Ramme-/karmkonstruktioner til højisolerende vinduer

Jørgen M. Schultz

Laboratoriet for Varmeisolering
Meddelelse nr. 237

Danmarks Tekniske Højskole
September 1992

LAVENERGIGRUPPEN:

Bjarne Saxhof, projektleder, civ.ing.
Mogens Byberg, lektor, civ.ing.
Søren Østergaard Jensen, civ.ing.
Jørgen M. Schultz, civ.ing.
Kirsten Engelund Thomsen, civ.ing.
Kim B. Wittchen, civ.ing.

Trykt på Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, Lyngby

FORORD

Nærværende rapport afslutter projektet "Ramme-/karmkonstruktioner til højisolerende vinduer" finansieret af Energistyrelsens Udviklingsprogram for Vedvarende Energi (J. nr. 51131/89-0612).

Rapporten beskriver de teoretiske overvejelser og beregninger samt de deraf fremkomne forslag til ramme-/karmkonstruktioner, der lever op til de højisolerende ruders isoleringsevne. Endvidere beskrives den eksperimentelle del af projektet, hvor en prototype på en ramme-/karmkonstruktion til højisolerende vinduer er opbygget og afprøvet. I projektet er der set på forskellige strategier for reduktion af varmetabet gennem ramme-/karmkonstruktionen, dels ved minimering af ramme-/karmarealet og dels ved kuldebroafbrydelse i konstruktionerne. Ved vurdering af de forskellige muligheder er det vindueshullets totale varmebalance, der er lagt til grund for bedømmelsen.

Sideløbende med dette projekt har der været udskrevet en konkurrence i Sverige om fremstilling af vinduer med en total U-værdi mindre end 0,9 W/m^2K, hvor hovedvægten lå i udvikling af ramme-/karmprofilet. Der er imidlertid en væsentlig forskel imellem konkurrencens og dette projekts udgangspunkt, idet der i nævnte konkurrence er fokuseret udelukkende på anvendelse af allerede markedsførte rudetyper, mens der i dette projekt er taget udgangspunkt i de forventede nye meget velisolerende ruder med monolitisk silica aerogel og vakuumruder. Da der alligevel er et vist sammenfald, er der i nærværende rapport et specielt kapitel omhandlende resultatet af konkurrencen.

Det teoretiske arbejde er grundlaget for opbygning af en prototype på en ramme-/karmkonstruktion til højisolerende vinduer, der er eksperimentelt undersøgt mht. resulterende varmetabskoefficient og overfladetemperaturer.

INDHOLDSFORTEGNELSE

Forord

Indholdsfortegnelse 4

Resumé 6

Summary 7

Indledning 8

1. Analyse af varmestrømme i vindueskonstruktioner 9
   1.1 Forudsætninger for varmestrømsanalysen 9
   1.2 Resultat af de udførte beregninger 11
   Betydning af ramme-/karmmaterialets varmeledningsevne 12
   Betydning af afstandsprofilet 13
   Betydning af almindelig ramme-/karmkonstruktion i forbindelse med højisolerende ruder 14

2. Løsningsmodeller for reduktion af varmetabet gennem ramme-/karmkonstruktionen 16
   2.1 Afstandsprofil og glaslister 16
   2.2 Ramme/karm til oplukkelige vinduer 22
   2.3 Karme til faste vinduer 29

3. Termisk optimal samling mellem væg og vindue 33
   3.1 Placering af vindue i forhold til væggens yderside 33
   3.2 Kuldebroafbrydelse i samling mellem væg og vindue 34

4. Vurdering af konstruktionsmæssige forhold for ramme-/karmkonstruktioner til højisolerende vinduer 35
   4.1. Styrkeforhold for ramme og karm 35
   4.2. Forhold vedrørende påvirkninger fra ude- og indeklima 37
   4.3. Monteringsforslag 40

5. Ramme-/karmprofiler udviklet i forbindelse med svensk konkurrence 41
   AB Överums Fönsterfabrik - Överum 2000 42
   Johs. Rasmussen A.S. - Nor-Dan 43

6. Konstruktion og afprøvning af prototype 45
   6.1 Konstruktion af rude med isolerende afstandsprofil 45
   6.2 Konstruktion af ramme-/karmprofilerne 45
   Referencekonstruktion 46
   Konstruktion med brudt kuldebro 47
   6.3 Beskrivelse af måleopstilling 49
   6.4 Resultat af målinger 51

7. Konklusion 55

8. Litteraturfortegnelse 59

LavEnergi Publikationer fra Laboratoriet for Varmeisolering (LfV), DTH 60

RESUMÉ

Udvikling af nye rudetyper med center U-værdier under 1 W/m^{2}K har gjort ramme-/karmarealet, der ofte udgør 25-30% af vinduets totale areal, til den isoleringsmæssigt svage del af vinduet. Formålet med projektet er at udvikle ramme-/karmkonstruktioner der isoleringsmæssigt svarer til de nye rudetyper, herunder vakuum- og aerogelruder, der endnu er under udvikling.

En detaljeret teoretisk analyse af varmestrømme i forskellige vindueskonstruktioner er udført med edb-programmet FRAME vers. 2.2. På baggrund af de udførte analyser er forskellige muligheder for ophævelse af kuldebrovirkningen i afstandsprofilet samt ramme- og karmkonstruktionen, set i forhold til rudens midte, blevet skitseret og analyseret. Ved vurdering af de forskellige løsningsmuligheder er det vinduets resulterende energibalance i fyringssæsonen (oktober-april inkl.) der lægges til grund.

Analyserne viser, at en forøgelse af glaslistehøjden til elimination af kuldebroen gennem afstandsprofilet medfører en dårligere energibalance for alle rudetyper pga. reduktionen i solindfaldet. Dette forhold er gældende for alle orienteringer af vinduer med lavere U-værdier end almindelige tolags termoruder.

Reduktion af varmetabet gennem ramme- og karmkonstruktionen udføres mest effektivt ved indførelse af en kuldebroafbrydelse i rudens forlængelse kombineret med en minimering af ramme-/karmarealet vendende mod det fri. Den afstivende del af vindueskonstruktionen placeres indvendigt eller udvendigt for rudens plan, og ruden fastholdes til denne via enkelte gennembrydninger af kuldebroafbrydelsen. Den teoretiske analyse viser, at det selv for aerogelruden er muligt med en kuldebroafbrydelse på 90 mm at opnå en total U-værdi for vinduet, der ligger meget tæt på center U-værdien. Reduceres tykkelsen af kuldebroafbrydelsen til 30 mm (lig rudetykkelsen) opnås en total U-værdi på 0,58 W/m^{2}K mod 0,42 W/m^{2}K ved rudens midte. Placeret i en traditionel ramme-/karmkonstruktion af træ ville den totale U-værdi være 0,75 W/m^{2}K, altså næsten det dobbelte af center-værdien.

Resultaterne fra analysen af oplukkelige vinduer kan umiddelbart overføres til faste vinduer. Derudover kan specielle indbygningsmuligheder i vægkonstruktionen i forbindelse med nybyggeri anvendes til reduktion af den totale U-værdi.

En referencekonstruktion i træ og en prototype med brudt kuldebro af 25 mm polystyrenskum er afprøvet under laboratorieforhold ved stationære forhold. Resultatet af målingerne viste en reduktion i den totale U-værdi fra ca. 1,7 W/m^{2}K til ca. 1,6 W/m^{2}K på trods af, at rudens center U-værdi er ca. 2,0 W/m^{2}K, og at glasarealet udgør ca. 60% af det samlede areal.

Udskiftning af aluminium-afstandsprofilet med et velisolerende profil af silicone (SUPERSPACER) resulterede ikke i en signifikant ændring af varmetabskoefficienten, men en forøgelse af overfladetemperaturen ved rudens bund på ca. 0,5 K blev målt.

Styrkemæssigt lever prototypen med kuldebroafbrydelsen fuldt ud op til de opstillede krav mht. stivhed og funktionsevne.

SUMMARY

The development of new glazing types with centre U-values below 1 W/m^2K has made the frames and casings (that often make up 25-30% of the total window area) the thermally weak part of new windows. The aim of this project is to analyse and develop frame solutions that correspond to the insulation level of new windows, incl superinsulating windows under current development, as silica aerogel and vacuum windows.

A detailed theoretical analysis of the heat flow through different frame types has been carried out, with the computer program FRAME vers. 2.2 as analysis tool. Based on the analyses, different ways of breaking the thermal bridges caused by the spacer, frame and casing (relative to the centre values) have been examined. The criteria used for evaluation of different solutions is the net heat balance for the window in the heating season (Oct-Apr incl).

The analyses show that increasing the height of the glazing bead to eliminate the thermal bridge effect of the spacer is a bad solution which increases the annual heat loss through loss of solar gain. The result is valid for all window orientations and all windows better than ordinary double glazing.

The most efficient way to reduce the heat loss through the frame and casing is to introduce a thermal break (in form of insulation material) in the same plane as the window pane and with at least the same thickness as the window pane - at the same time the exterior area of the frame and casing should be minimized. The supporting part of the frame should be constructed outside or inside the window pane, preferably inside, and the pane fastened to it at few points, thus creating only infinitesimal thermal bridges. Even for the aerogel window (centre U-value 0.42 W/m^2K) it is possible to match the centre U-value - it requires a thermal break 90 mm thick. With a 30 mm break, equal to the window thickness, the total U-value would be 0.58 W/m^2K, compared to 0.75 W/m^2K in the best traditional wooden frame.

The results derived for operable windows are directly transferable to fixed windows. Additionally, in new buildings it is possible to build fixed windows into the walls in ways that reduce the total U-value - an example is given in the report.

In addition to the theoretical analyses, a prototype window frame with a thermal break of 25 mm polystyrene has been built and tested in the laboratory under steady state conditions. For comparison, a standard wooden frame was tested. In both cases, a double-glazed window with 1 coated surface (centre U-value about 2.0 W/m^2K, glazed area about 60%) was used. The measurements confirmed the analyses by reducing the total U-value from about 1.7 to 1.6 W/m^2K.

The change in total U-value caused by replacement of the standard aluminium type spacer by a silicone profile (SUPERSPACER) was too small to show up as a significant value in the measurements, but an increase in surface temperature of 0.5 K along the bottom of the pane was registered.

The prototype meets the set requirements to strength and rigidity.

INDLEDNING

Varmetabet gennem en bygnings vinduer udgør, efterhånden som resten af klimaskærmen bliver bedre og bedre isoleret, op mod 30% af det totale varmetab på trods af det forholdsvis beskedne areal. Adskillige muligheder for at reducere dette tab har været undersøgt i teori og praksis, bl.a. anvendelse af isolerende skodder for reduktion af det natlige varmetab.

Sideløbende hermed er der sket en kraftig udvikling inden for vinduesbranchen begyndende med et ekstra lag glas i termoruderne, over udskiftning af luften mellem glaslagene med andre gasarter med mindre varmeledningsevne, til ikke mindst en reduktion af strålingstabet ved tynde metalbelægninger på glasset (coatede glas). Ved kombination af flere glaslag, gasfyldning med krypton eller xenon og coatede glas kan der opnås en varmetabskoefficient (U-værdi) på ca. 0,9 W/m^2K målt midt på ruden. Flere lag coatede glas reducerer imidlertid transmissionen af solenergi kraftigt.

I de senere år er der endvidere blevet forsket i udvikling af to alternative rudekonstruktioner, monolitisk silica aerogel ruder og vakuumruder, begge med en center U-værdi omkring 0,5 W/m^2K, men med en langt højere transmittans over for solenergi og lys. Hermed er rudens U-værdi af samme størrelsesorden som for resten af klimaskærmen plus, at der selv på en gråvejrsdag vil være en nettoenergitilførsel til huset gennem ruderne.

De angivne U-værdier er målt midt på ruden og indholder således ikke eventuelle randtab på grund af den mekaniske forbindelse (afstandsprofilet), der er nødvendig for at holde glaslagene sammen. Derudover skal ruden fastholdes i en ramme-/karmkonstruktion, der igen er fastgjort til bygningens bærende konstruktioner. Alle de indgående elementer påvirker således vinduets totale U-værdi, hvorved den reelle energibesparelse ved de højisolerende ruder bliver væsentlig reduceret.

Der er derfor et stort behov for at udvikle ramme-/karmsystemer, der isoleringsmæssigt svarer til de højisolerende rudetyper, og som reducerer betydningen af kuldebroen i vinduernes afstandsprofiler.

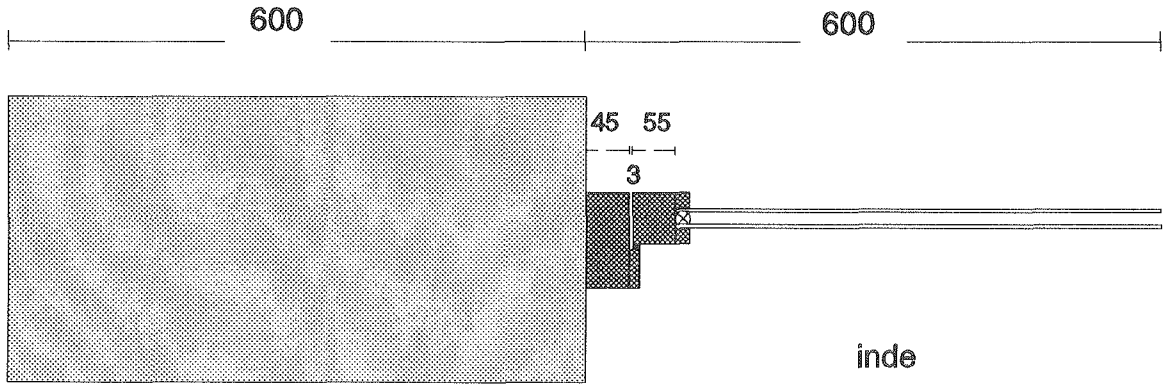
I dette projekt analyseres de termiske problemer omkring eksisterende ramme-/karmkonstruktioner ved anvendelse til højisolerende ruder. Baseret herpå udarbejdes og gennemregnes en række løsningsforslag til forbedring af ramme-/karmkonstruktioners isoleringsevne inkl. en eventuel forøgelse/formindskelse af vinduets solenergitransmission.

1. ANALYSE AF VARMESTRØMME I VINDUESKONSTRUKTIONER

Udvikling af ramme-/karmkonstruktioner til nye højisolerende rudetyper kræver en grundig analyse af den varmetekniske virkning af de forskellige elementer, der indgår i rude og ramme-/karmkonstruktionen. De vigtigste elementer er således rudens afstandsprofil, ramme-/karmmaterialet og udformningen af ramme og karm.

1.1. Forudsætninger for varmestrømsanalysen

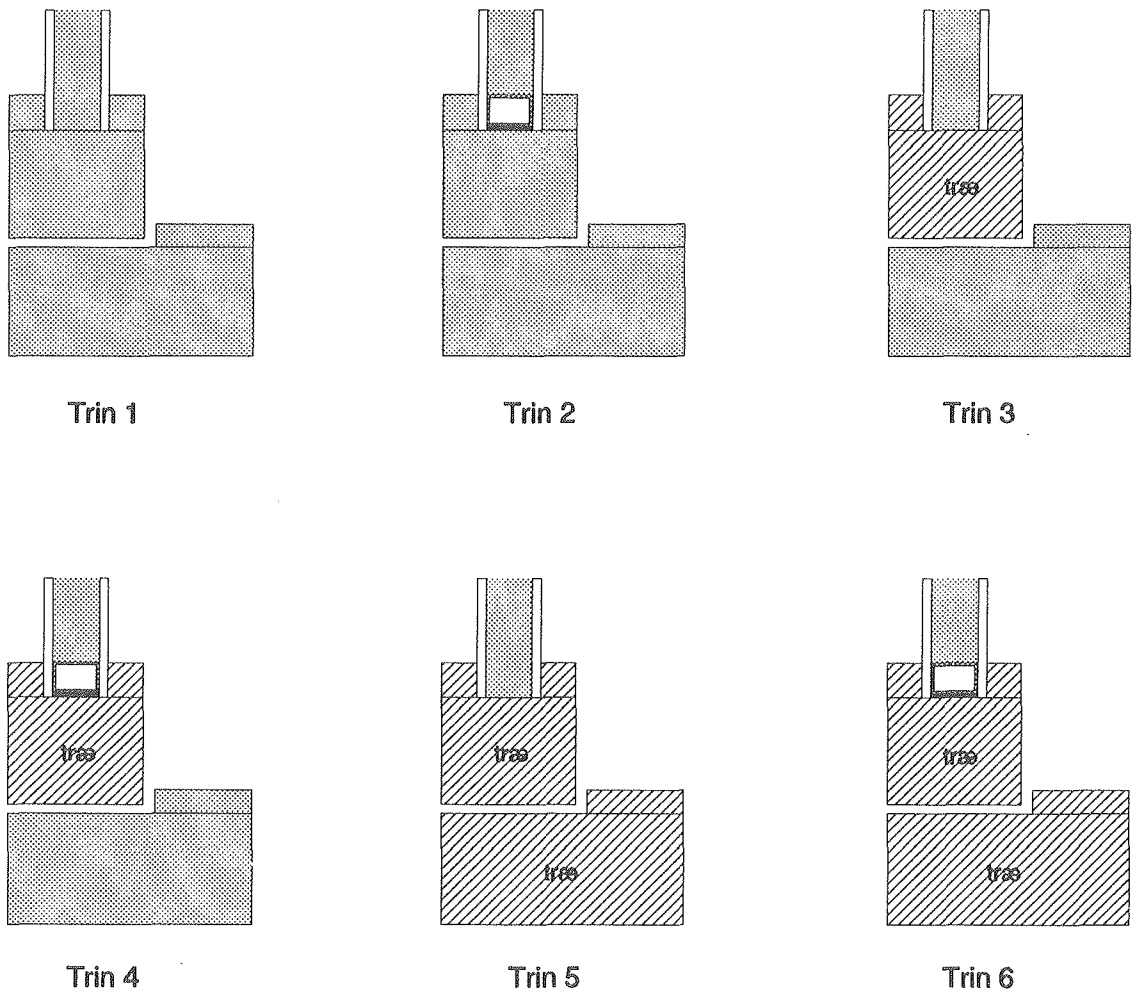
Analysen er foretaget ved hjælp af edb-programmet FRAME 2.2 [5], der er udviklet specielt til beregning af todimensionale stationære temperaturfelter i ramme-/karmkonstruktioner. Der er udført beregninger på fem forskellige rudetyper med center U-værdier på hhv. 2,73, 1,38, 0,94, 0,42 og 0,37 W/m^2K svarende til en almindelig tolags termorude, en tolags termorude med argonfyldning og ét lag lavemissionsbelægning, en trelags termorude med kryptonfyldning og ét lag lavemissionsbelægning, en delvis evakueret monolitisk silica aerogelrude [7] samt en vakuumrude [1]. Ruderne er monteret i en ramme-/karmkonstruktion med dimensioner svarende til en normal vindueskonstruktion af træ, der er placeret centreret i en 30 cm væg bestående udelukkende af isoleringsmateriale med en varmeledningsevne λ på 0,04 W/mK (figur 1.1.1). Vindueshullets dimensioner er $1{,}2 \cdot 1{,}2$ m^2 med et glasareal på 67%.



Figur 1.1.1. Opbygning af konstruktion anvendt ved analyse af forskellige ramme-/karmkonstruktioner.

For hver rudetype er der udført seks beregninger, der trinvis viser betydningen for varmestrømmene af de enkelte elementer, der indgår i konstruktionen. I den første beregning i hver serie er rudens afstandsprofil fjernet og varmeledningsevnen for hhv. ramme og karm tilpasset

således, at den endimensionale varmemodstand er lig varmemodstanden i rudens centrum. Herved opnås en endimensionalt set homogen konstruktion med samme varmemodstand af alle konstruktionsdele og dermed ingen kuldebroeffekt. I næste trin indsættes et almindeligt anvendt afstandsprofil i ruden. I trin tre anvendes ruden uden afstandsprofil, men varmeledningsevnen af rammematerialet ændres til 0,12 W/mK svarende til en træramme, der er valgt som referencetilfældet. Den fjerde beregning udføres på konstruktionen fra trin tre, men med almindeligt afstandsprofil i ruden. Trin fem og seks svarer til trin tre og fire, men med ændring af karmmaterialet til træ (varmeledningsevne = 0,12 W/mK). De seks trin i beregningen er anskueliggjort i figur 1.1.2.



Figur 1.1.2. De seks trin anvendt ved analyse af forskellige vindueskonstruktioner.

1.2. Resultat af de udførte beregninger

Uddata fra edb-programmet indeholder en U-værdi beregnet for ramme-/karmarealet og en U-værdi for ruden. Den resulterende U-værdi for hele vinduet beregnes ved arealvægtning af de to U-værdier. Resultatet af beregningerne er vist i tabel 1.2.1, hvor der for hvert trin er angivet den resulterende U-værdi samt forskellen i procent i forhold til center U-værdien for ruden.

Tabel 1.2.1. Resultat af varmestrømsanalysen udtrykt ved den resulterende U-værdi (W/m^2K) for 5 forskellige rudetyper ved seks forskellige udformninger af vindueskonstruktionen. Tallene i parantes angiver ændringen i procent i forhold til rudens center U-værdi. Nedenstående beskrivelse af rudetyperne er opbygget med det inderste lag glas først.

Rudetype I: 4 mm glas, 12 mm luft, 4 mm glas
Rudetype II: 4 mm coated glas, 12 mm argon, 4 mm glas
Rudetype III: 4 mm coated glas, 9 mm krypton, 4 mm glas, 9 mm krypton, 4 mm glas
Rudetype IV: 4 mm glas, 20 mm delvis evakueret monolitisk silica aerogel, 4 mm glas
Rudetype V: 4 mm coated glas, 0,5 mm vakuum, 4 mm glas

Rudetype	U_{center}	Trin 1	Trin 2	Trin 3	Trin 4	Trin 5	Trin 6
Type I	2,73	2,95 (8,2%)	2,98 (9,0%)	2,76 (1,2%)	2,78 (1,9%)	2,42 (-11,5%)	2,44 (-10,7%)
Type II	1,38	1,47 (6,4%)	1,58 (14,8%)	1,50 (8,6%)	1,62 (17,2%)	1,43 (3,6%)	1,55 (12,2%)
Type III	0,94	1,01 (7,3%)	1,14 (21,7%)	1,11 (17,8%)	1,25 (32,9%)	1,11 (17,8%)	1,26 (34,0%)
*Type IV	0,42	0,48 (14,1%)	0,54 (28,3%)	0,65 (55,5%)	0,71 (68,9%)	0,75 (78,9%)	0,80 (91,5%)
Type V	0,37	0,49 (32,2%)	0,57 (53,7%)	0,71 (90,7%)	0,78 (110,4%)	0,80 (117,3%)	0,88 (137,0%)

*Ved indsættelse af afstandsprofil i denne rudetype er anvendt et specielt udviklet profil [7].

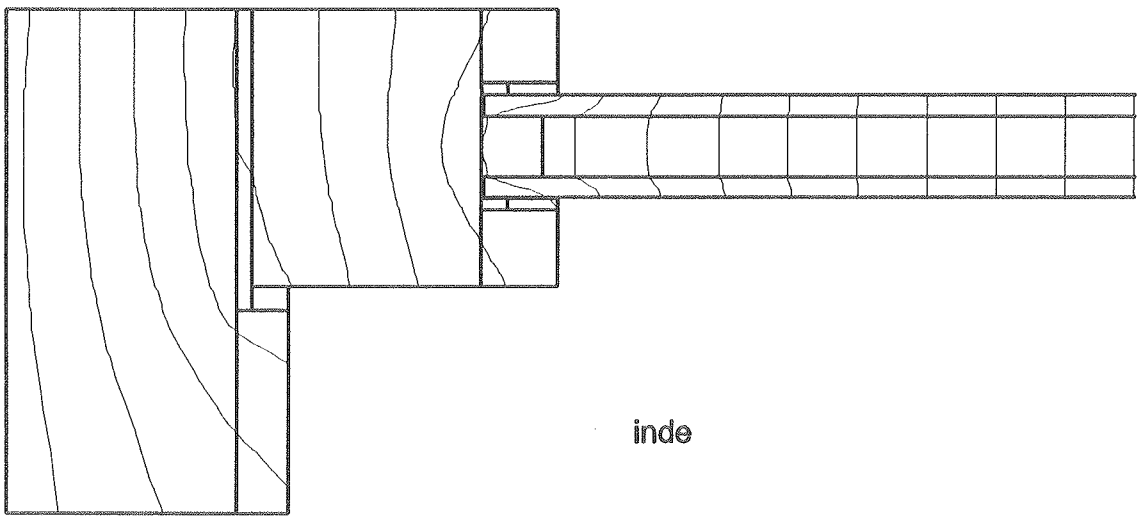
De anførte center U-værdier er beregnede værdier baseret på edb-programmets beregning af hulrumsmodstanden i rudekonstruktionen. I nogle tilfælde er der af beregningstekniske grunde foretaget visse forenklinger i inddata, hvorfor center U-værdierne ikke præcist afspejler de virkelige indbyrdes forhold mellem de anførte rudetyper.

Ovenstående resultater viser generelt, at kuldebrovirkningen i afstandsprofil og ramme-/karmkonstruktionen får en væsentlig større betydning, jo bedre rudernes isolans er, hvilket også er projektets udgangspunkt.

Betydning af ramme-/karmmaterialets varmeledningsevne

Betragtes kolonnen mærket Trin 1 i tabel 1.2.1, der indeholder resultater beregnet for en konstruktion uden afstandsprofil i ruden og med endimensionale varmemodstande af ramme og karm, der er lig varmemodstanden for rudens midte, fremgår det, at der er et betydeligt ekstra varmetab pga. de flerdimensionale strømninger. Dette er vist i figur 1.2.1, hvor varmestrømslinierne for rudetype II ved "Trin 1" beregningen er indtegnet. På figuren er indtegnet et afstandsprofil i ruden symboliseret ved et rektangel, men varmeledningsevnen er sat lig den ækvivalente varmeledning i rudens hulrum. Det største bidrag til det forøgede varmetab stammer fra varmeledning gennem det inderste lag glas gennem rammematerialet og ud gennem det yderste lag glas. Resultatet af varmestrømsanalysen viser, at den endimensionale varmemodstand af ramme-/karmmaterialet bør være større end varmemodstanden ved rudens midte. I tilfældet med rudetype I kan dette praktisk taget opnås ved anvendelse af en træramme (tabel 1.2.1, Trin 3), hvor det ekstra varmetab kun er på 1,2%.

For vakuumruden vil det være umuligt at opnå en væsentlig nedsættelse af varmestrømmen mellem de to lag glas gennem rammematerialet pga. den meget lille indbyrdes afstand på ca. 0,5 mm mellem glasskiverne.

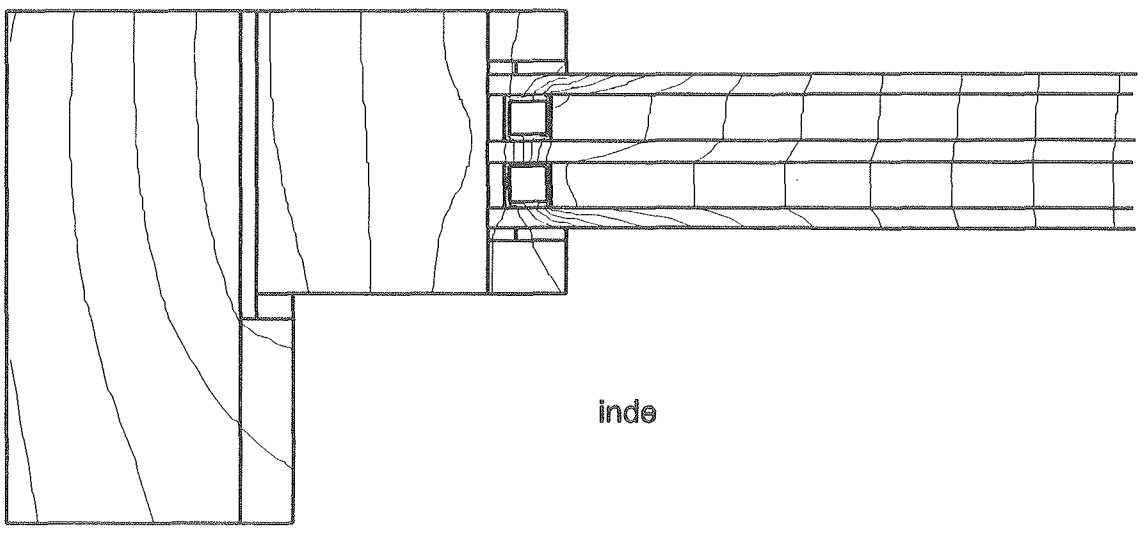


Figur 1.2.1. Varmestrømme gennem vindueskonstruktion med rudetype II uden afstandsprofil. Endimensionale varmemodstande af hhv. ramme og karm lig varmemodstand ved rudens midte.

Betydning af afstandsprofilet

Afstandsprofilets betydning for den resulterende U-værdi træder tydeligt frem, hvis kolonnerne "Trin 1" - "Trin 2", "Trin 3" - "Trin 4", "Trin 5" - "Trin 6" sammenlignes parvis. I tilfældet med en tolags termorude (type I) ses afstandsprofilet af aluminium kun at øge U-værdien med ca. 0,8%. For rude type II er afstandsprofilets betydning øget og er årsag til en forøgelse af U-værdien med ca. 9%. Den tilsvarende forøgelse for rude type III er på ca. 15%. Ved rudetype IV (delvis evakueret aerogelrude) øges U-værdien med ca. 13% på trods af, at der er udviklet et afstandsprofil med meget lille varmeledningsevne sammenlignet med det traditionelle aluminiumprofil. For vakuumruden, hvor den mekaniske forbindelse opnås ved sammensmeltning af de to glaslag, er stigningen i U-værdien på ca. 20% i forhold til center værdien.

Forøgelsen af varmetabet skyldes en meget kraftig varmeledning gennem afstandsprofilet, hvilket fremgår af figur 1.2.2, der viser varmestrømslinierne beregnet for rudetype III under trin 2. Figuren viser i øvrigt også, hvorledes varmestrømmen trænger op i den midterste glasskive, der er uden lavemissionsbelægning.



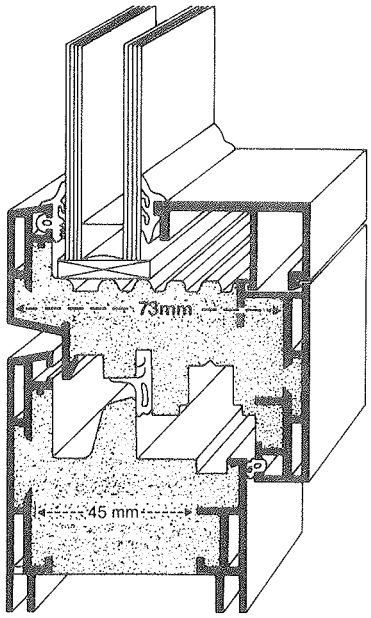
Figur 1.2.2. Varmestrømme gennem vindueskonstruktion med rudetype III med afstandsprofil af aluminium. Endimensionale varmemodstande af hhv. ramme og karm lig varmemodstand ved rudens midte.

Betydning af almindelig ramme-/karmkonstruktion i forbindelse med højisolerende ruder

Almindeligt anvendte vindueskonstruktioner i Danmark er lavet enten af træ eller af plastprofiler med indlagt forstærkning af stål eller aluminium. I DS418 - beregning af bygningers varmetab [3] angives U-værdien for ramme-/karmarealet for hhv. trævinduer og armerede plastprofiler til 1,6 W/m^{2}K og 4,0 W/m^{2}K. Adskillige undersøgelser har vist, at trævinduet er den termisk set bedste konstruktion. Alligevel viser resultaterne i tabel 1.2.1, at selve ramme-/karmkonstruktionen resulterer i en forøgelse af vinduets U-værdi med ca. 5%, 20% og 80% for henholdsvis rudetype II, III og IV, når ramme-/karmmaterialet er træ. Dette skyldes, at ramme-/karmarealet udgør en meget stor del af vindueshullets areal samtidig med, at isoleringsevnen er væsentlig ringere end rudernes. En reduktion af ramme- og karmbredden vil kunne reducere kuldebroeffekten og samtidig tillade passage af en større mængde solenergi gennem det samme vindueshulareal. Det skal dog sikres, at den mekaniske styrke og stivhed opretholdes, så ruderne ikke udsættes for vridninger, der vil reducere deres levetid. Dette forhold vil være specielt vigtigt for vakuumruder og aerogelruder.

I forbindelse med nærværende projekt er der foretaget en gennemgang af ramme-/karmprofiler på det danske marked. Det var imidlertid ikke muligt at finde nogle forhandlere, der havde ramme-/karmprofiler med bedre isoleringevne end et normalt trævindue. Et canadisk firma Owens-Corning fremstiller et vindue i glasfiber uden indlagt stålprofil [8], men derimod med en kerne af isoleringsmateriale. Den ubrudte glasfiberkonstruktion vil imidlertid stadig resultere i en U-værdi, der er højere end for de traditionelle trævinduer.

I Tyskland fremstilles et profil, PURAL [10], udelukkende af polyurethanskum (PUR-skum) beklædt med aluminium. Der er således ikke nogen gennemgående kuldebroer, men på grund af stabilitetskravet er densiteten af PUR-skummet temmelig høj og har dermed en relativ stor varmeledningsevne (0,07 W/mK). Fabrikanten (PURAL Profilwerk GmbH) opgiver U-værdien for ramme-/karm til 1,5 W/m^{2}K, hvilket er lidt bedre end en normal trækonstruktion. Opbygningen af profilet er vist i figur 1.2.3.



Figur 1.2.3. Tværsnit af PURAL profilet uden gennemgående kuldebroer. Total U-værdi for ramme og karm = 1,5 W/m²K.

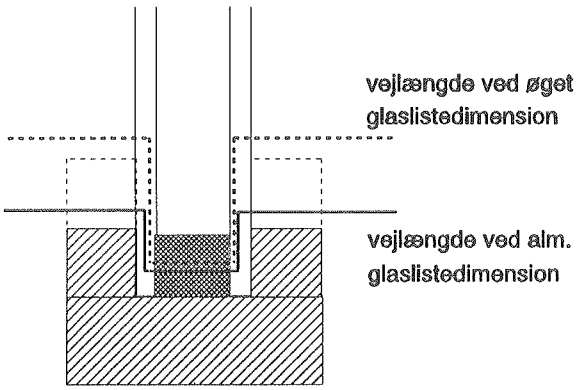
2. LØSNINGSFORSLAG TIL REDUKTION AF VARMETABET GENNEM RAMME-/KARMKONSTRUKTIONEN

I dette kapitel analyseres forskellige teoretiske muligheder for at forbedre ramme-/karmkonstruktionens termiske virkemåde. Der er således kun i ringe omfang taget højde for hhv. produktionstekniske, konstruktionstekniske og styrkemæssige problemer, som følge af de skitserede løsningsmuligheder. I kapitel 4 bliver de konstruktionsmæssige forhold nærmere behandlet.

2.1. Afstandsprofil og glaslister

Dette afsnit om afstandsprofiler og glaslister er gældende for såvel oplukkelige som faste vinduer. I det følgende dækker betegnelsen afstandsprofil over selve profilet plus anvendte klæbemidler og forseglingsmaterialer anvendt ved samling af ruderne. Afstandsprofilets funktion er at skabe den fornødne mekaniske kontakt mellem glaslagene i en flerlagsrude samt sørge for en tilstrækkelig lufttæthed. Sidstnævnte funktion skal dels forhindre dugdannelse i ruden og dels forhindre, at ædelgasserne i de gasfyldte ruder udskiftes med almindelig atmosfærisk luft. I forbindelse med aerogel- og vakuumruder skal afstandsprofilet ydermere sikre det undertryk hhv. vakuum, der er mellem glaslagene. Det er således ikke muligt at undvære afstandsprofilet, hvorfor denne kuldebro må forsøges reduceret på andre måder.

Beregningerne i kapitel 1 og figur 1.2.2 viser tydeligt hvorledes varmen ledes ned gennem det varme glaslag bag glaslisten, gennem afstandsprofilet og videre op gennem det kolde glaslag, hvor den afgives til udeluften. Nedsættelse af denne varmestrøm kan opnås ved at forøge højden af glaslisterne således, at varmemodstanden gennem glaslagene forøges pga. den forøgede vejlængde (figur 2.1.1).



Figur 2.1.1. Forøgelse af varmemodstand gennem glaslagene ved forøgelse af glaslistehøjden.

I tabel 2.1.1 er vist den højde af glaslisterne, der netop resulterer i, at det ekstra varmetab pga. afstandsprofilet elimineres. Endvidere indeholder tabellen det resulterende transparente areal samt nettovarmetabet for et sydvendt vindue beregnet ud fra referenceårets månedsmiddelværdier af solindfald og udetemperatur [6].

Tabel 2.1.1. Energimæssig sammenligning af vinduer med almindeligt anvendte glaslister (træ, højde = 15 mm) og vinduer med forøget glaslistehøjde afpasset således, at kuldebroen pga. vinduets afstandsprofil netop elimineres. Nettovarmetabet i kWh er angivet for perioden oktober-april inkl. for et sydvendt vindue med bruttoareal = $1{,}2 \cdot 1{,}2$ m^2 med fri horisont. Der regnes med en konstant indetemperatur på 20 °C og med, at den transmitterede solvarme udnyttes 100%. Udnyttelsesgraden vurderes at være realistisk i almindeligt byggeri, men lidt for optimistisk i lavenergibyggeri.
Rudetyperne er beskrevet indefra.
Rudetype I: 4 mm glas, 12 mm luft, 4 mm glas
Rudetype II: 4 mm coated glas, 12 mm argon, 4 mm glas
Rudetype III: 4 mm coated glas, 9 mm krypton, 4 mm glas, 9 mm krypton, 4 mm glas
Rudetype IV: 4 mm glas, 20 mm delvis evakueret monolitisk silica aerogel, 4 mm glas
Rudetype V: 4 mm coated glas, 0,5 mm vakuum, 4 mm glas

Rudetype	Glasliste-højde	Transparent areal	Rudens solvarme-transmittans [6]	Vinduets U-værdi (tabel 1.2.1)	Nettovarmetab
-	mm	m^2	-	W/m^{2}K	kWh
Type I	15 19	0,968 0,895	0,76	2,44 2,42	5 25
Type II	15 60	0,968 0,799	0,65	1,55 1,43	-61 -32
Type III	15 100	0,968 0,663	0,60	1,26 1,11	-77 -23
Type IV	15 120	0,968 0,599	0,70	0,80 0,75	-172 -75
Type V	15 125	0,968 0,584	0,65	0,88 0,80	-143 -53

Tabel 2.1.1. viser, at en elimination af kuldebroen i rudens afstandsprofil ved forøgelse af glaslistens højde reducerer det transparente areal med ca. 40% for vakuumruden og ruden med AIRGLASS med deraf følgende forringelse af rudens varmebalance. Selv for en tolags gasfyldt rude med én lavemissionsbelægning reduceres det transparente areal med ca. 20% og energitilførslen i fyringssæsonen (oktober-april) halveres.

Tilsvarende findes nettovarmetabene for nord-, øst- og vestvendte vinduer som vist i tabel 2.1.2.

Tabel 2.1.2. Nettovarmetab (kWh) i fyringssæsonen for et 1,2 · 1,2 m^2 vindue med fri horisont vendende mod hhv. nord, øst og vest, dels for glaslistehøjde på 15 mm og dels for en glaslistehøjde afpasset således, at kuldebroen pga. vinduets afstandsprofil netop elimineres. Der regnes med en konstant indetemperatur på 20 °C og med, at den transmitterede solvarme udnyttes 100%. Udnyttelsesgraden vurderes at være realistisk i almindeligt byggeri, men lidt for optimistisk i lavenergibyggeri.
Rudetyperne er beskrevet indefra.
Rudetype I: 4 mm glas, 12 mm luft, 4 mm glas
Rudetype II: 4 mm coated glas, 12 mm argon, 4 mm glas
Rudetype III: 4 mm coated glas, 9 mm krypton, 4 mm glas, 9 mm krypton, 4 mm glas
Rudetype IV: 4 mm glas, 20 mm delvis evakueret monolitisk silica aerogel, 4 mm glas
Rudetype V: 4 mm coated glas, 0,5 mm vakuum, 4 mm glas

Rudetype	Glaslistehøjde	Nord	Øst/vest
-	mm	kWh	kWh
Type I	15 19	228 233	152 163
Type II	15 60	130 125	64 71
Type III	15 100	99 98	38 56
Type IV	15 120	33 52	-37 8
Type V	15 125	48 62	-18 22

En forøgelse af glaslistehøjden vil betyde en forringelse af varmebalancen også for øst- og vestvendte vinduer. For de nordvendte vinduer kan der opnås en beskeden energibesparelse for rudetype I-III, mens der for rudetyperne IV og V vil være en negativ indflydelse på energibalancen i fyringssæsonen.

En alternativ fremgangsmåde er at øge isolansen af glaslisten ved forøgelse af dens tykkelse eller andet materialevalg. Denne mulighed er analyseret ved at gentage beregningerne fra tabel 2.1.1 med glaslister af isoleringsmateriale med en varmeledningsevne på 0,04 W/mK (tykkelsen uforandret). Resultatet af analysen er vist i tabel 2.1.3.

Tabel 2.1.3. Energimæssig sammenligning af vinduer med glaslister af isolering (λ = 0,04 W/mK) med højden 15 mm og vinduer med forøget glaslistehøjde afpasset således, at kuldebroen pga. vinduets afstandsprofil netop elimineres. Nettovarmetabet i kWh er angivet for perioden oktober-april inkl. for et sydvendt vindue med bruttoareal = 1,2 · 1,2 m^2 med fri horisont. Der regnes med en konstant indetemperatur på 20 °C og med, at den transmitterede solvarme udnyttes 100%. Udnyttelsesgraden vurderes at være realistisk i almindeligt byggeri, men lidt for optimistisk i lavenergibyggeri.
Rudetyperne er beskrevet indefra.
Rudetype I: 4 mm glas, 12 mm luft, 4 mm glas
Rudetype II: 4 mm coated glas, 12 mm argon, 4 mm glas
Rudetype III: 4 mm coated glas, 9 mm krypton, 4 mm glas, 9 mm krypton, 4 mm glas
Rudetype IV: 4 mm glas, 20 mm delvis evakueret monolitisk silica aerogel, 4 mm glas
Rudetype V: 4 mm coated glas, 0,5 mm vakuum, 4 mm glas

Rudetype	Glasliste-højde	Transparent areal	Rudens solvar-metransmittans [6]	Vinduets U-værdi	Nettovarmetab
-	mm	m^2	-	W/m^2K	kWh
Type I	15 17	0,968 0,960	0,76	2,40 2,38	1 1
Type II	15 40	0,968 0,872	0,65	1,51 1,41	-66 -53
Type III	15 60	0,968 0,799	0,60	1,23 1,10	-81 -56
Type IV	15 70	0,968 0,764	0,70	0,79 0,74	-173 -122
Type V	15 70	0,968 0,764	0,65	0,84 0,78	-148 -102

En tredobling af glaslistens varmemodstand (svarende til udskiftning af træglaslister med glaslister af isolering) reducerer den nødvendige glaslistehøjde med ca. 50%, men fører stadig til en betragtelig reduktion af det transparente areal - i tilfældet med vakuum- og aerogelruderne ca. 20%. Bibeholdes en glaslistehøjde på 15 mm betyder den ændrede varmemodstand af glaslisten en forbedring af energibalancen for vinduet med ca. 5%. Andre orienteringer af vinduet viser samme indbyrdes resultater som ved beregningen udført med glaslister af træ.

Afstandsprofilets betydning for vinduets energibalance ses af ovenstående analyser at være betragtelig og vanskelig at ophæve ved hjælp af ændrede glaslister. En mulighed, der ikke er behandlet her, er anvendelsen af transparente isoleringsmaterialer til glaslisterne, hvorved en del af reduktionen i solvarmetilførselen vil kunne undgås. Imidlertid vil den praktiske anvendelighed være begrænset af indkapslingsproblemer og udseende.

Udviklingsarbejdet med fremstilling af nye afstandsprofiler med lav varmeledningsevne er i de senere år taget til, og der findes flere kommercielt tilgængelige produkter, der dog endnu ikke er taget i anvendelse af de danske rudefabrikanter. Et af disse produkter, SUPERSPACER [11], består udelukkende af silicone indeholdende et fugtabsorberende materiale og er påklæbet en tynd aluminiumsfolie som dampspærre. Ved montering forsegles yderligere med en butylfuge el. lignende fugemateriale. Varmeledningsevnen for SUPERSPACER er angivet til 0,12 W/mK. Produktet er tænkt til anvendelse i almindelige termoruder såvel som i gasfyldte ruder med lavemissionsbelægning. Anvendelse i aerogelruder kræver en nærmere undersøgelse af lufttætheden i forbindelse med større trykforskelle over afstandsprofilet. I vakuumruder er anvendelsen udelukket. Udskiftning af aluminiumprofilet i rudetyperne I, II og III med SUPERSPACER-profilet får følgende indflydelse på vinduets energibalance (tabel 2.1.4):

Tabel 2.1.4. Beregnede U-værdier for 1,2 · 1,2 m^2 vindue med 67% glasareal for forskellige typer afstandsprofil i ruden. Glaslisten er af træ, 15 mm høj.
Rudetyperne er beskrevet indefra.
Rudetype I: 4 mm glas, 12 mm luft, 4 mm glas
Rudetype II: 4 mm coated glas, 12 mm argon, 4 mm glas
Rudetype III: 4 mm coated glas, 9 mm krypton, 4 mm glas, 9 mm krypton, 4 mm glas

Rudetype	U_{CENTER} (tabel 1.2.1)	$U_{UDEN\ AFSTANDSPROFIL}$ (tabel 1.2.1, Trin 5)	$U_{SUPERSPACER}$ -	$U_{ALUMINIUMPROFIL}$ (tabel 1.2.1, Trin 6)
-	W/m^2K	W/m^2K	W/m^2K	W/m^2K
Type I	2,73	2,42	2,40	2,44
Type II	1,38	1,43	1,50	1,55
Type III	0,94	1,11	1,19	1,26

Resultaterne i tabel 2.1.4 viser, at en udskiftning af aluminiumsafstandsprofilet med det bedre isolerende SUPERSPACER-profil maksimalt ændrer varmetabskoefficienten med ca. 6%. Sammenlignes med værdierne for ruder uden afstandsprofil fremgår det tydeligt, at afstandsprofilet stadig udgør en væsentlig kuldebro, der praktisk taget er næsten umulig at kompensere for. En effektiv kuldebroafbrydelse kræver, at afstandsprofilet har en varmeledningsevne meget tæt på den ækvivalente varmeledningsevne for hulrummet imellem glaslagene.

Dette kan umiddelbart realiseres ved at forøge afstanden mellem rudens glaslag, idet varmemodstanden mellem glassene kun ændres svagt for glasafstande større end ca. 15 mm, hvorimod der er en lineær sammenhæng for afstandsprofilet. Anvendes et afstandsprofil af SUPERSPACER-typen kræves imidlertid en glasafstand på ca. 72 mm, hvilket konstruktionsmæssigt er urealistisk. Derimod vil det være muligt for ruder uden gasfyldning at opsplitte ruden i to selvstændige ruder i hver sin ramme, hvorved kuldebroafbrydelsen er opnået. Alternativt kan anvendes forseglede ruder med gasfyldning suppleret med et eller flere enkelte lag glas i selvstændige rammer. Herved opnås en tillægsisolering af den gasfyldte rude, men

det generelle problem med kuldebroen gennem afstandsprofil og ramme relateret til den gasfyldte rude vil stadig betyde en formindskelse af vinduets resulterende isoleringsevne.

Endelig kan en kombination af et godt isolerende afstandsprofil og en let forøget højde af glaslisterne være en attraktiv mulighed. Resultatet af en analyse udført med glaslister af træ er vist i tabel 2.1.5.

Tabel 2.1.5. Energimæssig sammenligning af vinduer med glaslister af træ (λ = 0,12 W/mK) med højden 15 mm og vinduer med forøget glaslistehøjde afpasset således at kuldebroen pga. vinduets afstandsprofil (SUPERSPACER) netop elimineres. Nettovarmetabet i kWh er angivet for perioden oktober-april inkl. for et sydvendt vindue med bruttoareal = $1{,}2 \cdot 1{,}2$ m^2 og fri horisont. Der regnes med en konstant indetemperatur på 20 °C og med, at den transmitterede solvarme udnyttes 100%. Udnyttelsesgraden vurderes at være realistisk i almindeligt byggeri, men lidt for optimistisk i lavenergibyggeri.
Rudetyperne er beskrevet indefra.
Rudetype I: 4 mm glas, 12 mm luft, 4 mm glas
Rudetype II: 4 mm coated glas, 12 mm argon, 4 mm glas
Rudetype III: 4 mm coated glas, 9 mm krypton, 4 mm glas, 9 mm krypton, 4 mm glas

Rudetype	Glasliste-højde	Transparent areal	Rudens solvarme-transmittans [6]	Vinduets U-værdi	Nettovarmetab
-	mm	m^2	-	W/m^{2}K	kWh
Type I	15 12	0,968 0,980	0,76	2,40 2,42	1 -1
Type II	15 40	0,968 0,872	0,65	1,50 1,43	-67 -51
Type III	15 75	0,968 0,746	0,60	1,19 1,11	-86 -42

Sammenholdes tabel 2.1.5 med tabel 2.1.1 fremgår det, at udskiftning af aluminiumsafstandsprofilet med SUPERSPACER-profilet forbedrer energibalancen over fyringssæsonen med 5-8 kWh for det aktuelle vindue. Forøgelsen af glaslistehøjden for elimination af kuldebroen i afstandsprofilet kan reduceres med ca. 25%, men stadig med en forringelse af energibalancen for vinduet. Tænkes glaslisterne konstrueret i et isoleringsmateriale med λ = 0,04 W/mK, opnås der følgende resultater (tabel 2.1.6):

Tabel 2.1.6. Energimæssig sammenligning af vinduer med glaslister af isolering (λ = 0,04 W/mK) med højden 15 mm og vinduer med forøget glaslistehøjde afpasset således, at kuldebroen pga. vinduets afstandsprofil (SUPERSPACER) netop elimineres. Nettovarmetabet i kWh er angivet for perioden oktober-april inkl. for et sydvendt vindue med bruttoareal = 1,2 · 1,2 m^2 og fri horisont. Der regnes med en konstant indetemperatur på 20 °C og med, at den transmitterede solvarme udnyttes 100%. Udnyttelsesgraden vurderes at være realistisk i almindeligt byggeri, men lidt for optimistisk i lavenergibyggeri.
Rudetyperne er beskrevet indefra.
Rudetype I: 4 mm glas, 12 mm luft, 4 mm glas
Rudetype II: 4 mm coated glas, 12 mm argon, 4 mm glas
Rudetype III: 4 mm coated glas, 9 mm krypton, 4 mm glas, 9 mm krypton, 4 mm glas

Rudetype	Glasliste-højde	Transparent areal	Rudens solvarme-transmittans [6]	Vinduets U-værdi	Nettovarmetab
-	mm	m^2	-	W/m^2K	kWh
Type I	15 15	0,968 0,968	0,76	2,37 2,37	-3 -3
Type II	15 30	0,968 0,910	0,65	1,47 1,41	-70 -63
Type III	15 45	0,968 0,854	0,60	1,17 1,10	-88 -69

De udførte analyser viser, at det ikke er muligt at opnå en energigevinst for et sydvendt vindue ved at eliminere kuldebroen i afstandsprofilet ved forøgelse af glaslisternes højde eller varmemodstand. Anvendelse af bedre isolerende afstandsprofiler (f.eks. SUPERSPACER) i rudekonstruktioner med gasfyldning og lavemissionsbelægning mindsker vinduets U-værdi med ca. 6%. Selvom de bedre isolerende afstandsprofiler har relativt beskeden energimæssig betydning, vil de betyde en væsentlig forhøjelse af den indvendige overfladetemperatur bl.a. ved rudens nederste hjørner, hvorved kondensrisikoen mindskes.

2.2. Ramme/karm til oplukkelige vinduer

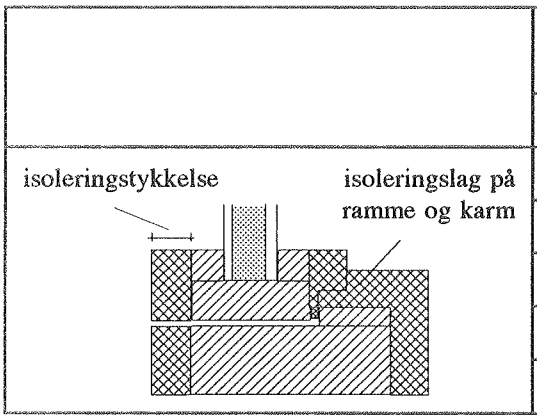
Rammen er den bevægelige del af vinduet, hvorpå ruden er monteret, og skal derfor have en tilstrækkelig styrke og stivhed til at hindre vridninger i ruden. Endvidere skal rammen have en sådan styrke, at den ikke deformeres ved ensidig befæstigelse (f.eks. sidehængte vinduer). Vinduesrammers dimensioner er derfor af en ikke ubetydelig størrelse, der i forhold til højisolerende ruder udgør en væsentlig kuldebro, der samtidig afskærer solindfaldet gennem vindueshullet. Tilsvarende gælder for karmen, der sikrer forbindelsen mellem den bevægelige del af vinduet og vægkonstruktionen, hvori vinduet er placeret.

I tabel 1.2.1 er betydningen af vinduesrammen og karmen angivet, og der er beregnet en forøgelse af U-værdien på ca. 80% for et vindue med delvis evakueret monolitisk silica aerogel. Analysen i kapitel 1 viste endvidere, at ramme-/karmmaterialet skal have en væsentlig større endimensional varmemodstand end gældende for rudens midte. Konstruktion af ramme og karm i en eller anden form for isoleringsmateriale ville være en oplagt idé, men der findes ikke et materiale der både har den fornødne styrke og en lav varmeledningsevne. Eksemplet fra PURAL Profilwerk i Tyskland, [10], viser netop, at hvis styrken i ramme og karm skal opretholdes, kræves et isoleringsmateriale med høj densitet og dermed relativ høj varmeledningsevne.

Efterisolering af rammen ved påmontering af et lag isolering på den indvendige og udvendige side af ramme og karm vil reducere varmetransporten, men ikke forhindre varmetransporten fra det inderste glaslag ned gennem rammematerialet til det yderste glaslag i ruden (se kapitel 1). Teoretisk set vil det imidlertid være muligt at øge isoleringstykkelsen, indtil den relative kuldebro i rammen er elimineret. Ved den relative kuldebro forstås den kuldebrovirkning som en dårligere isoleringsevne af ramme-/karmkonstruktionen, set ifht. rudens midte, bevirker. I tilfældet med en almindelig tolags termorude er den relative kuldebroeffekt af en ramme-/karmkonstruktion i træ negativ, idet trækonstruktionens isoleringsevne er bedre end rudens.

Tabel 2.2.1 viser den isoleringstykkelse der er nødvendig på hver side af ramme og karm for at eliminere kuldebroen. Analysen er udført ved at gå ud fra tabel 1.2.1, Trin 5, hvor ruden er uden afstandsprofil og ramme-/karmmaterialet er af træ. Isoleringslaget monteres på alle ramme-/karmprofilets frie flader (ekskl. glaslisternes vandrette flader). Ved elimination af kuldebroen i dette tilfælde, skal U-værdien for hele vinduet blive lig med center U-værdien for ruden. Bemærk, at der hermed kompenseres for kuldebroerne mellem rudens glaslag og mellem glaslisternes vandrette overflader via rammematerialet.

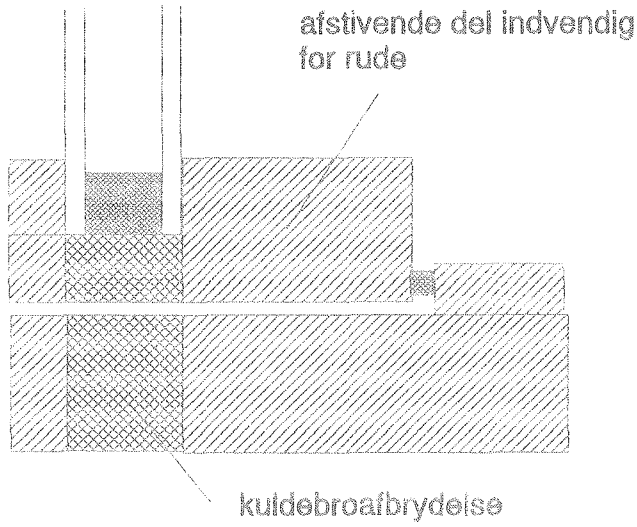
Tabel 2.2.1. Nødvendig isoleringstykkelse til elimination af den relative kuldebro gennem ramme og karm konstrueret af træ (λ = 0,12 W/mK). Isoleringen har en λ-værdi på 0,04 W/mK.
Rudetyperne er beskrevet indefra.
Rudetype I: 4 mm glas, 12 mm luft, 4 mm glas
Rudetype II: 4 mm coated glas, 12 mm argon, 4 mm glas
Rudetype III: 4 mm coated glas, 9 mm krypton, 4 mm glas, 9 mm krypton, 4 mm glas
Rudetype IV: 4 mm glas, 20 mm delvis evakueret monolitisk silica aerogel, 4 mm glas
Rudetype V: 4 mm coated glas, 0,5 mm vakuum, 4 mm glas



Rudetype	Nødvendig isoleringstykkelse
-	mm
Type I	0,0
Type II	2,5
Type III	12,5
Type IV	90,0
Type V	ikke muligt

Tabel 2.2.1 viser, at det er muligt ved en simpel forbedring af isoleringsevnen for ramme og karm at eliminere kuldebroeffekten gennem ramme og karm for rudetype II. For rudetype III kræves en total isoleringstykkelse på 25 mm (2 · 12,5 mm), før kuldebroen er elimineret. For rudetype IV, aerogel-ruden, kræves en samlet isoleringstykkelse på 180 mm, hvilket bevirker, at ramme og karm ville få samme tykkelse som vægkonstruktionen. I tilfældet med vakuumruden er det umuligt at isolere sig fra kuldebroforholdene, idet kuldebroen fra inderglas til yderglas gennem trærammen er altdominerende. Denne kuldebro er også årsagen til den meget store isoleringstykkelse i tilfældet med AIRGLASS-ruden, hvor den endimensionale varmemodstand for ramme og karm er ca. dobbelt så stor som modstanden ved rudens midte.

Ovenstående analyse leder frem til en mere hensigtsmæssig placering af isoleringsmaterialet som forlængelse af ruden. Problemet ved denne placering er, at ramme- og karmkonstruktionens styrkeforhold herved ændres. En attraktiv mulighed er at opdele rammen i en bærende del placeret indvendigt hhv. udvendigt for rudens indvendige hhv. udvendige glas, og i en del, hvis formål er at fastholde ruden. Herved opnås, at temperaturgradienten over ruden videreføres ned gennem ramme og karm via isoleringslaget. Figur 2.2.1 viser en skitse af en vindueskonstruktion med brudt kuldebro.



Figur 2.2.1. Skitse af ramme-/karmløsning med brudt kuldebro.

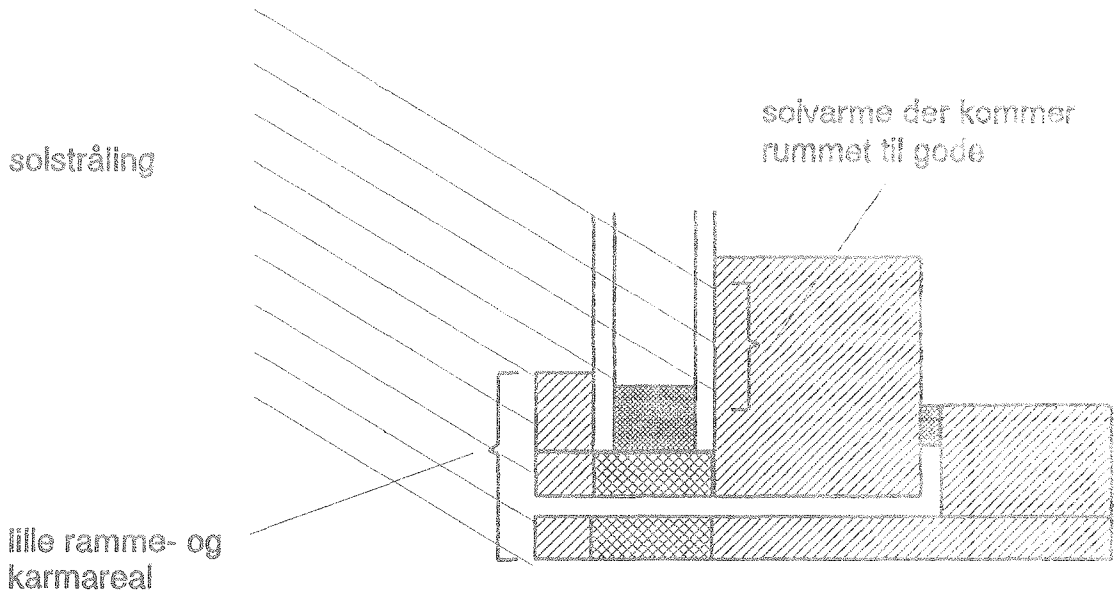
Kravet til isoleringslaget i den sammensatte konstruktion for helt at ophæve kuldebroen er, at varmemodstanden er af samme størrelse som ved rudens midte. I tilfældet med den gasfyldte tolagsrude med lavemissionsbelægning (rudetype II) vil det kræve en isoleringstykkelse (λ-værdi = 0,04 W/mK) på ca. 22 mm, hvilket omtrent svarer til rudens tykkelse. For rudetype III må isoleringslagets tykkelse øges til ca. 36 mm, hvilket svarer til rudetykkelsen plus 6 mm, idet rudetype III er en trelagsrude med 9 mm glasafstand. Derimod vil det for aerogelruden (rudetype IV) kræve en isoleringstykkelse på ca. 88 mm, hvor rudetykkelsen er ca. 28 mm. Derved vil der opstå en kuldebro mellem de to lag glas i ruden via isoleringsmaterialet i karmen. Tilsvarende forhold gælder for vakuumruden, der har en glasafstand på 0,5 mm. Ophævelse af kuldebroen vil i teorien kræve en isoleringstykkelse i ramme og karm på ca. 100 mm, men kuldebroen mellem de to glaslag vil praktisk taget ikke blive ændret pga. den lille glasafstand. Betydningen af denne kuldebro er vist i tabel 2.2.2, hvor der endvidere til sammenligning er anført center U-værdierne for de forskellige rudetyper samt U-værdierne beregnet for ruder uden afstandsprofil monteret i ramme og karm af træ.

Tabel 2.2.2. Analyse af kuldebroafbrydelse i ramme-/karmkonstruktionen ved indskydelse af et isoleringslag i forlængelse af ruden. Isoleringen har en λ-værdi på 0,04 W/mK. I tabellen er vist resultater dels for en beregning, hvor isoleringslagets tykkelse er lig med rudetykkelsen, og dels for en beregning, hvor isoleringens tykkelse er tilpasset, så den endimensionale varmemodstand svarer til rudens centermodstand.
Rudetyperne er beskrevet indefra.
Rudetype I: 4 mm glas, 12 mm luft, 4 mm glas
Rudetype II: 4 mm coated glas, 12 mm argon, 4 mm glas
Rudetype III: 4 mm coated glas, 9 mm krypton, 4 mm glas, 9 mm krypton, 4 mm glas
Rudetype IV: 4 mm glas, 20 mm delvis evakueret silica aerogel, 4 mm glas
Rudetype V: 4 mm coated glas, 0,5 mm vakuum, 4 mm glas

Rudetype	Isoleringstykkelse	U_{CENTER} (tabel 1.2.1)	U_{VINDUE} (tabel 1.2.1, Trin 5)	U_{VINDUE} brudt kuldebro
-	mm	W/m²K	W/m²K	W/m²K
Type I	20 8	2,73	2,42	2,30 2,36
Type II	20 22	1,38	1,43	1,29 1,29
Type III	30 36	0,94	1,11	0,96 0,94
Type IV	30 88	0,42	0,75	0,58 0,45
Type V	8,5 100	0,37	0,80	0,70 0,50

Tabellen viser, at det er muligt for rudetype I og II at opnå en samlet U-værdi, der er lavere end den tilhørende center U-værdi for ruden, ved at indskyde et isoleringslag lig rudetykkelsen i ramme og karm. For rudetype III er der ved samme fremgangsmåde opnået, at vinduets U-værdi praktisk taget er lig rudens center U-værdi. I sidstnævnte tilfælde vil en forøgelse af isoleringslagets tykkelse med 6 mm bringe vinduets U-værdi ned på rudens center U-værdi. For rudetype IV gælder, at en isoleringstykkelse lig rudetykkelsen reducerer vinduets U-værdi med 0,17 W/m²K svarende til ca. 23%. Øges isoleringstykkelsen til 88 mm er den tilsvarende reduktion på 0,30 W/m²K (40%), hvorved vinduets U-værdi er meget nær rudens centerværdi. De praktiske problemer med den store isoleringstykkelse vil blive behandlet nærmere i kapitel 4, men den resulterende tykkelse af ramme og karm er i sig selv et æstetisk problem. Vakuumruden (type V) udgør et specielt problem pga. den lille glasafstand, hvilket også fremgår af tabel 2.2.2. Den kraftige varmeledning gennem rammen fra inderste til yderste lag glas bevirker, at det selv ved 100 mm isolering i ramme og karm ikke er muligt at nå ned på rudens center U-værdi. Kuldebroafbrydelse i ramme og karm er dog ikke uden virkning, idet 8,5 mm isolering (svarer til rudens tykkelse) reducerer vinduets U-værdi med 0,10 W/m²K svarende til 12,5%.

Ovenstående analyser har udelukkende været udført med henblik på reduktion i U-værdien for vinduet. For rudetyperne IV og V viste analyserne, at det ikke er muligt at reducere varmetabet gennem ramme og karm, så vinduets U-værdi kommer ned på niveauet for rudens midte pga. kuldebrovirkningen langs rudens kanter. Betydningen af denne kuldebro kan reduceres ved at øge glasarealet, der for rudetype IV og V har en lavere U-værdi end ramme og karm. Ydermere vil en forøgelse af glasarealet betyde et større solindfald og dermed en bedre varmebalance. For oplukkelige vinduer kræver det, at der tages hensyn til placering af de nødvendige funktionsbeslag, der traditionelt er placeret i vinduesrammen. Anvendes imidlertid konceptet beskrevet ved afbrydelse af kuldebroen i ramme og karm med den bærende del af rammen placeret indvendig for ruden, vil den del af solstrålingen, der rammer karmen, primært komme det bagved liggende rum til gode (figur 2.2.2). Tilsvarende skal karmen udformes, så den har tilstrækkelig styrke til at bære rude og vinduesramme, samtidig med at den udadtil fylder så lidt som muligt. Et eksempel er vist i figur 2.2.2.



Figur 2.2.2. Maksimal udnyttelse af solindfald på vinduesramme ved placering af bærende ramme indvendigt for ruden, samt udformning af karm så arealet vendende mod det fri bliver så lille som muligt.

Selvom ramme-/karmarealet bliver minimeret, bør der stadig udføres en kuldebroafbrydelse i ramme og karm for at reducere kuldebroen mellem glaslagene gennem karmen. I tabel 2.2.3 er der vist en analyse af energibalancen for et sydvendt vindue med henholdsvis normal ramme-/karmbredde (108 mm) og med reduceret ramme-/karmbredde (38 mm). Der er for alle rudetyper anvendt glaslister af træ, normalt afstandsprofil, men med kuldebroafbrydelse i ramme og karm med en isoleringstykkelse lig rudetykkelsen. Varmeledningsevnen for isoleringslaget er sat til 0,04 W/mK.

Tabel 2.2.3. Nettovarmetab (kWh) i fyringssæsonen for et 1,2 · 1,2 m^2 sydvendt vindue med fri horisont for to forskellige bredder af ramme + karm. Ramme og karm er med brudt kuldebro af isoleringsmateriale med λ = 0,04 W/mK og tykkelse svarende til rudetykkelsen. Der regnes med en konstant indetemperatur på 20 °C og med, at den transmitterede solvarme udnyttes 100%. Udnyttelsesgraden vurderes at være realistisk i almindeligt byggeri, men lidt for optimistisk i lavenergibyggeri.
Rudetyperne er beskrevet indefra.
Rudetype I: 4 mm glas, 12 mm luft, 4 mm glas
Rudetype II: 4 mm coated glas, 12 mm argon, 4 mm glas
Rudetype III: 4 mm coated glas, 9 mm krypton, 4 mm glas, 9 mm krypton, 4 mm glas
Rudetype IV: 4 mm glas, 20 mm delvis evakueret monolitisk silica aerogel, 4 mm glas
Rudetype V: 4 mm coated glas, 0,5 mm vakuum, 4 mm glas

Rudetype	Rudetykkelse	Ramme-/karmbredde = 108 mm		Ramme-/karmbredde = 38 mm	
-	mm	U_{RESULT} (W/m^2K)	Nettovarmetab (kWh)	U_{RESULT} (W/m^2K)	Nettovarmetab (kWh)
Type I	20	2,33	-8	2,71	-51
Type II	20	1,43	-76	1,54	-138
Type III	30	1,12	-94	1,16	-160
Type IV	30	0,65	-190	0,59	-279
Type V	8,5	0,82	-150	0,72	-238

Analysen viser, at det for alle rudetyper er en fordel at mindske dimensionerne på ramme og karm, når der er tale om et sydvendt vindue uden skyggepåvirkning. Specielt opnås der en dobbelt gevinst for rudetype IV og V, idet U-værdien for vinduet bliver reduceret, samtidig med at solindfaldet øges. De tilsvarende nettovarmetab for nord-, øst- og vestvendte vinduer er vist i tabel 2.2.4.

Tabel 2.2.4. Nettovarmetab (kWh) i fyringssæsonen for et 1,2 · 1,2 m^2 vindue med fri horisont vendende mod hhv. nord, øst og vest for to forskellige bredder af ramme + karm. Ramme og karm er med brudt kuldebro af isoleringsmateriale med λ = 0,04 W/mK og tykkelse svarende til rudetykkelsen. Der regnes med en konstant indetemperatur på 20 °C og med, at den transmitterede solvarme udnyttes 100%. Udnyttelsesgraden vurderes at være realistisk i almindeligt byggeri, men lidt for optimistisk i lavenergibyggeri.
Rudetyperne er beskrevet indefra.
Rudetype I: 4 mm glas, 12 mm luft, 4 mm glas
Rudetype II: 4 mm coated glas, 12 mm argon, 4 mm glas
Rudetype III: 4 mm coated glas, 9 mm krypton, 4 mm glas, 9 mm krypton, 4 mm glas
Rudetype IV: 4 mm glas, 20 mm delvis evakueret monolitisk silica aerogel, 4 mm glas
Rudetype V: 4 mm coated glas, 0,5 mm vakuum, 4 mm glas

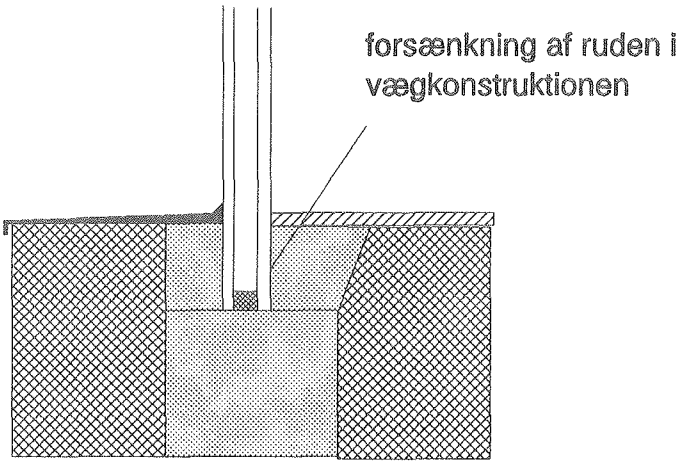
Rudetype	Ramme-/karmbredde = 108 mm		Ramme-/karmbredde = 38 mm	
-	Nord	Øst/vest	Nord	Øst/vest
Type I	215	138	240	140
Type II	115	49	110	25
Type III	82	21	70	-9
Type IV	15	-55	-12	-104
Type V	40	-25	10	-75

Omstående tabel viser, at en reduktion af ramme-/karmarealet for alle rudetyper, undtagen for en almindelig tolags termorude, er en energimæssig fordel selv for nordvendte vinduer. Det skal endvidere bemærkes, at et nordvendt vindue med rudetype IV, aerogel-rude, i fyringssæsonen vil tilføre energi til det bagved liggende rum.

2.3. Karme til faste vinduer

Faste vinduer er væsentlig enklere at montere på en energimæssig god måde, idet der kun skal sørges for fastholdelse af ruden i vægkonstruktionen. Mange af de overvejelser, der er foretaget under behandlingen af de oplukkelige vinduer mht. afbrydelse af kuldebroer, afstandsprofiler, glaslister og reduktion af karmarealet, vil også gælde for de faste vinduer.

Problematikken omkring kuldebroen pga. afstandsprofilet i ruden kan i tilfældet med faste vinduer løses ved at ruden "indbygges" i vægkonstruktionen (figur 2.3.1), hvorved der indirekte opnås en forøgelse af glaslisternes højde og isoleringsevne. Dette kan i en velisoleret væg ske uden at reducere væggens isoleringsevne mærkbart.



Figur 2.3.1. Principskitse der viser, hvorledes kuldebroen pga. af afstandsprofilet i ruden kan elimineres ved indbygning af ruden i vægkonstruktionen (faste vinduer). De konstruktive løsninger med hensyn til tæthed og udskiftning af ruden er ikke vist.

Ovenstående figur viser endvidere muligheden for at udnytte vægkonstruktionens isoleringslag som kuldebroafbrydelse i karmen, idet der ikke kræves en fysisk forbindelse mellem den yderste og den inderste del af karmen. Dette betyder også et langt friere valg af isoleringstykkelse ved udformning af kuldebroafbrydelsen. Sammenfattende kan der for faste vinduer anvendes alle de optimale løsninger skitseret i afsnit 2.2. Tabel 2.3.1 viser resultatet af en beregning med optimering af alle konstruktionsdele, dvs. at ruden er indbygget i vægkonstruktionen så kuldebroen hidrørende fra afstandsprofilet er elimineret, og at kuldebroafbrydelsen i karmen er udført med en isoleringstykkelse, der modsvarer den endimensionale varmemodstand ved rudens midte. Begge foranstaltninger er uden indflydelse på vinduets transparente areal, idet kun indbygningsdybden af ruden og dermed dennes størrelse varierer.

Tabel 2.3.1. Resulterende U-værdi (W/m^2K) og nettovarmetab (kWh) over fyringssæsonen (oktober-april) beregnet for et sydvendt vindueshulareal på $1,2 \cdot 1,2$ m^2 med fast indbygget rude. Indbygningsdybde og kuldebroafbrydelse langs rudens kanter er optimeret, så indflydelsen fra rudens afstandsprofil er minimeret eller helt ophævet. Definitionen af de indgående størrelser er vist i figur 2.3.1.
Rudetyperne er beskrevet indefra.
Rudetype I: 4 mm glas, 12 mm luft, 4 mm glas
Rudetype II: 4 mm coated glas, 12 mm argon, 4 mm glas
Rudetype III: 4 mm coated glas, 9 mm krypton, 4 mm glas, 9 mm krypton, 4 mm glas
Rudetype IV: 4 mm glas, 20 mm delvis evakueret monolitisk silica aerogel, 4 mm glas
Rudetype V: 4 mm coated glas, 0,5 mm vakuum, 4 mm glas

Rudetype	Indbygningsdybde	Kuldebroafbrydelse	$U_{RESULTERENDE}$	Nettovarmetab
-	mm	mm	W/m^2K	kWh
Type I	17	8	2,80	-72
Type II	40	22	1,47	-174
Type III	60	36	1,04	-199
Type IV	70	88	0,50	-320
Type V	70	100	0,53	-289

Resultatet af analysen viser, at der for alle rudetyper opnås en nettoenergitilførsel over fyringssæsonen for et sydvendt vindue med arealet $1,2 \cdot 1,2$ m^2. Endvidere at den resulterende U-værdi for de bedst isolerende rudetyper bliver temmelig nær center U-værdien for ruden. Udføres den tilsvarende analyse for andre vinduesorienteringer, findes følgende værdier:

Tabel 2.3.2. Nettovarmetab (kWh) over fyringssæsonen beregnet for nord-, øst- og vestvendt vindue med hulareal på $1,2 \cdot 1,2$ m^2 og fast indbygget rude.

Rudetype	Indbygningsdybde	Kuldebroafbrydelse	Nettovarmetab (kWh)	
-	mm	mm	Nord	Øst/vest
Type I	17	8	243	135
Type II	40	22	95	3
Type III	60	36	49	-36
Type IV	70	88	-30	-129
Type V	70	100	-20	-112

Anvendelse af de bedst isolerende ruder vil medføre en energitilførsel i fyringssæsonen selv for nordvendte vinduer. Sammenlignes med tabel 2.2.4, der viser resultatet af den tilsvarende analyse udført for oplukkelige vinduer, er der opnået en væsentlig forbedring af vinduets varmebalance, dels pga. større solindfald og dels på grund af bedre isoleringsforhold langs rudens kanter.

Den skitserede løsning for faste vinduer indeholder dog en del begrænsninger i anvendelse, idet vægkonstruktionen skal designes specielt til én rudetype. Endvidere vil udskiftning af ruden være en del vanskeligere end for de karmløsninger, der findes på markedet i dag. Også problemet vedrørende bortledning/bortventilering af indtrængende regnvand ved rudens underkant skal løses. Endelig er det beskrevne koncept kun anvendeligt i nybyggeri.

I eksisterende bygninger må der anvendes karmprofiler med brudt kuldebro og minimale dimensioner som beskrevet i afsnit 2.2.

3. TERMISK OPTIMAL SAMLING MELLEM VÆG OG VINDUE

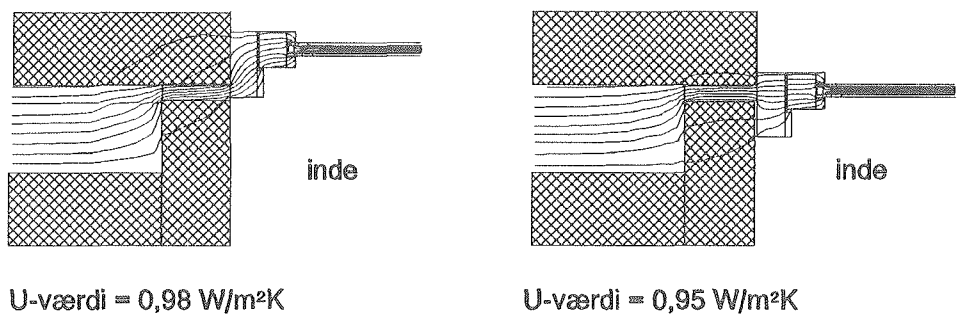
Samlingen mellem væg og vindue tjener til fastholdelse af vinduet med videreføring af de kræfter, der påvirker vinduet. Det er dels påvirkninger fra udeklimaet, især vindpåvirkning, og dels påvirkninger, der opstår ved betjening af oplukkelige vinduer. Vinduet skal således fastgøres til en mekanisk stabil del af vægkonstruktionen. Ved termisk optimal samling mellem væg og vindue forstås dels placeringen af vinduet i forhold til væggens yderside for opnåelse af det mindst mulige energiforbrug, dels at forbindelsen mellem væg og vindue udføres med mindst mulig kuldebroeffekt til følge.

3.1. Placering af vindue i forhold til væggens yderside

Vinduets placering i forhold til væggens yderside for opnåelse af det mindst mulige energiforbrug afhænger af placeringen af isoleringslaget i vægkonstruktionen i kombination med skyggevirkningen af vægkonstruktionen pga. af vinduets indrykning ifht. facaden samt vinduets orientering. En detaljeret analyse af dette problem er beskrevet i [12], hvor følgende retningslinier er givet:

- Vinduet skal placeres i forlængelse af centerlinien af væggens isoleringslag, hvorved betydningen af det flerdimensionale felt reduceres mest muligt. Skyggevirkningen pga. vinduets indrykning ifht. facaden spiller kun en mindre rolle for energibalancen, set over fyringssæsonen, uanset vinduets orientering.

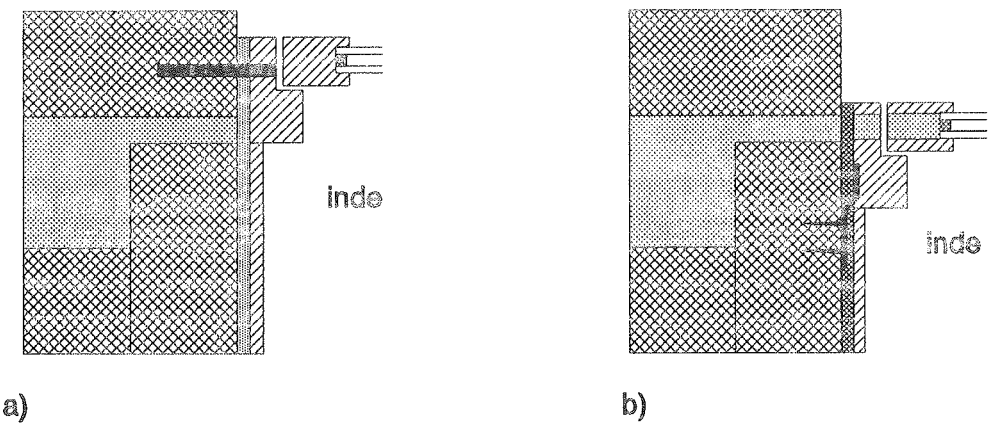
Figur 3.1.1 viser to eksempler på placering af vinduet, hhv. ud for væggens isoleringslag og forskudt mod væggens yderside. Beregningerne er udført med programmet FRAME 2.2.



Figur 3.1.1. Isotermforløb og resulterende U-værdi for de viste snit i vindue-vægkonstruktion ved to forskellige placeringer af vindue.

3.2. Kuldebroafbrydelse i samling mellem væg og vindue

I kapitel 2 er betydningen af kuldebroafbrydelse i ramme og karm beskrevet. Det er imidlertid en betingelse for optimal udnyttelse af den forbedrede vindueskonstruktion, at kuldebroafbrydelsen videreføres i samlingen mellem vindueskarm og vægkonstruktion. Det generelle problem er, at vindueskarmen skal fastgøres til en mekanisk stabil del af vægkonstruktionen som tidligere beskrevet. En ofte anvendt fastgørelsesmetode er vist i figur 3.2.1 a), hvor resultatet bliver, at isoleringsplanet i ruden ikke føres videre ned gennem kuldebroafbrydelsen i vægkonstruktionen. Figur 3.2.1 b) viser en alternativ fastgørelsesmetode, der sikrer, at kuldebroafbrydelsen i ramme og karm videreføres. Der vil ikke for beboeren være æstetiske gener ved den ændrede monteringmetode, idet beslaget vil blive gemt bag vinduets lysningspaneler. Løsningen forudsætter imidlertid anvendelse af lysningspaneler (hvis beslaget skal være usynligt) som måske ellers kunne være sparet.

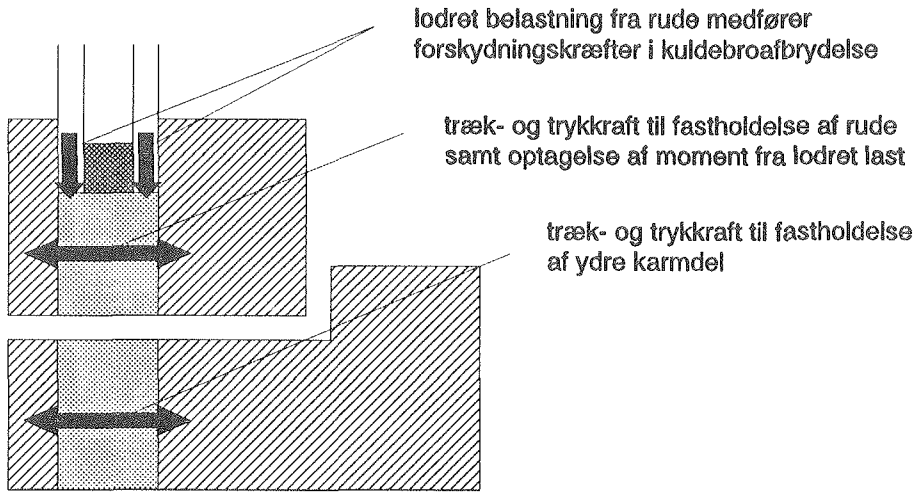


Figur 3.2.1. a) Traditionel fastgørelse af vindue til vægkonstruktion.
b) Alternativ fastgørelse af vindue med brudt kuldebro i ramme og karm.

4. VURDERING AF KONSTRUKTIONSMÆSSIGE FORHOLD FOR RAMME-/KARMKONSTRUKTIONER TIL HØJISOLERENDE VINDUER

4.1. Styrkeforhold for ramme og karm

En effektiv udnyttelse af højisolerende vinduer kræver, at ramme- og karmkonstruktionen er udført med kuldebroafbrydelse placeret i rudens forlængelse. Dermed indføres et styrkemæssigt svagt led i konstruktionen, netop hvor rudens vægt skal overføres til ramme eller karm. Derudover skal ruden fastholdes til den afstivende del af ramme eller karm, dvs. at der skal overføres en vandret kraft gennem kuldebroafbrydelsen (figur 4.1.1).



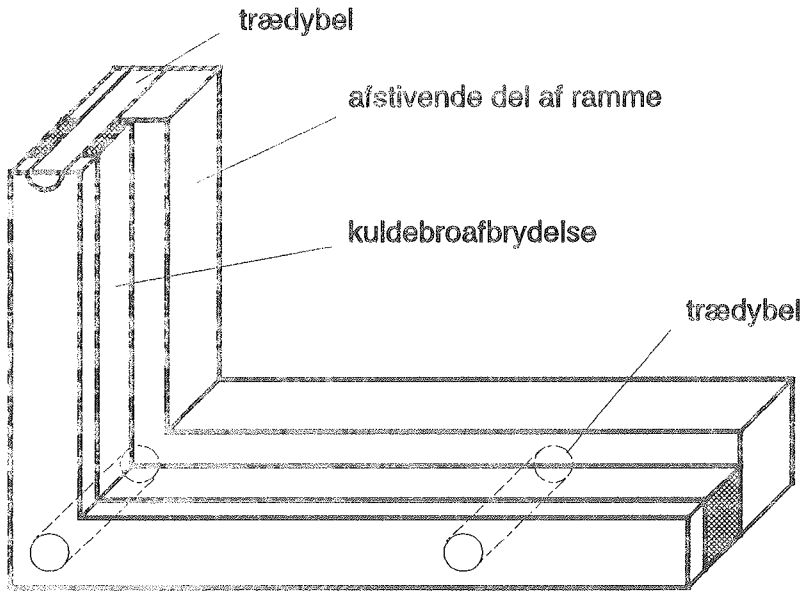
Figur 4.1.1. Lodret snit i ramme og karm med angivelse af kræfter, der skal overføres via kuldebroafbrydelsen.

Konstruktionen af kuldebroafbrydelsen skal således både kunne optage træk-, tryk- og forskydningskræfter. Trykkraften kan uden videre optages ved valg af et isoleringsmateriale med tilstrækkelig stivhed, f.eks. et skumprodukt eller hård mineraluld. Skumproduktet har den fordel, at det kan udskummes efter færdiggørelse af resten af rammen og/eller karmen, hvorved der sikres en fuldstændig udfyldning samt en vis sammenklæbning af de to ramme-/karmdele.

Trækkræfter kan optages af en lang række materialer, hvoraf træ, plastprodukter og rustfrit stål er de mest aktuelle i dette tilfælde. Trækkræfterne mellem den afstivende ramme/karmdel og den del, der sørger for fastholdelse af ruden, kan således overføres ved gennembrydning af isoleringslaget nogle få steder. Da de nævnte materialer har en gunstig trækstyrke, vil det samlede tværsnitsareal af gennembrydningen ikke forøge varmetransporten i nævneværdig grad.

Forskydningstyrken af kuldebroafbrydelsen er dermed det eneste problem, der resterer. En tolagsrude med 4 mm glastykkelse vejer ca. 25 kg/m^2. Tænkes en rude med arealet 1 m^2 at skulle understøttes af en "træbjælke", kræves maksimalt et tværsnit på ca. 250 mm^2. Hvis rudens kantlængde er 1 m, og der regnes med en højde af kuldebroafbrydelsen på 20 mm, vil ovennævnte træbjælke udgøre ca. 1% af det totale tværsnitsareal, hvilket er uden betydning for kuldebroafbrydelsens resulterende varmeledningsevne. Det er således muligt at kombinere optagelsen af såvel trækstyrke som forskydningsstyrke ved valg af den rette tværsnitsdimension på gennembrydningerne i kuldebroafbrydelsen, uden nævneværdig reduktion af isoleringslagets effektivitet. Det skal dog bemærkes, at ovenstående kun gælder, så længe højden af kuldebroafbrydelsen ikke bliver for lille, idet det samlede tværsnitsareal af træforbindelsen er forudsat konstant.

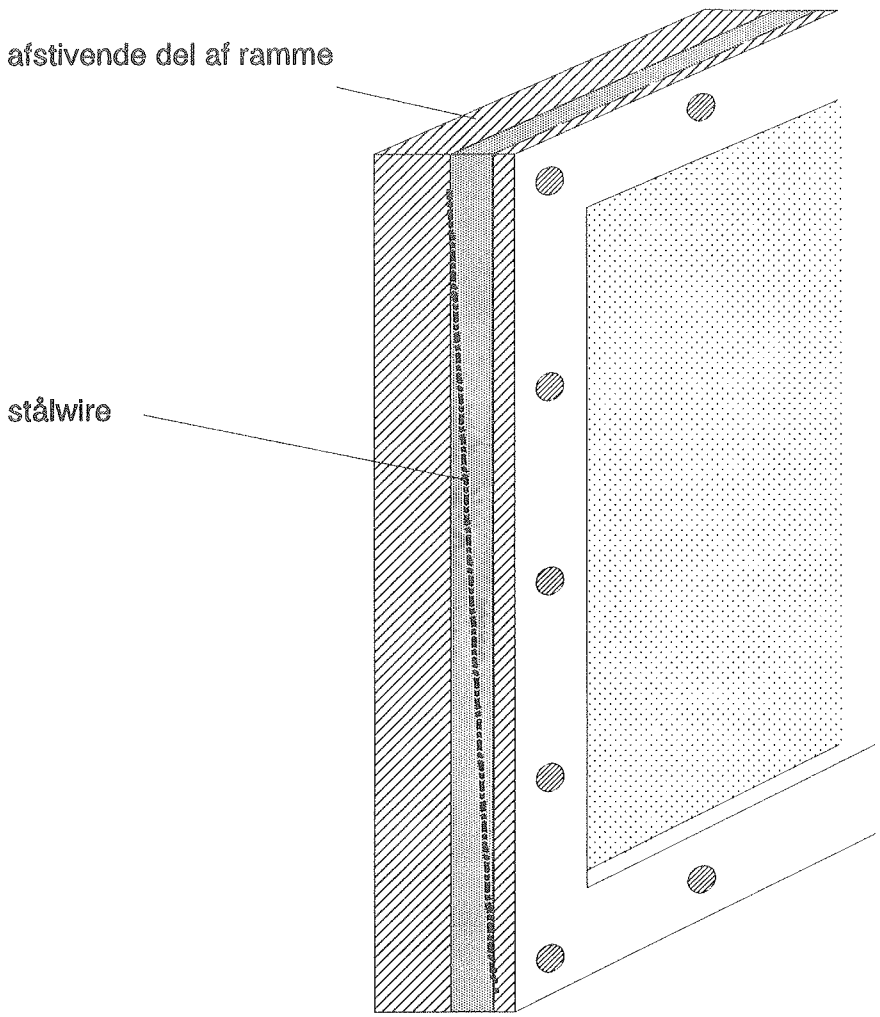
Ovenstående gennemgang af de styrkemæssige forhold viser, at det er muligt at konstruere en ramme-/karmløsning med brudt kuldebro ved at opdele ramme og karm i to dele, forbundet med et isoleringslag med enkelte gennemgående forbindelser. Princippet minder om armeret beton, hvor jernet optager trækkræfterne, og betonen optager trykkræfterne, hvor "betonen" i dette tilfælde er isoleringslaget. Figur 4.1.2 viser princippet i opbygningen af den isolerede ramme-/karm (kun karmen er vist).



Figur 4.1.2. Principtegning af karm, konstrueret i træ med brudt kuldebro.

Der er i ovenstående ikke taget højde for langtidspåvirkningen af rudens vægt på de spinkle forbindelser mellem de to ramme-/karmdele. Ved langtidsbelastning er der en risiko for, at der opstår en nedsynkning af den spinkle del af rammen ifht. den afstivende rammedel. Til imødegåelse af dette problem kan der monteres en tynd wire langs rudens sider, fra den nederste spinkle rammedel til den øverste del af den afstivende ramme (figur 4.1.3). En tynd

stålwire monteret på denne måde vil praktisk taget ikke øge varmetransporten, idet vejlængden via stålwiren fra yderside til inderside får en længde, der svarer til rudehøjden. Monteringsmæssigt vil dette dog gøre vindueskonstruktionen mere kompleks og dermed dyrere.

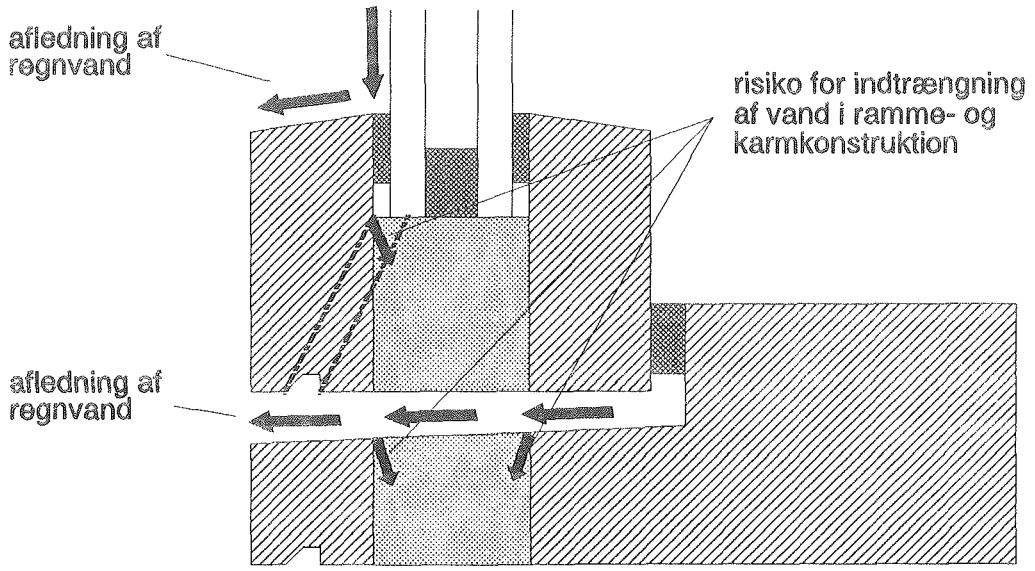


Figur 4.1.3. Montering af stålwire for sikring mod deformation af vinduesramme på grund af rudens vægt.

4.2. Forhold vedrørende påvirkninger fra ude- og indeklima

Den udviklede ramme-/karmkonstruktion skal selvfølgelig kunne modstå påvirkningerne fra udeklimaet (sol, vind, regn, etc.). I forbindelse med den indførte kuldebroafbrydelse i ramme og karm må det sikres, at påvirkningen fra solens ultraviolette stråler ikke nedbryder isoleringsmaterialet, og der må tages højde for, at den vandmængde, der skal bortledes, ikke trænger ned i ramme-/karmkonstruktionen og/eller vægkonstruktionen.

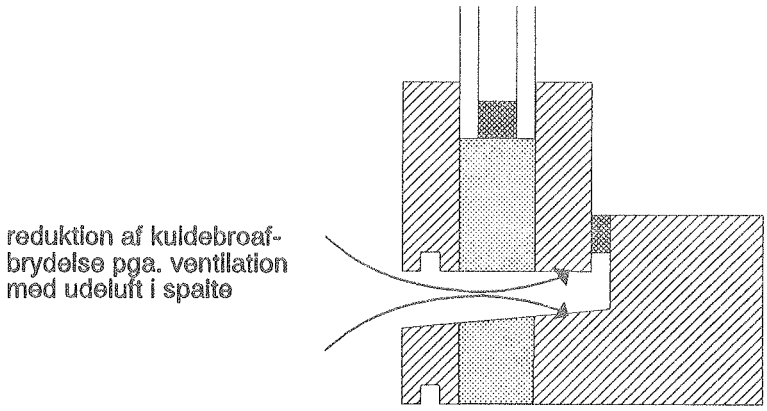
I tilfældet med oplukkelige vinduer er der to detaljer, som kræver opmærksomhed med hensyn til bortledning af vand: 1) indtrængende vand ved udvendige glaslister, der skal bortledes ved rudens underkant, og 2) indtrængende vand mellem ramme og karm (figur 4.2.1).



Figur 4.2.1. Særligt udsatte dele af ramme-/karmkonstruktionen mht. bortledning af vand.

For begge områder (se figur 4.2.1) vil montering af en tynd plastkappe, ført op bag henholdsvis inderste lag glas og tætningen mellem ramme og karm, kunne sikre mod nedtrængende vand. Problemet med ultraviolet stråling vil dermed samtidigt blive elimineret ved valg af et UV-bestandigt plastmateriale. Denne indkapsling af kuldebroafbrydelsen i ramme og karm vil medføre et øget varmetab, afhængig af indkapslingens tykkelse. Det er derfor meget vigtigt, at indkapslingen dimensioneres med et absolut minimalt tværsnitsareal. Eventuelt kan der anvendes et materiale, der kan stryges på fladerne som maling.

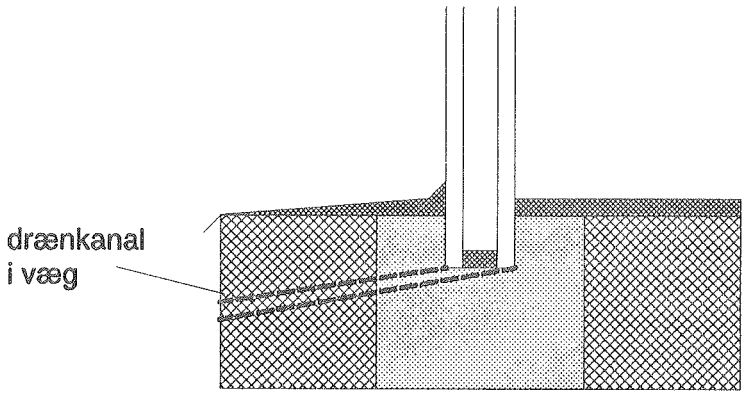
Udformningen af ramme- og karmprofilet bør udføres således, at der kun sker en svag ventilation af spalten mellem ramme og karm. Dette tjener dels det formål at mindske vandpåvirkningen ved slagregn, men især at undgå en kraftig reduktion af kuldebroafbrydelsens virkning. Hvis der foregår en kraftig luftudskiftning i spalten, vil der i princippet være direkte forbindelse mellem luft ved udetemperatur og den indvendige del af vinduets ramme og karm (figur 4.2.2).



Figur 4.2.2. Reduktion af kuldebroafbrydelsens virkning på grund af kraftig ventilation med udeluft i spalte mellem ramme og karm.

I forbindelse med karme til faste vinduer skelnes der mellem vinduer i nybyggeri og vinduer til eksisterende byggeri, pga. de forskellige indbygningsmuligheder i vægkonstruktionen jvf. afsnit 2.3. Karme med brudt kuldebro til eksisterende bygninger er i princippet opbygget analogt til rammekonstruktionen for oplukkelige vinduer, og der gælder de samme betingelser som ovenfor beskrevet.

Faste vinduer til nybyggeri kan enten udformes som til eksisterende bygninger, eller som beskrevet i afsnit 2.3 kan ruden med fordel, rent varmeteknisk, indbygges i vægkonstruktionen. En sådan løsning kræver imidlertid, at der i vægkonstruktionen indbygges en mulighed for ventilering og/eller dræning ved rudens nederste kant (principskitse vist i figur 4.2.3). En sådan løsning virker imidlertid ikke realistisk, hverken økonomisk eller teknisk.

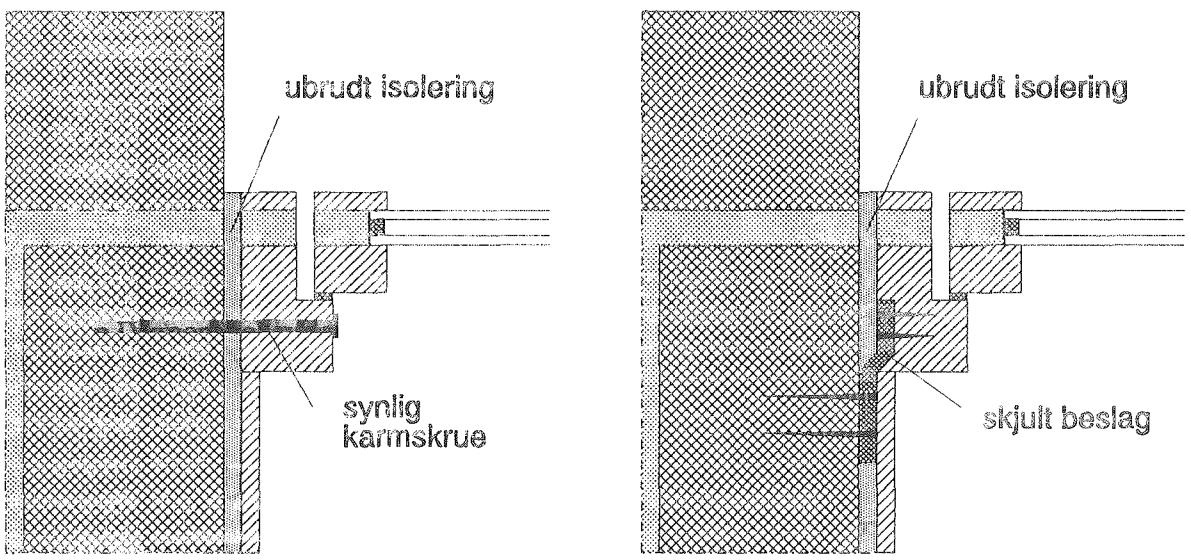


Figur 4.2.3. Principskitse af drænkanal indbygget i en vægkonstruktion i forbindelse med indbyggede faste vinduer.

Relateret til indeklimaet drejer påvirkningen af vinduet sig hovedsagelig om sikring af den nødvendige tæthed mod, at fugtig indeluft trænger ud i konstruktionen. I denne forbindelse er der ikke umiddelbart nogen forskel på traditionelle vindueskonstruktioner og konstruktionen med brudt kuldebro, beskrevet i nærværende rapport. Derimod vil risikoen for overfladekondens på den indvendige side af ruden og karmen blive væsentlig reduceret, hvis der anvendes et isolerende afstandsprofil i ruden og kuldebroafbrydelse i ramme og karm.

4.3. Monteringsforslag

Det fulde udbytte af kuldebroafbrydelsen opnås kun ved optimal placering af vinduet i vægkonstruktionen (jf. kapitel 3), dvs. at kuldebroafbrydelsen i ramme og karm skal være en videreførelse af væggens isoleringslag. Fastgørelse af vinduet til vægkonstruktionen skal derfor udføres uden gennembrydning af isoleringslaget. Dette kan realiseres ved anvendelse af fugeskum suppleret af fastgørelse med skruer gennem den bærende del af karmen. Hvis sidstnævnte mulighed ikke kan accepteres af æstetiske grunde (skruehovedet er jo normalt synligt), kan der anvendes monteringsbeslag, der sidder skjult bag lysningspaneler og vinduesplade. De 2 løsningsmuligheder er vist i nedenstående figur 4.3.1. Bemærk, at kuldebroafbrydelsen i ramme og karm er i ubrudt forbindelse med væggens isoleringslag.



Figur 4.3.1. 2 muligheder for montering af vindue med effektivt brudt kuldebro i ramme og karm.

Udskiftning af ruden vil kunne udføres på traditionel vis ved afmontering af glaslisterne. Hvis løsningsforslaget vist i figur 2.2.2, der udnytter solindfaldet maksimalt, anvendes, vil det kun være muligt at udskifte ruden ved afmontering af de udvendige glaslister.

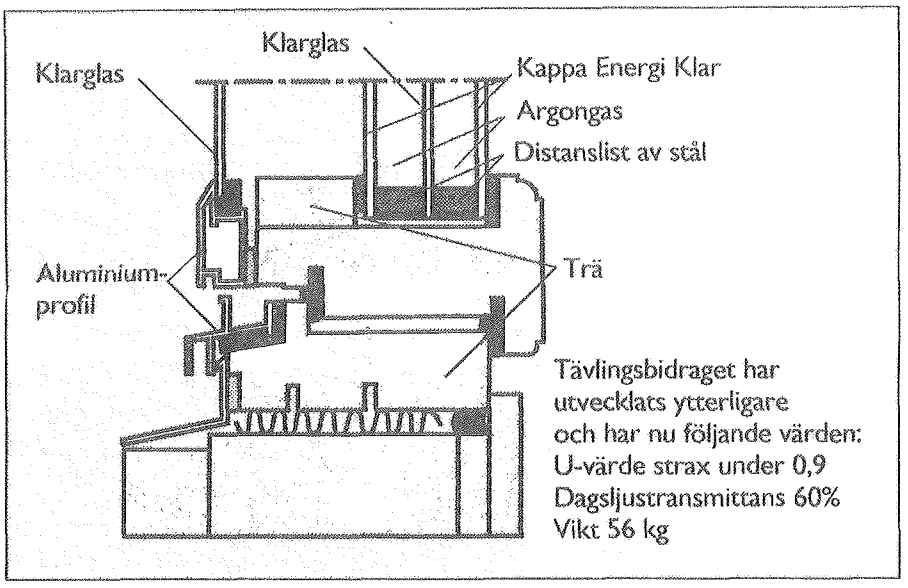
5. RAMME-/KARMPROFILER UDVIKLET I FORBINDELSE MED SVENSK KONKURRENCE

I foråret 1992 blev der i Sverige udskrevet en konkurrence [4], hvis formål bl.a. var at gøre vinduesfabrikanterne opmærksomme på det store misforhold, der er mellem henholdsvis rudens og ramme-/karmkonstruktionens isoleringsevne. Konkurrencen, der blev udskrevet af NUTEK (Närings- och teknikutvecklingsverket, Kanseliet för effektivare energianvänding), havde opstillet en række krav bl.a. til total U-værdi, lystransmittans, glasarealets andel, støjdæmpning, holdbarhed, vedligeholdelse og monteringsvenlighed. Målet i konkurrencen for den totale U-værdi for vinduet var 0,8 W/m^2K, dog med en tilladt øvre grænse på 0,9 W/m^2K.

I alle vinderforslagene er der anvendt 4 lag glas, hvoraf 2 er forsynet med en lavemissions-belægning. Derudover er mindst to af hulrummene mellem glassene fyldt med argon. Opbygning af ruden med fire lag glas er primært udført på to forskellige måder, dels som en trelagsrude plus et ekstra glas og dels som to tolagsruder i en koblet ramme. En enkelt deltager har anvendt to lag glas plus 2 lag varmereflekterende folie, men var dog ikke blandt konkurrencens vindere. Generelt for firelags-løsningerne gælder, at de har en center U-værdi på 0,75-0,90 W/m^2K (beregnet med programmet WINDOW v. 3.1 [13]), og en total bredde på ca. 75-120 mm, dvs. væsentlig tykkere konstruktioner end normalt anvendt.

Ramme-/karmkonstruktionerne udviklet i forbindelse med konkurrencen er kendetegnet ved en kraftig forøgelse af rammekonstruktionens dybde svarende til den forøgede rudetykkelse. Herved opnås automatisk en væsentlig forbedring af rammens isoleringsevne uden indførelse af kuldebroafbrydelse eller ekstra isolering. Dette fremgår også af, at et af vinderforslagene anvender en ramme-/karmkonstruktion udelukkende af træ. Nedenstående gennemgås de to vinderforslag fra ovennævnte konkurrence med beskrivelse af de anvendte løsninger, samt kommentarer til mulig anvendelse i forbindelse med eventuelt kommende rudetyper som aerogel- og vakuumruder.

AB Överums Fönsterfabrik - Överum 2000

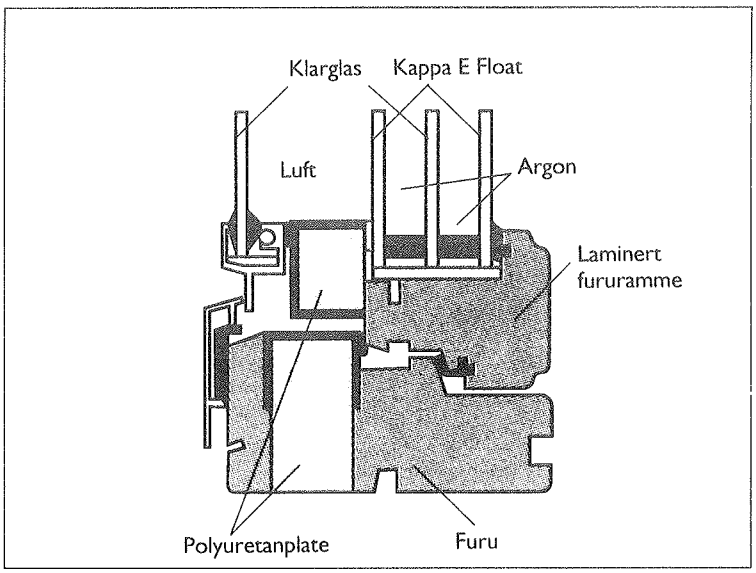


Figur 5.1. Vindue fra AB Överums Fönsterfabrik - delt vinder af NUTEK's konkurrence.

Vinduet er opbygget med en ramme og karm bestående udelukkende af træ og en rudekonstruktion med en argonfyldt trelagsrude med to lavemissionsbelægninger plus et enkelt lag glas (figur 5.1, [2]). I trelagsruden er de traditionelle afstandsprofiler af aluminium udskiftet med rustfri stålprofiler, der har en ca. 10 gange mindre varmeledningsevne. Derudover er glasafstanden øget fra ca. 12 mm til 18 mm. Det sidste lag glas er monteret i et aluminiumprofil monteret udvendig på trærammen. Den totale U-værdi er blevet målt til 0,73 W/m^2K. Denne lave værdi skyldes især forbedringerne af ruden samt en meget dyb rammekonstruktion (ca. 120 mm).

Konstruktionen opfylder kravene i konkurrencen og er teknisk simpel at lave, men er ikke energimæssig optimal. En mere ensartet fordeling af de fire lag glas ville have reduceret kuldebroen mellem de enkelte glaslag ved en fordeling af temperaturfeltet over hele tværsnittet. Især den enkelte rude monteret helt udvendig på rammen ville med fordel kunne være placeret nærmere trelagsruden. Aluminiumprofilet virker i den skitserede konstruktion som en kraftig kuldebro.

Den viste ramme-/karmkonstruktion adskiller sig ikke fra traditionelle trævinduer, bortset fra de anvendte dimensioner. Derfor vil en anvendelse til bedre isolerende ruder som aerogel- og vakuumruder ikke løse problemet mht. kuldebroen uden om ruden gennem karmen (jvf. kapitel 2).



Figur 5.2. Vindue fra Johs. Rasmussen A.S. - delt vinder af NUTEK's konkurrence.

Vinduet har en total U-værdi på 0,88 W/m^{2}K opnået gennem anvendelse af en trelagsrude med argonfyldning, to lag lavemissionsbelægninger plus et ekstra lag glas. Glasafstanden i trelagsruden er ca. 16 mm med afstandsprofil af aluminium. Den totale dybde af ramme og karm er ca. 120 mm. I såvel ramme som karm er der indbygget en kuldebroafbrydelse af polyurethanplade beskyttet af et PVC-profil, mens resten af konstruktionen er udført i træ. Det yderste lag glas er monteret i en aluminiumprofil udvendig på rammen (figur 5.2, [2]).

Denne vindueskonstruktion har en væsentlig højere U-værdi end vinduet fra Överum på trods af næsten ens rudekonstruktioner og karmdimensioner, hvor vinduet fra Johs. Rasmussen ovenikøbet har en indbygget kuldebroafbrydelse. Dette tilfælde viser tydeligt, at placeringen af kuldebroafbrydelsen har stor betydning for dens effektivitet. I dette tilfælde er kuldebroafbrydelsen placeret uden for trelagsruden, der udgør den primære del af rudens totale varmeisoleringsevne. Herved opnås ikke en reduktion af kuldebroen uden om ruden gennem karmmaterialet, og der skabes et kraftigt flerdimensionalt temperaturfelt pga. de forskudte isoleringsplaner. Derudover er der anvendt en indkapsling af kuldebroafbrydelsen med et ca. 2 mm tykt PVC-profil, hvis varmeledningsevne er ca. dobbelt så stor som træs. Indførelsen af kuldebroafbrydelsen har i dette tilfælde medført så mange andre forhold, der har betydning for varmestrømmene, at isoleringsevnen, ifht. en konstruktion helt i træ, ikke er blevet væsentlig forbedret. Anvendelse af skummateriale i stedet for træ har dog den fordel, at vægten bliver reduceret.

Med hensyn til anvendelse til nye rudetyper gælder i endnu højere grad de samme forhold som beskrevet for vinduet fra Överum.

I mange af de i alt 16 deltagende konstruktionsforslag er der anvendt isoleringsmaterialer til reduktion af ramme-/karmkonstruktionens varmetabskoefficient, men generelt gælder det, at det primære isolerende lag i ramme, karm og rude er forskudt i forhold til hinanden, hvorved der opstår en væsentlig forringelse af isoleringens effektivitet.

Konkurrencen har vist, at det er muligt at konstruere vinduer med en total varmetabskoefficient på ca. 0,8 W/m^2K ved anvendelse af 4 lag glas med 2 lag gasfyldning og 2 lavemissionsbelægninger, samt vinduesrammer med en væsentlig forøget dimension. I de præsenterede løsningsforslag er U-værdien for glasdelen og for ramme-/karmdelen omtrent den samme. Der er ikke nogen af deltagerne, der har anvendt en bedre isolerende rude i kombination med en smallere og måske lidt dårligere isolerende ramme-/karmløsning. En sådan løsning vil kunne opfylde kravet til den totale U-værdi, men med et større lys- og solindfald til følge.

Ingen af løsningsforslagene kan umiddelbart anvendes i forbindelse med bedre isolerende ruder, hvilket afspejler forskellen mellem konkurrenceprojekterne og nærværende projekt. I løsningsforslagene, der er præsenteret i forbindelse med konkurrencen, er det tydeligt, at ruden og ramme-/karmdelen opfattes som to delvis uafhængige elementer, der skal sammenbygges. De forskudte isoleringsplaner i mange af løsningerne tyder på, at udformningen af ramme og karm er fremkommet ved at betragte de enkelte konstruktionsdele særskilt, med en reduktion af U-værdien til 0,8 W/m^2K som mål. I nærværende projekt betragtes rude, ramme og karm som en samlet konstruktion, hvis sammenhæng med den aktuelle vægkonstruktion også medtages. I de udførte analyser er for hver rudetype foretaget en optimering af kuldebroafbrydelsen i ramme og karm (afsnit 2.2). I analyserne er regnet med en effektiv varmeledningsevne for kuldebroafbrydelsen på 0,04 W/mK, hvilket fører til U-værdier af samme størrelse som i konkurrenceprojekterne. Anvendelse af skummaterialer med væsentlig lavere varmeledningsevne vil kunne føre til ramme-/karmløsninger med lavere U-værdier og/eller med spinklere konstruktioner.

6. KONSTRUKTION OG AFPRØVNING AF PROTOTYPE

Den teoretiske analyse af varmestrømme i vindueskonstruktioner viser, at en simpel kuldebroafbrydelse i ramme og karm i forlængelse af ruden bevirker en væsentlig formindskelse af vinduets varmetab. Derudover er det især afstandsprofilets varmeledningsevne, der har betydning for forskellen mellem vinduets totale U-værdi og rudens center U-værdi.

Den eksperimentelle del af projektet har til formål at dokumentere ovenstående forhold samt at demonstrere, at det er praktisk muligt at konstruere en ramme-/karmkonstruktion med fuld kuldebroafbrydelse.

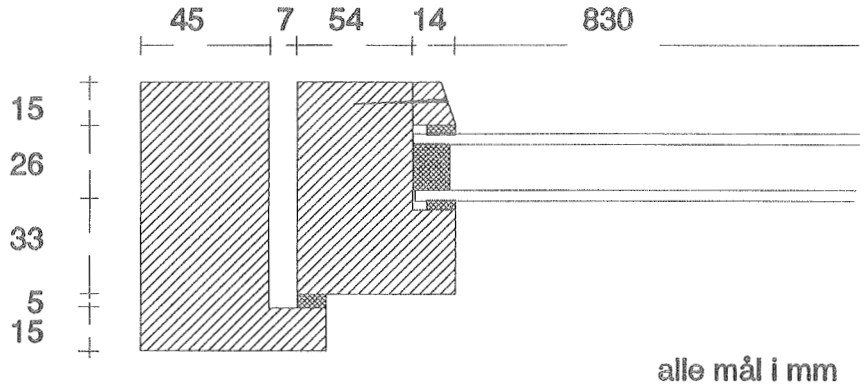
Til opfyldelse af dette formål er der konstrueret to vinduer, hvor den ene konstruktion er udført udelukkende i træ, mens den anden er udført med en kuldebroafbrydelse af 25 mm hård polystyrenskum (ROOFMATE). Derudover er der anvendt to ruder, begge med ét lag hård reflekterende belægning og 12 mm luft. Den ene rude er konstrueret på traditionel vis med afstandsprofil af aluminium, mens den anden er samlet i laboratoriet med anvendelse af et 12 mm isolerende afstandsprofil. De to ruder adskiller sig kun ved at have forskelligt afstandsprofil. Den eksperimentelle undersøgelse består således af fire målinger, hvorved alle kombinationsmuligheder af isoleret ramme-/karm og afstandsprofil bliver undersøgt. Målingerne består dels i en U-værdi bestemmelse og dels i måling af overfladetemperaturer på rude- og ramme-/karmkonstruktionen.

6.1 Konstruktion af rude med isolerende afstandsprofil

Det isolerende afstandsprofil er det tidligere beskrevne SUPERSPACER profil, der består af silicone med indstøbt fugtabsorberende materiale monteret med en tynd aluminiumfolie på den ene side. Varmeledningsevnen er af fabrikanten opgivet til 0,12 W/mK [11]. Profilet ankommer indpakket i en sammensvejst aluminiumspose, der hindrer, at profilet opsuger fugt fra luften. Profilet er selvklæbende på de to sider, der skal have kontakt med glasskiverne, og monteres ca. 3 mm inde på glasskiven, hvorved der er plads til den afsluttende butyl- eller urethanfuge. Det relativt bløde profil kræver en omhyggelig montering for opnåelse af pæne lige sider i ruden. Der er til dette formål udviklet et specialværktøj, der imidlertid ikke er anvendt i dette projekt, men som kan rekvireres hos forhandleren.

6.2 Konstruktion af ramme-/karmprofilerne

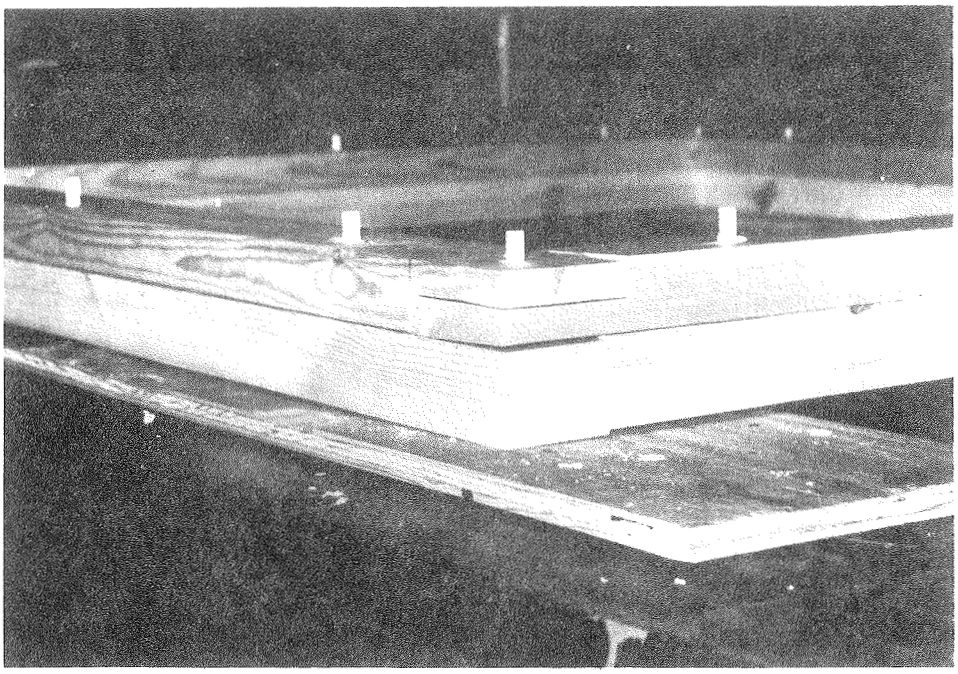
Vinduernes ydre mål er 1070 mm · 1070 mm med en karmdybde på 93 mm og et glasareal på 830 mm · 830 mm svarende til en glasandel på 60% (se figur 6.2.1). Vinduerne er konstrueret som oplukkelige udadgående vinduer af hensyn til demonstrationsformålet, idet de anvendte løsninger for oplukkelige vinduer umiddelbart kan overføres til faste vinduer. De ydre mål er bestemt af måleopstillingen, der anvendes til U-værdibestemmelsen. De øvrige dimensioner er valgt med baggrund i traditionelle vindueskonstruktioner, og er således ikke et forsøg på optimering af ramme-/karmkonstruktionen hverken i termisk eller styrkemæssig henseende.



Figur 6.2.1. Vandret snit i prototypekonstruktion uden kuldebroafbrydelse.

Referencekonstruktion

Referencekarm og -ramme er konstrueret udelukkende i træ og er tappet sammen i hjørnerne med gennemgående trædybler (figur 6.2.2).



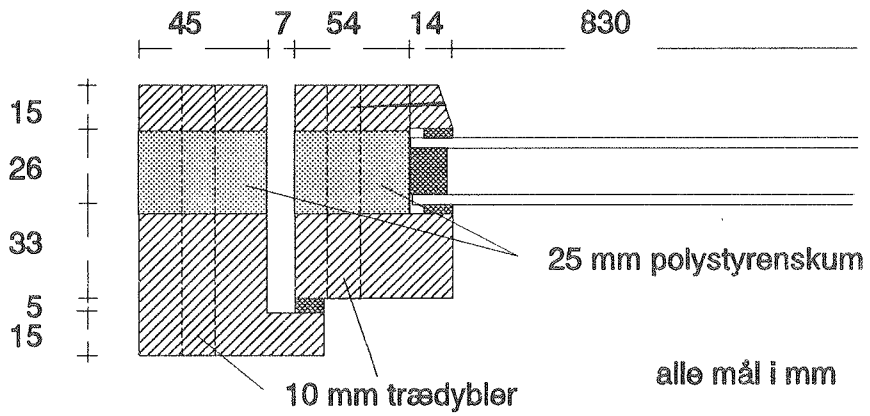
Figur 6.2.2. Samlet referencekarm før afskæring af dybler.

Rammen er udformet med henblik på udnyttelse af princippet med den bærende del indvendigt for rudens plan. Dette er ikke nødvendigt for referencekonstruktionen, men af hensyn til den senere sammenligning af U-værdier har de to vindueskonstruktioner de samme dimensioner.

Rammen er fastholdt i karmen med to glidebeslag. Beslagene er i rammen monteret i den bærende del inden for rudens plan. Ruden er monteret udefra i rammen og fastholdes af udvendige glaslister af træ. Ved konstruktion af vinduet er der ikke gjort noget ud af bortledning af regnvand, idet prototyperne udelukkende skulle underkastes indendørs afprøvning.

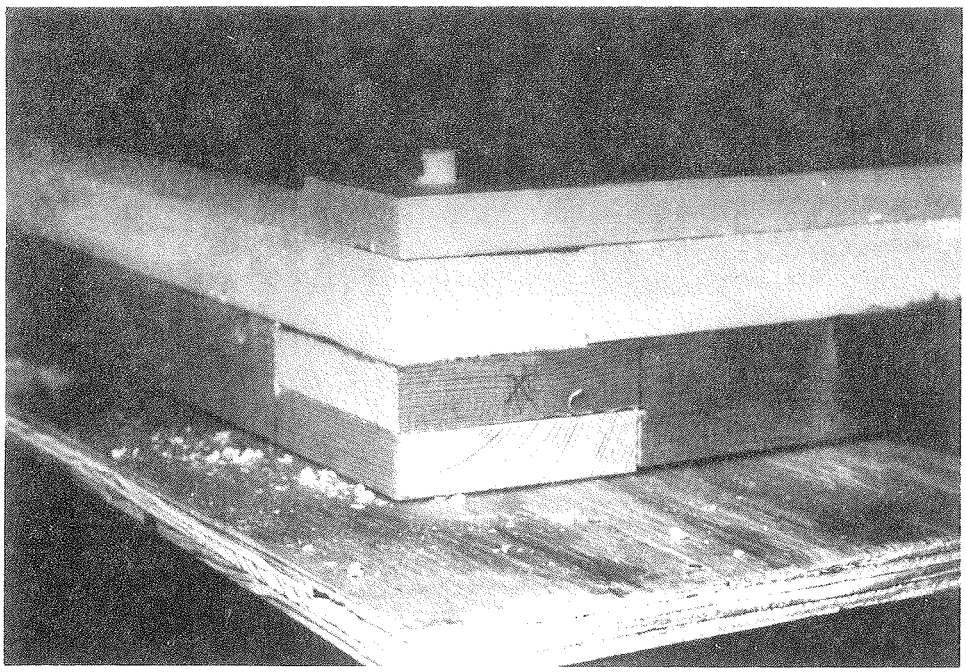
Konstruktion med brudt kuldebro

Konstruktionen med brudt kuldebro er samlet af tre dele: Den indvendige bærende del, et 25 mm isoleringslag af hård polystyrenskum og en udvendig afdækning af 15 mm træ. Alle tre dele er limet sammen og holdes yderligere på plads af 5 gennemgående trædybler (diameter = 10 mm) i hver af vinduets fire sider. Dyblernes gennembrydning af isoleringslaget medfører, at den resulterende varmeledningsevne øges med ca. 1%. Anvendelsen af polystyrenskum skyldes dels materialets store trykstyrke, der udnyttes til understøtning af ruden, og dels en passende varmeledningsevne på 0,036 W/mK. Ruden monteres på samme måde som i referencekonstruktionen med udvendige glaslister af træ, der skrues ned i den udvendige afdækning. Figur 6.2.3 viser et vandret snit i konstruktionen med brudt kuldebro.

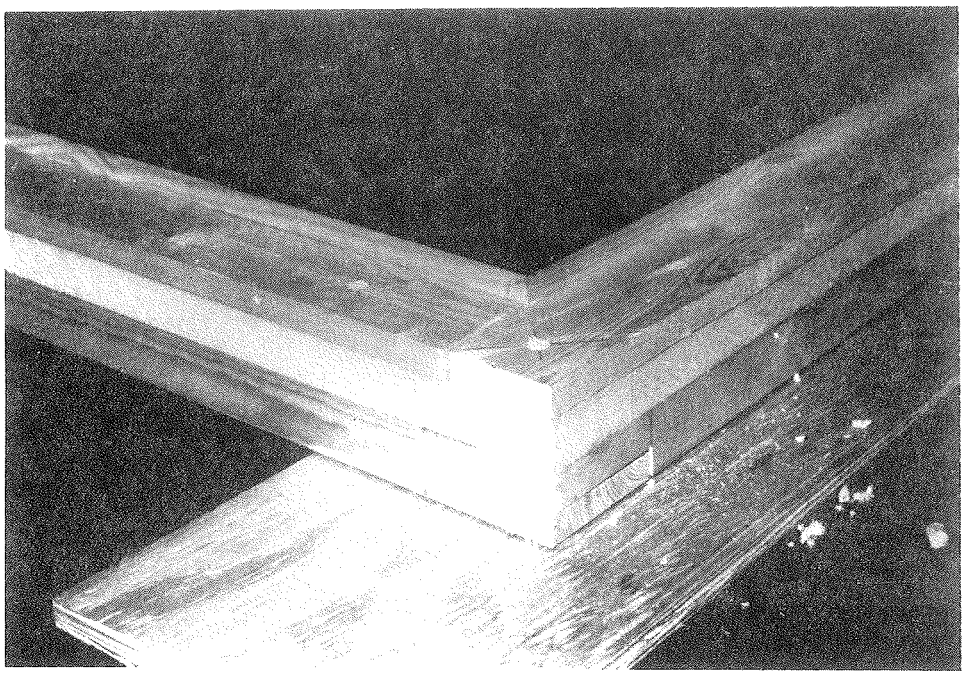


Figur 6.2.3. Vandret snit i prototype med brudt kuldebo af 25 mm hård isoleringsplade. Den indvendige bærende del vender nedad på tegningen.

På næste side er vist to stadier af samling af vinduesramme med brudt kuldebro. Figur 6.2.4 viser således en detalje af en hjørnesamling, hvor den ene halvdel af isoleringen er monteret, og det færdige resultat er vist i figur 6.2.5.



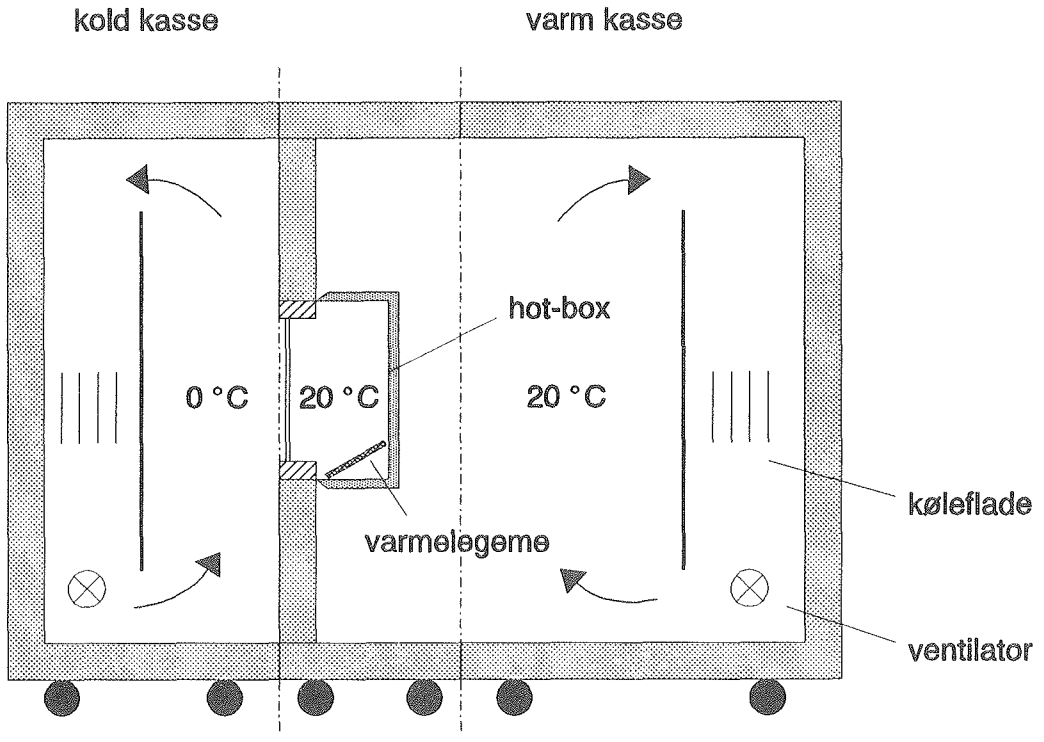
Figur 6.2.4. Hjørne af ramme med brudt kuldebro, hvor den ene halvdel af isoleringen er monteret.



Figur 6.2.5. Hjørne af færdig ramme med brudt kuldebro.

6.3 Beskrivelse af måleopstilling

Målingerne på vindueskonstruktionerne udføres som "guarded hot box" målinger ved anvendelse af laboratoriets prøvestand for laboratorietest af solvægge [9]. Prøvestanden består af to velisolerede bokse, der monteres på hver side af det aktuelle prøveemne, i dette tilfælde en væg bestående af en ca. 20 mm træfiberbetonplade isoleret med 100 mm polystyrenskum (figur 6.3.1), hvori det aktuelle vindue er monteret. Hver af boksene er forsynet med varme- og køleanlæg samt ventilatorer til sikring af en ensartet temperaturfordeling, hvorved en konstant temperaturdifferens over prøveemnet kan etableres. Målingen på vinduet udføres ved at placere en isoleret målekasse (hot-box) på den varme side af vinduet. Målekassen har et kantmål, der svarer til vinduets ydre dimensioner, og er endvidere forsynet med et varmelegeme (figur 6.3.1).

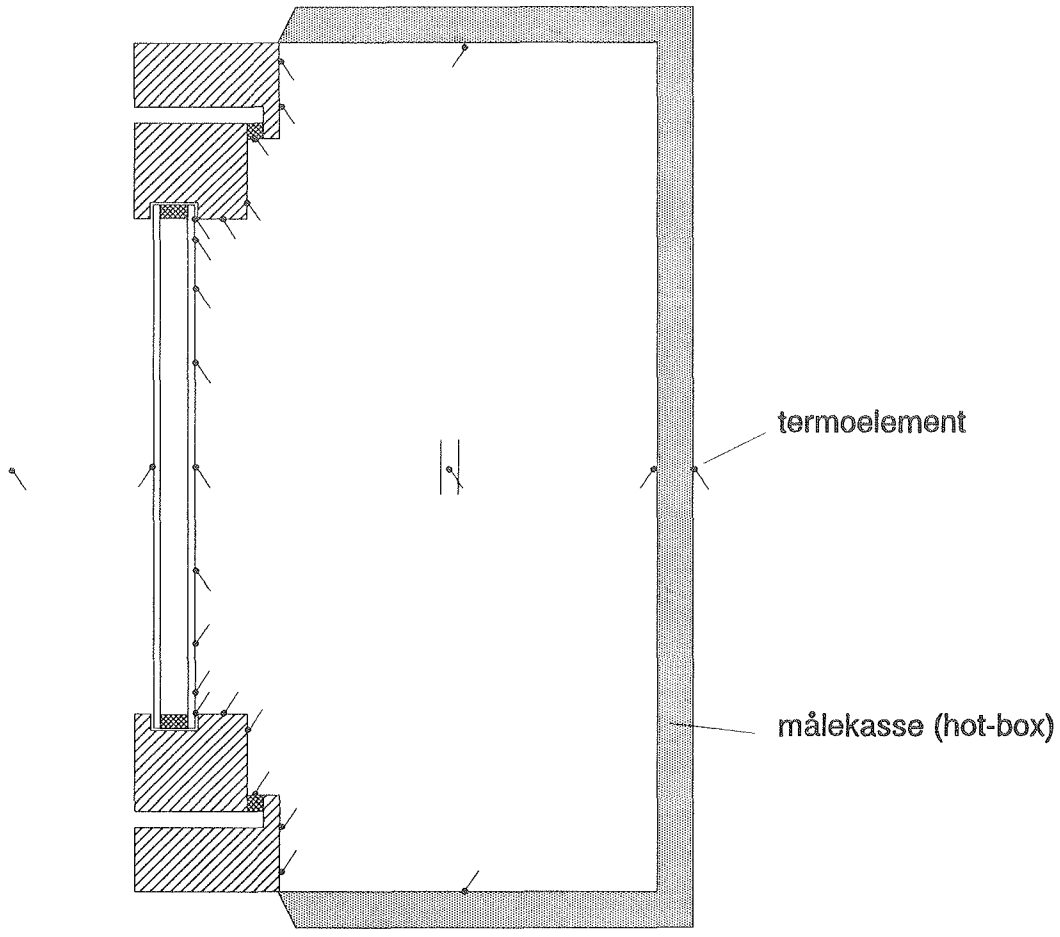


Figur 6.3.1. Lodret snit i prøvestanden anvendt ved måling på vinduesprototyperne efter "guarded hot-box" princippet.

Målekassen er fremstillet af 50 mm polystyrenskum, der er limet og tætnet med ekspanderende polyurethanlim. De indvendige mål er 1082 mm · 1082 mm · 400 mm. Varmelegemet er konstrueret af et 34 meter langt stykke båndstål og har en overflade på ca. 1 m^2, hvilket resulterer i en jævn varmeoverføring i kassen [7]. Den nødvendige effekt kan justeres ved anvendelse af en 0-30 V strømforsyning, der resulterer i en konstant effektafgivelse uafhængig af svingninger i netspændingen. Målekassen opvarmes til samme temperatur som i det bagvedliggende rum, hvorved det eneste varmetab, der er fra kassen, sker gennem vinduet. Samhørende værdier af effekttilførsel til kassen og temperaturdifferens over vinduet registreres, hvorved den stationære varmetabskoefficient bestemmes.

Under de foretagne målinger er temperaturen i målekassen ca. 23 °C og i den kolde kasse ca. 3 °C. Usikkerheden på den målte varmetabskoefficient vil afhænge af den præcision hvormed der kan opretholdes ens temperaturer i målekassen og det bagvedliggende rum. Ved en temperaturdifferens over vinduet på 20 K vil en temperaturdifferens over målekassens øvrige sider på 0,5 K resultere i en fejl på mindre end 5%. Alle temperaturer måles med kobber-/konstantan termoelementer, mens den afsatte effekt findes ud fra samhørende værdier af spænding og strømstyrke tilført varmelegemet. Det viste sig under målingerne, at opretholdelse af ens lufttemperatur i målekasse og det bagvedliggende rum ikke medfører en elimination af varmestrømmen over målekassens sider. Dette skyldes, at strålingsudveksling mellem vinduet og målekassens inderside resulterer i indvendige overfladetemperaturer på målekassen, der er ca. 2 K lavere end lufttemperaturen. Varmetilførslen til målekassen blev derfor justeret således, at temperaturforskellen mellem den udvendige og den indvendige overflade af målekassen blev mindst mulig. Varmetabskoefficienten skal dog stadigvæk relateres til lufttemperaturen i målekassen.

Vinduet er monteret med en ca. 10 mm bred fuge udskummet med polyurethan og er forsynet med en lang række målepunkter til fastlæggelse af overfladetemperaturer på såvel rude som ramme og karm. Målepunkternes placering fremgår af figur 6.3.2.



Figur 6.3.2. Placering af målepunkter til fastlæggelse af overfladetemperaturer på ramme og karm.

6.4 Resultat af målinger

De målte værdier af de fire målinger er vist i nedenstående tabel 6.4.1 samt i tabel 6.4.2. Ved bestemmelse af den eksperimentelt fundne U-værdi har det været nødvendigt at korrigere effekten afsat i målekassen. Korrektionen skyldes, at temperaturen uden om målekassen og dermed også overfladetemperaturerne på den udvendige side af målekassen svingede med ca. 1,5 K. Aflæsning af temperaturer og effekttilførsel blev derfor foretaget hhv. ved maksimum- og minimumværdi af udsvinget. For begge aflæsninger beregnes den tilhørende varmestrøm over målekassens sider, og den anvendes til korrektion af den målte effekt afsat i målekassen. Beregningen af korrektionen foretages ved at de målte overfladetemperaturer regnes repræsentative for den overflade, hvorpå de er monteret. For hver side i målekassen beregnes arealet, idet udstrækningen regnes til midt i den tilstødende side. Herved kompenseres for varmetabet gennem målekassens hjørner.

I tabel 6.4.1 er den anførte effekt fundet som middel af de to aflæsninger inkl. korrektion. Tallet i parantes er middelværdien af den anvendte korrektion. De øvrige værdier i tabellen er ligeledes fundet som middelværdien af de to aflæsninger.

Tabel 6.4.1. Målte og beregnede varmetabskoefficienter for de fire kombinationer af ruder og ramme-/karmkonstruktioner. Tallet i parantes angiver den anvendte korrektion på effekten.

Kombination I: alm. trækonstruktion, rude med aluminiumprofil
Kombination II: alm. trækonstruktion, rude med SUPERSPACER-profil
Kombination III: ramme-/karmkonstruktion med brudt kuldebro, rude med aluminiumprofil
Kombination IV: ramme-/karmkonstruktion med brudt kuldebro, rude med SUPERSPACER profil

Kombination	Effekt		T_{VARM}	T_{KOLD}	$UA_{MÅLT}$	$U_{MÅLT}$	U_{FRAME}
-	W		°C	°C	W/K	W/m²K	W/m²K
I	40,74	(+1,13)	23,8	3,2	2,0	1,7	1,9
II	41,77	(+1,12)	23,2	2,9	2,0	1,7	1,8
III	39,16	(-1,02)	24,2	3,0	1,9	1,6	1,8
IV	38,38	(-0,20)	23,8	3,0	1,8	1,6	1,7

Ovenstående tabel viser, at den anvendte korrektion udgør ca. 3% af den tilførte effekt. Korrektionen er behæftet med en del usikkerhed, dels på grund af det begrænsede antal målepunkter på overfladen af målekassen, og dels på grund af manglende kendskab til den præcise varmeledningsevne af den polystyren, som målekassen er opbygget af. Derudover vil måleresultaterne være behæftet med en vis indbyrdes usikkerhed, idet målekassens position ifht. vinduet kan være forskellig fra måling til måling.

Sammenlignes målingerne indbyrdes, fremgår det, at indførelsen af kuldebroafbrydelse i ramme og karm reducerer den totale U-værdi for den pågældende vindueskonstruktion og rudetype med ca. 10%. Resultatet af beregningerne med FRAME viser tilsvarende en reduktion i U-værdien på kun ca. 5%. Årsagen hertil er dels, at FRAME kun regner todimensionalt, dels at den korrekte varmeledningsevne for polystyrenisoleringen, anvendt i kuldebroafbrydelsen, ikke er kendt.

Forskellen mellem ruden med traditionelt afstandsprofil af aluminium og ruden med det isolerende afstandsprofil fremgår ikke af de målte U-værdier for vinduerne, hvilket især må tilskrives måleusikkerheden i forsøget. Sammenlignes den teoretisk fundne reduktion i U-værdien på ca. 0,05 W/m²K med de målte U-værdier, udgør den søgte forskel ca. 3%, eller hvad der svarer til den anvendte korrektion af effekttilførslen. Målingerne udført i den isolerede ramme viser dog et svagt fald i U-værdien, når den traditionelle rude udskiftes med den forbedrede rude. Derudover kan de to ruder være forskellige med hensyn til de optiske egenskaber, f.eks. kan emissionskoefficienten for den reflekterende belægning i ruden med

det forbedrede afstandsprofil være blevet reduceret på grund af støv under samling af ruden i Laboratoriets forsøgshal. Endelig er betydningen af den tynde aluminiumfolie på afstandsprofilet meget usikker.

Sammenlignes de målte og beregnede værdier for hver måleserie, er der en væsentlig forskel i niveauet af U-værdierne. Årsagen hertil er hovedsagelig manglende kendskab til den korrekte varmeledningsevne for de indgående materialer i konstruktionen.

Ud over bestemmelse af U-værdien for de forskellige vindueskonstruktioner, blev der også målt en række overfladetemperaturer. Idet temperaturniveauet i de enkelte måleserier ikke er konstant, er der foretaget en normalisering af de målte temperaturer, ved at regne alle målte temperaturer om til en referencetilstand med 20 °C varm luft på den indvendige side og 0 °C udvendigt. Omregningen er anskueliggjort med nedenstående formel:

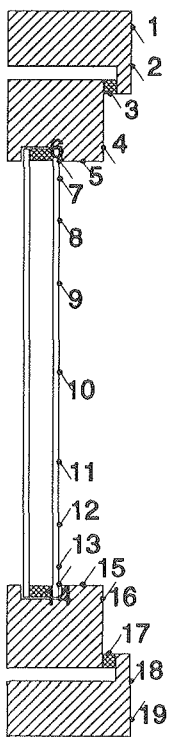
$$T_{overfl,norm} = 20\ °C - \frac{T_{inde} - T_{overfl,målt}}{T_{inde} - T_{ude}} \cdot (20 - 0)\ °C$$

De normerede målte temperaturer er vist på næste side (tabel 6.4.2). Det skal bemærkes, at der er en signifikant forskel på den indvendige overfladetemperatur af de to ruder, hvilket indikerer, at der er forskel på de to reflekterende belægninger. Dette kan også forklare, at den forventede reduktion af U-værdien på grund af et bedre isolerende afstandsprofil ikke kunne identificeres ved målingerne.

Temperaturen ved glas/rammesamlingen øges med ca. 0,5 K, når afstandprofilet af aluminium udskiftes med SUPERSPACER-profilet. Temperaturforøgelsen fremkommer på trods af, at det inderste glas er ca. 0,5 K koldere i den forbedrede rude end i den traditionelt opbyggede rude.

Indførelse af kuldebroafbrydelsen i ramme og karm medfører en forøgelse af de indvendige overfladetemperaturer med 0,2-0,5 K.

Tabel 6.4.2. Målte overfladetemperaturer på vindueskonstruktion, hhv. med og uden kuldebroafbrydelse i ramme og karm af 25 mm polystyrenskum. For hver vindueskonstruktion er der angivet værdier dels for en traditionel rudekonstruktion med afstandsprofil af aluminium, dels for en rudekonstruktion med afstandsprofilet SUPERSPACER. Begge tolagsruder er forsynet med ét lag hård lavemissionsbelægning og 12 mm luft.
De anførte temperaturer er normeret svarende til en indetemperatur på 20 °C og en udetemperatur på 0 °C.

Overfladetemperaturer i °C	Målepunkt	Uden kuldebroafbrydelse		Med kuldebroafbrydelse	
		Alu.-profil	Superspacer	Alu.-profil	Superspacer
	1	15,7	15,8	15,9	16,3
	2	15,8	15,8	16,1	16,3
	3	12,8	12,7	13,6	13,8
	4	15,6	15,7	16,2	16,3
	5	15,0	15,2	15,5	15,9
	6	10,6	11,1	10,6	11,9
	7	13,7	13,7	14,0	13,8
	8	14,7	14,2	14,7	14,2
	9	14,6	14,0	14,7	14,0
	10	14,5	13,9	14,6	14,0
	11	14,5	14,0	14,8	14,3
	12	14,3	13,6	14,6	13,9
	13	12,4	11,7	12,3	12,0
	14	9,5	9,8	9,3	9,9
	15	13,0	13,1	13,9	13,7
	16	14,2	14,3	14,7	14,7
	17	12,2	13,0	13,0	12,6
	18	14,8	15,1	15,0	14,8
	19	15,2	15,5	15,3	16,0

7. KONKLUSION

Det totale varmetab gennem en vindueskonstruktion består af et komplekst sammenspil mellem rudetype, rudekonstruktion, udformning af vinduesramme og -karm samt vinduets tilslutning til vægkonstruktionen.

Afstandsprofilet i ruden er traditionelt konstrueret af aluminium og er kraftigt medvirkende til, at ruder med lille center U-værdi får en væsentlig større total U-værdi. Anvendelse af større og bedre isolerende glaslister afhjælper kun til en vis grad problemet. Således skal en 16 mm tyk glasliste af isoleringsmateriale med en varmeledningsevne på 0,04 W/mK have en højde på 60 mm for at eliminere kuldebroen i kantsamlingen i en trelagsrude med en center U-værdi på 0,94 W/m^2K.

Der er de senere år blevet markedsført flere alternative afstandsprofiler med brudt kuldebro. Det indtil videre mest lovende profil består udelukkende af silicone med en meget tynd aluminiumsfolie. Anvendes profilet (SUPERSPACER), der har en varmeledningsevne på 0,12 W/mK, i modsætning til den traditionelle løsnings resulterende værdi på ca. 10 W/mK i den nævnte trelagsrude, kan glaslistehøjden reduceres med 25% fra de tidligere 60 mm til 45 mm. For en kvadratisk rude med kantlængden 1,0 meter vil U-værdien for vinduet kunne reduceres med ca. 6% ved udskiftning af aluminiumprofilet med SUPERSPACER-profilet, ved traditionel montering i vinduesramme.

I forbindelse med udvikling af delvis evakuerede ruder med monolitisk silica aerogel (AIR-GLASS) er der udviklet et specielt afstandsprofil i rustfrit stål, der i sig selv har en varmeledningsevne, der er ca. 10 gange mindre end aluminiums. Derudover er profilet bælgformet, hvorved vejlængden i materialet er væsentlig forøget. Den ækvivalente varmeledningsevne for profilet bliver på denne måde ca. 0,22 W/mK.

Ved udvikling af vakuumruder, dvs. ruder, hvor varmetransporten ved ledning og konvektion i luftlaget er elimineret, anvendes en sammensvejsning af rudens glaslag langs kanten, og det medfører en meget kraftig kuldebro. Både for aerogel- og vakuumruder vil der kræves en glaslistehøjde, defineret som ovenfor, på ca. 70 mm. Dette er kun 10 mm mere end for trelagsruden på trods af, at center U-værdien for de nye rudetyper kun er halvt så stor. Årsagen er, at det er varmemodstanden i glaslagene, der bliver dominerende pga. den forøgede vejlængde fra øverste kant af indvendig glasliste til øverste kant af udvendig glasliste.

Forøgelse af glaslisternes højde vil reducere det transparente areal og dermed lys- og solindfaldet. For et sydvendt vindue på $1{,}2 \cdot 1{,}2$ m^2 vil nettoenergitilførslen over fyringssæsonen blive reduceret for alle de undersøgte rudetyper, hvis glaslistehøjden øges.

Varmetabet gennem vinduets ramme- og karmareal ved anvendelse af traditionelle konstruktioner fører til en væsentlig forøgelse af den totale U-værdi for vinduer med højisolerende rudetyper. Monteres en kvadratisk rude med kantlængden 1,0 meter i en traditionel ramme-/karmløsning med ydre mål på $1{,}2 \cdot 1{,}2$ meter, bliver den totale U-værdi for vinduet ca. 18% større end center U-værdien på 0,94 W/m^2K for trelagsruden.

Tilsvarende bliver den totale U-værdi henholdsvis 79% og 116% større end center U-værdien for aerogel- og vakuumruden.

Kuldebrovirkningen i ramme og karm kan reduceres ved udbygning af traditionelle ramme-/karmkonstruktioner med isolering på inder- eller ydersiden eller ved indførelse af nye ramme-/karmtyper med indbygget kuldebroafbrydelse. Førstnævnte mulighed fører imidlertid til meget store isoleringstykkelser, hvis ramme-/karmarealet skal have samme U-værdi som rudens midte. For trelagsruden med center U-værdien 0,94 W/m^{2}K kræves en samlet isoleringstykkelse på 25 mm (varmeledningsevne = 0,04 W/mK). For aerogelruden skal isoleringstykkelsen øges til 180 mm, mens det for vakuumruden er umuligt at opnå samme U-værdi på denne måde. Dette skyldes rudens ringe tykkelse (8,5 mm), hvorved der skabes et kraftigt flerdimensionalt temperaturfelt, som et isoleringslag monteret på eksisterende ramme-/karmkonstruktion ikke kan kompensere for.

Indføres en kuldebroafbrydelse i ramme- og karmkonstruktionen i form af et isolerende lag i rudens forlængelse og med samme tykkelse som ruden, opnås en langt mere effektiv reduktion af U-værdien. Har isoleringslaget en varmeledningsevne på 0,04 W/mK, bliver den totale U-værdi for trelagsvinduet lig rudens center U-værdi på 0,94 W/m^{2}K.

For aerogelruden (tykkelse = 30 mm) vil ramme-/karmarealet med 30 mm kuldebroafbrydelse betyde en forøgelse af vinduets totale U-værdi med 38%, hvilket er en halvering af det ekstra varmetab gennem ramme og karm sammenlignet med en traditionel konstruktion. Øges kuldebroafbrydelsens tykkelse til 88 mm, vil den totale U-værdi omtrent svare til center U-værdien for aerogelruden på 0,42 W/m^{2}K.

I tilfældet med vakuumruden vil det pga. af rudens lille tykkelse ikke være muligt at reducere den totale U-værdi ned til rudens center U-værdi ved indførelse af kuldebroafbrydelse i ramme og karm. Indføres en kuldebroafbrydelse på 8,5 mm, er den totale U-værdi ca. 90% større end center U-værdien på 0,37 W/m^{2}K. Øges kuldebroafbrydelsens dimension til 100 mm, bliver den tilsvarende totale U-værdi stadig 35% større end center U-værdien. Anvendelse af kuldebroafbrydelse i ramme og karm vil dog altid føre til en væsentlig forbedring af vinduets totale isoleringsevne. Princippet om brudt kuldebro kan umiddelbart overføres til faste vinduer.

Kuldebroafbrydelsen kan udføres ved at koncentrere ramme- og karmkonstruktionens afstivende del, enten inden for eller uden for rudens plan. Den resterende del af ramme-/karmkonstruktionen skal sikre, at ruden understøttes og fastholdes. Understøtningen udgøres af et isoleringslag med tilstrækkelig stivhed, og fastholdelsen sker ved hjælp af et smalt profil, fastgjort til den afstivende ramme/karm gennem enkelte gennembrydninger af kuldebroafbrydelsen.

Placeringen af den afstivende del af ramme og karm helt inden for eller uden for rudens plan betyder, at der, uden ændring af isoleringsevnen, kan anvendes materialer med større styrke, men med højere varmeledningsevne, f.eks. stål og aluminium. Herved er der mulighed for reduktion af dimensionerne for denne del af ramme-/karmkonstruktionen, hvorved den totale dybde af ramme og karm kan tilpasses traditionelle ramme-/karmkonstruktioner uden at reducere isoleringsevnen.

Det synlige ramme-/karmareal, set udefra, skal være så lille som muligt, hvorved lys- og solindfaldet udnyttes bedst muligt. Placering af ramme-/karmkonstruktionens afstivende del på den indvendige side af ruden vil gøre det muligt at mindske arealet af ramme og karm, vendende mod det fri. Reduceres ramme-/karmbredden (med brudt kuldebro), set udefra, fra 108 mm til 38 mm, forbedres energibalancen for et 1,2 · 1,2 m^2 sydvendt vindue med 45-90 kWh i fyringssæsonen, afhængig af rudetypen. For øst/vest vendte vinduer opnås tilsvarende en forbedring på op til 50 kWh/fyringssæson. Kun i tilfældet med en almindelig tolags termorude er der en negativ effekt på -2 kWh. Nordvendte vinduer viser samme mønster, idet det kun er vinduet med den almindelige termorude, der resulterer i en dårligere energibalance ved reduktion af ramme-/karmbredden.

Ved montering af ramme-/karmkonstruktioner med brudt kuldebro er det vigtigt, at isoleringsplanet i vindueskonstruktionen fungerer som en videreførelse af væggens isoleringslag.

Fabrikation af ramme- og karmkonstruktioner med brudt kuldebro vil kræve en mere kompleks arbejdsgang med forøgelse af priserne til følge. Brugerne vil til gengæld opnå en væsentlig reduktion i energiforbruget, bedre indeklima, mindre risiko for kondens samt en forøgelse af bygningens transparente areal. Konstruktionen med brudt kuldebro kan både anvendes i nybyggeri og eksisterende bygninger uden, at det ændrer bygningens udseende.

Den eksperimentelle del af dette projekt skal ses som en afprøvning af den første prototype, der er konstrueret med henblik på demonstration af den gennemgående idé. Prototypen er således ikke optimeret til anvendelse i forbindelse med meget højisolerende rudetyper. Målingerne foretaget på hhv. en referencekonstruktion af træ og en prototype med kuldebroafbrydelse af 25 mm polystyrenskum i ramme og karm viser en markant forøgelse af vindueskonstruktionens isoleringsevne. Den totale U-værdi for vindueskonstruktionen falder fra ca. 1,7 W/m^2K til ca. 1,6 W/m^2K på trods af, at rudens center U-værdi er ca. 2,0 W/m^2K, og at glasarealet udgør ca. 60% af det samlede areal.

Udskiftning af et traditionelt afstandsprofil af aluminium med et SUPERSPACER-profil resulterede ikke i en målbar ændring af vinduets U-værdi. Det skyldes, at måleusikkerheden gør det umuligt at eftervise den 3% forbedring, som de teoretiske beregninger forudsagde. Målingerne af vinduets overfladetemperatur viser imidlertid en ca. 0,5 K stigning i temperaturen ved rudens samling med rammen.

De målte overfladetemperaturer viser desuden, at de to ruder ikke har den samme center U-værdi på trods af, at de indgående glaslag i konstruktionen er bestilt ens (og samtidig) hos den samme glarmester.

Styrkemæssigt lever prototypen med kuldebroafbrydelsen fuldt ud op til de opstillede krav mht. stivhed og funktionsevne. Som en yderligere fordel er prototypens vægt reduceret i forhold til referencevinduets med ca. 5 kg.

Der resterer endnu en del arbejde med optimering af konceptet med hensyn til materialevalg og endelig udformning, hvorefter den optimerede løsning skal gennemgå en række funktionsafprøvninger, før en eventuel produktion kan realiseres.

8. LITTERATURFORTEGNELSE

[1] Benson D.K., Tracy C.E., Potter T., Christensen C., Soule D.E., Vacuum Window Glazings for Energy-Efficient Buildings, Phase One Progress Report, Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado, USA, 1988.

[2] Det Superisolerade Fönstret Nr. 2, Pilkington Floatglas AB, Halmstad, Sverige, 1992.

[3] DS 418 - Dansk Ingeniørforenings regler for beregning af bygningers varmetab, 5. udgave, Teknisk Forlag, 1986.

[4] Energifönstertävlingen, Kanseliet för effektivare energianvänding, NUTEK, Stockholm, Sverige, 1992.

[5] FRAME vers. 2.2, Enermodal Engineering Limited, Waterloo, Ontario, Canada, 1991.

[6] Hansen H.E., Kjerulf-Jensen P., Stampe O.B., Varme- og Klimateknik Grundbog, DANVAK ApS, Lyngby, Danmark, 1990.

[7] Jensen K.I., Vinduer og solvægge med monolitisk silica aerogel, Meddelelse nr. 220, Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, Lyngby, Danmark, 1991.

[8] Owens-Corning Premium Window, Technical Information, 1990.

[9] Paludan-Müller C., Undersøgelse af solvægge ved hjælp af indendørs forsøgsopstilling, Meddelelse nr. 179, Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, Lyngby, Danmark, 1987.

[10] PURAL, Technische Information, PURAL Profilwerk GmbH, Riedstadt/Erfelden, Tyskland, 1991.

[11] SUPERSPACER, Technical Information, CU Chemie Uetikon AG, Uetikon, Schweiz, 1991.

[12] Thomsen K.E., Schultz, J.M., Optimal vinduesudformning - en varmeteknisk undersøgelse, Meddelelse nr. 202, Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, Lyngby, Danmark, 1990.

[13] WINDOW vers. 3.1, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, USA, 1988.

Yderligere litteratur

Byars N., Arasteh D., Design options for low-conductivity window frames, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 25, pp. 143-148, 1992.

LavEnergi Publikationer fra Laboratoriet for Varmeisolering (LfV), DTH

1 Bolet, B., Rasmussen, N.H. & Korsgaard, V.: Ressourcebesparende kassettebyggesystem til lavenergihuse. LfV, Meddelelse nr. 197, ISSN 0905-1511, december 1988.

2 Byberg, M.R.: Fremtidens lavenergihuse, XII Nordiske VVS Kongres i København, VVS Vision 82, 2/6-4/6 1982, Særtryk. LfV, Rapport nr. 82-26, juni 1982.

3 Byberg, M.R.: Do Conservation Houses Require Sophisticated Technical Installations? LfV, Meddelelse nr. 127, ISSN 0905-1511, november 1982.

4 Byberg, M.R.: Forbedret bearbejdning af måledata fra nyt lavenergihus, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150, ISSN 0905-1511, (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 125-133, maj 1984.

5 Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Lavenergihuse i Hjortekær, Kort beskrivelse af husene. LfV, Meddelelse nr. 83, ISSN 0905-1511, maj 1979.

Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Low-Energy Houses at Hjortekær - Description of the Houses. LfV, Meddelelse nr. 83, ISSN 0905-1511, maj 1979.

Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Niedrigenergiehäuser in Hjortekær, Dänemark - Kurze Beschreibung der Häuser. LfV, Meddelelse nr. 83, ISSN 0905-1511, maj 1979.

6 Byberg, M.R. & Saxhof, B.: 6 Lavenergihuse i Hjortekær, Konstruktioner - arbejdsudførelse og erfaringer. LfV, Meddelelse nr. 120, ISSN 0905-1511, november 1982.

7 Djurtoft, R.G.: Monitoring Energy Conservation Houses, ENERGEX 82. LfV, Rapport nr. 82-28, juni 1982.

8 Djurtoft, R.G.: Beregning og måling af mekanisk luftskifte i lavenergieksperimenthuset. LfV, Rapport nr. 82-65, december 1982.

9 Djurtoft, R.G.: Nordiske retningslinier for evaluering af byggeeksperimenter - Er noget sådant muligt?, Utvärdering av Experimentbyggnadsprojekt inom Energiområdet, Nordiskt Expertseminarium 6/9-7/9 1983 i Esbo, Finland, Særtryk. LfV, oktober 1983.

10 Djurtoft, R.G.: Tidskonstanter for huse, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150, ISSN 0905-1511, (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 40-56, maj 1984.

11 Djurtoft, R.G.: Tidskonstantens betydning for husets energiforbrug, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150, ISSN 0905-1511, (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 73-82, maj 1984.

12 Djurtoft, R.G.: Must Energy Conservation Houses be Designed for Maximum Utilization of Solar Heat Gain? CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Proceedings, Volume 5, pp. 167-173.

13 Engelund Poulsen, K.: Isolerende vinduesskodder, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150, ISSN 0905-1511, (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 83-90, maj 1984.

14 Engelund Thomsen, K.: IEA Task 13 Summary Report of the Technology: Solar heating systems for domestic hot water. LfV, august 1991.

15 Engelund Thomsen, K.: Kuldebroers indflydelse på bygningers varmetab. LfV, Meddelelse nr. 225, ISSN 0905-1511, november 1991.

16 Engelund Thomsen, K.: Energy Efficient Lights and Appliances. LfV, Rapport nr. 92-15, juli 1992.

17 Engelund Thomsen, K.: Water Saving In Buildings. LfV, Rapport nr. 92-17, september 1992.

18 Engelund Thomsen, K., Jensen, S. Østergaard & Saxhof, B.: Optimization of a Danish 3rd Generation Low-Energy House Concept. Proceedings of the 5th International Conference North Sun '92 - Solar Energy at High Latitudes, pp. 65-71, Trondheim, Off-print. LfV, Juni 1992.

19 Engelund Thomsen, K. & Jensen, S. Østergaard: Vinduer - nu og i fremtiden. Sun Media, 1992. Energi & Planlægning nr. 3, pp. 11-13.

20 Engelund Thomsen, K. & Saxhof, B.: Advanced Danish Low-Energy House, IEA Task 13 Project Summary. IEA SHC Task 13, 6th Experts' Meeting, Wadahl, Harpefoss, Norge, 1992. LfV, marts 1992.

21 Engelund Thomsen, K. & Schultz, J.M.: Målinger og beregninger af solindfald gennem glaspartier under hensyntagen til skyggende genstande for lavenergihus G i Hjortekær. LfV, Rapport nr. 87-24, december 1987.

22 Engelund Thomsen, K. & Schultz, J.M.: Optimal vinduesudformning - en varmeteknisk undersøgelse. LfV, Meddelelse nr. 201, ISSN 0905-1511, december 1990.

23 Engelund Thomsen, K., Wittchen, K.B., Saxhof, B. & Lundgaard, B.: Design Summaries and Drawings for Two Danish IEA Task XIII Houses, paper til IEA Task XIII Fourth Experts' Meeting, Toronto 1991. LfV, februar 1991.

24 Engelund Thomsen, K., Wittchen, K.B., Saxhof, B. & Lundgaard, B.: Parametric Studies for Two Danish IEA Task XIII Houses, paper til IEA Task XIII Fourth Experts' Meeting, Toronto 1991. LfV, februar 1991.

25 Gullev, J.: Lavenergihuse i Hjortekær, Byggeindustrien nr. 1, 1979, pp. 9-15.

26 Huusom, J. & Lund Madsen, T.: The Thermal Indoor Climate in six Low-Energy Houses, 7th International Congress of Heating and Air Conditioning, "CLIMA--2000", Budapest 1980, Off-print. LfV, 1980.

27 Jensen, S. Østergaard: Roof Space Collector System for Low Energy Houses. Paper til IEA Task XIII 2nd Experts' Meeting, Bregenz, Østrig, 1990. LfV, marts 1990.

28 Jensen, S. Østergaard: Solar Heating System for Space Heating and Domestic Hot Water Production for Low Energy Houses. Paper til IEA Task XIII 2nd Experts' Meeting, Bregenz, Østrig, 1990. LfV, marts 1990.

29 Korsgaard, V., Byberg, M.R. & Hendriksen, P.: Experiences and Results from 2 Years Monitoring of the Energy Balance for Six Solar Assisted Low-Energy Houses in Denmark, Solar 83 Conference, Palma de Mallorca 2/10-6/10 1983, Off-print. LfV, oktober 1983.

30 Kristensen, P.E.: Performance of Hjortekær House D and F - Internal report within the Performance Monitoring Group. LfV, Rapport nr. 83-48, december 1983.

31 Rasmussen, N.H.: En analyse af energibesparelser i etageejendom fra 1940 - foranstaltningernes energi- og pengeøkonomiske konsekvenser. LfV, Meddelelse nr. 111, ISSN 0905-1511, juli 1981.

32 Rasmussen, N.H.: Trykprøvning af seks lavenergihuse i Hjortekær. LfV, Rapport nr. 82-69, december 1982.

33 Rasmussen, N.H.: Simultaneous Testing of Small Heat Pumps Under Actual Climate Conditions, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Proceedings, Volume 6, pp. 147-153.

34 Rasmussen, N.H. & Saxhof, B.: Experimental Low-Energy House at the Technical University of Denmark, description of a system for simultaneous testing of heating systems for conservation houses under actual climate conditions. LfV, Meddelelse nr. 128, ISSN 0905-1511, november 1982.

35 Rasmussen, N.H. & Saxhof, B.: 6 Lavenergihuse i Hjortekær, Effektiviteter og tomgangstab for varme- og brugsvandsanlæg. LfV, Meddelelse nr. 152, ISSN 0905-1511, juni 1984.

36 Saxhof, B.: Transmissionskoefficienter og dimensionerende varmetab for seks lavenergihuse i Hjortekær. LfV, Rapport nr. 82-11, juni 1982.

37 Saxhof, B.: Varmetabsramme og isoleringsgrad for seks lavenergihuse i Hjortekær. LfV, Rapport nr. 82-12, juni 1982.

38 Saxhof, B.: Skøn over følsomhed af målte og beregnede transmissionstab for seks lavenergihuse i Hjortekær. LfV, Rapport nr. 82-56, oktober 1982.

39 Saxhof, B.: External Insulating Shutters in Energy Conservation Houses. LfV, Meddelelse nr. 129, ISSN 0905-1511, november 1982.

40 Saxhof, B.: Målesystemer for seks lavenergihuse i Hjortekær: Vejrstation. LfV, Rapport nr. 83-5, april 1983.

41 Saxhof, B.: Målesystemer for seks lavenergihuse i Hjortekær: Måling af rum- og jordtemperaturer. LfV, Rapport nr. 83-15, september 1983.

42 Saxhof, B.: Målesystemer for seks lavenergihuse i Hjortekær: Målinger i varme- og ventilationsanlæg m.v. LfV, Rapport nr. 83-16, september 1983.

43 Saxhof, B.: Skitse til målesystem til lavenergihus G i Hjortekær. LfV, Rapport nr. 83-27, oktober 1983.

44 Saxhof, B.: Opstilling af nettoenergiregnskab efter BES-metoden for Lavenergihus G i Hjortekær (skitseprojekt). LfV, Rapport nr. 83-47, december 1983.

45 Saxhof, B.: Utilsigtede varmetab fra installationer i lavenergihuse, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150, ISSN 0905-1511, (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 91-102, maj 1984 (optrykt i VVS nr. 9, september 1985, pp. 17-21).

46 Saxhof, B.: Installationers betydning for klimaskærmens lufttæthed, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150, ISSN 0905-1511, (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 103-115, maj 1984.

47 Saxhof, B.: The Seventh Low-Energy House at Hjortekær, Denmark, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Proceedings, Volume 5, pp. 255-262.

48 Saxhof, B.: Efficient Heating and Domestic Hot Water Systems: A Must for Low-Energy Houses, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Proceedings, Volume 5, pp. 319-324.

49 Saxhof, B.: A Second Generation Low-Energy House at Hjortekær, Denmark. Paper til Building Physics in the Nordic Countries, Symposium i Lund august 1987. Proceedings pp. 291-296. Off-print. LfV, Rapport nr. 87-8, 1987.

50 Saxhof, B.: Low-Energy Houses, 1st International Symposium on Energy Savings - Focussing on electricity savings, Copenhagen 1/9-4/9 1987, Off-print. LfV, Rapport nr. 87-21, september 1987.

51 Saxhof, B.: Summary on new materials, components and system concepts - Denmark, Monograph Part 2, IEA Workshop on Advanced Solar Building Design and Analysis, Watsonville, California, February 3-6 1988. LfV, januar 1988.

52 Saxhof, B.: Designing Detailed Monitoring Programmes (Questions and some Answers). Off-print af paper til IEA Workshop: Field Monitoring - For a Purpose. Göteborg 2-5 april 1990. LfV, marts 1990.

53 Saxhof, B.: Field Monitoring - For A Purpose. IEA Task 13 Summary Report. LfV, august 1991.

54 Saxhof, B.: The Thermal Envelope - An Integrated Part of the Heating System? Science and Technology at the Service of Architecture. 2nd European Conference on Architecture (SECA), Paris 1989. LfV, Meddelelse nr. 222, ISSN 0905-1511, oktober 1991.

55 Saxhof, B., Byberg, M.R., Engelund Thomsen, K. & Wittchen, K.B.: Low-Energy House G at Hjortekær, a 2nd Generation House: A Collection of 5 Papers on Monitoring. LfV, Rapport nr. 91-23, november 1991.

56 Saxhof, B., Djurtoft, R.G., Byberg, M.R. & Aasbjerg Nielsen, A.: Six Low-Energy Houses at Hjortekær, Denmark, Description of the Houses and Presentation of Energy Measurements during the first Winter, 7th International Congress of Heating and Air Conditioning, "CLIMA-2000", Budapest 1980, Off-print. LfV, 1980.

57 Saxhof, B. & Engelund Poulsen, K.: Foundations for Energy Conservation Houses. LfV, Meddelelse nr. 130, ISSN 0905-1511, november 1982.

58 Saxhof, B. & Engelund Poulsen, K.: Projektering af lavenergihus G i Hjortekær: Analyse af en række fundamentskonstruktioner. LfV, Rapport nr. 83-45, december 1983.

59 Saxhof, B. & Engelund Poulsen, K.: Projektering af lavenergihus G i Hjortekær: Analyse af varmebehov. LfV, Rapport nr. 83-46, december 1983.

60 Saxhof, B., Engelund Thomsen, K. & Wittchen, K.B.: Parametric Studies and Monitoring Results from a Danish 2nd Generation Low-Energy House Project. CIB W67 Workshop: Low-Energy-Buildings 2nd generation. Heidenheim, 31 May-1 June, 1990. Proceedings pp. 9-1 - 9-9. Off-print. LfV, maj 1990.

61 Saxhof, B., Engelund Thomsen, K. & Wittchen, K.B.: IEA Task 13 Summary Report of the Technology: Heating Systems. LfV, september 1991.

62 Saxhof, B., Schultz, J.M. & Wittchen, K.B.: From the Zero Energy House to the 1st and 2nd Generation Houses at Hjortekær, Denmark. LfV, Meddelelse nr. 200, ISSN 0905-1511, december 1988.

63 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: Om Energiministeriets lavenergihusprojekter, specielt Hus G i Hjortekær, et 2.-generations lavenergihus, Supplerende materiale til Energiministeriets plakat-vandreudstilling. LfV, 1986.

64 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: Project Monitor: Low Energy House G, Hjortekaer, Denmark. Commission of the European Communities. Nr. 41, februar 1989.

65 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: A Second Generation Low-Energy House at Hjortekær, Denmark, i "Examples from Task XIII Experts, IEA SH&CS Task XIII Working Document", (Proceedings from the 1st Workshop, Hinterzarten, Vesttyskland, 30 jan.-1 febr. 1989) pp. 4-11, EMPA, Dübendorf, Schweiz, januar 1990.

66 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: Draft Monitoring System for the Danish IEA Task 13 Houses, paper til IEA Task XIII Fifth Experts' Meeting, Monitoring Workshop, Kandersteg, Schweiz, 1991. LfV, september 1991.

67 Saxhof, B. & Aasbjerg Nielsen, A.: Insulation and Air Tightness of six Low-Energy Houses at Hjortekær, Denmark. LfV, Meddelelse nr. 121, ISSN 0905-1511, november 1982.

Kongresbidraget, som dannede grundlaget for Meddelelse nr. 121, er udgivet på engelsk og fransk i Building Research & Practice, May/June 1983, pp. 142-153.

68 Schultz, J.M.: Analysis of Insulating Window Shutters. Paper til Building Physics in the Nordic Countries, Symposium i Lund august 1987. Proceedings pp. 17-23. Off-print. LfV, Rapport nr. 87-9, 1987.

69 Schultz, J.M.: Generelt edb-program til beregning af skyggearealer på plane flader. LfV, Rapport nr. 87-26, december 1987.

70 Schultz, J.M.: Effektiv brugsvandsopvarmning. LfV, Meddelelse nr. 226, ISSN 0905-1511, december 1991.

71 Schultz, J.M.: Isolerende Skodder. LfV, Meddelelse nr. 202, ISSN 0905-1511, december 1990.

72 Schultz, J.M. & Engelund Thomsen, K.: Thermal Analysis of Window Design. Paper til symposiet: Building Physics in the Nordic Countries. Trondheim 20-22 august 1990. Proceedings pp. 101-107. Off-print. LfV, juni 1990.

73 Wittchen, K.B.: Air-Supply in Airtight, Highly Insulated Buildings. Paper til Building Physics in the Nordic Countries, Symposium i Lund august 1987. Proceedings pp. 241-246. Off-print. LfV, Rapport nr. 87-10, 1987.

74 Wittchen, K.B.: Friskluftforsyning til tætte, velisolerede huse. LfV, Meddelelse nr. 192, ISSN 0905-1511, december 1988.

75 Wittchen, K.B.: IEA Task 13 Summary Report of the Technology: Comfort control of heating systems. LfV, august 1991.

76 Wittchen, K.B.: Simulation Technology set: Multi-Layered Glazing - IEA task XIII Advanced Solar Low-Energy Buildings. LfV, Rapport nr. 91-26, december 1991.

77 Wittchen, K.B.: Technology Simulation Set: Multi-Layered Glazing. Working Document. LfV, Rapport nr. 92-40, august 1992.

78 Wittchen, K.B. & Saxhof, B.: Dimensioning Heating Systems for Low-Energy Buildings, Considering the Influence of Fluctuating Temperatures. Paper til symposiet: Building Physics in the Nordic Countries. Trondheim, 20-22 august 1990. Proceedings pp. 171-177. Off-print. LfV, juni 1990.

79 Wittchen, K.B. & Saxhof, B.: Monitoring Advanced Solar Low-Energy Houses - Introduction for Discussion, paper til IEA Task XIII Fifth Experts' Meeting, Monitoring Workshop, Kandersteg, Schweiz, 1991. LfV, september 1991.

80 Zachariassen, H.: H&S lavenergihus i Hjortekær, Arkitekten nr. 17, 1982, pp. B5-B8.

81 Aasbjerg Nielsen, A.: Energy Consumption in Buildings, Regression Models, Six Low-Energy Houses at Hjortekær. LfV, Rapport nr. 82-68, december 1982.

82 Aasbjerg Nielsen, A.: To Økonomiprogrammer til TI-59. LfV, Rapport nr. 83-9, maj 1983.

83 Aasbjerg Nielsen, A.: En dynamisk test-metode til bestemmelse af småhuses termiske respons, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150, ISSN 0905-1511, (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 57-72, maj 1984.

84 Aasbjerg Nielsen, A.: A Dynamic Test Method for the Energy Consumption of Small Houses, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Proceedings, Volume 2, pp. 533-541.

85 Aasbjerg Nielsen, A.: Dynamisk trykprøvning - En infrasonisk metode til måling af småhuses tæthed. LfV, Rapport nr. 87-1, 1987.

86 Aasbjerg Nielsen, A., Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Lavenergihuse i Hjortekær - Statusrapport 1. LfV, Meddelelse nr. 84, ISSN 0905-1511, juni 1979.

87 Aasbjerg Nielsen, A. & Kjær Nielsen, B.: A Dynamic Test Method for the Thermal Performance of Small Houses, ACEEE Summer Study, Santa Cruz 1984. LfV, Rapport nr. 84-19, juli 1984.

88 2.-generations lavenergihus i Hjortekær, folder, LfV, 1984. Findes også på engelsk: A Second-Generation Low-Energy House at Hjortekær.

Laboratoriets meddelelsesserie, ISSN 0905-1511, forhandles gennem Byggecentrums Boghandel, Dr. Neergaardsvej 15, 2970 Hørsholm, Telefon: 45 76 73 73, Fax 45 76 76 69.

Yderligere oplysninger kan fås ved henvendelse til:

Laboratoriet for Varmeisolering
Danmarks Tekniske Højskole
Bygning 118, DK-2800 Lyngby
Telefon (+45) 45 93 44 77
Fax (+45) 45 93 17 55