende ikke tale om nogen signifikant forværring af problemerne med overtemperaturer ved anvendelse af aerogelruder i stedet for almindelige termoruder. Den termiske komfort eller mangel på samme bliver stort set uforandret uden for fyringssæsonen. Om vinteren derimod bliver den indvendige glastemperatur forøget, og det reducerer dels det kolde nedfald ved vinduerne og dels strålingsasymmetrien. Det betyder en forøgelse af boligarealet, hvor der er tilfredstillende termisk komfort i fyringssæsonen.

7.3 Dagslysvægge

Det, der her menes med udtrykket dagslysvæg, er den del af en klimaskærm, der kun har én af vinduets to funktioner: at give udsyn og at give lys, dvs. kun den sidste funktion er opfyldt i dette tilfælde. Idéen er, at med aerogelens nuværende udsynskvalitet er anvendelsen af materialet som transparent isoleringsmateriale i ruder begrænset til såkaldte sekundære vinduer altså steder uden krav om udsyn så som entréer, badeværelser, ovenlys etc. Derfor er der så i stedet lavet en væg, der i realiteten er en stor aerogelrude, som er lavet med lettere mattede glas, der kun skal tilføre rummet bagved lys. De steder i væggen, hvor der normalt ville være vinduer, er

der ingen ændringer. Som tidligere nævnt, vil en aerogeltykkelse på 20 mm, evakueret, give en U-værdi på $0,37 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (ρ lig 100 kgm^{-3}) og en soltransmittans på ca. 75 % med jernfrit glas. Varmetabskoefficienten vil være omtrent den samme som værdien for en nyere ydermur. I modsætning hertil vil en sådan dagslysvæg give et varmetilskud i form af transmitteret solstråling. En anden del af idéen er så at placere "væggen" mod nord. Derved bliver lysintensiteten mere jævn over dagen og ikke så høj som ved andre orienteringer, da det faktisk kun er diffust solindfald fra himlen og reflekteret fra jord og omgivelser, der kommer ind. Ved en orientering mod nord er spørgsmålet, hvordan energibalancen bliver for en sådan udformning.

For at belyse dette emne er der foretaget simuleringer med SUNCODE. Udgangspunktet er det almindelige parcelhus og lavenergihuset, som også blev benyttet i beregningerne ovenfor. Den første ændring er, at ydermuren mod nord regnes praktisk taget adiabatisk. Det er sket ved at give teglhulmurens isoleringsmateriale en termisk modstand på $10.000 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$, hvilket svarer til et næsten 400 m tykt lag mineraluld. Derved fås energiforbruget ved en neutral energibalance for ydermuren uden diffust sollys. Ved simuleringen af aerogelvæg i nordfacaden er det forudsat, at det er store elementer, således at kantforseglingens kuldebroeffekt er så lille, at den resulterende U-værdi for det transparente areal er $0,45 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. På grund af de store aerogel-elementer sættes rammesystemet til kun at udgøre 5 %. Dets U-værdi er sat til $1,6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ som for de almindelige vindueskarme. Med hensyn til aerogelelementerne er der forudsat: ρ lig 100 kgm^{-3} , en tykkelse af den evakuerede aerogel på 20 mm og jernfrit glas. Det samlede areal, det drejer sig om, er $40,8 \text{ m}^2$, hvoraf den transparente andel udgør $38,8 \text{ m}^2$. Resultaterne af simuleringerne er vist i tabel 7.8.

Tabel 7.8 Beregnet energiforbrug i almindeligt parcelhus (1) og lavenergihus (2).

| Hustype | Nordfacade | Energiforbrug | Besparelse | |
|---------|------------|------------------------|--|-----|
| (-) | (-) | (kWhår ⁻¹) | (kWhm ⁻² år ⁻¹) | (%) |
| 1 | reference | 16.498 | 0 | 0 |
| | adiabatisk | 14.848 | 40 | 10 |
| | aerogelvæg | 14.155 | 57 | 14 |
| 2 | reference | 7.748 | 0 | 0 |
| | adiabatisk | 7.050 | 17 | 9 |
| | aerogelvæg | 6.984 | 19 | 10 |

Som det fremgår af tabellen, ser det ud til, at en sådan aerogelvæg i begge de her viste tilfælde vil give et positivt bidrag til rumopvarmningen på årsbasis. Om det også vil være tilfældet i praksis, er nok vanskeligt at afgøre ud fra beregningen alene, men det tyder på, at en aerogelvæg orienteret mod nord kan blive energineutral på årsbasis. Ved sammenligning af tallene på månedsbasis for den adiabatiske væg og aerogelvæggen viser det sig, at for begge huse er energiforbruget størst for aerogelvæggen i perioden fra november til og med februar. Den største afvigelse er ikke overraskende i februar, da det er en kold og solfattig måned i referenceåret. For det almindelige parcelhus er merforbruget på 684 kWh , og i lavenergihuset er tallet 712 kWh .

Disse forskelle bør kunne reduceres ved en mere detaljeret udformning af aerogelvæggen fx ved at øge aerogeltykkelsen. Eksemplet her er kun taget med for at illustrere en af de muligheder, der kan ligge i anvendelsen af aerogel som transparent isolering i det fremtidige byggeri.

7.4 Fremtidige teknikker

Den tidligere omtalte tre-lags rude med to lav-emissionsbelægninger og krypton-fyldning skulle akkurat være kommet i fri handel. Ruden er et eksempel på anvendelse af de gængse teknikker. Teoretisk set kan U-værdien blive så lav, som det måtte ønskes på denne vis. Dog kan tykkelsen af ruden blive et problem, og udsynet og soltransmittans kan blive for ringe. I stedet for ekstra lag glas med lav-emissionsbelægninger kan HEAT MIRRORS, som er plastfolier med lav-emissionsbelægninger, anvendes. Derved er vægtforøgelsen af ruden meget beskeden, men transmittansforringelsen skulle være noget større ved folierne end ved glas med belægning.

En anden måde er vakuumruder, som er to lag glas, der er forseglet rundt i kanten og evakueret i mellemrummet. For at holde de to glas fra hinanden er der med en afstand af ca. 5 cm placeret små afstandselementer. De skal være så små, at på en vis afstand af ruden, skulle de ikke genere udsynet. Idéen blev udviklet i USA, /23/, hvor der blev brugt laser til kantforseglingen og til fastgørelse af afstandselementerne. Afstandselementerne er glaskugler, som forårsager store spændinger i glassene. Det lader til, at projektet er sat i bero. Direkte inspireret af den amerikanske vakuumrude er en australsk variant under udvikling, /24/. Her benyttes "solder-glass"-teknik i stedet for laser, og afstandselementerne er piller, hvorved spændingerne i glassene skulle blive mindre kritiske. Det lader til, at styrken af kantforseglingen er så begrænset, at den tilladelige temperaturforskel over ruden udelukker brug i solvægge. Foreløbige resulater tyder på en U-værdi af størrelsesordenen $0,6 \text{ m}^2\text{K}^{-1}$ og en transmittans på omtrent 55%.

En lidt anden udvikling er ruder eller lag i ruder, som kan regulere soltransmittans og tildels den termiske isolans. De deles op i tre hovedtyper, som er elektro-, opto- og termokromiske. Forskellene består i den principielle virkemåde. De elektrokromiske reguleres af en påtrykt elektrisk spænding. Det kendes fra flydende krystal display på fx ure og lommeregnerne. De optokromiske reguleres af lysintensiteten, og det benyttes fx som glas i svejsehjelme og i brilleglas. Endelig reguleres de termokromiske af temperaturniveauet, og et eksempel herpå er at finde i /1/. Endnu er der meget udviklingsarbejde tilbage med disse teknikker, men hvis de bliver færdigudviklet og almindeligt økonomisk tilgængelige, kunne de sammen med de nye superisolerende ruder og dæklag, fx med aerogel, løse problemerne med overtemperaturer og kølebehov uden for fyrringssæsonen.

8. HOLDBARHED OG ØKONOMI

8.1 Holdbarhed

Hvis aerogelkonstruktionens delkomponenter undersøges hver for sig, er de meget bestandige under enkelte forudsætninger. Der tages i det følgende udgangspunkt i måden, som prototype IV er udformet på. Glassene er ikke forskellige fra dem der bruges i almindelige ruder med undtagelse af, at jernindholdet gerne må være meget lavt. De er meget holdbare men dog med en forholdsvis beskeden trækstyrke, som dog ikke forventes at blive noget problem her. Metalrammen med bælgtværnittet, som indgår i kantforseglingen, er lavet af rustfrit stål og samlet ved hjælp af lodning evt. svejsning. Dette skulle både være et materiale og samlemetode, der er modstandsdygtigt overfor det miljø, som aerogelkonstruktionen placeres i. Kravet til rammen er, at den er helt uden huller, da kantforseglingens begrænsede lækage forudsættes lokaliseret i fugerne alene. Støttematerialet, som indlægges i rammeprofilets bølger, er et inorganisk filt-materiale, KERLANE 50 papir. Det er beregnet til teknisk isolering og kan således tåle meget høje temperaturer. Der er ikke brugt nogen bindemidler, som kan frigives og risikere at forurene aerogelen. Der findes uden tvivl andre materialer, som kan opfylde funktionen som støttemateriale ligeså godt. Butyl er valgt som fugemateriale, da det er det mest lufttætte af fugemasserne. Desværre ser det ud til, at netop lufttætheden af fugemasser er meget lidt undersøgt. Der sker tilsyneladende ingen aldersbetinget nedbrydning af butyl, så længe temperaturen ikke kommer over 90-100°C eller det udsættes for UV-stråling. Til bagstopning i fugerne kræves kun en enkeltklæbende elastisk liste, fx af et skummateriale, der mindst kan tåle samme temperaturer som fugemassen. Tilbage er kun aerogelen. Det kan tåle temperaturer op til 750°C, tryk op til ca. 3 bar og påvirkes ikke af UV-stråling. Det er et relativt nyt materiale, som endnu ikke kendes til bunds. Fx om der sker en krybning under lang tids pres. Det er der dog ikke noget, der tyder på for tiden ifølge Würzburggruppen, men på den anden side er problemet ikke undersøgt specielt. I forbindelse med den begrænsede lækage i fugerne er det et sprøgsmålet, hvor meget vanddamp, der trænger igennem. Det kunne være, at koncentrationen bliver så stor, at der ved lave temperaturer kunne ske en kondensation med ødelæggelse af aerogelen til følge. På den anden side kan det måske tænkes, at vanddampen fordeles jævnt og bindes fysisk i aerogelstrukturen. Endelig er der porelufttrykket i aerogelen, hvor stigningen afhænger af fugeudformningen, og som for en aerogelkonstruktion på 1 m x 1 m ser ud til at kunne dimensioneres til en levetid på 30 år eller mere. Alt i alt ser det for øjeblikket ud til, at der ikke skulle være noget til hinder for, at en aerogelkonstruktion har en levetid med hensyn til transmittans og termisk egenskab på over 30 år, såfremt problemet med studsenes placering og beskyttelse løses tilfredsstillende.

8.2 Økonomi

Prisen for et færdigt vindue med aerogelrude kan kun anslås med nogen usikkerhed. Det skyldes selvfølgelig, at der ikke sker nogen industriel produktion af aerogel men kun fremstilling på forsøgsbasis. Desuden er det generelt svært at spå om økonomiske udsigter. Derfor er problemet

forsøgt angrebet på to måder. Den ene er at give et bud på, hvad en aerogelrude vil koste i forhold til lavenergiruder, som findes på markedet. Den anden måde er, hvad en aerogelrude maksimalt må koste, for at det er privatøkonomisk fornuftigt.

Indikation af fremstillingspris. I /25/ er resultater af økonomiske beregninger på produktionsprisen for aerogel angivet. De er udført på grundlag af erfaringerne med forsøgsproduktionen i Airglass AB i Sverige. Omkostningerne til råvarer, produktionspersonale og investeringer i produktionsanlæg er medregnet, hvorimod omkostninger til grund, bygninger og administration ikke er medtaget. Resultatet af beregningerne vil være en fremstillingspris for aerogel på under 165 kr/m^2 for en tykkelse på 1 cm. Heraf udgør råvarerne cirka 70%. Under forudsætning af linearitet mellem tykkelse og pris vil fremstillingsprisen her være under 330 kr/m^2 for en tykkelse på 2 cm. Prisen for glassene er den samme som for almindelige ruder, hvilket også gælder for fugerne. Tilbage i kantforseglingen er rammen af rustfrit stål og støttematerialet. Sammenlignet med en normal termorude, der har et aluminiumprofil fyldt med fugtsugende materiale, kræver aerogelrudens ramme lidt mere bearbejdning, men det er formentlig en beskeden udgift, som bliver relativt begrænset. Lavenergiruder har en gasfyldning af argon eller krypton, som den tidligere omtalte tre-lags rude. Aerogelruden kræver en evakuering, hvilket medfører udgifter til forrentning af pumpeanlæg. Kostprisen på coating af glas er uofficielt oplyst til ca. 150 kr/m^2 . Argon til gasfyldning har stor udbredelse, da den er en del billigere end krypton. Indkøbsprisen på krypton er i /2/ angivet til ca. 5.80 kr/l , så for en "4-9-4-9-4" rude koster en fyldning godt 100 kr. Ved en sammenligning mellem en aerogelrude og en tre-lags rude med to lav-emissionsbelægninger opvejer aerogeludgiften omtrent de to lav-emissionsbelægninger. Udgiften til det tredje glas samt krypton kan nok dække udgifterne til håndtering og evakuering af aerogelen samt eventuelle merudgifter på kantforseglingen. Det ser altså ud til, at prisen på en aerogelrude kan blive den samme som på den omtalte lavenergirude. I tilgift opnås en mere energiøkonomisk rude.

Privatøkonomisk pris. Nuværdimetoden, /26/, er benyttet til at undersøge, hvilken pris en aerogelkonstruktion kan bære for at investeringen skal være privatøkonomisk lønsom. Der er forudsat en levetid på 20 år. Lånerenten antages at være 15% og skattefradraget for renteudgifter er sat til 50%. Inflationen sættes til 4% og energiprisstigningen sættes til 0 og 3% større end inflationen. Der regnes med rumopvarmning ved oliefyret centralvarme med en middelvirkningsgrad på 0,85. Energiprisen er fastsat ud fra /27/ til 420 kr/MWh , hvilket giver en besparelse på $420 \text{ kr}/0,85$ lig 494 kr. per sparet MWh.

Solvægge. I tabel 7.2 er de årlige energibesparelser per m^2 ved fire forskellige tiltag vist. Det er tre dæklagssystemer, et lag glas og selektiv absorber, et lag glas med 100 mm honeycomb og sortmalet absorber samt aerogeldæklag med sortmalet absorber og sluttelig 100 mm udvendig efterisolering. Resultaterne af beregningerne er vist i tabel 8.1.

Tabel 8.1 Resultat af nu-værdiberegninger for lejlighed. Tallene er øvre grænse for investeringen.

| | Energiprisstigning pr. år | |
|--------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | 4 % (kr.m ⁻²) | 7 % (kr.m ⁻²) |
| Et lag glas og sel. abs. | 697 | 923 |
| 100 mm honeycomb | 1201 | 1591 |
| aerogeldæklag | 1294 | 1713 |
| 100 mm efterisolering | 711 | 941 |

Priserne i tabel 8.1 skal ikke kun dække dæklaget men også arbejdsløn til montering og rammesystemet. For lavenergihuset var de specifikke ydelser noget mindre på grund af det store solvægsareal. Udformningen med et lag glas og selektiv absorber gav øget energiforbrug, så den lades ude af betragtning her. Resultaterne blev som vist i tabel 8.2.

Tabel 8.2 Resultat af nu-værdiberegning for lavenergihus. Tallene er øvre grænse for investeringen.

| | Energiprisstigning pr. år | |
|------------------|------------------------------|------------------------------|
| | 4 % (kr.m ⁻²) | 7 % (kr.m ⁻²) |
| 100 mm honeycomb | 313 | 414 |
| aerogeldæklag | 427 | 565 |

Solvæggene forventes her at indgå i nybyggeri, hvilket betyder, at den isolerede hulmur skal erstattes med dæklaget og en 15 cm betonmur. Hvis prisen på den traditionelle mur sættes til 3700 krm⁻² incl. moms, må solvæggen med aerogeldæklag højst koste hhv. 4127 krm⁻² og 4265 krm⁻² for at være privatøkonomisk lønsom. Da en betonmur vil være en del billigere end en isoleret hulmur, kan aerogeldæklaget altså koste det mere end angivet i tabel 8.2.

Vinduer. Tilsvarende for vinduer med lavenergi- og aerogelruder placeret i et almindeligt parcelhus er resultaterne af nu-værdiberegning for energibesparelsen i forhold til almindelige termoruder vist i tabel 8.3, fra tabel 7.6.

Tabel 8.3 Nu-værdiberegning af energibesparelsen ved udskiftning af termoruder med lavenergi- og aerogelruder.

| Rudetype | Energiprisstigning pr. år | |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|
| | 4% (kr.m ⁻²) | 7% (kr.m ⁻²) |
| lavenergi | 1038 | 1374 |
| aerogel | 1663 | 2203 |

Tallene kan ses på to måder. Den ene er, at termoruderne udskiftes med en af de to typer for at spare energi. I det tilfælde skal der ud over ruden også betales for nye karme samt selvfølgelig montering. Den anden er, at de eksisterende termovinduer skal udskiftes på grund af konstruktionens dårlige stand, derfor skal udgifterne til arbejdet og et nyt termovindue under alle omstændigheder afholdes. Under antagelse af at karmudgiften er af samme størrelsesorden for aerogelruden som for termoruden og en pris for en almindelig termorude på ca. 500 krm⁻² incl. moms, kan en aerogelrude koste hhv. 2163 og 2703 kr. pr. m⁻², og investeringen vil være privatøkonomisk lønsom. Sluttelig kan det ses af tabel 8.3, at aerogelruden kan bære 6-800 krm⁻² mere end den tre-lags rude med to lav-emissionsbelægninger og kryptonfyldning.

KONKLUSION

Brugen af monolitisk silica aerogel som transparent isolering i ruder til vinduer og i dæklag til solvægge tegner lovende. Der ser ud til at være mulighed for at udforme en fornuftig konstruktion, således at der drages næsten fuld fordel af materialets termiske egenskaber. Samtidig er soltransmittansen høj, så den normale modsætning mellem høj transmittans og stor isolans er overvundet et godt stykke af vejen. Det, der for tiden ser ud til at være den største hindring for brugen af materialet i ruder til vinduer, er udsynskvaliteten, som forhåbentlig udvikles til et niveau, som for almindelige termoruder.

Der er fremstillet fire prototyper, hvoraf tre er 60 cm x 60 cm og den sidste 1 m x 1 m, som en slags termorude med aerogel mellem glassene, kantforseglet og evakueret. Forskellene på prototyperne er udformningen af kantforseglingen, som blev udviklet for at reducere kuldebrovirkningen. Det er lykkedes at konstruere en kantforsegling, som dels ser ud til at virke i mekanisk henseende, og dels har en kuldebrovirkning på et beskedent niveau. Endvidere ser metoderne til bedømmelse af kantforseglingens kuldebrovirkning ud til at være i orden.

Prototyperne blev undersøgt med hensyn til center U-værdi og kantforseglingen. Den store prototype blev forsynet med en trækarm og blev yderligere undersøgt med hensyn til total U-værdi. Måleresultaterne blev sammenlignet med beregnede værdier, og der var god overensstemmelse. Den totale U-værdi for prototypen inklusiv karm blev bestemt til $0,72 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, for aerogelkonstruktionen alene er U-værdien $0,55 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, og center U-værdien er på $0,51 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Aerogeldensiteten er 150 kgm^{-3} i prototypen, hvis den havde været 100 kg m^{-3} og tykkelsen 2 mm større, ville U-værdien for aerogelkonstruktionen have været $0,44 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Soltransmittansen er blevet målt til 64%, hvilket svarer til en transmittans på ca. 90% for aerogelen alene. Efterhånden som ruder til vinduer og dæklag til solvægge bliver bedre isolerende, bør U-værdien for karme og rammesystemer undersøges og evt. forbedres, så disse kommer ned på niveau med det transparente element i konstruktionen.

Der er udført simuleringer på årsbasis for aerogelkonstruktionen anvendt dels som dæklag på solvægge, og dels som ruder i vinduer. Beregningerne viser udbytte på op til ca. 180 kWhm^{-2} i uventilerede solvægge og ca. 240 kWhm^{-2} i vinduer. Ved sidstnævnte anvendelse tyder det ikke på større problemer med overtemperaturer end ved normale termoruder. Endelig er der foretaget indledende beregninger på aerogelkonstruktionen anvendt som dagslysvæg og orienteret mod nord. Det ser ud til, at en sådan væg vil være tabsfri set over fyringssæsonen.

Prisen på en aerogelkonstruktion er fundet på to måder. Den første er, at sammenligne med en kendt konstruktion, og der ser det ud til, at fremstillingsprisen for en aerogelrude vil være af samme størrelse som for en tre-lags rude med to lav-emissionsbelægninger og kryptonfyldning. Den anden er at bestemme den maksimale pris på aerogelkonstruktionen, hvor investeringen stadig er privatøkonomisk lønsom. For solvægsdæklagets vedkommende kan de koste op til ca. 2400 krm^{-2} inklusiv montering og rammesystem, og en aerogelrude kan koste op til 2700 krm^{-2} .

REFERENCER

- /1/ "T2, TRANSPARENT INSULATION". Proceedings fra den 2. internationale workshop, Freiburg, Tyskland. 1988.
- /2/ "T3, TRANSPARENT INSULATION TECHNOLOGY". Proceedings fra den 3. internationale workshop, Titisee/Freiburg, Tyskland. 1989.
- /3/ "Transparent Insulation". V. Wittwer et.al. SOLAR TODAY, januar-februar 1991.
- /4/ "Højisolerende transparent dæklag". Karsten I. Jensen. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH. Medd. nr. 204. 1989.
- /5/ "Performance prediction of solar thermal systems and the use of monolithic silica aerogel to improve collector efficiency". Atle Nordgaard, doktor ingeniøravhandling, Institutt for Varme- Ventilasjons og Sanitærteknik. Norges Tekniske Høgskole. 1991.
- /6/ "Thermal Transport in Monolithic silica aerogel". R. Caps, G. Döll, J. Fricke, U. Heinemann og J. Hetfleisch. Proceedings fra 2nd International Symposium on Aerogels (ISA2), Montpellier, Frankrig. 1989.
- /7/ "Thermal conductivity of SiO₂-aerogel tiles". D. Büttner, R. Caps, U. Heinemann, E. Hümmer, A. Kaduer, P. Scheuerpflug og J. Fricke i "Aerogels", red. J. Fricke, Springer Verlag, Heidelberg, New York. 1986.
- /8/ "Apparent thermal conductivity of evacuated SiO₂-aerogel tiles under variation of radiative boundary conditions". P. Scheuerpflug, R. Caps, D. Büttner og J. Fricke. Int. J. Heat Mass Transfer 28, pp. 2299-2306. 1985.
- /9/ "Theoretical model for coupled heat transfers through evacuated transparent silica aerogel tiles". K. Kamiuto. Proceedings fra ISES-kongres 1989, Kobe, Japan.
- /10/ "Thermal loss coefficient of low-density silica aerogel tiles". D. Büttner, R. Caps, U. Heinemann, E. Hümmer, A. Kadur og J. Fricke. Solar Energy, 40, pp. 13-15. 1988.
- /11/ "Thermal conductivity of evacuated highly transparent silica aerogel". D. Büttner og J. Fricke. Int. J. Solar Energy, 3, pp. 89-94. 1985.
- /12/ "Interlaboratory testing transparent insulation materials". Working Document. IEA task 10, subtask C. 1991.
- /13/ "Undersøgelse af solvægge ved hjælp af en indendørs forsøgsopstilling". Casper Paludan-Müller. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, Medd. nr. 179. 1987.
- /14/ "Beregning af bygningers varmetab". Dansk Standard DS418.
- /15/ Samtale med D. Büttner, Würzburg Universitet, Tyskland.
- /16/ "Oversigt over varmeisoleringsmaterialer tilsluttet varmeisoleringskontrollen". VIF og Varmeisoleringskontrollen. 1990.

- /17/ "Modulsolvægge". CowiConsult. 1991.
- /18/ "Production of silica aerogel". S. Henning og L. Svendsen. *Physica Scripta*, 23, pp. 697-702. 1981.
- /19/ "Infrared radiative heat transfer in highly transparent silica aerogel". R. Caps og J. Fricke. *Solar Energy*, 36, pp. 361-364. 1986.
- /20/ "Thermal and solar properties of windows. Expert guide". IEA Annex XII, windows and fenestration. 1987.
- /21/ "SUNCODE - PC. A program user's manual". M. J. De La Hunt. Ecotape. 1985.
- /22/ "Kobru 86, manual". Physibel Building Physics. 1990.
- /23/ "Vacuum window glazing for energy efficient buildings". D.K. Benson og C.E. Tracy. SERI/PR-2901. 1986.
- /24/ "Evacuated glazing". R.E. Collins og S.J. Robinson. *Solar Energy*, 41, pp. 27-38. 1991.
- /25/ "Aerglass-Silica aerogel. A transparent heat insulator". Sten Henning. Swedish Council for Building Research, Stockholm. D7. 1990.
- /26/ "Økonomisk vurdering af energibesparende foranstaltninger". Keld Johnsen, Michael Kvetny og Hans Skifter Andersen. SBI anvisning 132. 1982.
- /27/ "Energipriser, solenergi og graddage". VVS 8. 1991.

SYMBOLLISTE

| | | |
|-------------------|--|--|
| A | : konstant | (Wm ⁻¹ K ⁻¹) |
| A _a | : areal af aerogel | (m ²) |
| A _b | : areal af bagvæg i målekasse | (m ²) |
| A _s | : areal af sidevæg i målekasse | (m ²) |
| A _t | : totalt areal | (m ²) |
| b | : glasbredde | (m) |
| Δb _g : | : bredde af glas over kantforsegling | (m) |
| B | : konstant | (Wm ⁻¹) |
| c | : specifik varmekapacitet | (Jkg ⁻¹ K ⁻¹) |
| C | : konstant | (Wm ⁻¹ K ⁻¹) |
| d | : tykkelse | (m) |
| d _a | : aerogeltykkelse | (m) |
| D | : konstant | (Wm ⁻¹ K ⁻¹) |
| e _g | : glastykkelse | (m) |
| E | : konstant | (Wm ⁻¹) |
| E _s | : elektisk spænding | (V) |
| F _k | : finnefaktor for det kolde glas | (-) |
| F _v | : finnefaktor for det varme glas | (-) |
| h _f | : varmetransmissionskoefficient | (Wm ² K ⁻¹) |
| h _i | : varmetransmissionskoefficient | (Wm ⁻² K ⁻¹) |
| h _t | : varmetransmissionskoefficient | (Wm ⁻² K ⁻¹) |
| h _u | : varmetransmissionskoefficient | (Wm ⁻² K ⁻¹) |
| i | : indfaldsvinkel | (°) |
| I | : strømstyrke | (A) |
| k | : konstant | (lh ⁻¹ mmVS ⁻¹) |
| m _k | : lig ((h _t + h _u)/(λ _g e _g)) ^{1/2} | (m ⁻¹) |
| m _v | : lig ((h _i + h _f)/(λ _g e _g)) ^{1/2} | (m ⁻¹) |
| n | : brydningsindeks | (-) |
| N | : forhold mellem ledning og stråling | (-) |
| Δp | : trykforskel | (mmVS) |
| P | : effekt | (W) |
| P | : perimeter | (m) |
| ΔP | : effektforskel | (W) |
| P _k | : korigeret effekt | (W) |
| q | : varmestrøm pr. længdeenhed | (Wm ⁻¹) |
| q _k | : varmestrøm fra kantforsegling ud i det kolde glas | (Wm ⁻¹) |
| q _r | : varmestrøm gennem kantforsegling | (Wm ⁻¹) |
| q _s | : varmestrøm fra luft til glas over kantforsegling | (Wm ⁻¹) |
| q _{st} | : varmestrøm ved stråling | (Wm ⁻²) |
| q _v | : varmestrøm i det varme glas tilkantforsegling | (Wm ⁻¹) |
| Q _a | : varmestrøm gennem aerogel | (W) |
| Q _k | : varmestrøm gennem kantforsegling | (W) |

| | | |
|--------------|---|-----------------------|
| Q_r | : resulterende varmestrøm | (W) |
| r_1 | : isolans pr. længdeenhed for luft | (mKW-1) |
| r_2 | : isolans pr. længdeenhed for støttemateriale | (mKW-1) |
| r_f | : isolans pr. længdeenhed for fugerne | (mKW-1) |
| r_k | : kantforseglingens isolans pr. længdeenhed | (mKW-1) |
| r_s | : isolans pr. længdeenhed for rfs-profil | (mKW-1) |
| R_a | : aerogelens isolans | (m ² KW-1) |
| R_i | : indvendig overgangsisolans | (m ² KW-1) |
| R_k | : overgangsisolans på den kolde side | (m ² KW-1) |
| R_u | : udvendig overgangsisolans | (m ² KW-1) |
| R_v | : overgangsisolans på den varme side | (m ² KW-1) |
| T | : soltransmittans | (-) |
| T_o | : soltransmittans for indfaldsvinkel lig 0° | (-) |
| T_{60} | : soltransmittans for indfaldsvinkel lig 60° | (-) |
| ΔT | : temperaturforskel | (K) |
| T_1, T_2 | : grænsefladetemperaturer | (K) |
| ΣT_b | : summen af temperaturforskellene over bagvæggene i målekassen | (K) |
| T_{gk} | : temperatur af koldt glas | (K) |
| T_{gv} | : centertemperatur af varmt glas | (K) |
| $T_{gv}(x)$ | : temperatur af varmt glas til stedet x | (K) |
| T_k | : temperatur af kold grænseflade | (K) |
| T_{kk} | : temperatur af kold kant | (K) |
| T_{kv} | : temperatur af varm kant | (K) |
| T_l | : rumlufttemperatur | (K) |
| ΔT_l | : lufttemperaturforskel | (K) |
| T_{lk} | : temperatur af kold luft | (K) |
| T_{lv} | : temperatur af varm luft | (K) |
| T_m | : middeltemperatur | (K) |
| \bar{T}_p | : middeltemperatur af målekassens vægge | (K) |
| T_r | : middelstrålingstemperatur | (K) |
| ΣT_s | : summen af temperaturforskellene over sidevæggene i målekassen | (K) |
| T_v | : temperatur af varm grænseflade | (K) |
| U | : varmetabskoefficient | (Wm-2K-1) |
| U_o | : center for varmetabskoefficient | (Wm-2K-1) |
| U_k | : korregeret varmetabskoefficient | (Wm-2K-1) |
| U_r | : resulterende varmetabskoefficient | (Wm-2K-1) |
| \dot{V} | : luftflow | (lh-1mmVS-1) |
| y | : lig $m_v \cdot b/2$ | (-) |
| y_o | : tykkelse | (m) |
| $Y1$ | : konstant ved kurvefit | (K) |
| $Y2$ | : konstant ved kurvefit | (m-1) |
| \emptyset | : diameter | (mm) |

Græske symboler etc.

| | | |
|------------------|--|-------------------------------------|
| α | : ekstinktionskoefficient | (-) |
| $\bar{\alpha}$ | : middelektinktionskoefficient | (-) |
| ϵ | : emittans | (-) |
| ϵ' | : effektiv emittans | (-) |
| λ | : varmeledningsevne | (Wm ⁻¹ K ⁻¹) |
| λ_{10} | : varmeledningsevne ved middeltemperatur på 10°C | (Wm ⁻¹ K ⁻¹) |
| λ_a | : varmeledningsevne for aerogel | (Wm ⁻¹ K ⁻¹) |
| λ_g | : varmeledningsevne for glas | (Wm ⁻¹ K ⁻¹) |
| λ_p | : varmeledningsevne for polystyren | (Wm ⁻¹ K ⁻¹) |
| λ_s | : varmeledningsevne for aerogelskelettet | (Wm ⁻¹ K ⁻¹) |
| λ_t | : tilsyneladende varmeledningsevne for aerogel | (Wm ⁻¹ K ⁻¹) |
| Λ | : bølgelængde | (μ m) |
| ρ | : densitet | (kgm ⁻³) |
| ρ_a | : densitet af aerogel | (kgm ⁻³) |
| σ | : Stefan-Boltzmanns konstant | (Wm ⁻² K ⁻⁴) |
| τ_o | : optisk dybde | (-) |
| ϕ | : porøsitet | (-) |
| $(\tau\alpha)_e$ | : effektivt transmittans-absorptansprodukt | (-) |

FIGURLISTE

- 2.1 De fire hovedtyper af transparente isoleringsmaterialer.
- 3.1 Den specifikke ekstinktionskoefficient som funktion af bølgelængden for monolitisk silica aerogel opvarmet til 400°C i tre timer under vakuum.
- 3.2 Sammenligning af målte og beregnede λ -værdier for aerogel.
- 3.3 Sammenligning af beregnede og målte λ -værdier for aerogel.
- 3.4 Sammenligning af beregnede og målte λ -værdier.
- 4.1 Kantdesign I.
- 4.2 Kantdesign II.
- 4.3 Kantdesign III.
- 4.4 Kantdesign IV.
- 4.5 Tildannelse af aerogelskive med båndsav.
- 4.6 Ved hjælp af løfteværktøjet placeres den første tildannede aerogelskive i prototype IV.
- 4.7 Evakuering af prototype I.
- 4.8 Lækagesøgning på prototype IV.
- 5.1 Snit i kølekasse.
- 5.2 Prototype monteret i kølekassen.
- 5.3 Termoelementer limet på prototype IV's varme glas.
- 5.4 Fiksering af karmen i lægterammen inden udskumning af luftspalten.
- 5.5 Varmelegemet til målekassen.
- 5.6 Målekassen set forfra og monteret i den isolerede ramme.
- 5.7 Målte glastemperaturer på prototyperne.
- 6.1 Snit i karm, prototype IV samt forbedringsforslag.
- 6.2 Snit i standardprofil til to-lags ruder.
- 6.3 Dæklagsprofil med brudt kuldebro.

TABELLISTE

- 3.1 Beregnet effekt af kantforseglingen kuldebrovirkning.
- 5.1 Målte værdier af prototypernes center U-værdi.
- 5.2 Målt soltransmittans for prototype IV ved forskellige indfaldsvinkler.
- 5.3 Temperaturmålinger ved kantundersøgelse.
- 5.4 Bidrag til kuldebroeffekt på grund af uisoleret glas over kant.
- 5.5 Kantforseglingens isolans.
- 5.6 Måling med guarded hot-box på prototype IV med karm.
- 5.7 Korrektion for ikke-adiabatiske flader i målekassen.
- 5.8 U-værdi korrigeret til de sævanlige overgangsmodstande.
- 6.1 Beregnet r-værdi for kantforsegling, metode 1.
- 6.2 Beregnet r-værdi for kantforsegling, metode 2.
- 6.3 Beregnet U-værdi for prototyperne ved beregnet og målt isolans for kantforsegling.
- 6.4 Beregnet U-værdi for prototype IV, korrigeret for kuldebroeffekt.
- 6.5 Målte og beregnede totale U-værdier for prototype IV med trækarm.
- 7.1 Værdier for de tre dæklagssystemer.
- 7.2 Beregnet energibesparelser for lejlighed.
- 7.3 Beregnet energibesparelse for lavenergihus.
- 7.4 Beregnet overskudsvarme for lejlighed og lavenergihus.
- 7.5 Rumlufttemperatur for lejlighed og lavenergihus den 8. juni.
- 7.6 Beregnet årligt energiforbrug samt besparelser pr. m² rude og relativt for de fire rude-typer i parcelhus.
- 7.7 Rumlufttemperatur for sydvestzonen i parcelhus den 8. juni.
- 7.8 Beregnet energiforbrug i almindeligt parcelhus (1) og lavenergihus (2).
- 8.1 Resultat af nu-værdiberegningerne for lejlighed.
- 8.2 Resultat af nu-værdiberegningerne for lavenergihus.
- 8.3 Nu-værdiberegning af energibesparelser ved udskiftning af termoruder med lavenergi- og aerogelruder.

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 for 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.

Olsen, Lars:

Solvægge, målt og beregnet. 1985.

Paludan-Müller, Casper:

Undersøgelse af solvægge ved hjælp af indendørs forsøgsopstillinger. 1987.

Christensen, Jørgen Erik:

Edb-programmer til beregning af passiv solvarme. 1987.

Berg, Peter:

Simulering af termiske forhold i solvarmeanlæg med sæsonlagring. 1988.

Pedersen, Carsten Rode:

Combined heat and moisture transfer i building constructions. 1990.

APPENDIKS 1

Mellemresultater fra tabel 6.3

| Prototype nr. (-) | | I | II | III | IV |
|-------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| T_{lv} | (°C) | 27,5 | 23,2 | 23,5 | 22,8 |
| T_{gv} | (°C) | 25,4 | 20,8 | 21,2 | 20,9 |
| T_{gk} | (°C) | 0,0 | -0,8 | -2,2 | 1,6 |
| T_{lk} | (°C) | -1,4 | -2,6 | -4,2 | 1,1 |
| T_m | (°C) | 12,7 | 10,0 | 9,5 | 11,3 |
| $h_i = 1/R_v$ | (Wm ⁻² K ⁻¹) | 8,3 | 5,9 | 5,9 | 5,8 |
| $h_u = 1/R_u$ | (Wm ⁻² K ⁻¹) | 12,5 | 7,7 | 6,7 | 22,2 |
| $h_t = h_f$ | (Wm ⁻² K ⁻¹) | 1,3 | 1,3 | 1,2 | 1,1 |
| m_v | (m ⁻¹) | 54,77 | 47,43 | 47,10 | 46,44 |
| m_k | (m ⁻¹) | 65,67 | 53,03 | 49,69 | 85,33 |
| P | (m) | 2,32 | 2,22 | 2,30 | 3,84 |
| A_a | (m ²) | 0,336 | 0,309 | 0,332 | 0,922 |
| A_t | (m ²) | 0,360 | 0,360 | 0,360 | 1,000 |
| U_o | (Wm ⁻² K ⁻¹) | 0,60 | 0,58 | 0,53 | 0,52 |
| Metode 1 | | | | | |
| r_k | (mKW ⁻¹) | 2,40 | 18,77 | 23,98 | 41,47 |
| q_r | (mKW ⁻¹) | 1,99 | 0,69 | 0,63 | 0,37 |
| U_r | (Wm ⁻² K ⁻¹) | 1,00 | 0,66 | 0,63 | 0,55 |
| U | (Wm ² K ⁻¹) | 1,03 | 0,72 | 0,70 | 0,56 |
| Metode 2 | | | | | |
| r_k | (mKW ⁻¹) | 2,27 | 14,36 | 16,96 | 18,86 |
| q_r | (mKW ⁻¹) | 2,00 | 0,81 | 0,78 | 0,66 |
| U_r | (Wm ⁻² K ⁻¹) | 1,01 | 0,69 | 0,67 | 0,60 |
| U | (Wm ² K ⁻¹) | 1,04 | 0,76 | 0,74 | 0,61 |
| Målt r | | | | | |
| r_k | (mKW ⁻¹) | 3,33 | 23,97 | 24,26 | 27,92 |
| q_r | (mKW ⁻¹) | 1,85 | 0,59 | 0,62 | 0,51 |
| U_r | (Wm ⁻² K ⁻¹) | 0,97 | 0,64 | 0,63 | 0,57 |
| U | (Wm ² K ⁻¹) | 1,00 | 0,70 | 0,70 | 0,58 |

APPENDIKS 2

TRANSPARENT COVER BASED ON EVACUATED MONOLITHIC SILICA AEROGEL

Karsten I. Jensen

Thermal Insulation Laboratory
Technical University of Denmark
Building 118, DK-2800 Lyngby
Denmark

ABSTRACT

Monolithic silica aerogel is a highly insulating transparent material. The application of the material as transparent insulation has a large potential in the solar design. This paper describes the work carried out developing a highly insulating transparent cover for use in solar walls, windows, sunspaces etc.

KEYWORDS

Monolithic silica aerogel, transparent insulation, passive solar components, cold bridge effect.

INTRODUCTION

The monolithic silica aerogel has excellent properties concerning solar transmittance and thermal insulation. The two most serious disadvantages of the monolithic silica aerogel is that it will be damaged by liquid water, and that its ultimate tensile stress is very small.

Because of the disadvantages of monolithic silica aerogel it is necessary, when using the material, to make a unit consisting of two layers of glass with one layer of monolithic silica aerogel between them and seal the unit by an appropriate sealing of the edges. Used in a solar wall a unit of this type will improve the output considerably.

MONOLITHIC SILICA AEROGEL

The chemical composition of the material is 99.99 % SiO_2 or quartz. The material can be made with a density of 70 - 250 kg m^{-3} which corresponds to a porosity in the range from about 0.97 to 0.87. Aerogel consists of a network of silicon dioxide grains and open pores. The typical dimensions of the pores and the grains are much smaller than the wavelength of the solar radiation therefore the material is transparent though it is porous. Temperatures below 750°C are no problem and neither are pressures up to about 3 bar. But the ability to withstand tension is small

and therefore the aerogel will be damaged at contact with liquid water due to surface tensions. Humid air does not seem to have a irreversible impact on the material.

For 20 mm thick silica aerogel tile, the normal solar transmittance has been measured to 90 % with a variation of ± 2 %. The thermal conductivity depends among other things on the density, the mean temperature, the optical thickness and the emissivity of the boundary surfaces. For monolithic silica aerogel with a density of about 100 kgm^{-3} the thermal conductivity is $0.020 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ at room temperature and at atmospheric pressure. Due to the open pores the material can be evacuated. At a gas pressure below 50 - 100 mbar, thermal conduction in the gas will be eliminated and then the thermal conduction of the material is reduced to $0.008 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Similarly for densities of 150 kgm^{-3} and 200 kgm^{-3} the values are $0.010 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ and $0.012 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$. At present the complex mechanism of heat transfer in monolithic silica aerogel does not seem to be fully explained. Extensive thermal measurements have been carried out by prof. Fricke and his group at Würzburg University, FRG, see e.g. Büttner and co-workers (1988). A theoretical model is developed by Kamiuto (1989).

The production of monolithic silica aerogel is made by the Swedish company, Airglass Ltd., that holds patents on the process. For the time being the company only runs a pilot production of 60 cm x 60 cm tiles, but it is expected to be possible to make tiles with larger dimensions and a production price of about 25 US\$/m² for 2 cm thick tiles.

The view through the material is slightly hazed and slightly yellow against a bright background and slightly blue against a dark background. This will not influence the use of the material as transparent insulation e.g. in solar walls, but in windows where full view is required these disturbances will not be accepted. Airglass Ltd. is still developing the production process and expects to further improve the optical quality of the monolithic silica aerogel.

THE COVER

The cover consists of 20 mm monolithic silica aerogel placed between two 4 mm layers of low iron glass. Hereby it seems possible to have a solar transmittance of about 75 %. The aerogel is evacuated to obtain the best possible insulation capacity. For an aerogel density of 100 kgm^{-3} the center value of the heat loss coefficient (U value) for the cover is as low as $0.4 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$. As the material acts as a spacer, it gives a mechanically strong and rigid sandwich construction which reduces the mechanical demand for the sealing. This is proposed to be a combination of a stainless steel profile and a quality butyl sealant. The sealing can be worked out so that the air leakage in the butyl will be at a level which gives the cover a lifetime of at least 20 years concerning no thermal conduction of the gas in the pores. Due to the organic sealant, the maximum temperature of the cover is restricted to about 80 - 100 °C.

PROTOTYPES OF AEROGEL COVER

Several prototypes have been constructed and some tested during the last years. At first the size of the prototypes was 20 cm x 20 cm. Many different designs of the sealing of the edges were studied and the aerogel attempted evacuated, usually with limited success. Later on when the 60 cm x 60 cm tiles were available, the design of the sealing was set to be the earlier mentioned combination of a stainless steel profile and a butyl sealant. The evacuation of the aerogel was far more successful at these prototypes.

The silica aerogel tiles were almost not affected by the evacuation. The tiles withstood the pressure from the glass. A few racks occurred along and 2 - 5 cm from the edges during the evacuation and the reason is, that at the moment, the tiles are curved slightly at the edges.

The aerogel tiles had a density of about 200 kg m³ and a thickness of 17 - 20 mm after evacuation. The centre values and the thermal cold bridge effects of the edges were measured. The stainless steel profiles were optimized in order to reduce the cold bridge effect of the edges.

The latest prototype is 1m x 1m and made of 4 tiles. The aerogel density is about 150 kgm⁻³ and the thickness is 18 mm. The cover is mounted in a wooden frame. The center U value is measured and the total heat loss coefficient for the cover and the frame is measured by means of a guarded hot box technique.

THERMAL BRIDGE AT THE EDGE

The heat transfer through the cover takes place in 3 ways. First there is the one dimensional heat transfer normal to the cover. The second is two dimensional, as a fraction of the heat flows in the warm glass to the edge and through and out into the cold glass. The third is a three dimensional heat transfer and works like the two dimensional ones except that it only takes place at the four corners of the cover. In most cases the three dimensional heat transfer can be omitted.

The one dimensional heat transfer can be determined in the usual way. In order to calculate the thermal cold bridge effect of the edges an analytical model has been developed in which it has been taken into account that the glasses act as fins.

The contribution from the cold bridge effect depends on three things. The first thing is the actual design of the sealing of the edge or more precisely its thermal resistance. The second thing is the ratio of the perimeter and the area of the cover. For a given sealing the cold bridge effect decreases as the area of the cover increases. The last thing is the center heat loss coefficient. When it is lowered, the cold bridge effect gets more pronounced, relatively as well as absolutely.

The model has been compared with a numerical model and the agreement was good. Furthermore, the model has been validated by an experimental set up based on a cold box in which the air was circulated. The prototypes were mounted in the front of the box and

cooled air was blown along the inner glass. The outer glass was exposed to still indoor room air. By means of a thermo vision equipment the temperature distribution of the warm glass was investigated and based on the temperature gradient in the glass near the edge, the cold bridge effect was determined.

The experimental and theoretical investigation of the influence of the cold bridge effect on the total heat loss coefficient has shown a great reduction. For the earlier mentioned cover with 20 mm thick evacuated monolithic silica aerogel, an aerogel density of 100 kgm^{-3} and an area of $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, the result of equipping the cover with the first tested edge design is a total heat loss coefficient which is 83 % higher than the center value. For the latest tested edge design the level reached for total heat loss coefficient is only 25 % higher than the center value.

It must, however, not be forgotten that the frame in which the cover is placed, must be made with a heat loss coefficient similar to that of the cover.

CALCULATED PERFORMANCE

In Paludan-Müller and Jørgensen (1988) a comparison by means of the simulation program SUNCODE, has been made between different types of covers. They were placed on the same building and the weather data of the Danish Test Reference Year were used. Among other things the following three types of covers were studied: a) One layer of glass, b) Two layers of glass and c) Evacuated aerogel cover. The useful yearly output covers were: (cover a) 234 MJ, (cover b) 414 MJ and (cover c) 785 MJ. So it seems clearly that in this application the aerogel cover will double the output compared to the double glazing cover. The use of an aerogel cover demands an analysis of the need for preventing over-temperatures during summertime e.g. an appropriate shading device.

The utility of monolithic silica aerogel as transparent insulation in window glazings depends on the optical quality of the material. On the assumption that aerogel will be as clear as glass in the near future, and that a complete replacement of the existing glazings with evacuated monolithic silica aerogel glazings in the Danish housing stock takes place, the energy consumption for space heating in the building stock can be reduced by 18 % (Jørgensen, 1989). This is equivalent to a mean annual saving of almost 800 MJ per square meter window or 23,400 TJ total. Furthermore the temperature of the interior surface of the window increases in the heating season which improves the thermal comfort in the houses.

CONCLUSION

The first 1 m^2 prototype of a cover with evacuated monolithic silica aerogel is constructed and tested. The design of the sealing of the edge seems to have a reasonable solution in a combination of a stainless steel profile and a butyl sealant. This will give an adequate airtightness for 20 years and reduce the thermal cold bridge effect to an acceptable level. The thermal frame, in which the cover is placed, must be made without cold bridges.

The prospects of using evacuated monolithic silica aerogel as a transparent insulation material for solar walls and glazing in windows are very promising. Calculations have shown significant improvements of the thermal performance for solar walls and windows.

ACKNOWLEDGEMENT

These investigations have been made in cooperation with Airglass Ltd., Sweden, and they have been funded by the Danish Ministry of Energy.

REFERENCES

Büttner, D., Caps, R., Heinemann, U., Hümmer, E., Kadur, A. and Fricke, J. (1988). Thermal loss coefficient of low-density silica aerogel tiles. Solar energy, 41, 13-15.

Kamiuto, K. (1989). Theoretical model for coupled heat transfer through evacuated transparent silica aerogel tiles. Proc. ISES, Kobe, Japan.

Jørgensen, O. B. (1989). Silica aerogel windows in the Danish housing stock. Proceedings 3rd. workshop on Transparent Insulation Technology, Titisee/Freiburg, FRG.

Paludan-Müller, C. and Jørgensen, O. B. (1989) Solar walls with transparent insulation for the existing building stock. Proc. ISES, Kobe, Japan.

