



Aerogelruder

Jensen, Karsten Ingerslev

Publication date:
1994

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Jensen, K. I. (1994). *Aerogelruder*. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

AEROGELRUDER

Karsten Ingerslev Jensen

**Laboratoriet for Varmeisolering
Danmarks Tekniske Universitet**

**Meddelelse nr. 266
September 1994**

Medvirkende ved projektet:

Karsten I. Jensen, civilingeniør, Ph.D.

Svend Svendsen, professor, civilingeniør, Ph.D.

Jørgen M. Schultz, civilingeniør.

Jane Nielsen, civilingeniør.

Martin Dandanell, ingeniørassistent.

Bodil Fauerskov, korrespondent.

Hamid Jalali, teknisk tegner.

FORORD

Denne rapport afslutter projektet: "Aerogelruder", journalnr.: 1213/91-003, finansieret af Energiministeriets forskningsprogram EFP91.

Delresultater fra projektet er beskrevet i paperet: "Development of evacuated windows based on monolithic silica aerogel spacers". Paperet blev præsenteret på Third European Conference on Architecture, 17-21 maj 1993 i Firenze, Italien, og er medtaget i rapporten i appendiks 1.

Arbejdet er udført på Laboratoriet for Varmeisolering, DTU, i samarbejde med Airglass AB, Staffanstorps, Sverige.

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD	1
RESUMÉ	5
SUMMARY	6
1. INDLEDNING	7
2. DE UNDERSØGTE RUDER	9
2.1 Aerogelrude	9
2.2 Lavenergirude - 2-lags	11
2.3 Lavenergirude - 3-lags	11
3. EKSPERIMENTELLE UNDERSØGELSER	13
3.1 Forsøgsopstillinger	13
3.2 Målt center U-værdi	13
3.3 Målt U-værdi for vinduerne	14
3.4 Målt kuldebroeffekt af kantforseglingen	17
3.5 Målt soltransmittans	20
4. TEORETISKE UNDERSØGELSER	23
4.1 Center U-værdi	23
4.2 Total U-værdi for vinduerne	24
4.3 Kantforseglingens kuldebrovirkning	26
4.4 Total soltransmittans	27
4.5 Rudeinddata til TSBI3	29
5. AEROGELVINDUE UNDER NATURLIGE FORHOLD	31
5.1 Erfaringer	32
6. ENERGIBESPARELSESBEREGNINGER	35
6.1 Beregningsmodel	35
6.2 Beskrivelse af parcelhus	36
6.3 Beskrivelse af rækkehus	37
6.4 Beskrivelse af lejlighed	38
6.5 Parametervariationer	40
6.6 Resultater	40

INDHOLDSFORTEGNELSE (- fortsat)

KONKLUSION	45
REFERENCER	47
SYMBOLLISTE	49
FIGURLISTE	51
TABELLISTE	53
APPENDIKS 1	55
APPENDIKS 2	59
APPENDIKS 3	63

RESUMÉ

Anvendelsen af monolitisk silica aerogel som transparent isoleringsmateriale i vinduer er blevet undersøgt eksperimentelt.

Der er blevet fremstillet en prototype af en aerogelrude, der er lavet som en sandwichkonstruktion, hvor aerogelen er placeret mellem to lag glas, og enheden er forseglet langs kanten. Herefter er ruden evakueret ned til et groft vakuum. Herved er aerogelen beskyttet mekanisk, og rudens isolans er samtidigt størst mulig.

Prototypen af aerogelruden er sammen med en to-lags og en tre-lags lavenergirude blevet undersøgt eksperimentelt mht. soltransmittans og varmetab. Ydermere er det samlede varmetab for vinduer med førnævnte ruder blevet undersøgt.

Endvidere er ruderne, samt vinduerne med disse ruder, blevet undersøgt teoretisk vha. beregningsprogrammer og analytiske modeller. Resultaterne herfra er blevet sammenlignet med de eksperimentelt fundne værdier. På grundlag heraf er rudernes inddata bestemt til brug i beregninger af forskellige boligtypers energibesparelsespotentialer ved anvendelse af de undersøgte ruder.

Sluttelig har en tilsvarende aerogelprototype været monteret i et forsøgshus og således været udsat for naturlige forhold gennem flere år for at undersøge aerogelmaterialets holdbarhed.

SUMMARY

Application of monolithic silica aerogel as transparent insulation material in windows has been investigated experimentally.

A prototype of an aerogel glazing is made as a sandwich construction in which the aerogel is placed between two glass panes, and the unit is sealed at the rim. Then the glazing is evacuated down to a rough vacuum. Hereby the aerogel is protected mechanically and at the same time the isolation of the glazing is as high as possible.

The prototype of the aerogel glazing is along with a two layer and a three layer low energy glazing tested experimentally with respect to solar transmittance and heat loss. Furthermore, the overall heat loss of windows with the above mentioned glazings have been investigated.

The glazings and the windows with these glazings have been investigated theoretically by means of simulation programs and analytical models. The results from the calculations have been compared with the results from the measurements. Based on this, the input data of the glazings were determined to be used for calculation of the energy saving potential of different types of dwellings by application of the investigated glazings.

Finally, a similar aerogel prototype has been mounted in a test house and thus been exposed to real weather conditions during several years in order to investigate the durability of the aerogel material.

1. INDLEDNING

Nærværende rapport omhandler brugen af monolitisk silica aerogel som transparent isoleringsmateriale i vinduesruder.

Som bekendt er vinduesarealet den svage del af bygningers klimaskærm i termisk henseende. Der er stadig stor forskel på isoleringsevnen af vinduer og fx af ydervægge. Heraf følger et forholdsmæssigt større varmetab gennem vinduerne i forhold til resten af klimaskærmen. Dog kan der vindes noget gratis energi i form af transmitteret solstråling. Udover energibesparelsen, kan den termiske komfort øges ved et bedre isolerende vinduesareal.

Hidtil har udviklingen af bedre isolerende vinduer været baseret på tre teknikker. Det er: Flerre lag glas, gasfyldning og lavemissionsbelægninger (lav-e). På nær gasfyldning, sker forbedringen af vinduets U-værdi ikke, uden at soltransmittansen samtidigt forringes. Dette kan betyde, at den forventede energibesparelse udebliver. Desuden påvirkes dagslysforholdene sådan, at man i forbindelse med udskiftning af vinduer i eksisterende boliger kan komme til at opleve rummene mørkere end før.

En måde at overvinde det normale modsætningsforhold ved stor isolans og høj soltransmittans kan være at anvende monolitisk silica aerogel som transparent isoleringsmateriale. Monolitisk silica aerogel er et højporøst materiale, hvor den faste del praktisk taget er rent kvarts. For materialet alene er soltransmittansen omkring 90% for en tykkelse på 20 mm, og varmeledningsevnen kan være ned til $8 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ i et groft vakuum. Silica aerogel skal beskyttes både mod flydende vand og mod trækspændinger (1/, 2/).

For at opnå den største isoleringsevne og samtidig beskytte aerogelen mekanisk bliver materialet her anvendt i en termorude-lignende konstruktion, hvor hulrummet mellem glassene erstattes af monolitisk silica aerogel. En sådan laboratorieversion på en aerogelrude er opbygget. Denne og to lav-energiruder, som markedsføres, er undersøgt i indendørs opstillinger. Desuden er en tilsvarende aerogelrude monteret i et forsøgshus og derved gennem længere tid udsat for naturlige forhold. Sluttelig er der lavet beregninger på de forskellige ruder monteret i forskellige boligtyper.

Produktionen af aerogelmaterialet er endnu i udviklingsfasen. Det betyder, at det ikke er muligt at få større aerogelskiver end ca. 60 cm x 60 cm, som Airglass AB i Sverige kan producere. Udover denne begrænsede materialedimension kan man generelt sige, at den nuværende aerogelkvalitet er tilfredsstillende mht. varmeisoleringsevne, mekanisk styrke og soltransmittans. Derimod skal udsynskvaliteten formentligt op på niveau med almindeligt vinduesglas, for at aerogelvinduer kan anvendes overalt, hvor der kræves udsyn. Det kan tænkes, at den nuværende udsynskvalitet er tilstrækkelig ved sekundære anvendelser, dvs. hvor sollys men

ikke udsyn er ønsket som fx i ovenlys- og badeværelsevinduer. Det vil naturligvis være et meget begrænset område.

Årsagen til aerogelmaterialets utilstrækkelige udsynskvalitet skyldes effekten dels fra overfladerne og dels i selve materialet. Overfladerne bliver ikke helt plane, hvis der har været forstyrrelser under den første del af produktionsprocessen. I materialet forekommer der densitetsgradienter, fordi silica partiklerne enkelte steder samles i klynger. Størrelsen af disse klynger er mindre end bølgelængden i det synlige lys men afbøjer de mindste bølgelængder - den såkaldte Rayleigh spredning. Resultatet er en svag farvning af udsynet, og et mælket udseende af materialet pga. spredt lys. Det forventes, at en optimering af produktionsprocessen vil reducere og måske helt fjerne disse udsynsforstyrrelser.

2. DE UNDERSØGTE RUDER

Tre forskellige typer ruder er blevet undersøgt. Den første er en aerogelrude, som i korthed er en sandwich-konstruktion bestående af et lag monolitisk silica aerogel mellem 2 lag glas samt en forsegling rundt langs kanten. Endvidere er aerogelen evakueret ned til under 50 mbar. Den anden er en 2-lags lavenergirude med en lavemissionsbelægning og argonfyldning. Den sidste er en 3-lags rude med to lavemissionsbelægnings og kryptonfyldning. De to sidstnævnte lavenergiruder er blevet bestilt med samme glasmål som for aerogel-ruden. Herved var det muligt at bruge samme karmstørrelse for alle 3 rudetyper. Karmene, der blev benyttet, var faste og af træ.

2.1 Aerogelrude

Den monolitiske silica aerogel, som blev brugt, var af den såkaldte standardkvalitet fra Airglass AB. Densiteten er ca. 155 kgm^{-3} , og det er ved fremstillingen af denne type, at producenten bedst kan kontrollere krybning og dobbeltkrumning af de større skiver. Pga. dobbeltkrumningen, som rækker et par centimeter ind fra kanten af aerogelskiven, blev tilskæringen jævnt fordelt på de fire sider, således at de tildannede skiver blev så plane som muligt.

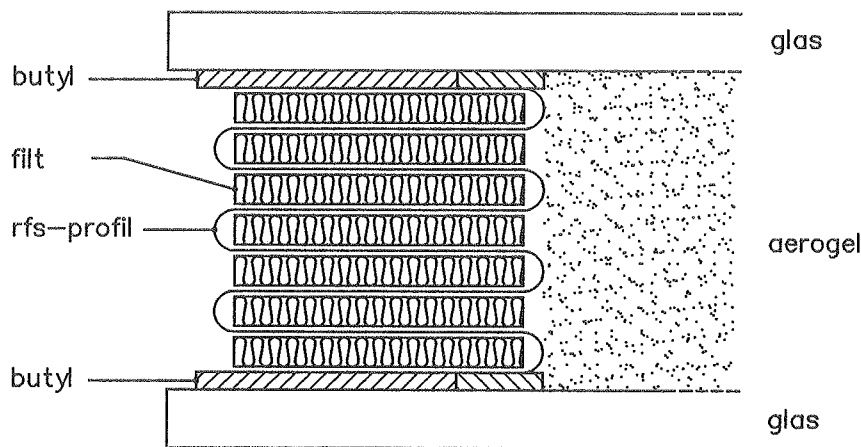
Som nævnt ovenfor er aerogelruden principielt opbygget som en sandwichkonstruktion, der består af et lag aerogel placeret mellem to lag glas. Enheden er af hensyn til isoleringsevne og holdbarhed forsejlet rundt langs kanten og evakueret. Til prototyper af aerogelruder benyttes hærdet glas, da der ved Laboratoriet er erfaring for, at almindeligt rudeglas kan revne. Det kan ske ved håndteringen af aerogelprototypen eller kort tid efter evakueringen. Det sidste er der især risiko for, når der er tale om aerogelruder større end $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$, dvs. aerogellaget består af flere skiver. Disse er som sagt ikke planparallele, og der kan være små tykkelsesforskelle skiverne imellem. Når aerogelruden evakueres kan det i nogle tilfælde tydeligt ses, at glassene bølg. Hvis der opstår brud i et stykke uhærdet glas, sker det ved en rolig revnedannelse, som stopper, når undertrykket er tabt i ruden, men ved anvendelse af hærdet glas har man ikke været ude for, at glasset gik i stykker .

Udformningen af kantforseglingen er valgt efter et tidligere benyttet princip. Kantforseglingen består af et afstandsprofil og to fuger. Som fugemateriale er brugt butyl, da det er den mest lufttætte fugemasse, og der skulle kunne dimensioneres for fornuftige fugetværsnit, som vil give aerogelruder en rimelig levetid mht. nødvendigt undertryk i aerogelmaterialet (/2/). Afstandsprofilet har et bælglignende tværsnit og er lavet af rustfrit stål, jvf. figur 2.1. Idéen er, at det er vakuumtæt, så aerogelrudens lækage er begrænset til butylfugerne. Ydermere er kantforseglingens kuldebrovirkning gjort mindre ved

- 1) at gøre vejlængden lang gennem metallet fra det varme til det kolde glas,
- 2) at bruge et metal med så lav varmeledningsevne som muligt, samt
- 3) at bruge en lille godstykkelse.

Hver bølge i bælgeprofilen er fyldt ud med et filtignende isoleringsmateriale kaldet KERLANE 50 PAPER. Disse indlæg sikrer, at bælgeprofilen ikke trykkes sammen før butylfugerne under evakueringen. Efter sammentrykningen af butylfugerne modvirker filtstrimlerne, at der opstår kontakt mellem bølgerne indbyrdes og forårsager en termisk kortslutning.

På indersiden af butylfugen er der anbragt en selvklæbende skumliste, som virker som bagstopning for fugen og derved forhindrer butylen i at blive suget ind i ruden af undertrykket.



Figur 2.1 Principskitse af kantforseglingen i aerogelrude.

Hjørnesamlingerne er lidt problematiske med det aktuelle afstandsprofil. Det ser dog ud til at kunne løses med kun en mindre kuldebro til følge. Profilenderne kan skæres i smig og stødes mod et lille stykke rustfri stålplade, hvorpå profilerne loddes fast på hver sin side. Her er hjørnesamlingerne tætte, og den ekstra kuldebro opstår kun ved det lille pladestykke i hvert hjørne. Af hensyn til studsene, som er nødvendige ved arbejdet med prototyperne, er en anden løsning valgt her. Profilerne blev skåret i smig og fikseret i den endelige position. Derefter blev hvert hjørne af profilrammen dyppet i flydende loddetin og således støbt ud. Efterfølgende blev noget af loddetinet fjernet vha. en loddekolbe, så der kun var et ca. 10 mm tykt lag loddetin tilbage.

Evakueringen af aerogelprototypen sker med en lamelvakuumpumpe gennem en studs i det rustfri stålprofil i kantforseglingen. Da der desuden er ønske om at måle trykket i aerogelruden under og efter evakueringen, er der monteret en studs til en trykføler. Tidligere har de

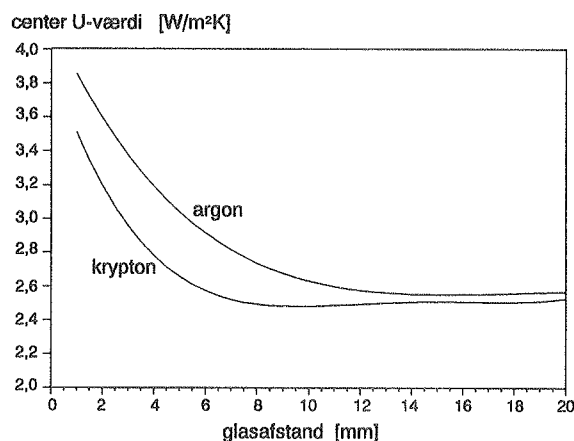
to studs været placeret omtrent midt på siden af det rustfri stålprofil. Det har været en omstændelig udførelse, som også har været mekanisk svag med stor risiko for pludselig lækage. I stedet blev der boret hul igennem loddetin-massen i to af hjørnerne, hvori studsene blev loddet fast. Der er brugt kobberør til studsene, som tidligere var 10 mm i udvendig diameter. Ved forsøg kunne det konstateres, at evakueringen af aerogelruden kun tager en smule længere tid ved at gå to størrelser ned i rørdimension til 6 mm i udvendig diameter.

2.2 Lavenergirude - 2-lags

Denne er en typisk lavenergirude (4-12-4) med en lavemissionsbelægning og argonfyldning. Kantforseglingen er en traditionel konstruktion bestående af butylklæber, aluminiumafstandsprofil med tørremiddel og polysulfidforsegling.

2.3 Lavenergirude - 3-lags

Denne rude tilhører generationen efter ovennævnte 2-lags rude. Der er tilføjet et ekstra lag glas med lav emissionsbelægning, og som gasfyldning er der brugt krypton i stedet for argon. Glasafstandene er 9 mm, og glassene er 4 mm tykke. Effekten af at benytte krypton og ikke argon er en lavere ækvivalent varmeledningsevne (λ -værdi) mellem glassene. Men som det er illustreret med beregningseksemplet i figur 2.2, har kryptonfyldningen sit optimum omkring en glasafstand på ca. 9 mm i modsætning til argonfyldningens optimum ved en glasafstand på ca. 14 mm. Beregningerne er udført med WINDOW 4.0-programmet fra LBL (/3/).



Figur 2.2 Beregnet effekt af krypton hhv. argonfyldning. WINDOW 4.0 fra LBL er benyttet.

Denne rudetype er ikke særlig udbredt i forhold til den føromtalt 2-lags lavenergirude. Det kan skyldes flere ting. For det første har der vel ikke været arbejdet så meget med at udvikle

bedre ruder end lavenergiruder. For det andet er krypton meget dyrere end argon. En liter argon koster ca. 10 øre, mens prisen på en liter krypton er oppe på omkring 16 kr., ifølge /4/. Dvs. for en 1 m², 4-12-4 rude koster det ca. 190 kr. at bruge krypton i stedet for argon, og denne meromkostning er sandsynligvis en del højere end prisen for en lavemissionsbelægning. Sluttelig drejer det sig om problemer af mere følelsesmæssig karakter. Pga. atomprøvesprængninger i det tidligere USSR, er der opstået radioaktive kryptonisotoper. Disse kan evt. være tilstede, når krypton er udvundet. Selv om størrelsen af den radioaktive stråling fra en kryptonfyldt rude skulle være mindre end den, der kommer fra det menneskelige legeme, har det betydet, at et stort tysk vinduesfirma har trukket denne rudetype tilbage fra det tyske marked.

3. EKSPRIMENTELLE UNDERSØGELSER

3.1 Forsøgsopstillinger

Center U-værdi. Til formålet blev der brugt et af Laboratoriets λ -apparater. Det er af typen "guarded hot plate - single specimen". Apparatets prøveareal er 40 cm x 40 cm, og målepladens areal er 20 cm x 20 cm. Målingerne blev udført med ruderne i lodret position.

Total U-værdi. Til bestemmelse af den resulterende U-værdi for vinduerne (rude og karm) blev der benyttet guarded hot box teknik i form af en målekasse, /1/, og Laboratoriets solvægsprøvestand, /5/. Alle de registrerede temperaturer blev målt med type T termoelementer (kobber-konstantan). Inden termoelementerne blev monteret i opstillingen, blev der foretaget sammenligninger af temperaturmåling med termoelementerne med instrument og et kalibreret termometer. Målekassens vægge deles op i seks delarealer. Centralt på hver side af et delareal er der placeret et termoelement. Under antagelse af at hvert par termoelementer repræsenterer et delfladeareal, kan U-værdi målingerne korrigeres for varmestrømme gennem målekassens væg.

Kuldebroeffekt. Princippet i denne metode går ud på at se på temperatur-fordelingen i rudens varme glas, medens der går en varmestrøm gennem ruden, jvf. /1/. Ud fra temperaturfaldet ud mod kantforseglingen findes gradienten og derved en varmestrøm mod randen, og ud fra temperaturfaldet over denne bestemmes kantforseglingens isolans. Som ved total U-værdimåling benyttes der også en solvægsprøvestand for at få et temperaturfald over prøven. Til glas-temperaturmålingen bruges der type T termoelementer lavet af tråde med en diameter på ca. 0,2 mm. Termoelementerne limes fast på glasset, og deres indbyrdes afstand er mindst nær ved randen og størst ind mod rudens centrum.

Soltransmittans. Til brug ved soltransmittansmålingerne benyttes opstillingen, som er beskrevet i /6/. Opstillingen har 2 frihedsgrader og er således velegnet til udendørs målinger. Selve instrumentet var et Kipp & Zonen CM11 pyranometer.

3.2 Målt center U-værdi

Efter samlingen af aerogelruden blev den evakueret ned til ca. 2 mbar, således at gastrykket var klart under de 50-100 mbar, der er det maksimale gastryk, hvor varmeledning i poreluften ikke optræder.

Resultatet af målingen i λ -apparatet blev en center-isolans, R_r , for selve aerogelruden på $1,91 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$, hvilket, med de sædvanlige overgangsisolanser, giver en center U-værdi på $0,48 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Efter evakueringen blev aerogel i ruden målt til en tykkelse, d_a , på $19,5 \text{ mm}$. Ud fra denne og R_r fås en ækvivalent λ -værdi, λ_a , for aerogelen på $10,2 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

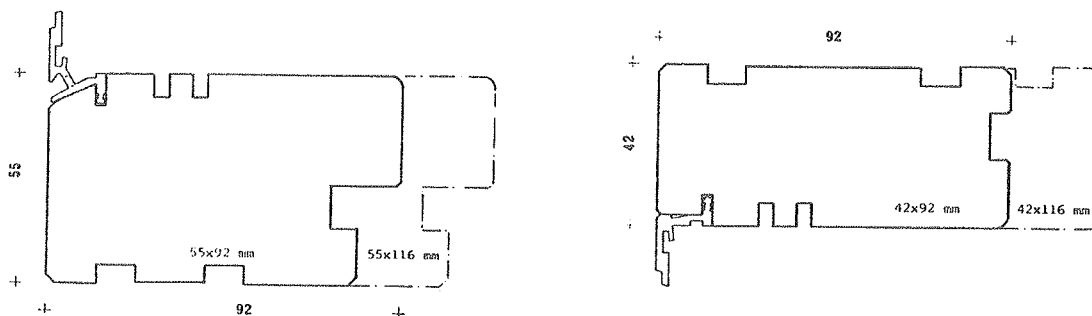
Desuden blev de 2 lavenergiruder også målt i λ -apparatet. Resultatet blev en centerisolans for 3-lags ruden på $1,03 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ og for 2-lags ruden på $0,46 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$. Med de sædvanlige overgangsisolanser svarer disse værdier til center U-værdier på $0,83 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ hhv. $1,59 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ for de to ruder, hvilket er omtrent det forventede. I tabel 3.1 er centerisolanserne og U-værdierne for de tre ruder vist.

Tabel 3.1 Målt centerisolans, R_r , og tilsvarende center U-værdi, U_c , for de tre ruder.

Rude nr. (-)	Rude Type (-)	R_r (m^2KW^{-1})	$U_c = (R_r + 0,17)^{-1}$ ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
1	Evakueret aerogel	1,91	0,48
2	3-lag m. 2 lav-e belægn. & krypton	1,03	0,83
3	2-lag m. 1 lav-e belægn. & argon	0,46	1,59

3.3 Målt U-værdi for vinduerne

Som tidligere nævnt blev der brugt en fast karm til ruderne ved målingerne af den totale U-værdi for vinduerne. Karmens udvendige mål er $1,09 \text{ m} \times 1,09 \text{ m}$. Bundkarmens tværsnit er $55 \text{ mm} \times 116 \text{ mm}$. Sidekarmene og overkarme har det samme tværsnit og er $42 \text{ mm} \times 116 \text{ mm}$. Et tværsnit af bundkarmen og af overkarmen er vist i figur 3.1.



Figur 3.1 Snit i bund- og overkarmen af karmen brugt ved måling af vinduernes U-værdi. Fra producentens salgsmateriale.

Efter at et vindue og målekassen var blevet monteret i den isolerede ramme i solvægsprøvestanden, blev tætheden af målekassen kontrolleret. Fremgangsmåden er beskrevet i /1/. Den mulige infiltrations størrelse pga. skorstenseffekt blev beregnet ud fra det værste tilfælde, hvilket er, når luft fra den kolde side kommer ind i bunden af målekassen og returnerer til den kolde side fra toppen af målekassen. Ved alle tre målinger var det muligt at opnå en tæthed af målekassen, som maksimalt ville betyde et bidrag fra infiltrationen på under 1 ‰. Der er derfor set bort fra infiltrationen ved disse målinger.

Under indsvingningen til stationære forhold var temperaturen på den varme og den kolde side termostatstyret. Effektafgivelsen i målekassen blev styret manuelt efter temperaturforskellene over målekassens flader. Når det så ud til, at der var opnået et rimeligt lavt niveau for varme-strømmen gennem målekassen, blev det kontrolleret, at temperaturforskellen over rudens centerområde var konstant. Det var typisk over 1-1 1/2 time, at denne temperaturforskel blev målt, førend effektafgivelsen i målekassen og temperaturerne blev registreret. Alt i alt tog det omkring 20 timer fra forsøget blev startet, til stationære forhold var opnået.

For at korrigere for ikke-adiabatiske flader i målekassens vægge deles disse op i seks delarealer, som hver har et termoelement centralt på den indvendige og den udvendige side. Ud fra temperaturforskellen over væggen, dennes isolans og delarealets størrelse, kan effektkorrektionen, ΔP , findes ved summation af bidragene. Mht. de nærmere detaljer om korrektionen se /1/.

Den sidste korrektion på U-værdimålingerne på de tre vinduer gælder overgangsisolanserne, idet de sædvanlige overgangsisolanser ikke blev ramt præcist under målingerne. Korrektionen skete på almindelig vis på grundlag af rudernes målte centerisolans samt de målte luft- og glastemperaturer på den kolde og varme side. Nedennævnte udtryk blev benyttet:

$$R_i = R_r \cdot \frac{T_{lv} - T_{gv}}{T_{gv} - T_{gk}} \quad \text{og} \quad R_u = R_r \cdot \frac{T_{gk} - T_{ik}}{T_{gv} - T_{gk}} \quad (\text{m}^2\text{KW}^{-1})$$

R_i er den indvendige overgangsisolans, R_r er rudens center isolans og R_u er den udvendige overgangsisolans. T_{lv} er lufttemperaturen på den varme side (i målekassen), T_{gv} er rudens overfladetemperatur på den varme side, T_{gk} er tilsvarende rudens overfladetemperatur på den kolde side og T_{ik} er lufttemperaturen på den kolde side. Resultatet af guarded hot box-målingerne er vist i tabel 3.2.

Tabel 3.2

Resultatet af guarded hot box-målingerne for de tre vinduer. P er den i målekassen afsatte effekt, ΔP er det beregnede bidrag for varmestrøm gennem målekassen. T_{lv} og T_{lk} er lufttemperaturerne på varm hhv. kold side. T_{gv} og T_{gk} er rudens overfladetemperatur på varm hhv. kold side. $R_i + R_u$ er summen af de beregnede overgangsisolanser under målingerne. Og U_v er U -værdien for hele vinduet korrigeret for ikke-adiabatiske forhold i målekassens vægge og korrigeret for overgangsisolanser forskellige fra de sædvanlige.

Vinduesnr. (-)	P (W)	ΔP (W)	T_{lv} (°C)	T_{gv} (°C)	T_{gk} (°C)	T_{lk} (°C)	$R_i + R_u$ (m ² KW ⁻¹)	U_v (Wm ⁻² K ⁻¹)
1	24,94	-0,72	23,8	22,4	2,4	1,8	0,19	0,94
2	26,40	-0,19	22,4	20,6	2,4	1,8	0,14	1,04
3	44,99	-2,66	23,7	20,0	3,1	1,9	0,13	1,55

Angående vindue nr. 1 eller nærmere aerogelruden i vinduet, kom der tæthedsproblemer inden målingen i guarded hot box-opstillingen blev sat i værk. Efter fremstillingen af ruden blev aerogelen evakueret ned til et gastryk på ca. 2 mbar. Efter center U -værdimålingen begyndte trykket pludselig at stige. Der blev foretaget omfattende undersøgelser, hvorefter det kunne konstateres, at lækagen var at finde i det rustfrie stålprofil i kantforseglingen. Ved at sprøjte vand på profilet viste det sig, at der var flere små huller i profilet. Omkring hullerne blev filtmateriallet fjernet i de udadvendte bølger i profilet, og butyl blev påført for at dække hullerne. Dette var ikke tilstrækkeligt til at opnå en rimelig tæthed, hvorefter det blev besluttet at dække hele kantforseglingen med en aluminiumtape, der klæbde på begge glassene.

Denne løsning gav en tæthed af aerogelruden, som betød, at de planlagte målinger kunne gennemføres. Men samtidig forårsagede alutapen også en termisk forringelse af kantforseglingen. Det er forklaringen på, at forskellen i U_v for vindue nr. 1 og 2 (jvf. tabel 3.2) er mindre end forventet, når U_c for de respektive ruder tages i betragtning.

Årsagen til ovennævnte huller skyldes evt., at metallet ikke var vakuumtæt fra starten. Men så ville det nok ikke have været muligt at evakuere ruden i første omgang. Desuden regnes der med inden for vakuumteknikken, at rustfrit stål er vakuumtæt ved en godstykkelse på mindst 70 μ m, og den aktuelle godstykkelse er 0,2 mm. En anden mulighed kunne være skader opstået under bukningen af profilet, men netop det anvendte værktøj blev ordnet inden bukningen og skulle således være i orden. Den sidste og sandsynligste forklaring er, at revnerne er opstået, fordi båndstålet er blevet bukket parallelt med valseretningen og ikke vinkelret på. Når ruden evakueres, trykkes bælgeprofilet lidt sammen. Denne belastning forårsager

muligvis revnedannelse i profilet efter nogen tid. Problemet skal løses ved at benytte båndstål eller rustfri stålplader store nok til, at bukningen kan foretages vinkelret på valseretningen.

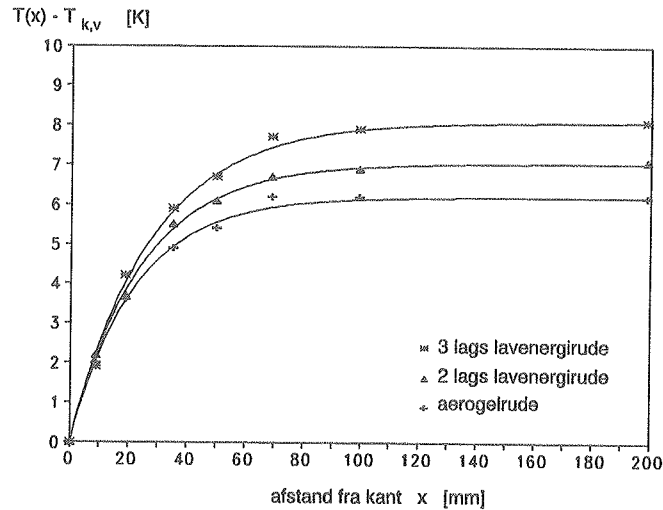
3.4 Målt kuldebroeffekt af kantforseglingen

De temperaturer, som blev målt var følgende: Lufttemperatur på varm og kold side, T_{lv} og T_{lk} . Centerglastemperatur på varm og kold side, T_{gv} og T_{gk} . Glastemperaturen, hvor kantforsegling og aerogel/hulrum mødes på varm og kold side, T_{kv} og T_{kk} . På det varme glas blev der desuden målt glastemperaturer syv steder mellem kanten og midten af ruden. Disse temperaturer betegnes $T(x)$, idet x er afstanden fra kantforseglingen. Placeringen af de syv målepunkter er følgende omtrentlige afstande fra kantforseglingen: 10 mm, 20 mm, 35 mm, 50 mm, 70, 100 mm og 200 mm. Temperaturmålingerne ved kantundersøgelsen samt de beregnede overgangsisolanser er vist i tabel 3.3. Overgangsisolanser er beregnet på samme vis som i afsnit 3.3.

Tabel 3.3 Temperaturmålingerne ved kantundersøgelserne samt beregnede overgangsisolanser.

Vindue (-)	T_{lk} (°C)	T_{gk} (°C)	T_{kk} (°C)	T_{kv} (°C)	T_{gv} (°C)	T_{lv} (°C)	R_i (m ² kW ⁻¹)	R_u (m ² kW ⁻¹)
1	1,6	2,4	5,5	16,6	22,8	22,9	0,01	0,07
2	1,7	2,4	6,2	11,1	19,2	20,0	0,05	0,04
3	1,9	2,4	6,8	10,5	17,6	19,9	0,06	0,04

De målte glastemperaturer ved undersøgelsen af temperaturfordelingen i det varme glas for de tre ruder er vist i figur 3.2 med de tilhørende kurvefit. Udfra en analytisk model for kantforseglingens kuldebrovirkning, /1/, forventes kurvefittet for $T(x)$ at være af formen $T(x) - T_{kv} = Y1 (1 - \exp(-Y2 \cdot x))$, hvor $Y1$ og $Y2$ er konstanter.



Figur 3.2 Målte temperaturer og tilhørende kurvefit fra undersøgelsen af kantforseglingens kuldebrovirkning for de 3 ruder.

For at bestemme varmestrømmen i det varme glas ud til kantforseglingen, q_v , benyttes temperaturgradienten i glasset ved kantforseglingen - stedet $x = 0$. Altså:

$$T(x) - T_{k,v} = Y1 (1 - \exp(-Y2 \cdot x)) \quad (K)$$

Den først afledte mht. x er:

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

Varmestrømmen i det varme glas ud til kanten bliver:

$$q_v = \lambda_g \cdot e_g \frac{dT(x)}{dx} \Big|_{x=0} \quad (W \cdot m^{-1})$$

hvor λ_g er λ -værdien for glas, som sættes lig $0,8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, og e_g er glastykkelsen, som her er lig 4 mm . Der fås:

$$q_v = -\lambda_g \cdot e_g \cdot Y1 \cdot Y2 \exp(-Y2 \cdot 0)$$

$$q_v = \lambda_g \cdot e_g \cdot Y1 \cdot Y2 \quad (\text{Wm}^{-1})$$

Y1 og Y2 samt q_v for de samme tre ruder er vist i tabel 3.4

Tabel 3.4 Y1 og Y2 fra kurvefit af kantmålingerne samt den beregnede q_v for de tre ruder.

Rudenr. (-)	Y1 (K)	Y2 (m ⁻¹)	q_v (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
1	6,2	45,0	0,89
2	8,1	36,2	0,94
3	7,1	41,1	0,93

Vha. q_v kan rudens totale U-værdi beregnes med følgende udtryk (jf /1/):

$$U_{rt} = U_r \cdot \frac{A_t}{A_r} + \frac{P \cdot q_v}{A_r \cdot (T_{lv} - T_{lk})} \quad (\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1})$$

hvor U_{rt} er rudens totale U-værdi, U_r er rudens center U-værdi, A_t er rudens transparente areal (her lig 0,957 m²), A_r er rudens totale areal (her lig 0,981 m²) og P er perimeteren (her lig 3,914 m). I U_{rt} og U_r indgår de fra målingerne beregnede overgangsisolanser, og rudens totale U-værdi korrigeret til de sædvanlige overgangsisolanser kaldes U_{ro} . Resultatet af beregninger er vist i tabel 3.5.

Tabel 3.5 Rudernes totale U-værdi bestemt ud fra kantmålingerne.

Rudenr.	U_r (Wm ⁻² K ⁻¹)	q_v (Wm ⁻¹)	$T_{lv} - T_{lk}$ (K)	U_{rt} (Wm ⁻² K ⁻¹)	U_{ro} (Wm ⁻² K ⁻¹)
1	0,50	0,89	21,3	0,66	0,62
2	0,89	0,94	18,3	1,08	0,99
3	1,79	0,93	18,0	1,95	1,72

Endelig kan kantforseglingens isolans pr. længdeenhed, r_k , findes ud fra temperaturfaldet over kantforseglingen samt q_v , idet sidstnævnte antages at være lig varmestrømmen gennem kantforseglingen, q_k . Disse værdier for de 3 ruder er vist i tabel 3.6.

Tabel 3.6 Målt lineær isolans af kantforseglingerne, r_k , i de tre ruder.

Rudenr. (-)	T_{kk} (°C)	T_{kv} (°C)	q_v (Wm ⁻¹)	r_k (mKW ⁻¹)
1	5,5	16,6	0,89	12,43
2	6,2	11,1	0,94	5,23
3	6,2	10,5	0,93	3,97

3.5 Målt soltransmittans

Der er foretaget målinger ved indfaldsvinklerne 0 og 60°. Målinger blev udført på dage med relativ lav diffus irradians og midt på dagen, således at opstillingen skulle korrigeres færrest mulige gange. For at undgå reflekteret stråling fra jordoverfladen op på bagsiden af prøven var der spændt sort filt ud under rammesystemet, hvor prøverne blev anbragt, og hvor solarimetret var placeret. Hulrummet mellem prøven og filten var godt ventileret, så solarimetret havde en temperatur nær luftens. Endelig blev solarimetrets hvide skærm afmonteret også for at undgå refleksion op på bagsiden af prøven.

Fremgangsmåden ved målingerne på et prøveemne og ved en indfaldsvinkel var i korthed følgende: Stativet blev indstillet i forhold til solen i den ønskede indfaldsvinkel. Når signalet fra solarimetret havde været konstant i ca. 2 minutter, blev prøveemnet lagt på. Efter 2 minutters konstant udslag, blev prøveemnet taget af. Typisk blev der målt 3 gange med prøveemnet på og 4 gange uden. Forholdet mellem de midlede målinger med og uden prøveemne er da soltransmittansen. Til bestemmelse af den diffuse andel blev der målt med og uden en cirkulær skive, som blev placeret, så den netop skyggede for solarimetrets målefelt. Til registrering af udslaget fra solarimetret blev en skriver benyttet.

Målingerne blev udført over to dage. Den ene dag blev der målt på den 3-lags og den 2-lags lavenergirude samt glassene til aerogelruden. Senere da denne var fremstillet, blev den målt mht. soltransmittans. Den første dag var det totale solindfald, I_t , ca. 950 Wm² med en diffus andel, I_{diff}/I_t , på 10,6%. Under målingerne på aerogelruden var I_t omkring 790 W/m², og I_{diff}/I_t var 9,7%.

Under forudsætning af, at den diffuse stråling er isotropisk, vil en rudes transmittans for diffus stråling være den samme som rudens transmittans for direkte stråling ved en indfaldsvinkel på 60°, T_{60} . Soltransmittansen for direkte stråling og en indfaldsvinkel på 0°, T_0 , kan derfor bestemmes af:

$$T = T_o \cdot (1 - I_{\text{diff}}/I_t) + T_{60} \cdot I_{\text{diff}}/I_t$$

$$T_o = \frac{T - T_{60} \cdot I_{\text{diff}}/I_t}{1 - I_{\text{diff}}/I_t} \quad (-)$$

De to lag glas, som blev brugt til aerogelruden blev målt til præcist det samme, og derfor er der kun vist resultaterne fra det ene glas i nedenstående tabel 3.7.

Tabel 3.7. Soltransmittansmålinger for de tre ruder samt det ene glas til aerogelruden.

Rudernr. (-)	Rudetype (-)	Diffus andel (%)	T (-)	T ₆₀ (-)	T _o (-)
-	1 lag 4 mm glas	10,6	0,859	0,767	0,870
1	Aerogelrude	9,7	0,663	0,589	0,663
2	3-lags lavenergirude	10,6	0,366	0,263	0,378
3	2-lags lavenergirude	10,6	0,522	0,398	0,537

4. TEORETISKE UNDERSØGELSER

I forbindelse med de teoretiske undersøgelser af de tre forskellige ruder er der benyttet følgende simuleringsprogrammer. Det første er det to-dimensionale beregningsprogram KOBUR 86, version 6.0, /7/. Endvidere er det canadiske program FRAME anvendt, version 3.0, /8/, som er udviklet til at beregne de termiske forhold ved ramme-/karmsystemer samt randzonen af ruder. Endelig er WINDOW 4.0, /3/, anvendt. Programmet er først og fremmest beregnet til analyse af de termiske og optiske forhold ved ruders centerområde dvs. uforstyrret af kantforseglingens kuldebrovirkning.

4.1 Center U-værdi

Aerogelrude. Idet den benyttede aerogelkvalitet har en densitet på ca. 150 kgm^{-3} forventes en ækvivalent varmeledningsevne, λ_a , på ca. $10 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$, /1/, ved et porelufttryk i aerogelen på under 50-100 mbar og i det byggetekniske temperaturområde. Ved måling blev aerogelrudens centerisolans bestemt til $1,91 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$, og aerogelens tykkelse blev efter evakuering målt til 19,5 mm (jvf. afsnit 3.2). Det giver en λ_a for aerogelen på $10,2 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$, og der er således overensstemmelse mellem den forventede og den ved måling bestemte værdi.

3-lags lavenergirude. Som tidligere nævnt er ruden kryptonfyldt og med 2 lavemissionsbelægninger. Glassene er 4 mm tykke, og glasafstandene er 9 mm. Den forventede center U-værdi er $0,7\text{-}0,8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, medens den målte center U-værdi er $0,83 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, jvf. tabel 3.1. Den målte værdi er altså lidt over den forventede.

2-lags lavenergirude. Ruden er af typen 4-12-4 med argonfyldning og en lavemissionsbelægning. Afhængig af fabrikat er den forventede center U-værdi i området $1,5\text{-}1,6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Som det ses af tabel 3.1, er center U-værdien bestemt ved forsøg til $1,59 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, altså i den øvre del af det forventede område.

Årsagen, til at begge de to lavenergiruder har tendens til, at de målte center U-værdier er lidt højere end forventet, kan være flere forhold. Det kan være, at de målte værdier er inden for produktionstolerancerne. En anden mulighed er måleopstillingen. Det benyttede λ -apparat har, som tidligere nævnt, et prøvelfelt på 40 cm x 40 cm og et målefelt på 20 cm x 20 cm. Idet ruderne er ca. 1 m x 1 m, kan det være, at konvektionsforholdene i ruderne er anderledes end ved større prøve- og målefelte, og der derved måles let forhøjede center U-værdier. Sluttelig kunne det tænkes, at kølepladedelen og varmepladedelen var spændt for hårdt ind mod ruden, hvorved glasafstandene blev mindre mellem køle- og målepladen med en forringet isolans til følge.

Det vurderes dog, at overensstemmelsen mellem de to lavenergiruders målte og forventede center U-værdier er tilfredsstillende. Derfor vil de målte center U-værdier for alle tre ruder blive benyttet i det følgende.

4.2 Total U-værdi for vinduerne

Beregningen af vinduernes totale U-værdi er sket ved en opdeling af vinduet i tre delarealer, hvortil U-værdien beregnes. Ved arealvægtning af U-værdierne bestemmes U-værdien for vinduet. De tre delarealer for vinduet, centerarealet af ruden, rudens kantzone og karmarealet. Angående rudens kantzone er den defineret som gående 2 1/2 tomme (svarende til 63,5 mm) ind fra kantforseglingen ifølge ASHRAE-konventionen, /9/. Både FRAME og WINDOW 4.0 benytter denne definition. Den stive definition er ikke korrekt ved målingerne på de aktuelle vinduer, da alle tre kantforseglingers kuldebrovirkning strækker sig længere ind end de 63,5 mm, jvf. figur 3.2. Det skønnes dog, at denne fejlkilde er begrænset.

Som nævnt ovenfor, benyttes de målte center U-værdier for de tre ruder. Som omtalt tidligere, blev der benyttet ens faste trækarme i de tre vinduer. Tværsnittet af karmene er vist i figur 3.1, og de modificerede tværsnit, som de er benyttet i FRAME, er vist i appendiks 2. Ved beregninger med FRAME fås resultatet som en U-værdi for rudens kantzone hhv. karmareal. Med hensyn til sidstnævnte, som det ses på figur 3.1, er der forskel på bundkarmens tværsnit og tværsnittet af de øvrige karmsider. Derfor er karmarealet egentligt delt i to - et for bundkarmen og et for resten af karmen.

Aerogelvinduet. Det gav problemer at få lavet en ordentlig model af kantforseglingen i aerogelvinduet i FRAME. Derfor blev selve kantforseglingen beregnet i KOBRU 86, og heraf blev der fundet en ækvivalent isolans. I FRAME-beregningerne blev kantforseglingen erstattet med et homogent materiale med den fundne isolans.

Resultatet af FRAME-beregningerne blev følgende U-værdier. For kantzonen; U_{kz} lig 1,15 $Wm^{-2}K^{-1}$, for bundkarmen; U_{bk} lig 1,49 $Wm^{-2}K^{-1}$ og for side- og topkarmene, U_{sk} lig 1,59 $Wm^{-2}K^{-1}$. Center U-værdimålingen gav en U_c -værdi på 0,48 $Wm^{-2}K^{-1}$.

3-lags lavenergivindue. Rudens kantzone blev i FRAME-modellen opbygget med tre stk 4 mm glas, hvor de to glashulrum blev erstattet af to homogene materialelag, hver 9 mm tykke. Det hele med en samlet isolans lig centerisolansen bestemt ved måling.

Ved FRAME-beregning fandtes følgende U-værdier: Rudens kantzone; U_{kz} lig 1,96 $Wm^{-2}K^{-1}$, bundkarmen, U_{bk} lig 1,79 $Wm^{-2}K^{-1}$, side- og topkarmene, U_{sk} lig 1,96 $Wm^{-2}K^{-1}$. Fra tidligere haves en center U-værdi på 0,83 $Wm^{-2}K^{-1}$.

2-lags lavenergirude. Resultatet af beregningerne blev en U_{kz} på $2,56 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, U_{bk} på $1,94 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ og U_{sk} på $2,16 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Den målte center U -værdi for ruden, U_c , er $1,59 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Vinduets totale U -værdi, U_v , blev fundet ved arealvægtning af U -værdierne efter:

$$U_v = \frac{U_c \cdot A_c + U_{kz} \cdot A_{kz} + U_{sk} \cdot A_{sk} + U_{bk} \cdot A_{bk}}{A_v} \quad (\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1})$$

Idet kantforseglingen i aerogelruden og den 3-lags lavenergirude gik 2 mm længere ind i ruden end kantforseglingen i den 2-lags lavenergirude, bliver der lidt forskellige delarealer for sidstnævnte vindue i forhold til de to andre. For alle tre vinduer er deres totale areal, A_v , lig $1,09 \text{ m} \times 1,09 \text{ m} = 1,188 \text{ m}^2$. Angående bundkarmens areal regnes det som værende produktet af karmhøjden og vinduets bredde. Delarealerne for vinduerne er vist i tabel 4.1.

Tabel 4.1 Delarealerne for vinduerne. Vindue nr. 1 og 2 er aerogelvinduet og det 3-lags lavenergivindue. Vindue nr. 3 er med den 2-lags lavenergirude.

Vindue nr. (-)	A_{bk} (m^2)	A_{sk} (m^2)	A_{kz} (m^2)	A_c (m^2)
1 & 2	0,078	0,177	0,228	0,705
3	0,076	0,172	0,229	0,711

De beregnede og målte U_v -værdier er vist i tabel 4.2.

Tabel 4.2 Beregnede og målte totale U -værdier for de tre vinduer.

Vindue nr. (-)	Type (-)	U_c ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	U_{kz} ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	U_{sk} ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	U_{bk} ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	U_v (bereg.) ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	U_v (målt) ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
1	Aerogel	0,48	1,15	1,59	1,49	0,84	0,94
2	3-lags, 2 lav-e og krypton	0,83	1,96	1,96	1,79	1,28	1,04
3	2-lags, 1 lav-e og argon	1,59	2,56	2,16	1,94	1,88	1,55

Når de målte og beregnede værdier for U_v betragtes, ses en vis forskel. Hvis der ses på aerogelvinduet, er den målte U_v -værdi højere end den beregnede. Hovedårsagen hertil er nok, at i prototypen er hjørnesamlingerne af bælgprofilet i kantforseglingen sket ved hjælp af udstøbning med loddetin, jvf. afsnit 2.1. Der er altså fire kuldebroer, som ikke kan simuleres med FRAME. Men trods alt ligger den beregnede og den målte tættest på hinanden her for aerogelvinduet i forhold til de andre vinduer.

Omkring de to lavenergiruder er de beregnede U_v -værdier her højere end de målte. Her er den sandsynligste forklaring knyttet til center U -værdien. Som omtalt i afsnit 4.1, er de målte U_c -værdier nok lidt for høje på grund af måleudstyret. Idet rudernes centerareal, A_c , udgør omtrent 60% af vinduesarealet, vil en formindskelse af U_c naturligvis gøre U_v mindre. Et andet forhold, som kan have betydning, er variationen af overgangsisolansen over vinduet på den varme side. Ved forsøgene blev overgangsisolanserne på den varme side bestemt ud fra rudernes centerisolans, temperaturfaldet over ruden samt forskellen mellem lufttemperaturen og rudens overfladetemperatur. Disse temperaturer blev målt ud for rudens center og midt i måleboksen. Denne træder netop an på kanten af karmen, og derfor kunne det tænkes, at konvektionen især hæmmes ved den nederste og den øverste del af vinduet. Derved vil overgangsisolansen være større i disse området af vinduet end midt på ruden. Specielt for vinduet med den 2-lags lavenergirude, som har den laveste centerisolans af de tre, vil en ændring af den resulterende overgangsisolans, på den varme side, have stor betydning for vinduets totale U -værdi.

4.3 Kantforseglingens kuldebrovirkning

Ud fra værdierne i foregående afsnit (tabellerne 4.1 og 4.2) kan den totale varmetabskoefficient for ruderne, U_{ro} , beregnes ved arealvægtningen:

$$U_{ro} = \frac{U_c \cdot A_c + U_{kz} \cdot A_{kz}}{A_r} \quad (\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1})$$

hvor A_r er summen af A_c og A_{kz} - rudearealet.

Rudens totale U -værdi er interessant, fordi den dels, sammenholdt med center U -værdien, viser effekten af kantforseglingens kuldebrovirkning, og dels fordi den kan benyttes i simuleringsprogrammet TSBI3, som anvendes i kapitel 6 "ENERGIBESPARELSESBEGREBNINGER". I TSBI3 angives vinduers U -værdi i form af en U -værdi for karmen og en U -værdi for ruden.

De beregnede værdier af U_{ro} er vist i tabel 4.3 sammen med de eksperimentelt bestemte værdier (fra tabel 3.5).

Tabel 4.3 Beregnede og målte totale U-værdier for de 3 ruder.

Rude nr. (-)	Rudetype (-)	U_c ($Wm^{-2}K^{-1}$)	U_{kz} ($Wm^{-2}K^{-1}$)	U_{ro} (beregnet) ($Wm^{-2}K^{-1}$)	U_{ro} (målt) ($Wm^{-2}K^{-1}$)
1	Aerogel	0,48	1,15	0,65	0,62
2	3-lags, 2 lav-e og krypton	0,83	1,96	1,11	0,99
3	2-lags, 1 lav-e og argon	1,59	2,56	1,84	1,72

Som det ses, er der en rimelig overensstemmelse mellem de målte og beregnede værdier for rudernes totale U-værdi. I forbindelse med de eksperimentelle undersøgelser af kantforseglingernes kuldebrovirkning blev der lavet en måling på aerogelruden uden alufolie uden om kantforseglingen. På et stykke på ca. 30 cm blev alufolien taget af, og termoelementerne blev monteret midt ud for. Resultatet af målingen blev en U_{ro} på $0,57 Wm^{-2}K^{-1}$, svarende til en lineær modstand, r_k , for kantforseglingen på $24,11 mKW^{-1}$. Det tyder på en kuldebrovirkning af alufolien svarende til en U-værdiforøgelse på $0,05 Wm^{-2}K^{-1}$ for aerogelruden.

Ud fra resultaterne i tabel 4.3 er det valgt at benytte følgende totale U-værdier i TSBI3-beregningerne:

Aerogelrude:	$U_{ro} = 0,6 Wm^{-2}K^{-1}$
3-lags lavenergirude:	$U_{ro} = 1,0 Wm^{-2}K^{-1}$
2-lags lavenergirude:	$U_{ro} = 1,7 Wm^{-2}K^{-1}$.

4.4 Total soltransmittans

Til brug for TSBI3-beregninger er der i det følgende foretaget en vurdering af, hvad den totale solenergitransmittans er for de tre ruder.

Som omtalt i afsnit 3.5 blev soltransmittansen (ved en indfaldsvinkel på 0°), T_o , for et lag, 4 mm, glas målt til 0,87. Reflektansen kan findes ved:

$$r_o = (n - 1)^2 / (n + 1)^2 \quad (-)$$

hvor n er brydningsindekset for glas lig 1,53, r_o er da 0,043. Transmittansen mht. refleksion, T_r , findes ved

$$T_r = \frac{1 - r_o}{1 + r_o} \quad (-)$$

hvilket giver T_r lig 0,92. Transmittansen mht. absorption, T_a , svarer til forholdet mellem T_o og T_r , som her bliver 0,95. Ud fra T_a og glastykkelsen kan glassets ekstinktionskoefficient, a , findes til 12,8 m^{-1} .

For aerogelruden blev T_o målt til 0,66. Med en aktuel aerogeldensitet på 150 kgm^{-3} er aerogelens brydningsindeks lig 1,03. Da brydningsindekset praktisk talt er 1, kan aerogelrudens T_r beregnes, som for en 2-lagsrude. T_r bliver da 0,85. Dvs. at T_a for aerogelruden bliver 0,79, svarende til en absorption på 0,21 eller 21%. Følgelig bliver aerogelrudens resulterende reflektans 13%.

Solfaktoren eller energitransmittansen, g , bestemmes som summen af T_o og den del af absorptionen, som transmitteres ind i det bagved liggende rum. For aerogelruden skønnes det, at absorptionen i det kolde og i det varme glas transmitteres til omgivelserne hhv. til det bagved liggende rum. Den absorberede energi i aerogelmaterialet skønnes at blive transmitteret lige meget til omgivelserne og til det bagved liggende rum. Summen af absorptionsbidragene bliver da 0,10, og energitransmittansen bliver derved 0,76.

I alle ruderne er der anvendt 4 mm glas. Og da de er indkøbt samme sted, antages det, at alle glassene har samme ekstinktionskoefficient. Gasserne i de to lavenergiruder influerer ikke på transmittansforholdene.

Angående 2-lags lavenergiruden med en lavemissionsbelægning, er dens T_o målt til 0,54. Som nævnt ovenfor, er T_o for et lag glas lig 0,87. Transmittansen for glaslaget med lavemissionsbelægningen er da omtrent 0,62. Det skønnes, at det skyldes lige dele refleksion og absorption. Altså absorberer glaslaget med en lavemissionsbelægning 19%. For lavenergiruden bliver den samlede absorptans da lig: $0,05 + 0,87 \cdot 0,19 = 0,22$. Heraf absorberes 0,17 i glaslaget med lavemissionsbelægning. Det antages, at de 5% absorption i det ydre glas transmitteres til omgivelserne. For det indre glas, skønnes det, at hovedparten af den absorberede energi transmitteres til det bagved liggende rum på grund af lavemissionsbelægningen. Andelen sættes til 75%. Energitransmittansen for den 2-lags lavenergirude bliver da: $g = 0,54 + 0,75 \cdot 0,17 = 0,67$.

For den 3-lags lavenergirude blev T_0 målt til 0,38, jvf. tabel 3.7. Under forudsætning af, at det målte enkelte glaslag har samme soltransmittans, som glassene i denne rude, kan T_0 for hver af de to glas med lavemissionsbelægning findes til: $(0,38 / 0,87)^{1/2} \approx 0,66$. Denne værdi er lidt højere end den, der blev bestemt i forbindelse med den 2-lags lavenergirude. Det kan skyldes et forskelligt jernindhold, og dermed ekstinktionskoefficient, i glasset i de to ruder.

Ved at bruge samme antagelse som ovenfor, fås en absorptans for hver af de 2 glas med lavemissionsbelægninger på 0,17. Der absorberes så 5% i det yderste glas, i det midterste glas absorberes $0,87 \times 0,17$ svarende til 15%, og i de inderste glas absorberes: $0,87 \times 0,66 \times 0,17$ svarende til ca. 10%.

Det antages som før, at den absorberede energi i det yderste glas transmitteres ud til omgivelserne. For det midterste glas skønnes det, at den absorberede energi transmitteres ligeligt hver sin vej. Og endelig skønnes det, at al den absorberede energi i det inderste glas transmitteres ind til det bagved liggende rum. Der fås da en energitransmittans for den 3-lags lavenergirude på: $0,38 + 0,5 \cdot 0,15 + 0,10$ svarende til 0,56.

4.5 Rudeinddata til TSBI3

I de sammenlignende undersøgelser af de tre ruder må det ikke glemmes, at hvor de to lavenergiruder er færdigudviklet, er aerogelruderen stadig midt i udviklingsfasen. Derfor vil egenskaberne for aerogelruden i en nær fremtid blive skitseret her.

Fremstillingen af monolitisk silica aerogel er vidt forskellig, om det er på laboratorieniveau eller i en pilotproduktion. På laboratorieniveau kan aerogel med densiteter fra ca. 20 kgm^{-3} til over 300 kgm^{-3} fremstilles. Mht. pilotproduktion er det kun Airglass AB ved Lund, Sverige, som er i stand til dette. Men fremstillingen af de store aerogelskiver giver ekstra problemer i forhold til laboratorieprøverne. Derfor har aerogelmateriale af den såkaldte standardkvalitet fra Airglass en densitet på omkring 150 kgm^{-3} . Ved en lavere densitet har aerogelen en lavere λ -værdi i det aktuelle temperaturområde. Samtidig vil de mekaniske egenskaber (især trykbrudstyrken) også reduceres. Derfor ser det for tiden ud til, at en aerogeldensitet på ca. 100 kgm^{-3} er passende. Her er den ækvivalente varmeledningsevne $8 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ i et groft vakuum (lufttryk mindre end 50-100 mbar) og de mekaniske egenskaber er fuldt tilstrækkelige til anvendelse i evakuerede ruder. I mindre grad bliver aerogelens transmittans forbedret.

I nær fremtid kunne en aerogelrude derfor have følgende egenskaber: Med en aerogeldensitet på 100 kgm^{-3} og en lagtykkelse på 20 mm efter evakuering, vil rudens center U-værdi blive $0,37 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Anvendes der en glastykkelse på 4 mm, bliver rudens tykkelse ialt 28 mm,

hvilket er 2 mm mindre end den undersøgte 3-lags lavenergirude. Hvis den samme kantforsegling som i den undersøgte aerogelrude anvendes, og revnedannelsen i det rustfri stålprofil overvindes, er kantforseglingens lineære modstand, r_k , lig $24,11 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, som omtalt i afsnit 4.3. Med samme glasmål som for de tre andre ruder, bliver U_r -værdien for hele ruden, U_r , lig $0,48 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Sol- og energitransmittansen bliver også bedre end for den undersøgte aerogelrude men nok kun et par procentpoint. Generelt vil alle rudernes soltransmittans dog kunne forbedres ved brug af jernfrit glas, men denne mulighed er der ikke taget hensyn til her.

Den aerogelrude, fra den nære fremtid, vil blive anvendt i energibesparelsesberegningerne i kapitel 6 sammen med de tre undersøgte ruder. Som tidligere omtalt, kræver TSBI3 rudeinddata i form af en U_r -værdi og en energitransmittans. I tabel 4.4 er vist TSBI3-inddata for de tre undersøgte ruder samt for den netop skitserede aerogelrude fra den nære fremtid. Sidstnævnte har rudernr. 4 og er tildelt den samme energitransmittans som den undersøgte aerogelrude.

Tabel 4.4 TSBI3-inddata for ruderne.

Rudernr. (-)	Type (-)	U_r ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	Energitransmit. (-)
1	aerogelrude	0,6	0,76
2	3 lags lavenergirude	1,0	0,56
3	2 lags lavenergirude	1,7	0,67
4	aerogelrude	0,48	0,76

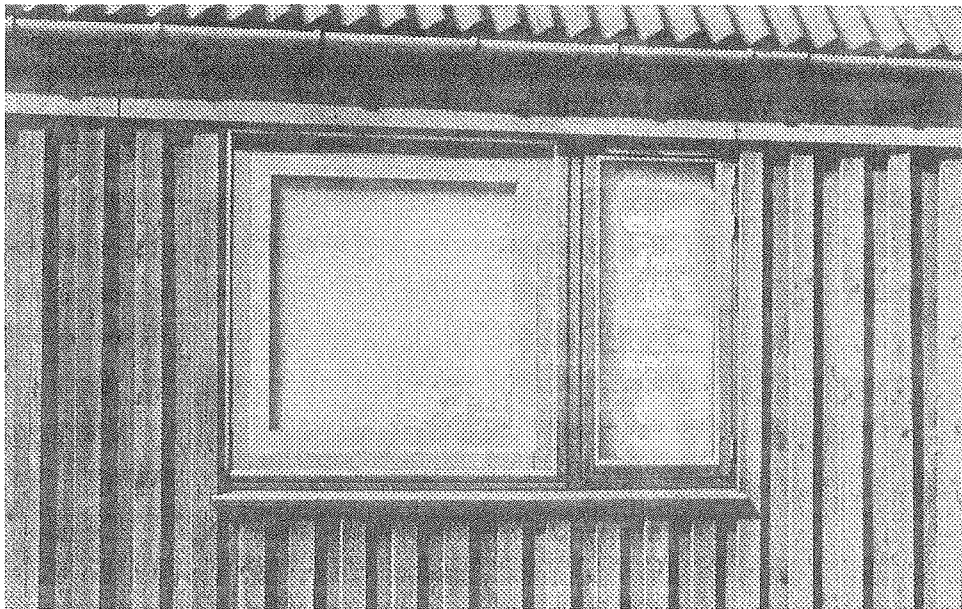
5. AEROGELVINDUE UNDER NATURLIGE FORHOLD

For at få et førstehånds indtryk af hvordan et aerogelvindue reagerer, når det flyttes ud af Laboratoriet og udsættes for naturlige forhold gennem længere tid, blev en prototype på et aerogelvindue monteret i et eksperimenthus på Laboratoriets forsøgsområde.

Selve aerogelruden er 1 m x 1 m og har en aerogeltykkelse på ca. 18 mm efter evakuering. Aerogelens densitet er ca. 150 kgm^{-3} . Kantforseglingen er efter samme princip som vist i figur 2.1 og består af et rustfrit stålbelgprofil med filtmateriale i bølgerne samt butylfuger. Ruden er monteret i en simpel, fast trækarm, som er fremstillet her på Laboratoriet.

Karmens ydre mål er ca. 1,1 m x 1,1 m x 0,07 m. Center U-værdien er målt til $0,51 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. For hele ruden er U-værdien målt til $0,55 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, og den totale U-værdi for aerogelvinduet er bestemt til $0,72 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Aerogelvinduet blev monteret i eksperimenthusets sydfacade. En eksisterende termorude på ca. 1,3 m x 1,3 m blev taget ud, og en ekstra ramme, hvor aerogelvinduet passede i, blev sat i den oprindelige karm. Aerogelvinduet blev monteret sidst i februar og har siddet i omtrent to et halvt år. Det bagved liggende rum er termisk set let. Rummet er i den forløbne periode blevet brugt som kontor og har derfor været opvarmet til mindst 20°C .



Figur 5.1 Aerogelvinduet monteret i eksperimenthuset. I det smalle vindue til højre for aerogelvinduet er der monteret en indvendig, translucent skodde med granuleret silica aerogel.

5.1 Erfaringer

Som nævnt ovenfor er kantforseglingen udformet efter samme princip som den i aerogelvinduet, der er brugt til de sammenlignende, indendørs undersøgelser, jvf. kapitel 3. Desværre opstod de samme problemer med lækage i det rustfri stålprofil. Mønsteret er det samme som ved den anden prototype. Relativ kort tid efter evakueringen begyndte trykket at stige i ruden. Grundige undersøgelser viste ikke tegn på svigt i butylfugerne eller omkring studsenes fastgørelse til det rustfri stålprofil. Som den allersidste udvej blev der brugt vand til at lokalisere lækagen. Selvom metoden blev benyttet med stor forsigtighed, blev et par kvadrantcentimeter aerogel lige omkring lækagen ødelagt. Det skønnedes dog at være uden nævneværdig betydning for aerogelvinduet som helhed.

Også her må årsagen til revnedannelsen i det rustfri stålprofil skyldes, at profilet er blevet bukket parallelt med valseretningen og ikke vinkelret herpå. Skaden blev forsøgt repareret på 3 måder. Den første måde var at pensle fortyndet butyl henover det skadede område på profilet. Det var ekstruderet butyl, som blev fortyndet med rensbenzin. Tanken var, at når det tilsyneladende var så små revner, ville der kun være brug for en lille mængde tætningsmateriale. Det viste sig ikke at være en brugbar metode, og derfor blev en anden metode prøvet. Den gik ud på at dække revnerne i profilet med butylfugemasse. På ca. 10 cm af profilet blev filt-materialet fjernet fra de bølger, der vendte udad altså væk fra aerogelmaterialet. Her blev der så fyldt op med butylfugemasse. Ved den efterfølgende evakuering så reparationen ud til at have en vis effekt, som dog langt fra var tilstrækkelig i forhold til det påtænkte tidsrum, hvor aerogelvinduet skulle udsættes for naturlige forhold. Som den tredje og sidste måde blev en videreudvikling af den foregående metode forsøgt. Der blev lavet et ca. 10 cm langt rustfrit stålprofil med samme tværsnit, som profilet i kantforseglingen. Det nye stykke blev så presset så langt ned som muligt i den fugemasse, der var påført kantforseglingsprofilen. Herved kom det ekstra profilstykke til at være placeret næsten parallelt med det oprindelige profil, og imellem de to profiler var der fyldt ud med butyl. Til at begynde med holdt reparationen, men efter godt en måneds tid begyndte gastrykket i aerogelruden at stige igen. Trykstigningen skete med en vis fart, således at det kunne udelukkes, at fx afgang i ruden var årsagen. En forklaring kan være, at butylen har en ringe klæbeevne, og derfor er det ekstra profilstykke ikke blevet holdt godt nok på plads, og en lille lækage er opstået. På grund af den snævre plads mellem karm og rude blev det opgivet at lave en mekanisk fiksering af det ekstra profilstykke. Det blev besluttet at montere aerogelvinduet i eksperimenthuset, selv om ruden ikke kunne holde vakuum.

Hovedformålet med at montere et aerogelvindue i en eksisterende bygning var at finde ud af, om aerogelmaterialet kunne holde til de mekaniske påvirkninger fra fx vindlaste og lignende. To mulige typer af nedbrydning var forudset. Den ene var, at aerogelen revnede igennem fra det indvendige til det udvendige glas. Hvis en sådan revnedannelse gik meget langt, kunne

det måske resultere i en næsten fuldstændig knusning af aerogelmaterialet, hvori kun ca. 5 vol.-% er fast stof. Den anden mulige nedbrydningstype drejer sig om aerogelmaterialets overflade. En vis bevægelse mellem aerogelens og glassenes overflader kan tænkes. Da aerogelens trækbrudstyrke er meget lille, kunne disse indbyrdes bevægelser af overflader tænkes at resultere i en art slibning af aerogeloverfladen. I værste tilfælde ville den optiske kvalitet ændres fra transparent til translucet, og så ville konstruktionen være uegnet som vinduesrude.

Af hensyn til holdbarheden af aerogelmaterialet forventes det at være mest hensigtsmæssigt, at ruden er evakueret. Aerogelen vil da være fastholdt mellem glassene pga. atmosfæretrykket og dermed udsat for en forspænding. Samtidigt vil hele ruden virke som en stiv sandwichkonstruktion og bøje mindre ud end glassene i en traditionel termorude ved vindbelastninger. Alt i alt anses aerogel for at være bedre beskyttet i en evakueret rude end i en praktisk taget uevakueret rude, som det har været tilfældet her.

Efter den to et halvt år lange periode, ser det ud til, at aerogelmaterialet i prototypen har klarer sig godt. Da vinduet blev monteret, var der nogle revner i aerogelen. Disse var fremkommet som følge af en pludseligt opstået lækage under evakueringen. Det menes, at trykstigningen ikke har kunnet udjævnes hurtigt nok pga. aerogelens fine porestruktur. Derfor er der kommet gastyksgradienter, som har givet anledning til trækspændinger større end aerogelens trækbrudstyrke. Det ser ud til, at nogle få af revnerne er blevet lidt større, men samtidigt ser det ikke ud til, at nye revner er opstået. Mht. den anden type nedbrydning i form af friktions-slibning i aerogeloverfladen, har det ikke været muligt at konstatere tegn på dette ved en nøje undersøgelse. Det tyder altså på, at aerogelmaterialet er robust nok til den aktuelle anvendelse.

Et andet forhold ved bedre isolerende vinduer er risikoen for rimfrost og kondensdannelse på rudens udvendige flade pga. dennes lavere temperatur gennem fyringssæsonen set i forhold til en almindelig termorude. Det var håbet at finde en pålidelig og enkel metode til automatisk registrering af rimfrost- og kondensforekomster på aerogelvinduets udvendige glasareal. Der blev ikke fundet en brugbar løsning, og derfor blev nødløsningen en jævnlig inspektion om morgenen og sidst på eftermiddagen. I de to et halvt år har der kun været observeret rimfrost én gang på aerogelvinduets ydre glas. Det var efter en vinternat med megen rimfrost. Hvad angår kondens, har det ikke været set på aerogelvinduet. Her spiller to forhold ind. Det ene er tidspunkterne for inspektionerne, idet risikoen for kondens naturligvis er større om aftenen og om natten. Det andet forhold er, at aerogelen i realiteten var uevakueret. Dvs. i stedet for en center U-værdi på omkring $0,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, var den knapt dobbelt så stor.

Det må forventes, at rimfrost og kondens optræder hyppigere på den udvendige glasflade på superisolerende vinduer end på almindelige termoruder. På grundlag af disse undersøgelser kan der dog ikke siges noget om størrelsen af problemet. En måde at mindske risikoen på

kunne være at have en hård lavemissionsbelægning på den udvendige glasflade. Herved vil varmetabet til omgivelserne reduceres, idet bidraget fra stråling mindskes, og glassets temperatur hæves. Center U-værdien mindskes, men soltransmittansen bliver samtidig dårligere. Denne måde kan ses som en passivt virkende metode. Den kunne måske gøres aktiv ved at lægge en spænding over den hårde lavemissionsbelægning, således at der blev afsat en effekt til fjernelse af kondens og rimfrostforekomster. Hvis det kan lade sig gøre, kræves der nok et styrings- og reguleringssystem for at minimere energiforbruget, da fx kondens på ruden i de fleste tilfælde ikke vil genere i nattetimerne. Ulemperne ved metoden kan først og fremmest være et stort energiforbrug og behov for yderligere installation specielt i eksisterende byggeri.

Sluttelig var det tanken at undersøge aerogelvinduet i eksperimenthuset mht. til de termiske forhold og sammenligne med de indendørs undersøgelser af det andet aerogelvindue. Som tidligere nævnt kunne der ikke holdes et tilstrækkeligt vakuum i aerogelvinduet under naturlige forhold. Derfor ville U-værdierne for de to aerogelvinduer være vidt forskellige og meningsløse at sammenligne.

6. ENERGIBESPARELSESBEREGNINGER

Der er udført årssimuleringer for et parcelhus, et rækkehus og en lejlighed. Hver af bygningernes isoleringsgrad og tæthed ændres svarende til, at de er opført i 50'erne, i 60'erne, i slutningen af 70'erne og i 90'erne. Det skal her bemærkes, at det kun er ydervæggens U-værdi og infiltrationen, som ændres, dvs. bygningerne kan ikke forventes at svare helt til bygningsreglementet for de pågældende perioder.

6.1 Beregningsmodel

Det EDB-program, der er brugt til beregninger af solindfald og opvarmningsbehov i bygningerne, er TSBI3 v.B04 /10/. Dette program, som er udviklet af Statens Byggeforsknings Institut, kan modellere de fleste bygningstyper og beregne de termiske forhold mere eller mindre detaljeret afhængig af brugerens ønsker.

Når der regnes på bygningerne, opdeles disse i et antal zoner. Hver zone tildeles en temperatur, og en varmebalance for hver zone beregnes. Hvis det vurderes, at flere rum i en bygning har næsten samme temperaturforhold, kan disse rum samles i en zone. Jo færre zoner, jo hurtigere beregningstid, men jo mindre detaljeret bliver beregningen også.

Vægkonstruktioner beskrives ved tykkelse og materialeværdier for de forskellige materialer der indgår. Væggenes placering defineres i forhold til zoner og nabozoner og for ydervægge også ved orientering og absorptionskoefficient for solstråling. De materialeværdier, der skal anvendes, er massefylde, varmekapacitet og varmeledningsevne.

Vinduer beskrives ved en U-værdi for ruden og en U-værdi for karmen, energitransmittans og orientering. Som solafskærmning kan tilføjes skodder og gardiner. Disse kan reguleres efter solstråling, temperaturer og en tidsplan.

Varmetilførslen kan tilføjes og reguleres på næsten enhver måde. For varmetilførsel fra radiatorer er her forudsat, at de skal opvarme zonerne til 20°C hele døgnet. Gratisvarmen (varme fra personer, lys og udstyr) kan også tilføjes og reguleres efter en tidsplan.

I alle beregningerne forudsættes det, at der benyttes en trækarm med U-værdi 1,6 Wm⁻²K⁻¹.

6.2 Beskrivelse af parcelhus

	Parameterbeskrivelse	Værdier for parcelhuset
Generelt for parcelhuset for alle tidsperioder	Etageareal	87 m ² netto, 100 m ² brutto
	Rudetype	Termorude
	Vinduesareal (murhul)	10,5, m ² (12% / 11% af gulvareal)
	m ² mod N/S/Ø/V	0,9/8,2/1,4/0,0
	U-værdi, rude	3,0 Wm ⁻² K ⁻¹
	Energitransmittans	0,76
	Orientering, stue	Syd
	Gratisvarme (lys, eludstyr og personer)	4600 kWh/år
	Opvarmning	20° C, konstant
	Udluftning	3,5 h ⁻¹ ved indetemperaturer > 24° C
Ydervæg, type	Tegl, Isolering, Tegl	
Parcelhus fra 1950	U-værdi	1,8 W/m ² K
	Naturlig infiltration	1,0 h ⁻¹
Parcelhus fra 1960	U-værdi	1,1 W/m ² K
	Naturlig infiltration	0,5 h ⁻¹
Parcelhus fra 1979	U-værdi	0,4 W/m ² K
	Naturlig infiltration	0,5 h ⁻¹
Parcelhus fra 1990	U-værdi	0,3 W/m ² K
	Naturlig infiltration	0,5 h ⁻¹

Figur 6.1 Generel beskrivelse af parcelhuset og opdeling i tidsperioder.

Det parcelhus, der er regnet på, svarer til det hus, der er brugt som eksempel i DS 418 /11/. Huset er et typisk etplanshus, som man byggede dem i midten af 70'erne. Ydervæggene er opført som en dobbelt teglmur med isolering. Vinduerne har et glasareal på 85%. Tagdæknin-

gen er eternit, og overalt i huset er der regnet med støbte gulve. Grundmodellen er valgt således, at stuevinduerne vender mod syd.

6.3 Beskrivelse af rækkehuset

Generelt for rækkehuset	Parameterbeskrivelse	Værdier for rækkehuset	
for alle tidsperioder	Etageareal	72 m ² netto	
	Rudetype Vinduesareal (murhul) m ² mod N/S/Ø/V/ Ovenlys U-værdi, rude Energitransmittans	Termorude 20,2 m ² (28% af gulvareal) 0,0/9,6/0,0/9,0/1,6 3,0 Wm ⁻² K ⁻¹ 0,76	
	Orientering, stuevinduer	Vest	
	Gratisvarme (lys, eludstyr og personer)	1840 kWh/år	
	Opvarmning	20 °C, konstant	
	Udluftning	3,5 h ⁻¹ ved indetemperaturer > 24 °C	
	Ydervægge, type	Beton, Isolering, Beton	
	Rækkehus fra 1950	U-værdi	2,3 W/m ² K
		Naturlig infiltration	1,0 h ⁻¹
Rækkehus fra 1960	U-værdi	1,1 W/m ² K	
	Naturlig infiltration	0,5 h ⁻¹	
Rækkehus fra 1979	U-værdi	0,4 W/m ² K	
	Naturlig infiltration	0,5 h ⁻¹	
Rækkehus fra 1990	U-værdi	0,3 W/m ² K	
	Naturlig infiltration	0,5 h ⁻¹	

Figur 6.2 Generel beskrivelse af rækkehuset og opdeling i tidsperioder.

Rækkehuset er et enderækkehus bygget i slutningen af 60'erne som et vinkelhus med gårdhave. Ydervæggene er opført som en sandwichkonstruktion af beton og isolering. Vinduerne har et glasareal på 85%, og der er ovenlysvinduer i køkken, bad og entré. Tagdækningen er eternit, og overalt i huset er der regnet med et isoleret trægulv på strøer over en krybekælder. I badeværelset er der dog klinker. Grundmodellen er valgt således, at stuevinduerne vender mod vest.

6.4 Beskrivelse af lejlighed

Den lejlighed, der er regnet på, er en endelejlighed i en betonblok. Der er lejligheder over, under og på den ene side af den betragtede lejlighed. Lejligheden har 2 værelser og 2 kamre. Ydervæggene er opført som en dobbelt teglmur med isolering. Vinduerne har et glasareal på 85%. Ved beregningen antages, at der findes samme temperaturforhold i de omgivende lejligheder som i den aktuelle. Grundmodellen er valgt således, at stuevinduerne vender mod syd.

	Parameterbeskrivelse	Værdier for lejligheden
Generelt for lejligheden for alle tidsperioder	Etageareal	44 m ² , netto
	Rudetype	Termorude
	Vinduesareal (murhul) m ² mod N/S/Ø/V/ Ovenlys	9 m ² (21% af gulvareal) 2,4/6,6/0,0/0,0
	U-værdi, rude	3,0 Wm ⁻² K ⁻¹
	Energitransmittans	0,76
	Orientering, stuevinduer	Syd
	Gratisvarme (lys, eludstyr og personer)	3290 kWh/år
	Opvarmning	20 °C, konstant
	Udluftning	3,5 h ⁻¹ ved indetemperaturer > 24 °C
Ydervægge, type	Tegl, Isolering, Tegl	
Lejlighed fra 1950	U-værdi	1,7 W/m ² K
	Naturlig infiltration	1,0 h ⁻¹
Lejlighed fra 1960	U-værdi	1,0 W/m ² K
	Naturlig infiltration	0,5 h ⁻¹
Lejlighed fra 1979	U-værdi	0,4 W/m ² K
	Naturlig infiltration	0,5 h ⁻¹
Lejlighed fra 1990	U-værdi	0,3 W/m ² K
	Naturlig infiltration	0,5 h ⁻¹

Figur 6.3 Generel beskrivelse af lejligheden og opdeling i tidsperioder.

Grundskitser af de tre boligtyper er vist i appendiks 3.

6.5 Parametervariationer

Parametervariationerne laves for både parcelhuset, rækkehuset og lejligheden. Dette gøres for at kunne vurdere, i hvilken bygningstype de enkelte parametre har størst indflydelse.

Der laves først 5 forskellige modeller, hvor det er rudetyperen der er ændret mellem modellerne. U-værdier og energitransmittanser er vist i nedenstående skema.

	Rudenr. 0	Rudenr. 1	Rudenr. 2	Rudenr. 3	Rudenr. 4
Ruder	Termorude	Aerogelrude. 2 x 4 mm glas, 19,5 mm aero- gel, evak. (150 kg m ⁻³).	3 lag 4 mm glas, 2 x 9 mm glasafstand, krypton og 2 lav-e belægn.	2 lag 4 mm glas, 12 mm glasafstand, argon og 1 lav-e belægn.	Aerogelrude. 2 x 4 mm glas, 20 mm aerogel, evak. (100 kg m ⁻³).
U-værdi	3,0 Wm ⁻² K ⁻¹	0,6 Wm ⁻² K ⁻¹	1,0 Wm ⁻² K ⁻¹	1,7 Wm ⁻² K ⁻¹	0,48 Wm ⁻² K ⁻¹
Energi- transm.	0,76	0,76	0,56	0,67	0,76

Figur 6.4 Oversigt over de 5 forskellige rudetyper, der benyttes i beregningerne.

6.6 Resultater

Resultaterne fra TSBI3-beregningerne er vist i de nedenstående tabeller. Fælles for de fem tabeller (tabel 6.1 til 6.5) er, at resultaterne angives for hver boligtype som funktion af vinduestypen.

Tabel 6.1 Årligt, totalt opvarmningsbehov for de forskellige boligtyper ved anvendelsen af de forskellige rudetyper, (kWhår⁻¹).

Boligtype	Rudenr. 0	Rudenr. 1	Rudenr.2	Rudenr. 3	Rudenr. 4
Lejl.-50	11.739	10.130	10.844	11.080	10.047
Lejl.-60	7.978	6.226	6.837	7.165	6.143
Lejl.-79	5.786	4.332	4.776	6.062	4.271
Lejl.-90	5.359	4.035	4.415	4.675	3.985
Ræk.-50	21.409	19.433	20.357	20.614	19.323
Ræk.-60	15.738	12.115	13.312	14.027	11.937
Ræk.-79	11.462	7.939	8.995	9.733	7.772
Ræk.-90	10.715	7.247	8.267	9.007	7.084
Parc.-50	16.588	15.832	16.420	16.460	15.779
Parc.-60	12.098	9.653	10.598	11.048	9.526
Parc.-79	8.072	5.714	6.452	6.943	5.604
Parc.90	7.261	4.956	5.658	6.141	4.845

Tabel 6.2 Årligt, totalt solindfald, (kWhår⁻¹).

Boligtype	Rudenr. 0	Rudenr. 1	Rudenr. 2	Rudenr. 3	Rudenr. 4
Lejlighed	3.629	3.629	2.674	3.199	3.629
Rækkehus	7.588	7.588	5.736	6.754	7.588
Parcelhus	5.768	5.767	4.249	5.084	5.767

Tabel 6.3 Årligt opvarmningsbehov pr. m² rude, (kWhm⁻²år⁻¹).

Boligtype	Rudenr. 0	Rudenr. 1	Rudenr. 2	Rudenr. 3	Rudenr. 4
Lejl.-50	1.525	1.316	1.408	1.439	1.305
Lejl.-60	1.036	809	888	931	798
Lejl.-79	751	563	620	687	555
Lejl.-90	696	524	573	607	518
Ræk.-50	1.245	1.130	1.184	1.198	1.123
Ræk.-60	915	704	774	816	694
Ræk.-79	666	462	523	566	452
Ræk.-90	623	421	481	524	412
Parc.-50	1.864	1.779	1.845	1.849	1.773
Parc.-60	1.359	1.085	1.191	1.241	1.070
Parc.-79	907	642	725	780	630
Parc.90	816	557	636	690	544

Tabel 6.4 Årligt solindfald pr. m² rude, (kWhm⁻²år⁻¹).

Boligtype	Rudenr. 0	Rudenr. 1	Rudenr. 2	Rudenr. 3	Rudenr. 4
Lejlighed	471	471	347	415	471
Rækkehus	441	441	333	393	441
Parcelhus	648	648	477	571	648

Tabel 6.5 Årlig besparelse i opvarmningsbehov pr. m² rude ved rudenr. 0 som reference, (kWhm⁻²år⁻¹).

Boligtype	Rudenr. 0	Rudenr. 1	Rudenr.2	Rudenr. 3	Rudenr. 4
Lejl.-50	-	209	116	86	220
Lejl.-60	-	228	148	106	238
Lejl.-79	-	189	131	64	197
Lejl.-90	-	172	123	89	178
Ræk.-50	-	115	61	46	121
Ræk.-60	-	211	141	99	221
Ræk.-79	-	205	143	101	215
Ræk.-90	-	202	142	99	211
Parc.-50	-	85	19	14	91
Parc.-60	-	275	169	118	289
Parc.-79	-	265	182	127	277
Parc.90	-	259	180	126	271

Som det ses af tabel 6.5, svinger besparelsen noget afhængig af rudetypen og isoleringsgraden. I disse beregningseksempler er der besparelser på helt op til ca. 290 kWh pr. m² pr. år. Hvis der ses bort fra den dårligste isoleringsgrad, er der typisk en besparelse på 200 kWhm²år⁻¹ ved at anvende aerogelruder (rudenr. 1 og 4) i stedet for termoruder. I forhold til de markedsførte lavenergiruder (rudenr. 2 og 3), er aerogelruder signifikant bedre, idet sidstnævnte typisk giver 80 kWhm²år⁻¹ mere i besparelse end lavenergivinduerne.

De to aerogelruder, svarende til prototypen (nr. 1) og morgendagens udgave (nr. 4), har en forskel i U-værdi på 20 % og samme energitransmittans, men forskellen i årlig energibesparelse er kun af størrelsesordenen 5%.

Udover de beregnede energibesparelser ved anvendelse af aerogelvinduer, vil der også være en forbedring af den termiske komfort i bygningerne i fyringssæsonen, fordi overfladetemperaturen af det indvendige glas bliver højere. Derved mindskes kuldeneffaldet ved vinduerne, og strålingsasymmetrien i rummet bliver ligeledes mindre. Det er gener, som brugerne ofte kompenserer for ved at hæve rumtemperaturen.

KONKLUSION

Anvendelsen af monolitisk silica aerogel som transparent isoleringsmateriale i vinduer er undersøgt eksperimentelt og teoretisk.

Der er fremstillet en prototype af et aerogel vindue, som er blevet prøvet mht. de termiske egenskaber sammen med to markedsførte lavenergivinduer. Disse var dels et tre-lags vindue med to lavemissionsbelægninger og kryptonfyldning, og dels var det et to-lags vindue med en lavemissionsbelægning samt argonfyldning.

Beregninger af de termiske forhold i de eksperimentelt undersøgte vinduer er blevet udført og sammenlignet med målingerne. Bl.a kan det ses, at kantforseglingens kuldebrovirkning har stor indflydelse på højisolerende ruders resulterende varmetabskoefficient.

De optiske målinger viser, at aerogelruden har en klart højere soltransmittans end de markedsførte lavenergiruder.

Den undersøgte aerogelrude har en resulterende varmetabskoefficient på $0,6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ og en soltransmittans på 66 %. Hvis aerogeldensiteten er 33 % lavere, bliver rudens resulterende varmetabskoefficient $0,48 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ med den benyttede kantforsegling.

En tilsvarende prototype af en aerogelrude har været udsat for naturlige forhold. Den har gennem en periode på ca. 2½ år været monteret i et forsøgshus. Det har efter denne periode ikke kunnet konstateres nogen som helst tegn på nedbrydning eller andre former for skader på aerogelmaterialet.

Slutteligt er der blevet udført TSBI3-beregninger på forskellige boligtyper, hvorved energibesparelsespotentialt for anvendelsen af de undersøgte ruder er belyst. Resultaterne viser, at der på rumopvarmningen kan spares op til 275 kWh pr.m² rude pr. år med aerogel ruder.

REFERENCER

- /1/ "Vinduer og solvægge med monolitisk silica aerogel". K.I. Jensen, Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Meddelelse nr. 220. 1991.
- /2/ "Højisolerende transparent dæklag". K.I. Jensen. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Meddelelse nr. 204. 1989.
- /3/ "WINDOW 4.0. A PC program for analyzing window thermal performance". Windows and Daylighting group, Lawrence Berkeley Laboratory, USA. 1992.
- /4/ "Ti₃, Transparent insulation technology". Proceedings fra den 3. internationale workshop i Titisee, Tyskland. 1989.
- /5/ "Undersøgelse af solvægge ved hjælp af indendørs forsøgsopstillinger". C. Paludan-Müller, Licentiatafhandling, Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. 1987.
- /6/ "Interlaboratory testing transparent insulation materials". Working Document, IEA task 10, subtask C. 1991.
- /7/ "Kobru 86-manual". P. Standaert & P. Houthuys. Physibel Building Physics, Belgien. 1990.
- /8/ "FRAME - A computer program to evaluate the thermal performance of window frame systems". Enermodal Engineering Ltd., Canada. 1992.
- /9/ "ASHRAE 1981. Handbook of Fundamentals". American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., USA. 1981.
- /10/ "TSBI3. Brugervejledning". K. Johnsen, K. Grau & J.E. Christensen. Statens Byggeforskningsinstitut. 1993.
- /11/ "DS418. DIF's regler for beregning af bygningers varmetab". 5. udgave. 1986.

SYMBOLLISTE

a	: ekstinktionskoefficient	(-)
A_{bk}	: areal af bundkarm	(m^2)
A_c	: centerareal af rude	(m^2)
A_{kz}	: areal af kantzone for rude	(m^2)
A_r	: totalt areal af rude	(m^2)
A_t	: transparent areal af rude	(m^2)
A_{sk}	: areal af side- og topkarm	(m^2)
A_v	: areal af vindue	(m^2)
d_a	: aerogeltykkelse	(m)
e_g	: glastykkelse	(m)
g	: energitransmittans	(-)
I_{diff}	: diffus irradians	(Wm^{-2})
I_t	: total irradians	(Wm^{-2})
n	: brydningsindeks	(-)
P	: perimeter	(m)
P	: effekt	(W)
ΔP	: effektforskel	(W)
q_v	: varmestrøm i varmt glas	(Wm^{-1})
R	: isolans	(m^2KW^{-1})
r_0	: reflektans ved vinkelret indfald	(-)
R_i	: indvendig overgangsisolans	(m^2KW^{-1})
r_k	: lineær isolans af kantforsegling	(mKW^{-1})
R_r	: centerisolans for rude	(m^2KW^{-1})
R_u	: udvendig overgangsisolans	(m^2KW^{-1})
T	: soltransmittans	(-)
T_0	: soltransmittans ved vinkelret indfald	(-)
T_{60}	: soltransmittans ved indfaldsvinkel på 60°	(-)
T_a	: soltransmittans mht. absorption	(-)
T_{gk}	: centertemperatur af koldt glas	($^\circ C$)
T_{gv}	: centertemperatur af varmt glas	($^\circ C$)
T_{kk}	: temperatur af kold grænseflade	($^\circ C$)
T_{kv}	: temperatur af varm grænseflade	($^\circ C$)
T_{lk}	: temperatur af kold luft	($^\circ C$)
T_{lv}	: temperatur af varm luft	($^\circ C$)
$T(x)$: glastemperatur til stedet x	($^\circ C$)
U	: varmetabskoefficient	($Wm^{-2}K^{-1}$)
U_{bk}	: varmetabskoefficient for bundkarm	($Wm^{-2}K^{-1}$)
U_c	: center varmetabskoefficient	($Wm^{-2}K^{-1}$)

U_{kz}	: varmetabskoefficient for kantzone af rude	$(Wm^{-2}K^{-1})$
U_r	: center varmetabskoefficient for rude	$(Wm^{-2}K^{-1})$
U_{sk}	: varmetabskoefficient for side- og topkarm	$(Wm^{-2}K^{-1})$
U_{tr}	: total varmetabskoefficient for rude	$(Wm^{-2}K^{-1})$
U_v	: varmetabskoefficient for vindue	$(Wm^{-2}K^{-1})$
x	: stedparameter	(m)
$Y1$: konstant ved kurvefit	(K)
$Y2$: konstant ved kurvefit	(m^{-1})

Græske symboler

λ	: varmeledningsevne	$(Wm^{-1}K^{-1})$
λ_a	: ækvivalent varmeledningsevne	$(Wm^{-1}K^{-1})$
λ_g	: varmeledningsevne for glas	$(Wm^{-1}K^{-1})$

FIGURLISTE

- 2.1 Principskiste af kantforseglingen i aerogelrude.
- 2.2 Beregnet effekt af krypton- hhv. argenfyldning.
- 3.1 Snit i bund- og overkarm af karmen brugt ved måling af vinduernes U-værdi.
- 3.2 Målte temperaturer og tilhørende kurvefit fra undersøgelsen af kantforseglingens kuldebrovirkning for de 3 ruder.
- 5.1 Aerogelvinduet monteret i eksperimenthuset.
- 6.1 Generel beskrivelse af parcelhuset og opdelingen i tidsperioder.
- 6.2 Generel beskrivelse af rækkehuset og opdelingen i tidsperioder.
- 6.3 Generel beskrivelse af lejligheden og opdelingen i tidsperioder.
- 6.4 Oversigt over de 5 forskellige rudetyper, der benyttes i beregningerne.

TABELLISTE

- 3.1 Målt center isolans, R_c , og tilsvarende center U-værdi, U_c , for de tre ruder.
- 3.2 Resultatet af guarded hot-box målingerne for de tre vinduer.
- 3.3 Temperaturmålingerne ved kantundersøgelserne samt beregnede overgangsisolanser.
- 3.4 Y_1 og Y_2 fra kurvefit af kantmålingerne samt den beregnede q_v for de tre ruder.
- 3.5 Rudernes totale U-værdi bestemt ud fra kantmålingerne.
- 3.6 Beregnet lineær isolans af kantforseglingerne, r_k , i de tre ruder.
- 3.7 Soltransmittansmålinger for de tre ruder samt det ene glas til aerogelruden.
- 4.1 Delarealerne for vinduerne.
- 4.2 Beregnede og målte totale U-værdier for de tre vinduer.
- 4.3 Beregnede og målte totale U-værdier for de 3 ruder.
- 4.4 TSBI3-inddata for ruderne.
- 6.1 Årligt, totalt opvarmningsbehov for de forskellige boligtyper ved anvendelsen af de forskellige rudetyper.
- 6.2 Årligt totalt solindfald.
- 6.3 Årligt opvarmningsbehov pr. m^2 rude.
- 6.4 Årligt solindfald pr. m^2 rude.
- 6.5 Årlig besparelse i opvarmningsbehov pr. m^2 rude ved rudenr. 0 som reference.

APPENDIKS 1

"Development of evacuated windows based on monolithic silica aerogel spacers"

Præsenteret på Third European Conference on Architecture, 17-21 maj 1993 i Firenze,
Italien.

S. Svendsen & K.I. Jensen
 Thermal Insulation Laboratory
 Technical University of Denmark, Building 118
 DK-2800 Lyngby, Denmark

ABSTRACT: The window area is still the weak part of the thermal envelope of buildings. The use of monolithic silica aerogel (msa) as transparent insulation material in a thermopane-like glazing seems to be one way of making a high performance window. Within the CEC JOULE II-programme a project was started December 1992, the aim of which is both to improve msa for this purpose and to develop highly insulating glazings and windows based on evacuated msa. A glazing with 20 mm msa, which is maintained at a gas pressure below 50-100 mbar, will have a centre U-value of about $0.4 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ and a solar transmittance of about 68%. For a Danish location the use of such msa glazings in existing housing will result in an energy saving of about 20% for space heating. Even a north facing glazing will have a net energy gain during the heating season.

1. INTRODUCTION

Improvements of the thermal performance of windows have accelerated over the last 5-10 years. So far, they have been obtained by means of multiple layers of glass, low-E coatings and low conductivity gas fills. Except for the last one, these techniques have a negative impact on the optical transmittance and thus on the potential solar energy gain. The heat loss coefficient (U-value) of the most energy efficient windows, which are commercially available today, is in the order of $0.8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ at the centre of the glass. This is four times above the U-value of a wall, which, for a Danish location, is about $0.2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ according to the national building code. This means that the distance between the windows and the walls with respect to the U-value still needs to be decreased further. And that is the aim of a current JOULE II project in which a different technique from the above mentioned is used. By means of monolithic silica aerogel as a transparent insulation material a highly insulating glazing is being developed.

2. MONOLITHIC SILICA AEROGEL

2.1 Production Process

The production process takes place in two major stages. First an alcogel is formed by hydrolysis. According to [1] tetramethoxysilane can be used as precursor, methanol as solvent and ammonia as catalyst and a controlled amount of water is used.

During the second stage the methanol is removed from the alcogel by supercritical drying. The alcogel is placed in a pressure vessel, heated and pressurized to exceed the critical point for the solvent and then the gaseous solvent is slowly let out. Another method is to exchange the alcohol in the alcogel for liquid carbon dioxide and then dry under supercritical conditions. Hereby the temperature level is lowered significantly as the critical point of methanol is about 240°C and 79 bar and the critical point of carbon dioxide is about 30°C and 74 bar.

Until now silica aerogel tiles can be made with a thickness of up to 3 cm and a sidelength of up to 60 cm.

2.2 Properties

Monolithic silica aerogel has excellent properties when used as a transparent insulation material due to the high solar

transmittance and the low thermal conductivity. The material consists of almost pure quartz and has a high porosity. It can be made with a density of $70\text{-}250 \text{ kgm}^{-3}$ 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. As the typical dimensions of the pores and the grains are much smaller than the wavelength of the solar radiation, the material is transparent even if it is porous. In table 1 some properties of the material are shown.

Table 1. Properties of monolithic silica aerogel with a density of 100 kgm^{-3} at room temperature.

Thermal conductivity	
- gas pressure ~ 1 bar:	$20 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$
- gas pressure below 50-100 mbar:	$8 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Solar transmittance	
- 20 mm thickness:	about 90%
Non deforming pressure:	about 3 bar
Non deforming temperature:	750°C
Refractive index:	1.02
Chemical composition:	99.99% SiO_2

Because of the open pores it is possible to evacuate the material. Due to the small pore diameter thermal conduction in the gas will be eliminated at a gas pressure below 50-100 mbar which is only a rough vacuum.

The monolithic silica aerogel has, however, some serious disadvantages. Its ultimate tensile strength is small and therefore the material will be damaged when getting into contact with liquid water due to surface tensions in the pores. Humid air does not seem to have an irreversible impact on the aerogel. The optical quality is influenced by effects of Rayleigh scattering probably due to inhomogenities in the network of silicon dioxide grains. These effects become apparent in the form of colouring of the view through the material. This view is slightly yellow against a bright background and slightly blue against a dark background.

3. CONSTRUCTION OF A MONOLITHIC SILICA AEROGEL GLAZING

In order to use of the good qualities of the monolithic silica aerogel, without forgetting its disadvantages, the following design is proposed. The construction consists of 20 mm monolithic silica aerogel placed between two layers of 4 mm glass and a rim seal. Such a system has a solar transmittance of about 68% when using ordinary glass and about 75% when using low iron glass. The aerogel is evacuated in order to obtain the best possible insulation. For an aerogel density of 100 kgm^{-3} , the centre-of-glass U-value is as low as $0.37 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-2}$. As the material acts as a spacer, it gives a mechanically strong and rigid sandwich construction. If the standard spacer system for thermopanes is used for an aerogel glazing, the influence of the thermal bridge caused by the rim seal on the overall U-value of the glazing will be very large. Therefore, a substitute with a higher thermal resistance than the one of the aluminium spacer will have to be used.

Except for the spacer, the rim seal consists of two butyl seals. They can be optimized for a lifetime of at least 20 years with respect to the suppression of gaseous thermal conduction in the pores. For an initial and final gas pressure of about 1 mbar and 50 mbar, respectively, over a period of 20 years, the leak rate will have to be smaller than $140 \mu\text{g}/(\text{day m}^2)$. The air leak coefficient for butyl is about $14 \times 10^{-5} \text{ l}/(\text{m day bar})$. This means that for a $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ glazing with the given aerogel thickness, and a depth of seal of 10 mm, the thickness can be up to 1 mm [2].

4. THE JOULE II PROJECT

4.1 Objective

Within the CEC JOULE II-programme a project started in December 1992 and is planned to run for 2 1/2 years. The project is entitled: Development and Investigation of Evacuated Windows Based on Monolithic Silica Aerogel Spacers. The aim of the project is to develop and investigate highly insulating glazing units and windows based on evacuated monolithic silica aerogel and to develop production processes, that can be used to produce an aerogel of such optical quality, as far as clarity is concerned, that it can be used in windows.

4.2 Participants

The following institutes are participants in the project: The Thermal Insulation Laboratory / Technical University of Denmark (TIL/TUC), Denmark, Physikalisches Institut, EP II / Universität Würzburg (PI/UW), Germany, Scan-Gobain Glass A/S (SGG), Denmark, CSTB / Grenoble (CSTB), France, Centre d'Énergétique / Ecole des Mines de Paris (CE/EMP), LMPC-ISM / Université Claude Bernard Lyon I (LMPC-ISM), France, Produits Chimiques Auxiliaires et de Synthèse (PCAS), France and AIRGLASS AB (AIRGLASS), Sweden. The Thermal Insulation Laboratory is the coordinator of the project.

4.3 Description of the Project

The project is organized in 3 tasks: Task 1, material and process; Task 2, characterization and Task 3, application.

Participants in task 1 are the following: CE/EMP, LMPC-ISM, PCAS and AIRGLASS. The work deals with obtaining good properties of monolithic silica aerogel concerning thermal conductivity and clarity and developing and investigating an in situ process to produce the material between double panes. PCAS will develop and produce new precursors which are able to replace the ones presently used.

The production of monolithic silica aerogel for test samples and prototypes will be carried out at LMPC-ISM and at AIRGLASS, at AIRGLASS the production will take place by means of an industrial pilot facility. By the supercritical drying stage of the production process both CO_2 and alcohol will be used as solvents. CE/EMP and LMPC-ISM will study and analyze the material during and after the production.

CSTB and PI/UW are participants in task 2 which deals with characterization of monolithic silica aerogel with respect to structure, mechanical, optical and thermal properties. The results obtained from the task are to be used both for task 1 to guide the development of the production process and for task 3 to design the aerogel glazings.

In task 3 the work concerns application of monolithic silica aerogel as transparent insulation material and spacer in evacuated glazings. The participants are the TIL/TUC, CSTB and CE/EMP. TIL/TUC, SSG and CSTB will propose and investigate different designs of aerogel glazings and windows regarding thermal performance and airtightness. Full scale prototypes will be made by SGG and thermally tested at TIL/TUC. One of the prototypes will be tested in one of the PASSYS test cells at TIL/TUC according to the common European test procedure. TIL/TUC, CSTB and CE/EMP will use simulation programs for the calculation of energy saving potential in typical buildings equipped with aerogel windows. SGG will make an estimate of the potential market for aerogel windows. Finally, prototypes mounted in outdoor test facilities at TIL/TUC and CE/EMP will serve as limited demonstration.

Concerning the production process the goals are to improve the thermal and optical properties of monolithic silica aerogel and to develop the in situ process during which the double glazing itself is used as a mould for the aerogel material. For the aerogel glazing and window it is expected that the centre heat loss coefficient (U-value) is below $0.4 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ and the overall U-value is below $0.5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (for a size of $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$) and that the requirement (mechanical, acoustical, climatic shelter etc.), for windows in general, are fulfilled.

The total budget of the project is 1,579,500 ECU. As AIRGLASS AB is a Swedish company EC does not contribute to their budget which is 624,000 ECU. In total the contribution of EC to the project is 670,000 ECU.

5. CALCULATED PERFORMANCE

5.1 An Overall Replacement of Glazings

The application of monolithic silica aerogel as transparent insulation material in glazings depends on the clarity of the material. The present optical quality of aerogel makes a general application of aerogel glazing in windows impossible when an undisturbed view is required. So, for the time being the remaining possibilities are windows in bathrooms, skylights and similar places.

Compared to other parts of the thermal envelope of buildings the window area has a shorter lifetime and it can thus be replaced several times during the lifetime of the building, an improvement of that part of the thermal envelope may thus be carried out more easily compared to the rest of the building.

In order to estimate the energy saving potential for space heating in the existing housing stock in Denmark, computer simulations have been carried out by means of the computer program SUNCODE [3]. The weather data of the Danish Test Reference Year were used and it was assumed that the clarity of aerogel glazings was adequate for a complete replacement of the existing glazing for evacuated monolithic silica aerogel glazings. The various types of

housing were divided into a number of categories concerning type, age and insulation standard. The result of the replacement of glazing was an annual energy saving of 23,400 TJ, about 20% of the energy consumption for space heating for the Danish housing stock, which is equivalent to a mean annual saving of about 800 MJ per square meter window. Furthermore, the temperature of the inner surface of the glazing increases during the heating season which improves the thermal comfort in the houses.

5.2 Energy Balance of a North Facing Window

Using the above simulation program and weather data the energy balance of a north facing aerogel window has been investigated. Due to the assumption that the window was mounted in a well insulated single family house the heating season only lasted from about the end of September to about the end of April, whereas the heating season normally lasts from mid-September to the end of May. The centre-of-glass U-value was set to $0.37 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ and the results of the calculations are shown in table 2.

Table 2: Calculated net energy gain of a north facing silica aerogel window on a monthly basis during the heating season for a Danish location. (*: only part of the month is considered).

Month [-]	Net energy gain [MJ m ⁻²]
September *)	0.5
October	8.2
November	-4.7
December	-15.7
January	-15.9
February	-2.1
March	17.5
April *)	18.1
Total	5.9

Over the heating season the aerogel window has a net energy gain of about 6 MJ per m² due to only diffuse irradiance. Further investigations are necessary to see whether this figure can be increased by changing the aerogel thickness. These calculations indicate, however, that even the diffuse fraction of the solar radiation can be utilized by means of a highly insulating and highly transparent window.

6. OUTLOOK

The prospects of the application of evacuated monolithic silica aerogel used as transparent insulation material in glazings for windows are very promising. In existing buildings a replacement of the ordinary glazings for aerogel glazings can yield substantial savings of the energy consumption for space heating. For new buildings it must be expected that a careful use of aerogel windows will greatly influence the space heating demand and the daylight conditions.

REFERENCES

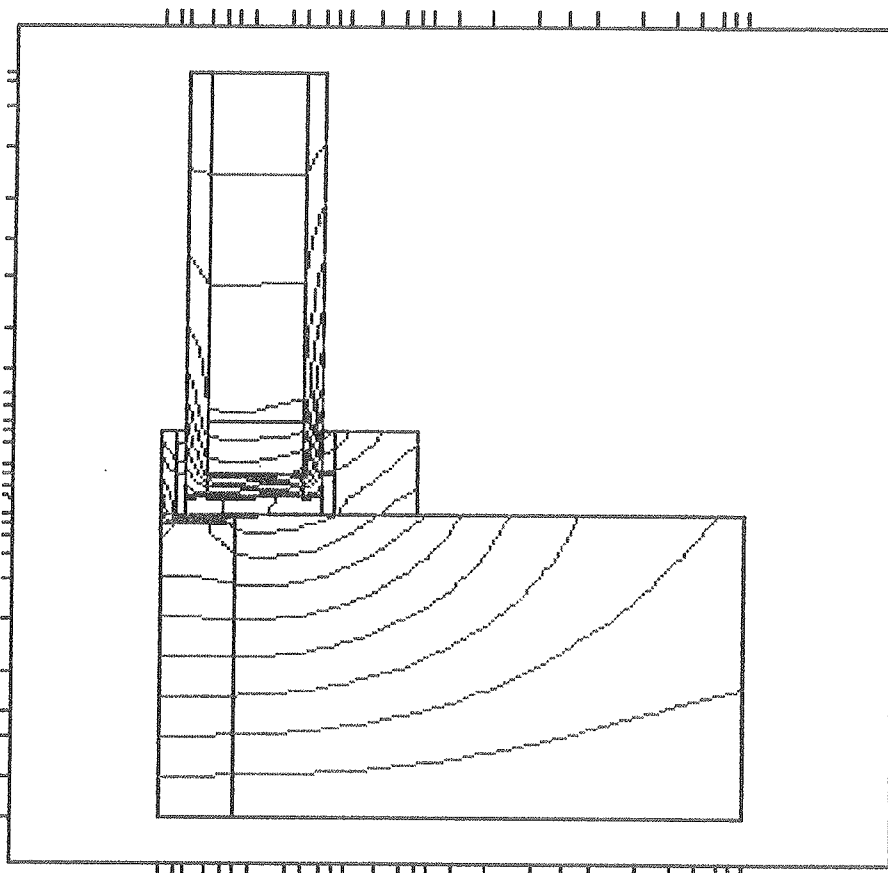
- [1] S. Henning, Airglass - Silica Aerogel, Swedish Council for Building Research, D7 (1990).
- [2] K.I. Jensen, J. Non-Crystalline Solids 145 (1992) 237.
- [3] O.B. Jørgensen, Silica aerogel-ruder i den danske boligmasse, Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, Report no. 208 (1989).

APPENDIKS 2

FRAME-beregningsmodeller af karm og rudens kantzoner.

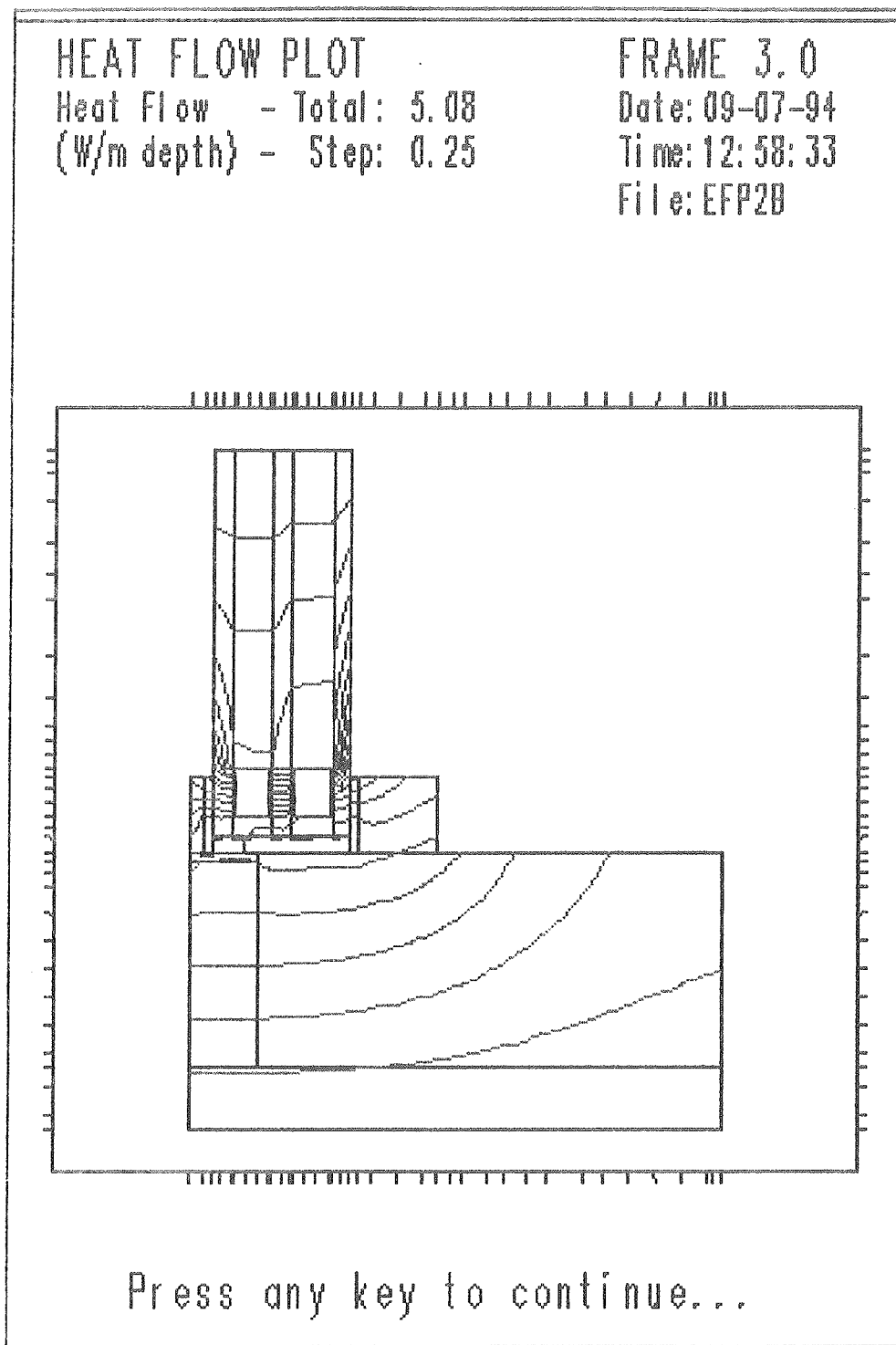
HEAT FLOW PLOT
Heat Flow - Total: 3.6
(W/m depth) - Step: 0.18

FRAME 3.0
Date: 09-07-94
Time: 13:08:24
File: EFP18

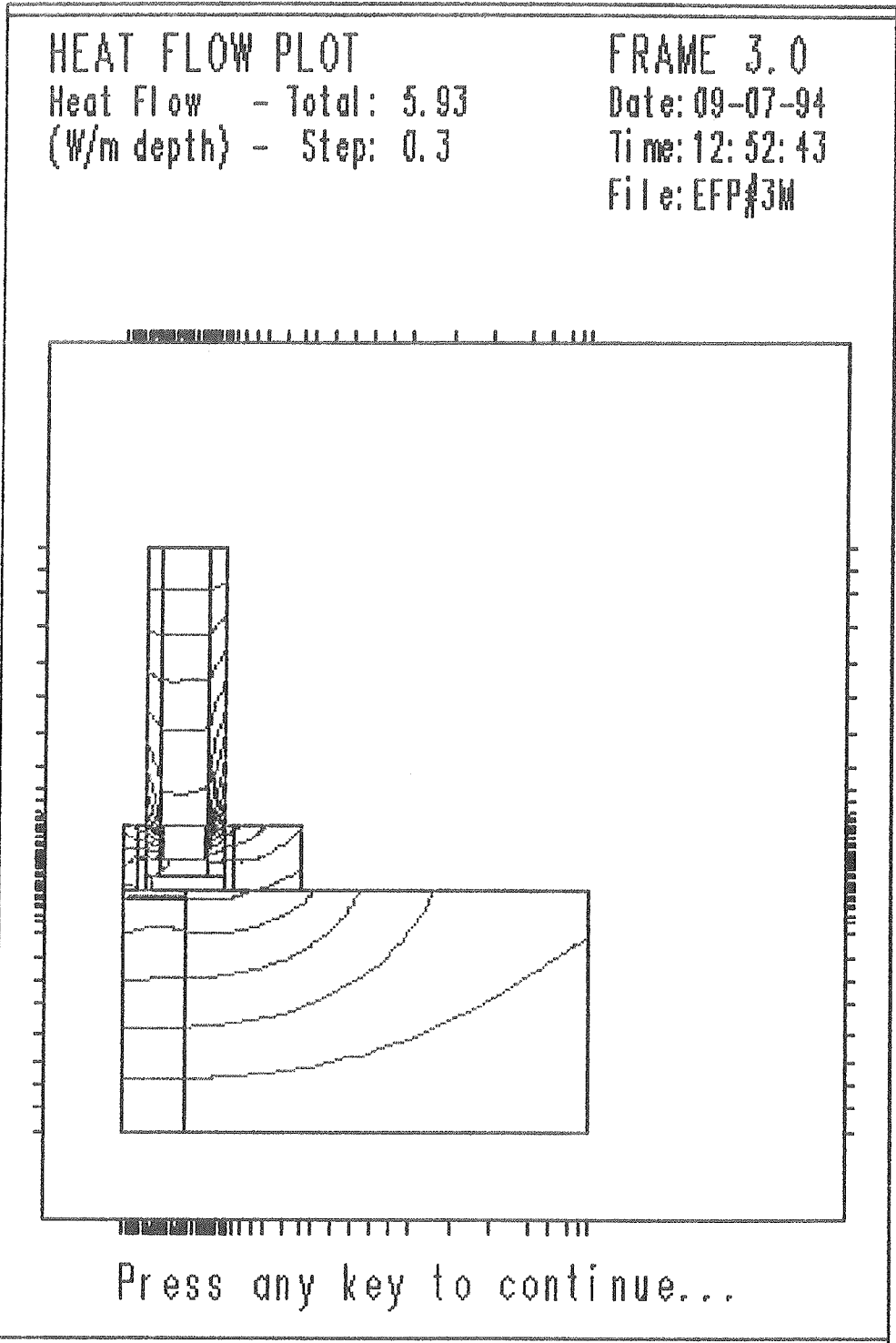


Press any key to continue...

Figur AP-2.1 Beregningsmodel i FRAME af karmen og aerogelrudens kantzone.



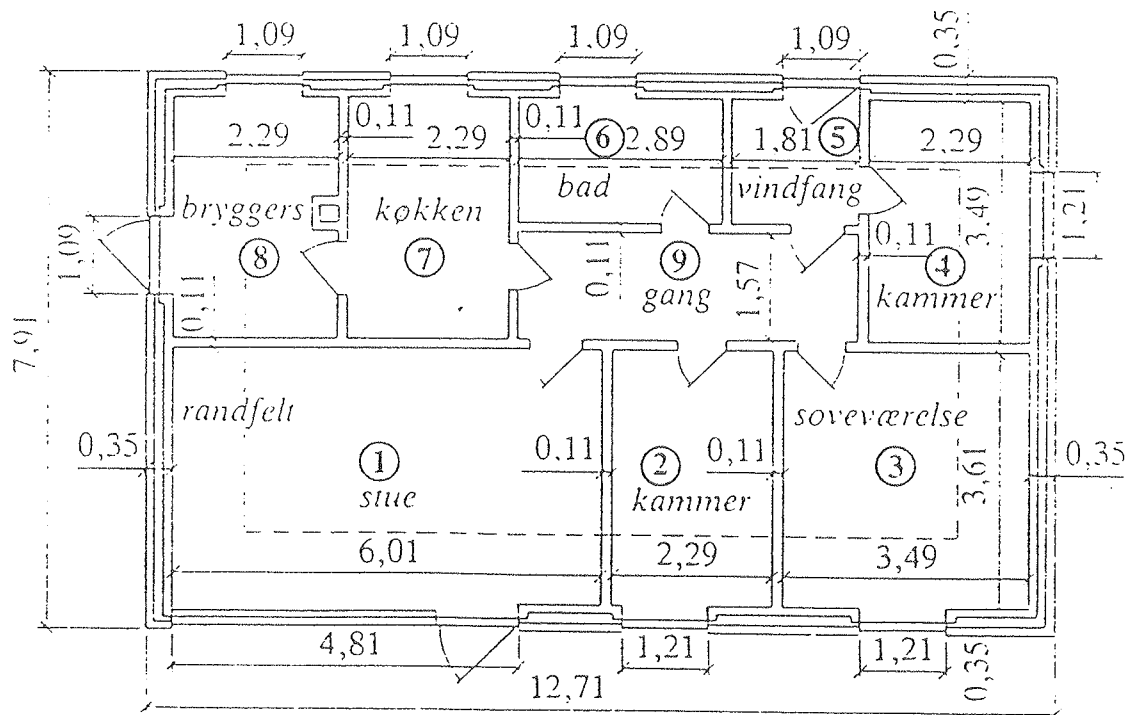
Figur AP-2.2 Beregningsmodel i FRAME af karmen og den 3 lags lavenergi rudes kantzone.



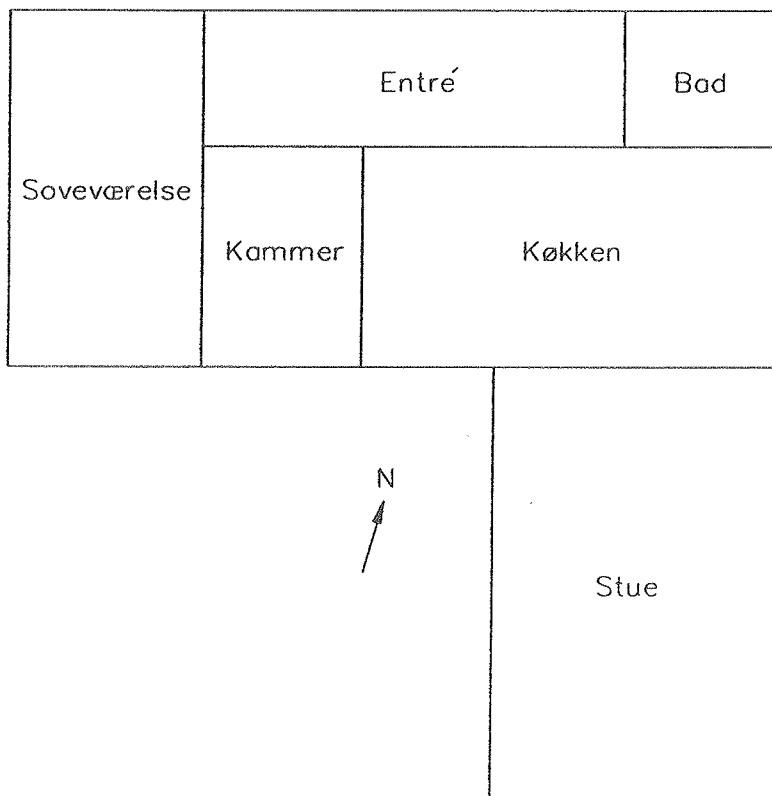
Figur AP-2.3 Beregningsmodel i FRAME af karmen og den 2 lags lavenergi rudes kantzone.

APPENDIKS 3

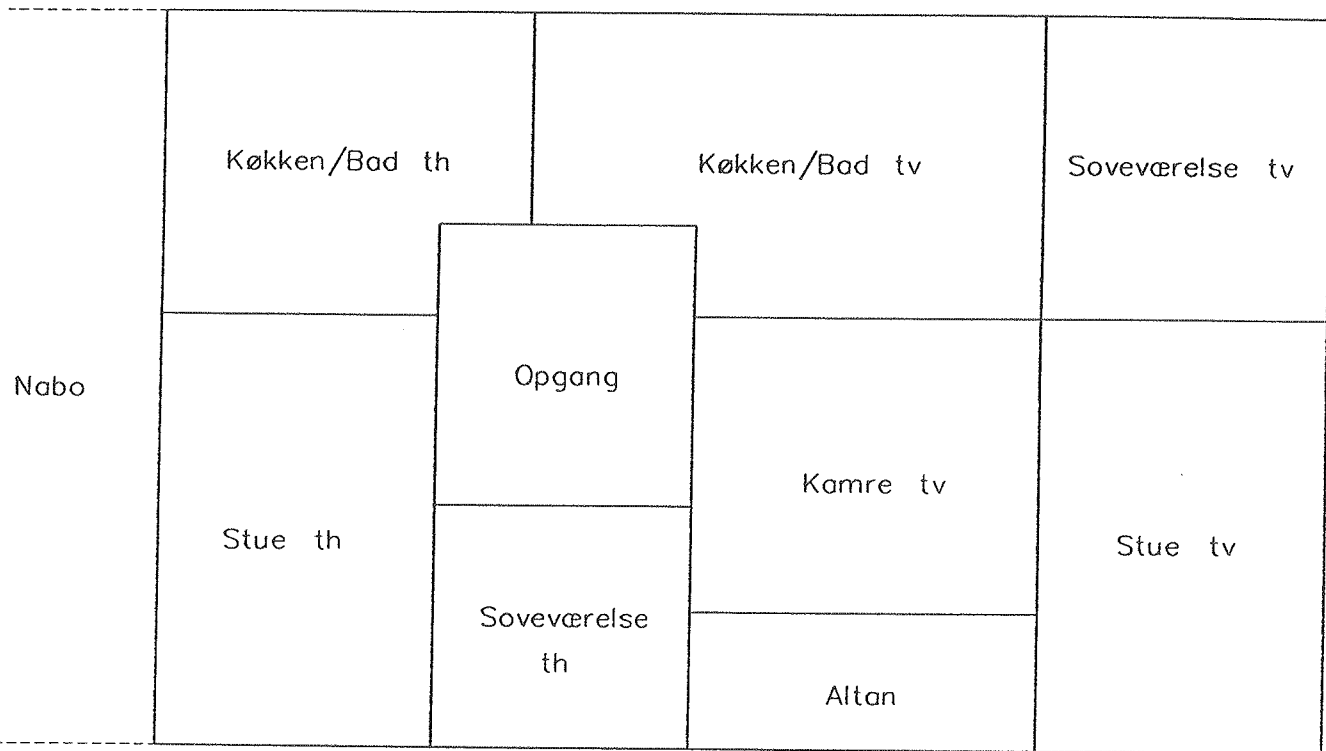
Grundskitser af parcelhus, rækkehus og lejlighed.



Figur AP-3.1 Grundskitse af parcelhus som benyttet i TSBI3-beregninger, fra /11/.



Figur AP-3.2 Grundskitse af rækkkehus som benyttet i TSBI3-beregninger.



Figur AP-3.3 Grundskitse af lejlighed som benyttet i TSBI3-beregninger. Lejligheden til venstre (tv) benyttes.

