

Bæredygtigt arktisk byggeri i det 21. århundrede - Energirigtige vinduessystemer

Slutrapport til
VILLUM KANN RASMUSSEN FONDEN

Rapport SR 06-11
BYG·DTU
November 2006

Energirigtige vinduessystemer

Slutrapport

VILLUM KANN RASMUSSEN FONDEN

Jesper Kragh

Jacob Birck Laustsen

Svend Svendsen

Michael Ramskov

Forord

Nærværende rapport er slutrapport for projektet med titlen Energirigtige vinduessystemer støttet af VILLUM KANN RASMUSSEN FONDEN. Projektet er udført i perioden maj 2003 til november 2006 på BYG-DTU, Danmarks Tekniske Universitet.

Målet med projektet var at udvikle et vindue med positivt energitilskud under kolde klimaforhold som i Grønland og Danmark.

Projektet har vist, at det er muligt at udvikle nye vinduesløsninger med 3-lags energiruder og smalle ramme/karm profiler, der giver en optimal kombination af varmetabskoefficient og total solenergitransmittans for hele vinduet, som fører til positive energitilskud i såvel Grønland som Danmark. Samtidigt viser projektet at det er muligt, at der udvikles vinduer med meget længere levetid end almindelige energivinduer. Der er med nærværende projekt skabt et grundlag for en videreudvikling af plusenergivinduer til kolde klimaer.

Jesper Kragh

Jacob Birk Laustsen

Svend Svendsen

Michael Ramskov

November 2006

Danmarks Tekniske Universitet

Indholdsfortegnelse

Side

RESUMÉ	7
SUMMARY	8
1 INDLEDNING	9
1.1 BEREKNINGER AF ENERGIFORBRUG VED BRUG AF FORSKELLIG VINDUER	10
1.2 DET VALGTE VINDUESKONCEPT	11
2 DAGSLYSFORSØG MED FORSKELLIGE RUDELØSNINGER	13
2.1 SPØRGESKEMAUNDERSØGELSE	15
3 UDVIKLING AF NYT VINDUESDESIGN	19
3.1 RUDEKONSTRUKTIONEN	19
3.2 FASTLÆGGELSE AF RAMME/KARM GEOMETRI	20
3.3 ENERGIOPTIMERET VINDUESDESIGN	21
3.4 RUDENS VENTILERING OG FUGTFORHOLD	22
3.5 HÆNGSEL	23
3.6 SAMLINGSBESKRIVELSE	25
3.7 MONTAGE AF VINDUET	28
3.8 U-VÆRDI BEREGNING	30
3.8.1 U-værdi beregning med <i>THERM</i> og <i>WINDOW6</i>	32
3.8.2 U-værdi beregning med <i>BISCO</i> og <i>RADCON</i> modul	33
3.8.3 Sammenfatning af simuleringresultater	35
4 CFD SIMULERING AF LUFTSTRØMNINGER I 3-LAGSRUDE	37
4.1 GEOMETRI OG BEREGNINGSNET	37
4.2 SIMULERING MED <i>FLUENT</i>	38
4.2.1 Randbetingelser og materialedata	38
4.2.2 Strålingsmodel	38
4.2.3 Turbulent eller laminar luftbevægelse	38
4.3 RESULTATER FOR CFD SIMULERING	39
4.3.1 Validering af model	39
4.3.2 Persiennes betydning for rudens U-værdi	41
5 REALISERBART VINDUESDESIGN	44
5.1 BEREGNING AF U-VÆRDI FOR PROTOTYPE	46
6 HOT BOX MÅLING AF PROTOTYPENS U-VÆRDI	47
6.1 STYRINGSPRINCIP	47
6.2 TÆTHEDSTEST	48
6.3 FORSØGSRESULTATER	48
7 KONKLUSION	50
8 REFERENCER	51

Bilagsoversigt

Bilag 1: Paper: Improved Windows for cold climates

Bilag 2: Powerpoint præsentation af paper: Improved Windows for cold climates,
♦ Nordic Symposium on Building Physics, Reykjavik 13-15 June 2005
♦ April 12th – 14th 2005 • Symposium in Sisimiut

Bilag 3: Målinger fra Spektrometer

Bilag 4: Beskrivelse af renovering af guarded hot box opstilling

Resumé

Der er i projektet udført et omfattende arbejde med at udvikle et nyt design af et lavenergivindue til kolde klimaer. Designet adskiller sig fra traditionelle lavenergivinduer ved at anvende en ikke forseglet 3 lags rude med stor glasafstand, der gør det muligt at indbygge en solafskærmning i form af en persienne eller et rullegardin. Selve ruden er opbygget af tre separate glas, hvor det yderste og inderste har en hård lavemissionsbelægning vendende mod hulrummet. Det midterste glas er jernfattig for at maksimere solindfaldet. Afhængigt af glasafstanden mellem de tre glas får ruden en U-værdi på ca. $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ og en g-værdi på 0,58. Ved at anvende smalle ramme/karm profiler maksimeres solindfaldet gennem vinduet, hvilket er en fordel i kolde klimaer, hvor al solindfald kan antages, at kunne udnyttes til rumopvarmning hele året rundt. Den relativt store glasafstand bevirker at ramme/karm dybden øges, hvilket giver en bedre isolerende konstruktion. Ramme/karmen laves i glasfiberarmeret polyester, som er et vejrbestandigt materiale, der i kombination med den ikke forsegledede rude bevirker, at vinduet har en betydelig bedre holdbarhed end traditionelle vinduer.

Det er ofte hævdet at den hårde lavemissionsbelægning kan forvrænge farvegengivelsen mere end den bløde lavemissionsbelægning og derved give en dårligere dagslyskvalitet i lokalet. Dette er undersøgt gennem en spørgeskemaundersøgelse, hvor 36 testpersoner blev bedt om at vurdere dagslysf forholdene i fire ens kontorlokaler med forskellige rudeløsninger. Undersøgelsen viste bl.a. at der ikke var nogen markant forskel i oplevelse af dagslyskvaliteten i lokalerne med en 3-lags rude med bløde eller hårde lavemissionsbelægninger. Det kunne derfor forsvares at anvende den hårde lavemissionsbelægning i det videre arbejde med designet af lavenergivinduet.

Der er desuden opbygget en detaljeret CFD model af luftstrømningerne i en 3-lags rude med stor glasafstand. Modellens beregning af rudens center U-værdi stemmer fint overens med resultatet fra mere simple beregningsprogrammer. Modellen er desuden udvidet med indvendige lameller mellem de to yderste glas. En beregning af rudens center U-værdi med lukkede lameller viste en reduktion af U-værdien på ca. 10 procent.

Ud fra analyserne er et nyt vinduesdesign foreslået og beskrevet i nærværende rapport. Alle detaljer og samlingstekniske problemer er skitseret og et forslag til en konstruktionsvejledning er givet. Der er givet et forslag til et ramme/karm konstruktion bestående af tre separate profiler af glasfiberarmeret polyester med en total bredde på kun 21 mm. Profilerne findes ikke i handlen og der skal derfor først udvikles værktøjer/forme til at producere profilerne med. Et vindue opbygget med dette profil-system og en 3 lags rude med to hårde belægninger får en samlet U-værdi på 1,04 og en g-værdi på 0,54, hvilket giver et energitilskud på 74 og 13 kWh/m² pr. år i henholdsvis Grønland og Danmark. Sammenlignes dette med energitilskuddet for et standard træ vindue med energirude svarer dette til en forbedring på ca. 70 kWh/m² pr. år.

En prototype af vinduet i standard dimensionen 1230 x 1480 mm er opbygget på værksted på BYG-DTU og testet i en guarded hot box opstilling til måling af U-værdien. Målingen viste en samlet U-værdi for vinduet på $1,03 \text{ W/m}^2\text{K}$, hvilket således stemmer fint overens med de udførte beregninger.

Summary

In the project, thorough work has been done on developing a new design of a low-energy window for cold climates. The design differs from traditional low-energy windows by using non-sealed triple-glazing with large space between the panes, which makes it possible to build in a solar screening in the form of a venetian blind or a roller blind. The glazing itself is built up by three separate panes, where the two outer panes have a hard low-emission coating facing the cavity. The middle pane is of low-iron glazing to maximize the solar radiation. Depending on the space between the three panes the glazing will get a U-value of between 0.9 and 1.0 W/m²K and a g-value of 0.58. By using narrow frames, the solar radiation through the glazing is maximized, which is an advantage in cold climates, where all the solar radiation can very likely be utilized for space heating all the year round. The comparatively large space between the panes leads to an increase of the frame depth, which results in a better insulated construction. The frame is made of fibre glass reinforced polyester, which is a weatherproof material that in combination with the non-sealed glazing results in a considerably better durability of the window than do traditional windows.

It has often been asserted that the hard low-emission coating can distort the colour reproduction more than the soft low-emission coating and thus give a poorer daylight quality in the room. A questionnaire investigation has been carried out, in which 36 test persons were asked to estimate the daylight conditions in four identical offices with different glazing solutions. The investigation showed, among other things, that no marked difference was observed in the daylight quality of rooms with a triple-glazing with soft or with hard low-emission coatings. It could therefore be justified to use the hard low-emission coating in the further work with the design of the low-energy window.

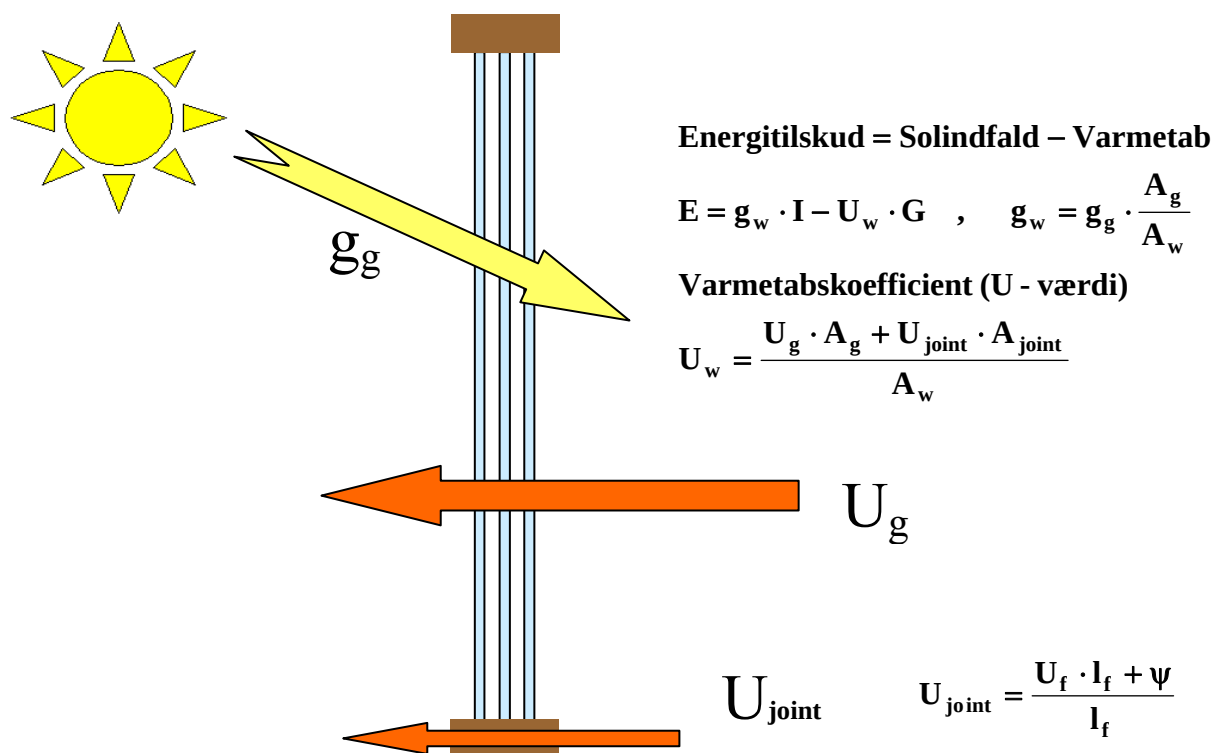
In addition, a detailed CFD model of the airflows in a triple-glazing with large space between the panes has been built. The calculation of the centre U-value of the model agrees well with the results from simpler calculation programs. In addition, the model was extended with inside Venetian blind between the two outer panes. A calculation of the centre U-value of the pane, with closed blinds, showed a reduction of the U-value of about 10 per cent.

From the analyses, a new window design has been suggested and described in the present report. All details and assembly technical problems have been outlined and a proposal for design instructions has been given. A proposal has been given for a frame design consisting of three separate profiles of fibre glass reinforced polyester with a total width of only 21 mm. The profiles are not on the market and new tools have to be developed. A window constructed with the profiles system and a triple-glazing unit with hard low-emission coating achieves a total U-value of the window of 1.04 W/m²K and a g-value of 0.54, which result in a net energy gain of 74 and 13 kWh/m² in Greenland and Denmark respectively. Compared with the net energy gain of a standard wooden frame window the net energy gain is improved by approximately 70 kWh/m² pr. Year.

A prototype of the window in standard dimensions 1230 x 1480 mm was constructed at the laboratory at BYG-DTU and tested in a guarded hot box. The result of the measured U-value was 1,03 W/m²K, which then was in good agreement with the calculation.

1 Indledning

Der har i projektets første del været fokus på en beregningsmæssig vurdering af forskellige energimæssigt forbedrede vinduesløsninger i arktiske (Grønland) og nordeuropæiske klimaforhold. Da fyringssæsonen i Grønland løber hele året rundt (i modsætning til i Danmark, hvor der ikke er opvarmningsbehov om sommeren) er der en ganske stor mængde solenergi, der kan udnyttes om sommeren. Derudover øges solstrålingen pga. refleksion fra sneen i vintermånederne. For at udnytte dette er der behov for vinduer med høj solenergitransmittans (g-værdi). Samtidig medfører det kolde klima at vinduet skal være godt isolerende (lav U-værdi) både for at reducere opvarmningsbehovet og for at undgå indvendige kondensproblemer. Da en reduktion af U-værdien ofte også medfører en reduktion af g-værdien er der tale om en balancegang mellem lav U-værdi og høj g-værdi. Til at sammenligne de forskellige vinduesløsninger er det derfor praktisk at benytte vinduets energitilskud. Energertilskuddet udtrykker solenergien som transmitteres ind gennem vinduet til bygningen minus varmetabet ud gennem vinduet. Energertilskuddet udregnes for et reference hus /1/ og er normalt negativt i Danmark, da varmetabet ud gennem vinduet som regel er større end solenergimængden som tilføres ind gennem vinduet.



Figur 1 Illustration af et vindues energitilskudsberegning. Solindfaldet (I) og gradtimetallet (G) bestemmes ud fra et vejrdato reference år. Index g angiver data for ruden og index w angiver data for hele vinduet. U_{joint} er ramme/karmens samlede varmetabskoefficient inkl. linietab. Værdien er nærmere beskrevet i afsnit 3.8.

I forbindelse med projektet ”Design af grønlandske referencevejrdataår” udført på BYG-DTU er der udarbejdet vejrdatoår for Grønland /2/, som kan anvendes til bygningssimuleringer. Da der er store klimavariationer i Grønland er landet opdelt i to zoner: Zone 1 syd for polarcirklen og zone 2 nord for polarcirklen /3/.

1.1 Beregninger af energiforbrug ved brug af forskellig vinduer

For at vurdere mulighederne for at udvikle energimæssigt forbedrede vinduer til nordlige og arktiske klimaer er der foretaget beregninger af energiforbruget med programmet Bsim /4/ for to forskellige enfamiliehuse i henholdsvis Grønland og Danmark med en række forskellige vinduer. De undersøgte vinduer er beskrevet i artiklen bilag 1. De vigtigste data for vinduerne er vist i Tabel 1. Vinduestype 1 og 2 er standardvinduerne i de to huse. Type 3 har en ganske smal ramme/karm (5 cm) af træ og en 2-lags energirude. Type 4 er et forslag som har en ekstra smal ramme/karm (2,5 cm) af glasfiberarmeret plast en 3-lags rude med stor glasafstand. Type 5 er identisk med type 4, men med en isolerende skodde udvendigt. Type 6 er et typisk finsk vindue af træ og aluminium og tre lag glas, hvor det yderste hulrum er meget stort. Type 7 er et tysk vindue som overholder kravene i ”Passivhaus” ordningen /5/. Det har en bred ramme/karm af skumisoleret PVC og en 3-lags energirude.

Tabel 1. Data for de nuværende og nye vinduer og beregningsresultater for simuleret energiforbrug i Grønland og Danmark.

Type	Vindue Ramme/karm	Rude type	U_g W/m ² K	U_{joint}^2 W/mK	g_g -	U_{tot} W/m ² K	g_{tot} -	Grønland (Zone 1) ¹		Danmark	
								Energi-tilskud kWh/m ²	Opvarmningsforbrug KWh/år	Energi-tilskud kWh/m ²	Opvarmningsforbrug KWh/år
1	Standard Træ	2-lag energirude med argon og blød lavemissionsbelægning	1,28	2,58	0,63	1,61	0,46	- 76	11427	-56	6656
2	Standard Træ	2-lag energirude med argon og blød lavemissionsbelægning	1,17	1,84	0,63	1,34	0,46	-26	10744	-32	5274
3	Træ beklædt med alu. Smal ramme/karm	2-lag energirude med argon og blød lavemissionsbelægning. Jernfattet glas yderst.	1,15	1,96	0,67	1,27	0,57	41	10024	-4	4401
4	Ekstra smal ramme/karm af Glasfiberarmeret plast	Tre lag glas med luft i hulrum. To hårde lavemissionsbelægninger.	0,93	1,49	0,58	0,97 ³	0,54	83	9488	18	4032
5	Ekstra smal ramme/karm af Glasfiberarmeret plast + Skodde	Tre lag glas med luft i hulrum. To hårde lavemissionsbelægninger.	0,93	1,49	0,58	0,97 ³ 0,493	0,54 0,0 ⁴	-	9294	-	3949
6	Finsk 1+2 Træ + alu	1 + 2. Et lag alm glas – luft - 2-lags energirude.	1,01	1,72	0,60	1,20	0,43	-10	10455	-23	4836
7	Bred ramme/karm af Skumisoleret PVC	3 lag energirude med argon og to bløde lavemissionsbelægninger	0,7	0,98	0,51	0,79	0,33	16	9830	-6	4093

¹ Grønland er opdelt i to zoner mht. til klimadata til termisk bygningssimulering. Zone 1 dækker landet syd for polarcirklen.

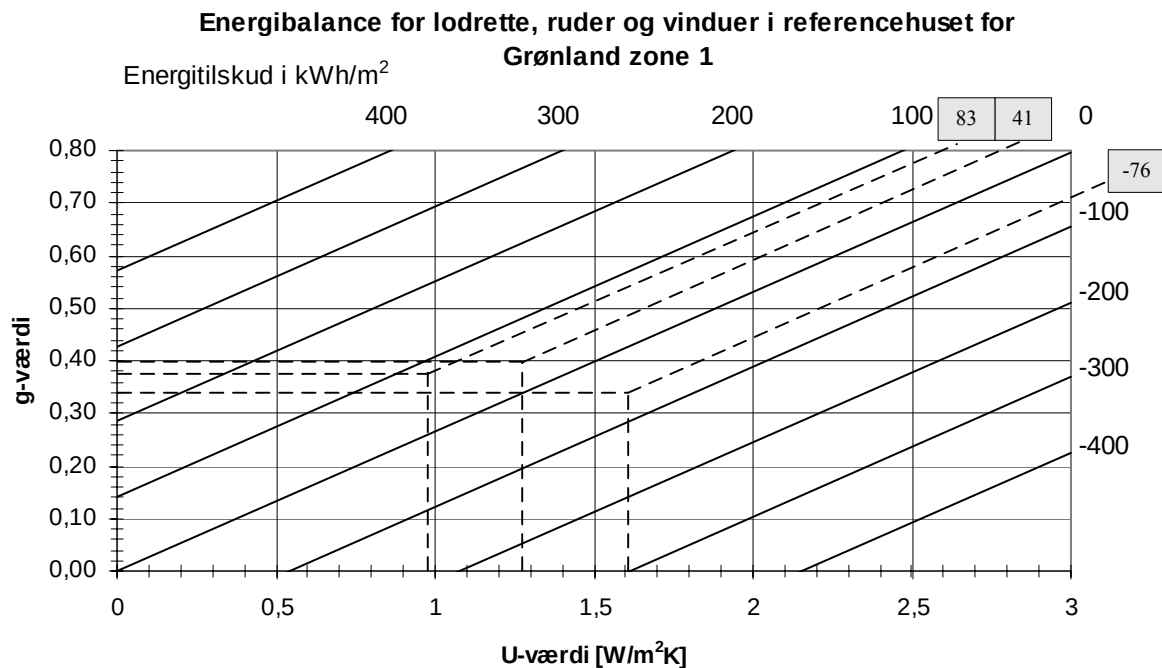
² U_{joint} beregnes som profilets bredde gange U-værdi plus linieta, divideret med profilbredde og får dermed enheden W/m²K

³ pga. den særlige beregningsmetode for ruder med stort hulrum regnes der ikke med Ψ -værdi. Evt. linieta i samlingen mellem rude og ramme er indeholdt i U_{joint} for rammen.

⁴ Med 40 mm isoleringsskodde der benyttes i simuleringen når solhøjden er under nul (dvs. døgnets mørke periode)

Beregningerne viser at vinduestype 4 er bedst og at det er teoretisk muligt, at nå målsætningen om at udvikle vinduer med positivt energitilskud til et kold klima.

På basis af de grønlandske referencevejrdataår er der udviklet energitilskudsdiagrammer for de to zoner. Vha. diagrammerne kan energitilskuddet aflæses direkte når vinduets U og g-værdi kendes. Diagrammerne er velegnede til at sammenligne forskellige vinduers energimæssige egenskaber på en simpel måde. I Figur 2 er tre forskellige vinduer indtegnet i energitilskudsdiagrammet for et referencehus i Grønland beliggende i zone 1. Bemærk at vinduets g-værdi er korrigeret med en skyggefaktor på 0,7.



Figur 2. Eksempel på vinduer indsat i energitilskudsdiagrammet for referencehuset i Grønland i zone 1. Vindue type 1: $U=1,61 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g=0,46$, Type 3: $U=1,27 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g=0,57$, Type 4: $U=0,97 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g=0,54$ (se Tabel 1). Der er anvendt en skyggefaktor, F_s på 0,7 som ganges på g -værdien.

Det fremgår af diagrammet at både den totale solenergitransmittans, g , og varmetransmissionskoefficienten, U , har stor betydning for energitilskuddet, samt at vindue type 3 og 4 begge har et positivt energitilskud og dermed bidrager til rumopvarmningen i huset.

Når det er muligt at lave vinduer med positivt energitilskud, vil det være fordelagtigt, at øge vinduesarealerne for derved at opnå et større bidrag til rumopvarmningen fra vinduerne. Dette kan dog give problemer med overtemperaturer i perioder med meget sol. Dette viser behovet for at udvikle velisolerende vinduer med stort rudeareal og integreret solafskærmning.

1.2 Det valgte vindueskoncept

På baggrund af de indledende analyser der viste, at de største energibesparelser blev opnået med et vindue med meget smal ramme/karm konstruktion og tre lag glas med 2 hårde lavemissionsbelægninger arbejdes der videre med dette vindueskoncept.

Ramme/karmen er meget dyb, hvilket bevirker at både isoleringsevnen og styrken/stivheden forbedres. Samtidigt er det en fordel at den dybe karm kan dække over store isoleringstykkelser i ydermuren, hvilket reducerer kuldebroer og flerdimensionale varmestrømme i samlingen mellem mur og vindue.

Pga. de store glasafstande vil en forseget rude ikke være mulig pga. trykændringer ved temperaturvariationer i luft-gasblandingen. Derfor er hulrummene svagt ventilerede med udeluft, som ledes gennem filtre for at undgå snavs inde i ruden. En fordel ved dette er at afstandsskinner, som normalt giver anledning til kuldebroer helt undgås. Til gengæld betyder det også, at der ikke kan anvendes bløde lavemissionsbelægninger, da de ikke tåler fugt og derfor kun kan anvendes i forseglede ruder.

2 Dagslysforsøg med forskellige rudeløsninger

Et minus ved anvendelse af lavemissionsbelægninger er, at de medfører at både den totale solenergitransmittans, g -værdi, og sollystransmittansen, τ -værdi, reduceres. Samtidig kan belægninger medføre en vis forvrængning af farvegengivelsen i rummet og når man ser ud gennem ruden. Det er ofte hævdet at den hårde lavemissionsbelægning kan forvrænge farvegengivelsen mere end den bløde lavemissionsbelægning og derved give en dårligere dagslyskvalitet i lokalet. Pga. spektralfordelingen af transmittansen reducerer bløde belægninger g -værdien mere end hårde belægninger, mens τ -værdien reduceres mere for hårde belægninger end for bløde.

Ruders sollystransmittans kan med stor nøjagtighed måles eller beregnes ud fra kendskab til glassenes egenskaber, men der foreligger kun få praktiske undersøgelser af hvordan mennesker oplever dagslyset ved forskellige ruder. Da en af de primære årsager til at have vinduer i bygninger netop er, at sende dagslys ind i bygningen og give adgang til klart udsyn, var der derfor behov for at gennemføre en uddybende undersøgelse af forskellige ruders dagslysegenskaber med særlig fokus på betydningen af lavemissionsbelægninger.

For at vurdere hvordan lyset i praksis påvirkes ved anvendelse af forskellige ruder, er der gennemført et fuldskalaforsøg, hvor et testpanel har givet deres vurdering af fire forskellige ruder monteret i et forsøgshus på BYG·DTU. Ruderne er monteret i fire identiske sydvendte rum med samme indretning og vinduesstørrelser.

I undersøgelsen indgik følgende ruder:

- 2-lags almindelig termorude uden belægninger (lokale 5)
- 2-lags energirude med en blød lavemissionsbelægning (lokale 1)
- 3-lags energirude med 2 bløde lavemissionsbelægninger (lokale 2)
- 3-lags rude med 2 hårde lavemissionsbelægninger (lokale 3)



Figur 3. Forsøgshuset hvor de fire vinduer var monteret under forsøget. Solafskærmningerne var fjernet under forsøget.

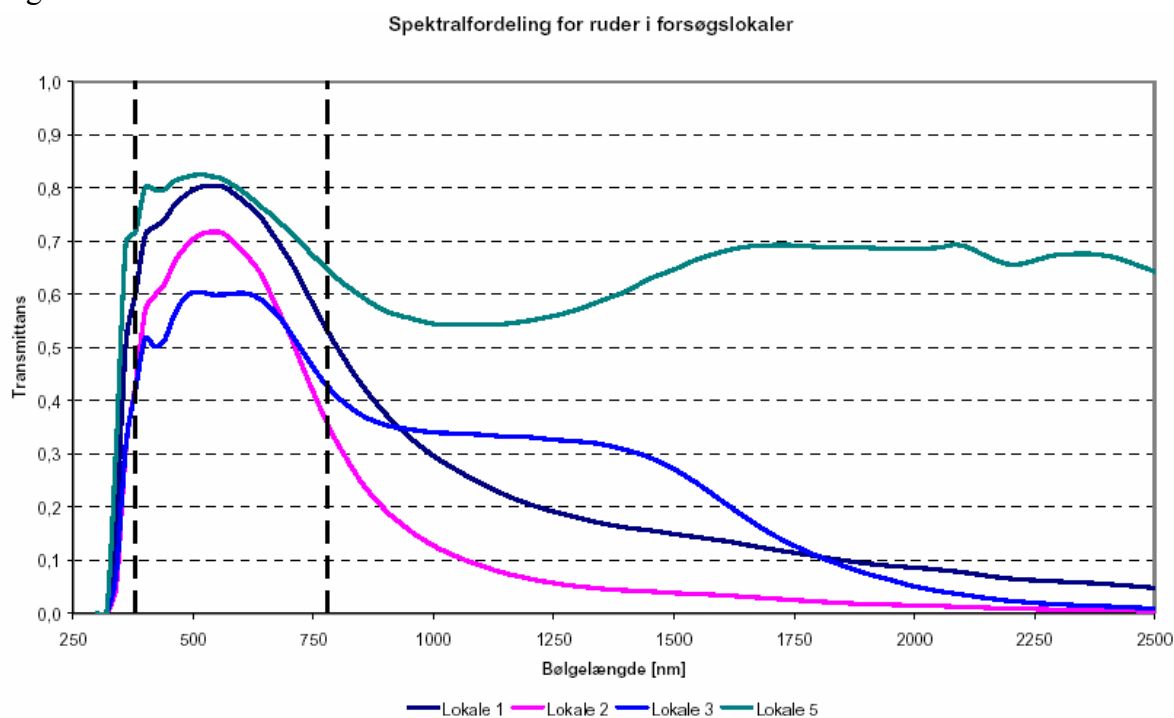
Vha. programmerne *WIS* /13/ og *Glas04* /14/. er der foretaget beregninger af termiske og optiske data for de fire forskellige rudetyper, som er vist i Tabel 2

Tabel 2 Beskrivelse af ruderne monteret i kontorlokalerne beregnet med programmet Glas04 /14/. Varmetransmissionskoefficient (U-værdi), Sollystransmittans (τ_t -værdi), total solenergitransmittans (g-værdi). Gr₁ angiver energitilskuddet for Grønland syd for polarcirklen og Gr₂ nord for polarcirklen. DK angiver energitilskuddet i Danmark

Placering	Type	Beskrivelse	U-værdi [W/m ² K]	τ_t -værdi [%]	g-værdi [%]	Energitilskud [kWh/m ²]			Farvegengivelsesindeks Ra
						Gr ₁	Gr ₂	DK	
Lokale 1	2-lags	Optifloat Clear 4 mm Optitherm SN 4 mm (blød)	1,15	80	63	227	222	20	97
Lokale 2	3-lags	Optitherm SN 4 mm (blød) Optifloat Clear 4 mm Optitherm SN 4 mm (blød)	0,63	70	46	205	209	33	96
Lokale 3	3-lags	K Glass 4 mm (hård) Optifloat Clear 4 mm K Glass 4 mm (hård)	0,89	64	58	240	242	33	97
Lokale 5 (Reference)	2-lags	Alm. float 4 mm Alm. float 4 mm	2,63	82	76	43	-9	-88	98

Det fremgår af Tabel 2, at 2-lagsruderne har højere U-værdi og lavere g- og τ_t -værdier end 3-lagsruderne. Sammenlignes de to 3-lags ruder ses det, at ruden med hårde belægninger har bedste (højeste) g-værdi mens den med bløde belægninger har højest τ_t -værdi. Ruden med hårde belægninger slipper altså mindst sollys ind. Energitilskuddet for de to 3-lagsruder er næsten ens og markant bedre end 2-lags energiruden.

Vha. programmet *WIS* er spektralfordelingen af transmittansen for de fire ruder beregnet og vist i Figur 4.



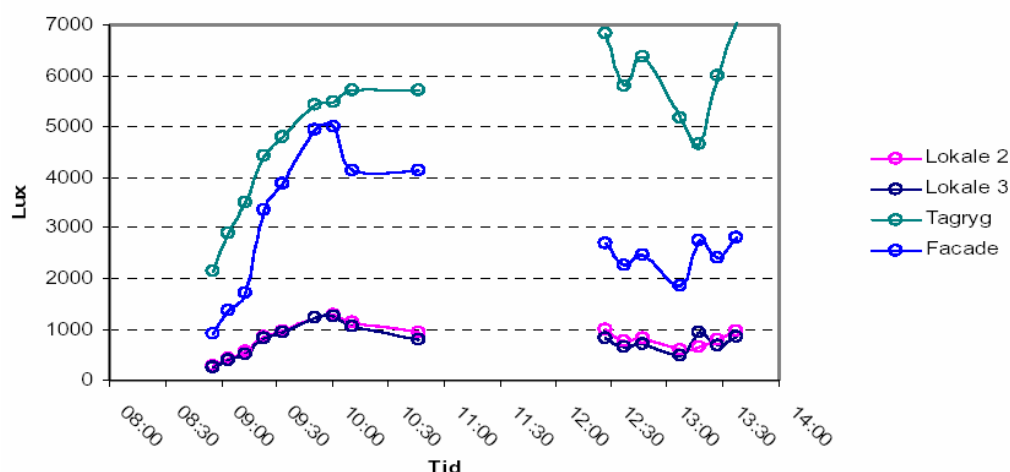
Figur 4. Spektralfordelingen for ruderne i de fire lokaler beregnet i *WIS* /13/.

Det fremgår af Figur 4, at der er stor forskel på spektralfordelingen af transmittansen for de fire ruder. Det ses også at kurven for ruderne i lokale 2 og 3 krydser hinanden, hvilket forklarer modsætningsforholdet mellem den totale solenergitransmittans og sollystransmittansen for de to ruder. For at validere resultaterne beregnet i WIS er der foretaget målinger af spektralfordelingen af transmittansen for de to 2-lags ruder (lokale 1 og 5) i BYG·DTU's spektrofotometer. Resultaterne er vist i Bilag 3, hvoraf det fremgår, at der er god overensstemmelse mellem beregningerne og målingerne.

2.1 Spørgeskemaundersøgelse

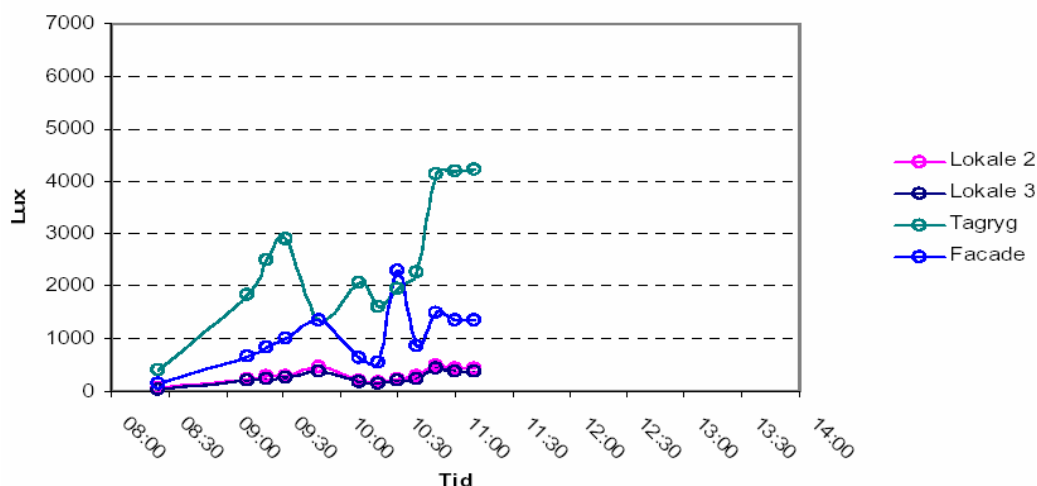
Dagslysforsøgene blev gennemført den 30/11 og den 1/12 2004, hvor det begge dage var overskyet. Derfor var lysniveauet udenfor lavt under forsøgene, hvilket er en fordel, da det netop er de kritiske tidspunkter med ringe dagslys, som er interessante. Der deltog 36 personer i forsøgene. Samtidig med at forsøgene med testpersoner kørte blev lysniveauet målt i lokale 2 og 3 samt på taget af huset og på facaden. Måleresultaterne er vist i Figur 5 og Figur 6.

30.11.2004



Figur 5. Lysniveauet målt under forsøget. Kurverne er opdelt i to svarende til formiddag og eftermiddag.

01.12.2004



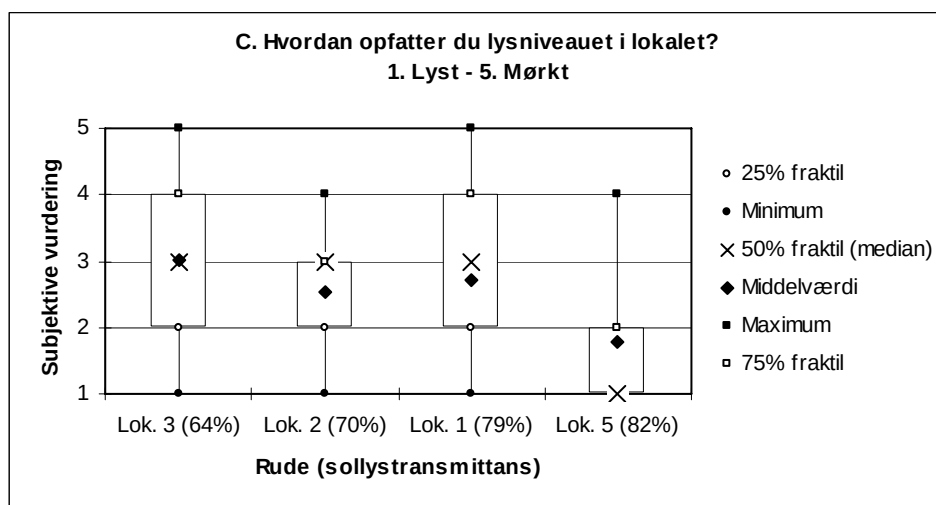
Figur 6. Lysniveauet målt under forsøget den 1/12 2004.

Af Figur 5 og Figur 6 fremgår det at lysniveauet i de to lokaler ligger ganske tæt. Der er dog en svag tendens til at der er mest lys i lokale 2 med vinduet med bløde belægninger. Spørgeskemaet som blev anvendt til forsøgene er vist i Tabel 3.

Tabel 3. Spørgsmål stillet i spørgeskemaet.

Spørgsmål		Bipolar skala (1-5)	
C.	Hvordan opfatter du lysniveauet i lokalet?	1	Lyst - Mørkt
D.	Hvordan vil du beskrive dagslyset i dette rum?	1	Koldt – Varmt
		2	Klart – Tonet
		3	Sløret – Skarpt
		4	Behageligt - Ubehageligt
E.	Hvor let er det for dig at læse teksten på papiret?	1	Vanskeligt – Let
		2	For mørkt – For lyst
F.	Hvordan vil du beskrive skyggerne på frugterne og omkring dem?	1	Slørede – Skarpe
		2	Hårde – Bløde
G.	Hvordan opfatter du detaljerne af frugterne?	1	Klare – Slørede
H.	Hvordan opfatter du farverne af frugterne?	1	Naturlige – Forandrede
		2	Farvede – Ufarvede
I.	Er der refleksioner eller spejlbilleder i computer-skærmen?	1	I høj grad – Ingen
J.	Hvordan opfatter du farverne af billedet på computerskærmen?	1	Varme – Kolde
		2	Naturlige – Kunstige
		3	Slørede – Klare
		4	Levende – Triste
K.	Har du opfattelse af, at dagslyset i rummet er farvet?	1	Farvet - Ufarvet
L.	Hvis du opfatter dagslyset som farvet, hvilken farve opfatter du?	1	Angiv farven (gerne som flere farver eller som to-farvet)
M.	Hvis du opfatter dagslyset som farvet, finder du da dagslysets farve som acceptabel?	1	Acceptabel – Uacceptabel
N.	Hvordan vil du beskrive vejret udenfor lige nu?	1	Overskyet – Skyfrit
		2	Klart (ingen dis) – Diset
		3	Smukt - Trist
O.	Hvordan vurderer du de omgivelser, du ser ud på?	1	Utiltalende – Tiltalende
P.	Hvordan er dit generelle indtryk af dagslyset udenfor lige nu?	1	Svagt – Stærkt
		2	Blændende – ikke blændende
Q.	Hvordan opfatter du farverne udenfor?	1	Varme- Kolde
		2	Slørede – Klare
		3	Naturlige – Unaturlige
		4	Levende – Triste
		5	Vellignende - Forandrede
R.	Hvordan har du oplevet temperaturen, mens du har opholdt dig i lokalet?	1	For varmt – For koldt
S.	Hvordan er dit helhedsindtryk af lyset i lokalet?	1	Acceptabelt - Uacceptabelt
T.	Hvordan er dit helhedsindtryk af lokalet som arbejdsplads?	1	Dårligt – Godt
Personlige spørgsmål			
p2	Hvad er dit køn?	1	Kvinde – Mand
p3	Hvad er din alder?	1	Alder:
p4	Har du normalt farvesyn?	1	Ja – Nej
p5	Bruger du kontaktlinser/briller?	1	Ja – Nej
p6	Hvis ja, er disse da farvede/tonede?	1	ja - Nej

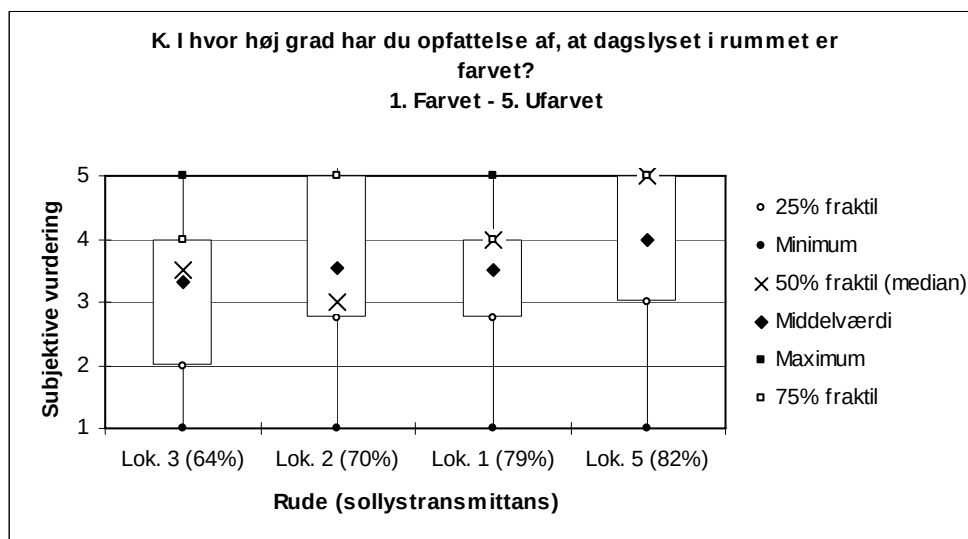
I det følgende er nogle af de vigtigste svar fra spørgeundersøgelsen gengivet. I Figur 7 er vist svarene på hvordan testpersonerne vurderede lysniveauet i de fire lokaler.



Figur 7. Testpersonernes svar på spørgsmålet: Hvordan opfatter du lysniveauet i lokalet? Lyst – Mørkt.

Det fremgår af Figur 7, at lokale 5 med 2-lags ruden uden belægninger opfattes som lysest, mens de tre andre vurderes næsten ens. Dog vurderes lokale tre med 3-lags ruden med to hårde belægninger marginalt mørkest. Det ses endvidere at lokale 1 med 2-lags rude med blød belægning vurderes en anelse mørkere end lokale 2 med 3-lags ruden med to bløde belægninger, på trods af at ruden i lokale 1 har væsentligt højere sollystransmittans end ruden i lokale 2. Dette kan indikere, at den praktiske menneskelige vurdering af lysgengivelsen ikke nødvendigvis svarer til den eksakte sollystransmittans.

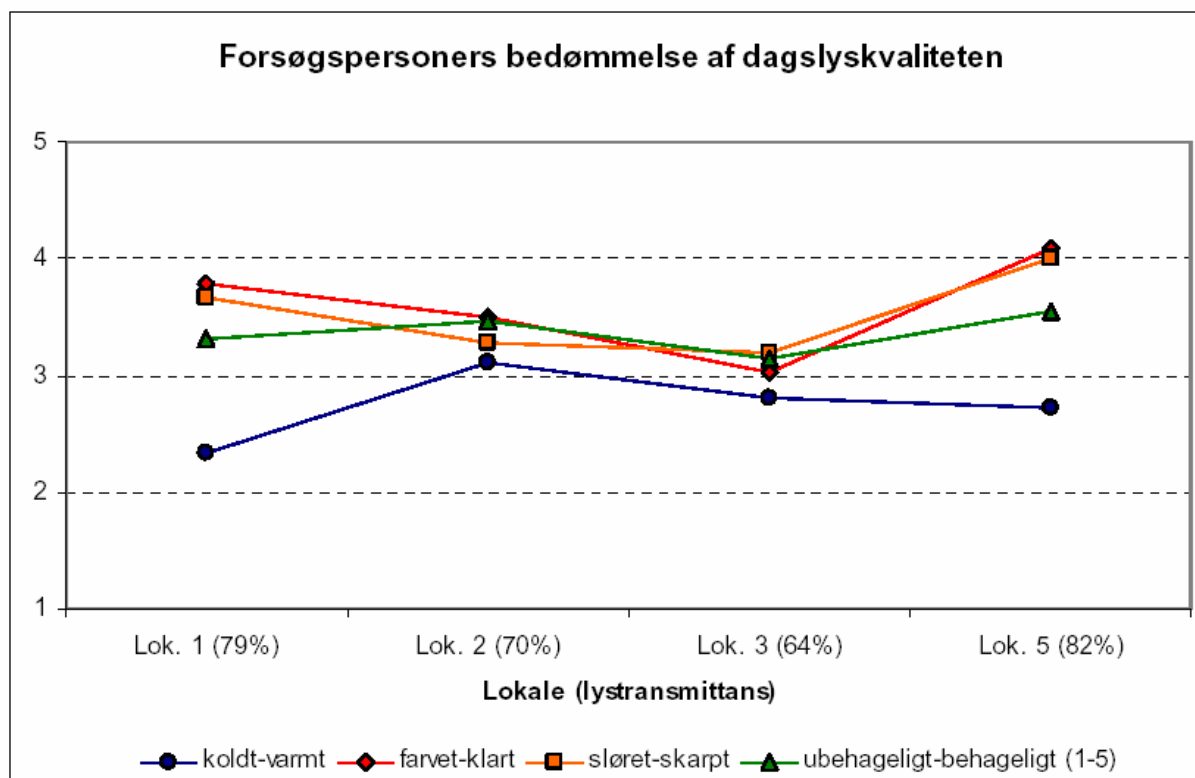
I Figur 8 er testpersonernes svar på, om de opfatter dagslyset i lokalet som farvet vist.



Figur 8. Testpersonernes svar på spørgsmålet: I hvor høj grad har du opfattelse af, at dagslyset i rummet er farvet? Farvet – Ufarvet.

Igen fremgår det, at ruden i lokale 5 skiller sig ud, idet det vurderes, at den farver lyset mindst, mens de tre andre ligger tæt.

I Figur 9 er testpersonernes svar på spørgsmål vedrørende lyskvaliteten i lokalerne vist.



Figur 9. Subjektiv vurdering af spørgsmål D: Hvordan vil du beskrive dagslyset i dette rum? På en 5 punkts skala med 5 som mest positive og 1 som mest negative.

Den generelle tendens i besvarelsene var, at dagslysforholdene i lokalet med 3-lags ruden med bløde belægninger var en anelse bedre end i lokalet med 3-lags ruden med hårde belægninger. Forskellene var dog så små, at det ikke entydigt kan konkluderes, at der er en væsentlig forskel på dagslyskvaliteten for de to ruder. Samtidig skal det nævnes, at forsøgene blev foretaget på to vinterdage hvor det var overskyet. På en solskinsdag om sommeren, hvor lysintensiteten udenfor er meget højere vil besvarelsene måske være anderledes.

På baggrund af forsøgene vurderes det derfor at være forsvarligt at være forsvarligt at arbejde videre med en 3-lagsrude med 2 hårde lavemissionsbelægninger. Deres gode energimæssige og holdbarhedsmæssige egenskaber opvejer de marginalt dårligere dagslysegenskaber.

3 Udvikling af nyt vinduesdesign

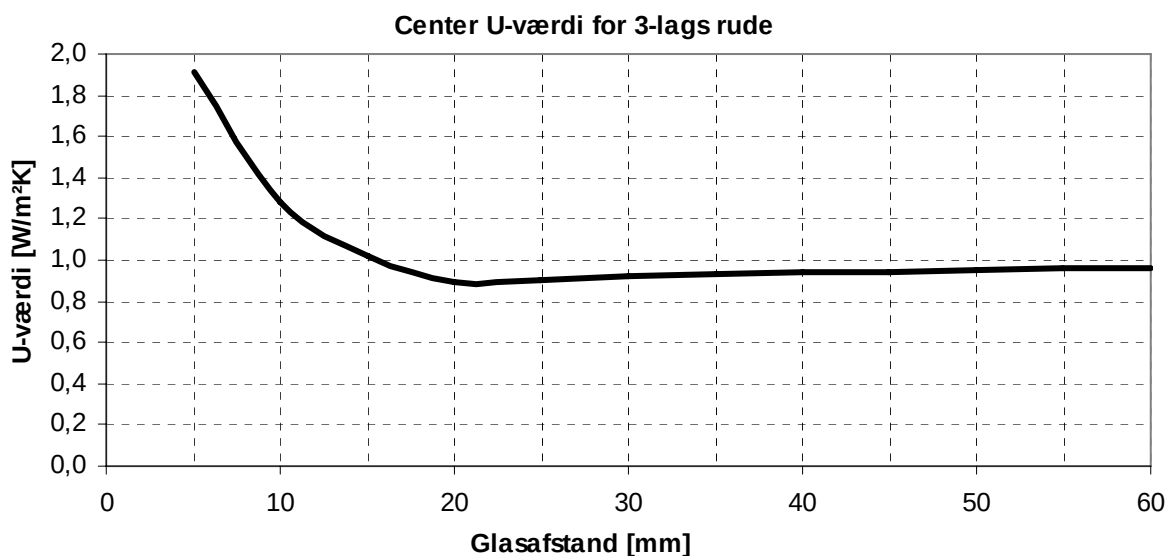
I dette afsnit gives en detaljeret beskrivelse af et forslag til konstruktionen af et vindue baseret på de foregående analyser, der viser at et vindue med tre separate glas og en smal ramme/karm konstruktion resulterer i et markant bedre energitilskud end fx et standard vindue i træ med 2-lags lavenergirude.

3.1 Rudekonstruktionen

Ruden er opbygget af tre lag glas med en relativ stor afstand, hvilket muliggør indbygning af persienne, rullegardin eller en natisoleringsskodde. Det inderste og yderste glas har en hård lavemissions belægning med en emissionsfaktor på 0,16. Belægningerne vender mod det midterste glas, der er lavet af jernfattigt glas for at maksimere solenergitransmittansen (solindfaldet). En af fordelene ved den valgte rudeløsning er, at denne ikke kan punktere, som traditionelle energiruder gør med tiden. Da rudeløsningen ikke kan punktere er levetiden i princippet uendelig. Det vælges således at anvende følgende rudeopbygning:

4 mm Kglas / luft hulrum / 4 mm jernfattigt glas / luft hulrum / 4 mm Kglas

Med denne opbygning får ruden en solenergitransmittans (g-værdi) 0,58 som er uafhængig af glasafstanden. Mht. rudens center U-værdi viser Figur 10 glasafstandens betydning.



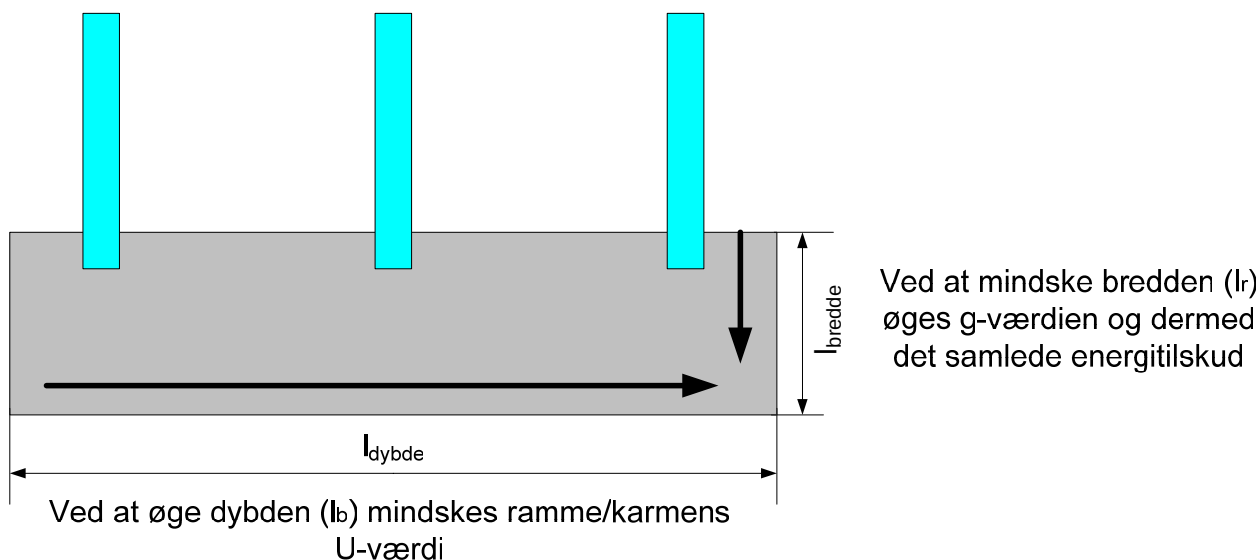
Figur 10 Glasafstandens betydning for rudens center U-værdi beregnet med GLAS04 /14/. Samme afstand i begge hulrum er antaget i beregningen

Som det ses af Figur 10 falder U-værdien for ruden markant indtil en glasafstand på ca. 20 mm, hvorefter U-værdien stiger svagt til lidt under 1 W/m²K. Da det er hensigten at ruden evt. skal kunne indeholde en solafskærmning i form af persienne eller rullegardin er der en nedre grænse for hvor lille glasafstanden kan blive (ca. 30-40 mm). Af hensyn til andre forhold som fx ramme/karm løsning og indbygning i murhul kan glasafstanden derfor vælges frit, da center U-værdien for ruden ses at være næsten uændret.

3.2 Fastlæggelse af ramme/karm geometri

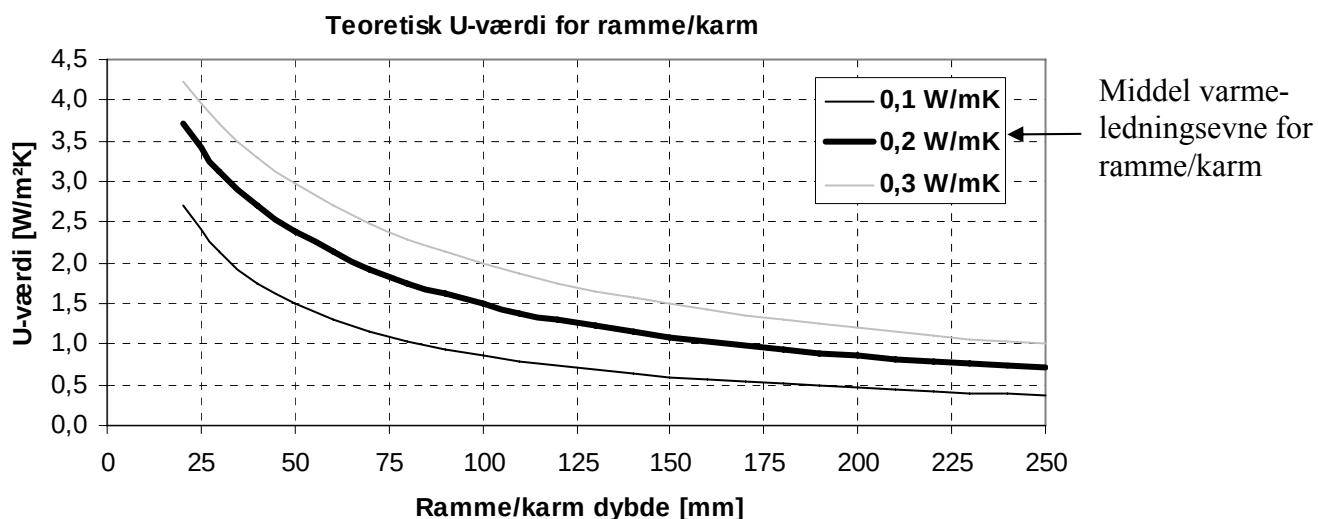
Ramme/karmens dybde og bredde har indflydelse på hhv. U-værdien og g-værdien og bør derfor optimeres. Det er valgt at ramme/karm løsningen skal laves i glasfiberarmeret polyester, der er et let, stærkt og korrosionsbestandigt materiale og med en relativ lav varmeledningsevne på kun 0,25 W/mK. Materialet er derfor yderst velegnet til vinduesprofiler.

Figur 11 viser den teoretiske betydning af ramme/karmens geometri for U-værdien og g-værdien.



Figur 11 Betydningen af ramme/karmens bredde og dybde for hhv. transmitteret solenergi og U-værdi

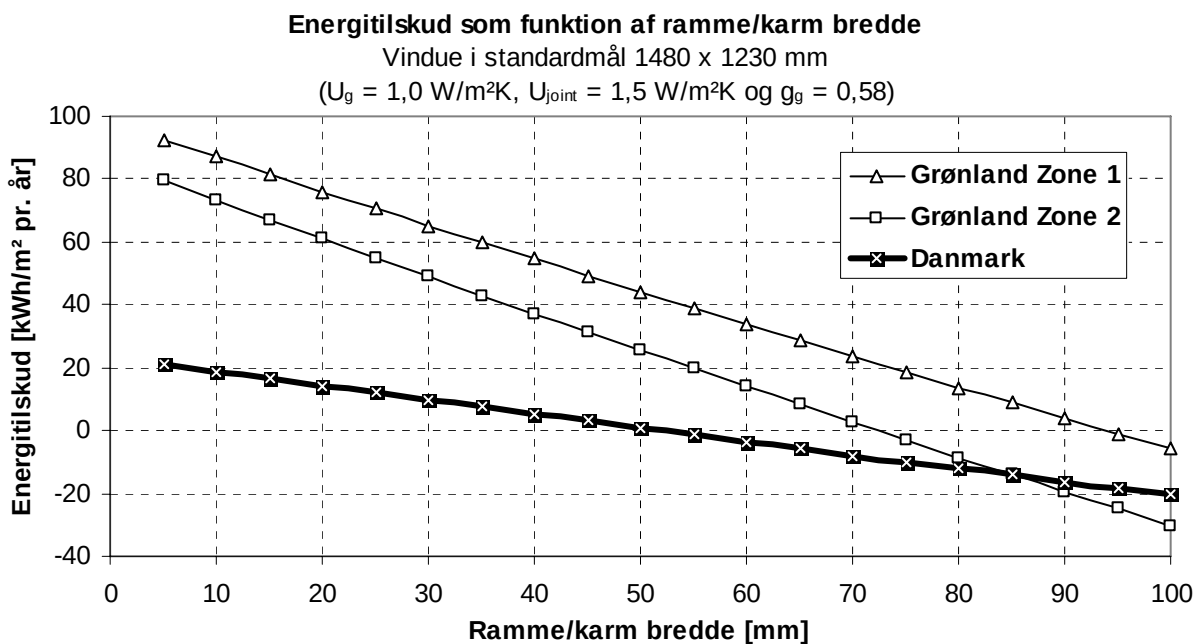
Antages det at rammen/karmen har en middelvarmeledningsevne på ca. 0,2 W/mK kan vinduets samlede U-værdi beregnes som funktion af ramme/karm dybden (middelvarmeledningsevnen kan antages at være lidt lavere end for rent glasfiberarmeret polyester grundet effekten af små isolerende lufthulrum). Figur 12 viser denne beregning.



Figur 12 Beregning af ramme/karmens U-værdi som funktion af ramme/karm dybden. Til beregningen er medtaget overgangsisolanser indvendigt og udvendigt.

Som det ses af Figur 12 er effekten ved at øge ramme/karmens dybde markant de første 100 mm og flader herefter ud for til sidst at være uden betydning. Det vurderes på den baggrund at ramme/karmens dybde minimum skal være 100 mm. Ved en dybde på 100 mm ses at ramme/karmen vil have en U-værdi på ca. $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

På baggrund af U-værdien for ramme/karmen og U-værdien for ruden kan energitilskuddet skønmæssigt beregnes for et vindue i standard dimensionen $1480 \times 1230 \text{ mm}$. Det antages at U-værdien for ruden er $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$, g-værdien er $0,58$ og ramme/karmens U-værdi (inkl. linietaf) er $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Som tidligere nænt vil en reduktion af ramme/karm bredden øge vinduets g-værdi, hvilket igen øger vinduets energitilskud. Denne sammenhæng er vist i Figur 13.



Figur 13 Ramme/karm breddens betydning for vinduets energitilskud beregnet for Zone 1 og 2 i Grønland. Definitionen af U_{joint} er vist på figur 1.

Som det ses af Figur 13 har det stor betydning at ramme/karm bredden laves mindst muligt. For hver mm ramme/karm bredden øges energitilskuddet med ca. 1 kWh/m^2 pr. år i Grønland. Reduceres ramme/karm bredden fra fx 100 mm til 20 mm spares altså ca. 80 kWh/m^2 pr, hvilket fx svarer til ca. 1.600 kWh pr. år for et hus med 20 m^2 vinduer.

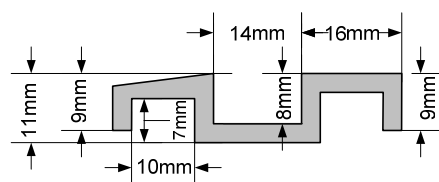
3.3 Energooptimeret vinduesdesign

På baggrund af ovenstående analyser beskrives i det følgende et konkret forslag til et optimalt vinduesdesign mht. maksimalt opnåeligt energitilskud. Forslaget er ikke optimeret mht. omkostninger til materialer, men selve samlingsproceduren har været nøje overvejet gennem processen med henblik på at gøre denne mindst mulig arbejdskrævende.

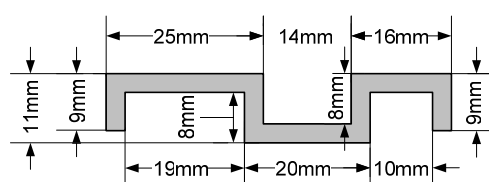
Vinduesrammen samles af tre separate profiler med et lag glas i hver. På Figur 14 ses profilerne som vinduesrammen tænkes opbygget af. Profil 1 benyttes både indvendigt og udvendigt. Profilbredden er lavet mindst mulig af hensyn til opnåelse af maksimalt solindfald. I standarden /6/ er

angivet en mindste faldsdybde på 6 mm. Hertil lægges en skæretolerance på glassets på +1 mm (medregnes for begge sider), hvilket dermed giver den mindste faldsdybde på samlet 8mm.

Profil 1 (benyttes indvendigt og udvendigt)

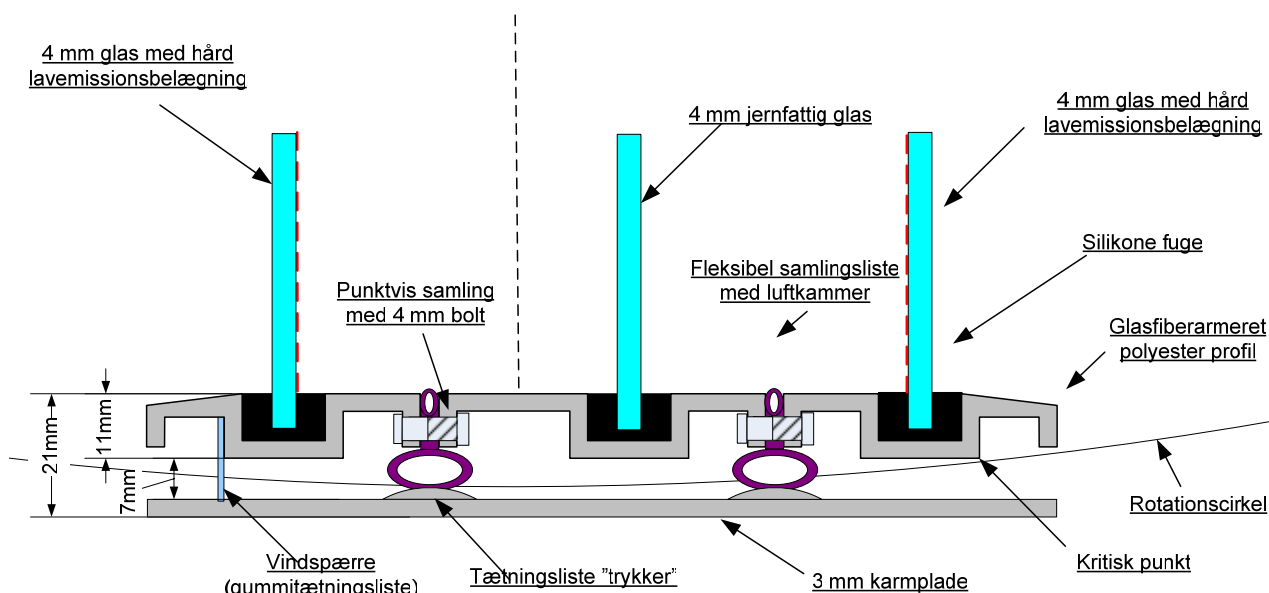


Profil 2 (center profil)



Figur 14 Design af glasfiberarmeret polyester profiler til vinduesrammen

Der er i designet taget hensyn til at vinduet forholdsvis let skal kunne serviceres i tilfælde af fx en glasskade. Dette opnås ved at rammerne kan adskilles separat, hvilket beskrives senere i dette afsnit. På Figur 15 ses et tværsnit af det samlede bund ramme/karm profil med angivelse af de forskellige komponenter.



Figur 15 Tværsnit af ramme/karm profil i top og bund

3.4 Rudens ventilering og fugtforhold

Selvom hulrummenes ventilation kun foretages med udeluft som indtagsluft og luftstrømmen begrænses til kun netop at udligne trykvariationer, vil der være et vist fugtindhold i hulrumsluften. Ved lave udetemperaturer kan dette forårsage indvendig kondens i ruden. Projektet har primært fokuseret på at løse og optimere de energimæssige egenskaber for vinduet og det vurderes bl.a. ud fra tidligere erfaringer med uforseglede 3-lags ruder, at problemer med indvendig kondens er stærkt begrænsede. Hvis dette skulle være et problem for vinduet er forskellige løsninger overvejet:

- Fugtbuffering
- Udtørring
- Udtørring med fugttransporterende materiale

Ved fugtbuffering holdes hulrummets luftfugtighed under et kritisk niveau ved hjælp af fugtabsorberende materialer, som opsuger fugt fra luften når den relative luftfugtighed er høj og afgiver den ved lavere luftfugtighed. Silica gel eller hydroskopiske materialer kan benyttes.

Ved udtørring med et tørremiddel skal dette efter opfugtning enten udskiftes eller kunne regenereres. Materialet må anbringes i en beholder placeret uden på rammen, så den let kan udskiftes.

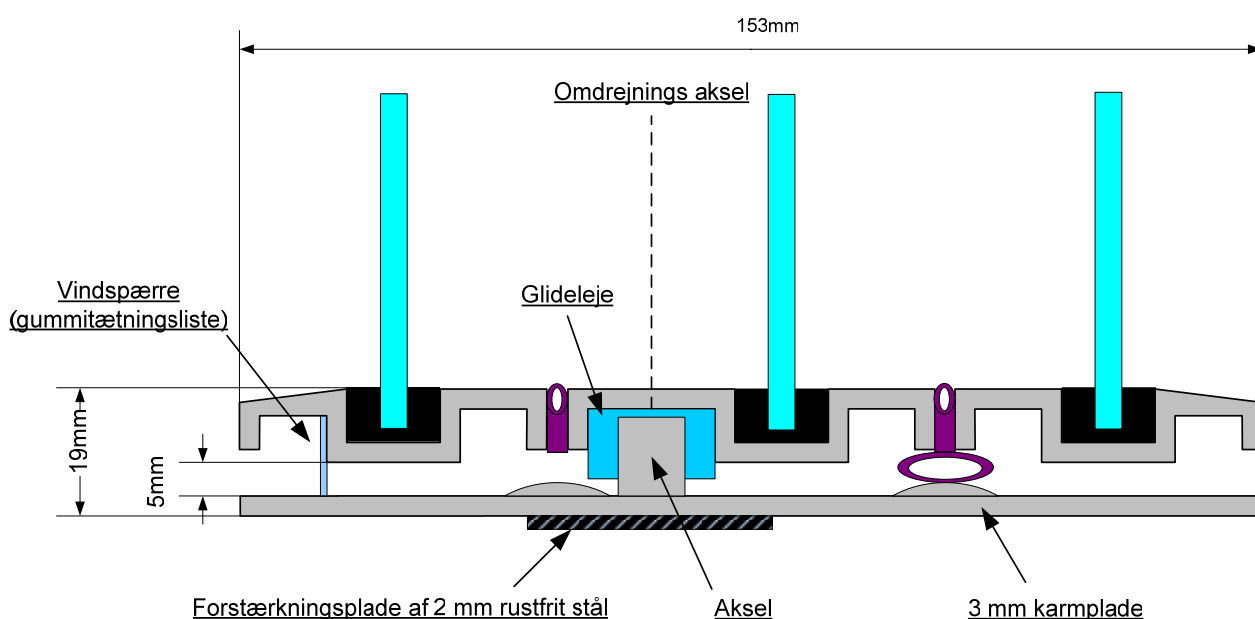
Ved udtørring med fugttransporterende materialer anvendes en vandmættet saltopløsning eller et kapillarsugende stof til at suge fugt ud af lufthulrummene og transportere den ind til fordampning til indeluften. Processen kan forløbe når den relative luftfugtighed i ruden er højere end i indeluften.

3.5 Hængsel

Det er valgt at lave vinduet som et vippevindue af hensyn til at vinduespolering af den udvendige glasoverflade, skal kunne foretages indefra.

I centerpunktet på siderammen monteres et glideleje som vist på Figur 16. Selve karmen består af en plan 3 mm glasfiberarmeret plade. Karmpladen er ud for akselomdrejningspunktet forstærket med en 50 x 300 mm rustfri stålplade med en godstykkelse på 2 mm.

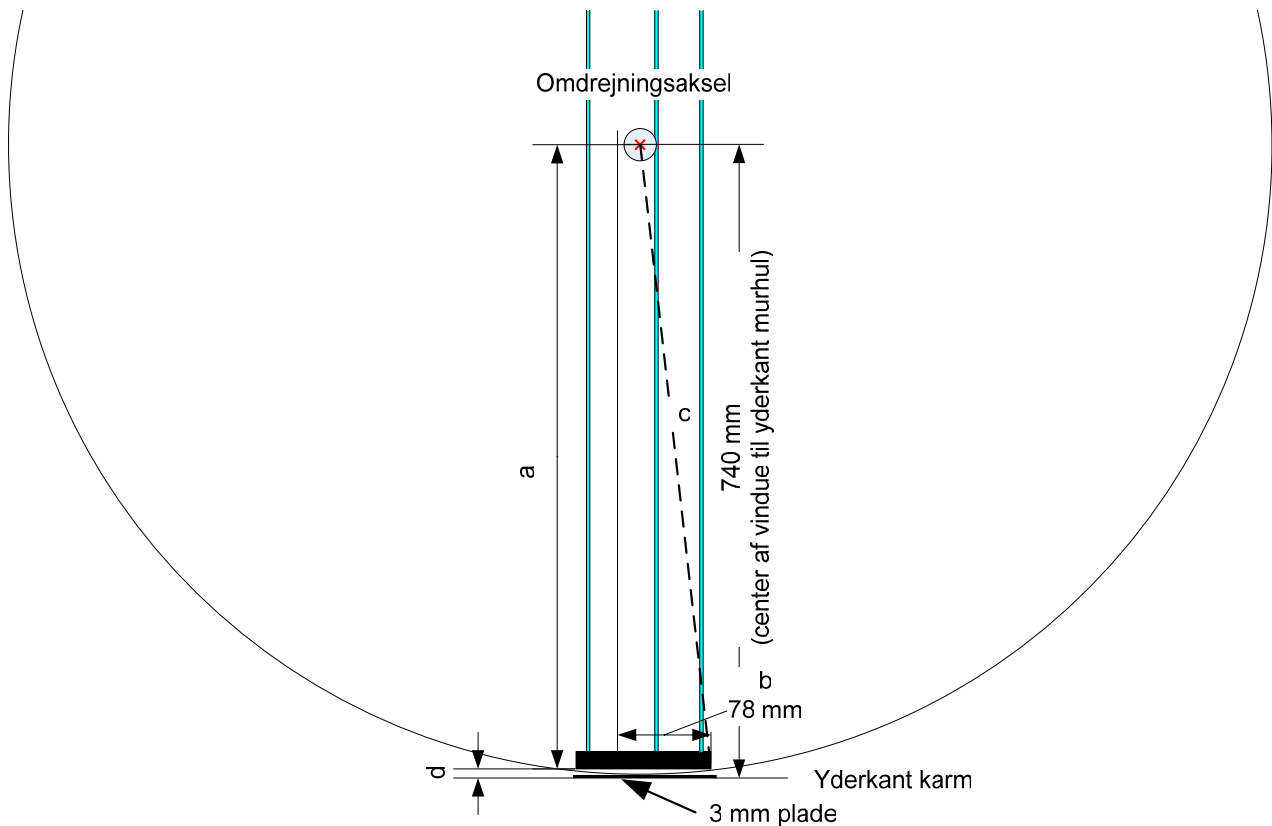
Side ramme/kram profil med angivelse af rotationsaksel



Figur 16 Tværsnit af side ramme/karm med angivelse af rotationsaksel og glideleje

For at optimere solindfaldet skal ramme/karm højden være mindst mulig. Derved skal også afstanden mellem rammen og karmen være mindst mulig, men denne er dog begrænset af at vinduet skal kunne åbne. På Figur 17 ses en tegning af vinduet med angivelse af rotation ved åbning af vinduet.

Det er valgt at vinduets totale højde er 1480 mm (standard mål), hvilket giver et center rotationspunkt 740 mm fra top og bund.



Figur 17 Tegning af vindue med angivelse af hjælpestørrelser til beregning af mindste afstanden mellem karm og ramme.

Nedenfor er afstanden d mellem rammen og karmen udledt.

Følgende ligninger kan opstilles og løses med hensyn til afstanden d :

$$\left. \begin{aligned} a^2 + b^2 &= c^2 \\ c &= a + d \\ a + d + 3\text{mm} &= \frac{h_w}{2} \Rightarrow a = \frac{h_w}{2} - d - 3\text{mm} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left(\frac{h_w}{2} - d - 3 \right)^2 + b^2 = \left(\frac{h_w}{2} - d + 3 + d \right)^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow d = -0.5 \cdot \left(\sqrt{h^2 - 12 \cdot h - 24300} - h + 6 \right)$$

Den mindst mulige afstand mellem rammen og karmen er således ca. 5 mm. Det er dog valgt at øge afstanden til 7 mm af hensyn til diverse tolerancer, således at rammen kan passere forbi tætningslisten som angivet på Figur 15.

Tabel 4 viser minimumsafstanden mellem karmpladen og rammen ved forskellige vindueshøjder.

Tabel 4 Beregning af minimumsafstand mellem karmplade og rammen. Værdier afrundet op til nærmeste millimeter

Vindues total højde [mm]	500	1000	1200	1480	1600	1800	2000
Afstand mellem ramme og karm	13	7	6	5	4	4	4

3.6 Samlingsbeskrivelse

I det følgende gives en kort beskrivelse af hvordan vinduet tænkes samlet på værksted. Mange løsninger/principper har været drøftet vedr. selve samlingen af vinduet og enkelte steder gives derfor flere alternativer.

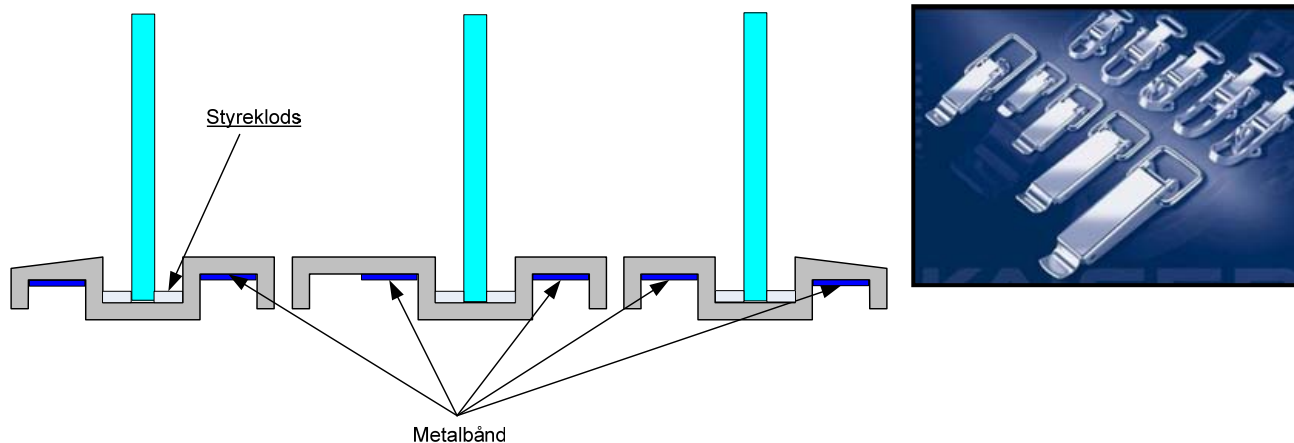
1) Samling af rammen

Rammerne samles omkring glasset med 45° skrånit og fuges i hjørner så de er lufttætte. For at glasset kommer til at sidde symmetrisk i profilet anvendes punktvis små styreklodser i plast i hjørnerne.

Tre forskellige samlingsmetoder af rammen er overvejet.

1.1) Metalbånd med lukkebeslag

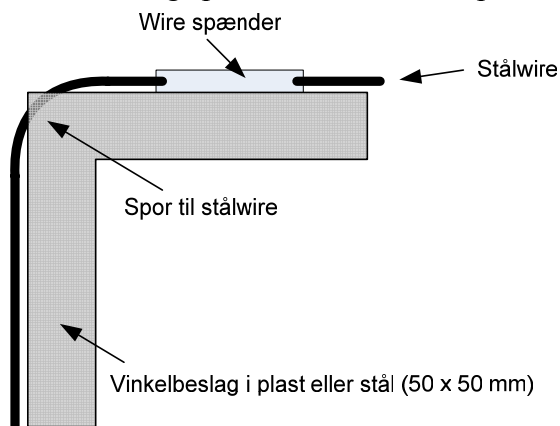
Profilerne spændes sammen med et gennemgående metalbånd (såkaldt emballagestålbånd), der lægges i hvert af de tre profiler som vist på Figur 18. Metalbåndet spændes med et smalt lukkebeslag.



Figur 18 Samlingsdetalje med angivelse af placering af metalbånd og styreklodser. Til højre et eksempel på et lukkebeslag der kunne anvendes

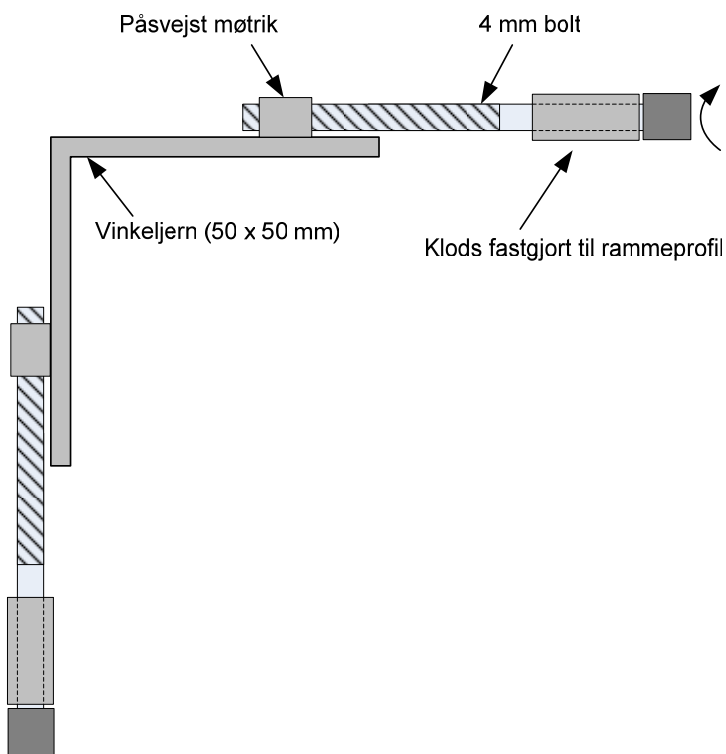
1.2) Vinkelbeslag med stålwire

Profilerne samles ved at der indlægges et vinkelbeslag af hårdt plast eller stål i profilhjørnerne. I vinkelbeslaget laves i hjørnet et lille spor til wiren for at skåne den. Wiren føres hele vejen rundt om rammen og spændes med en wirespænder.



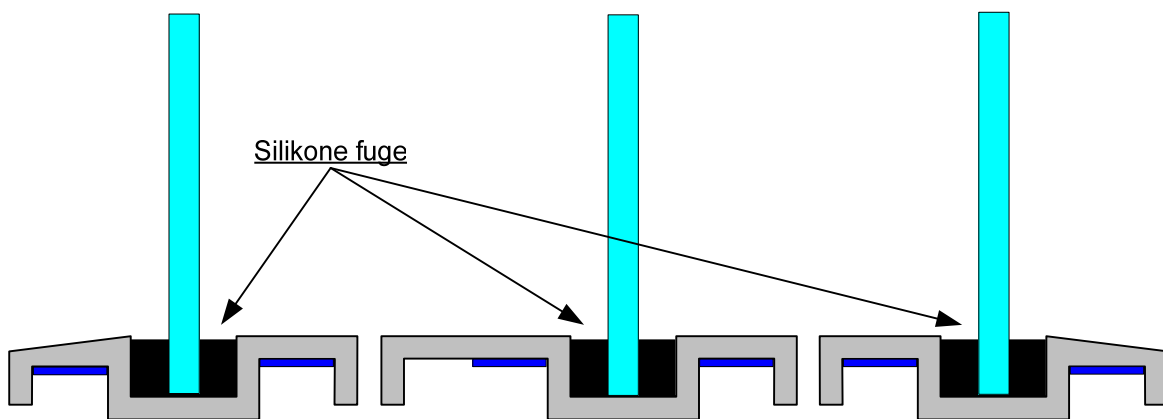
Figur 19 Vinkelbeslag til samling af rammer ved brug af stålwirer

1.3) Vinkelbeslag med påsvejst møtrik samt gevindstænger



2) Fugning af glas

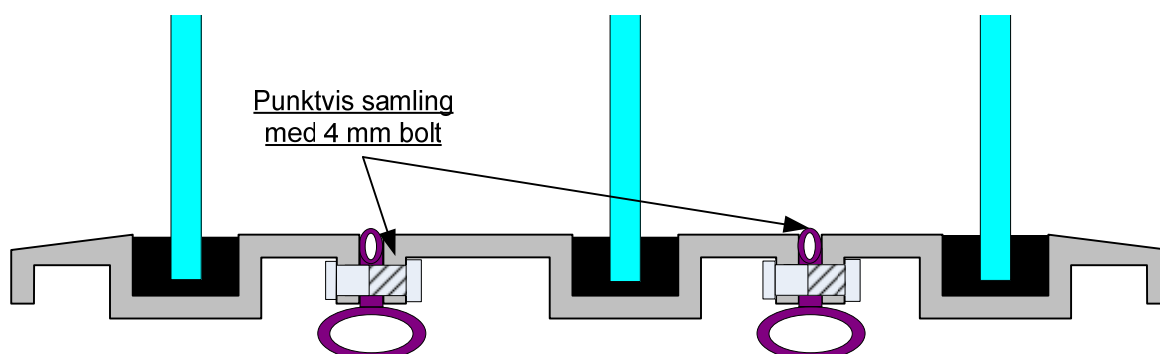
Glasset fuges med silikonefuge til rammen (Alternativt bruges Hotmelt som i biler)



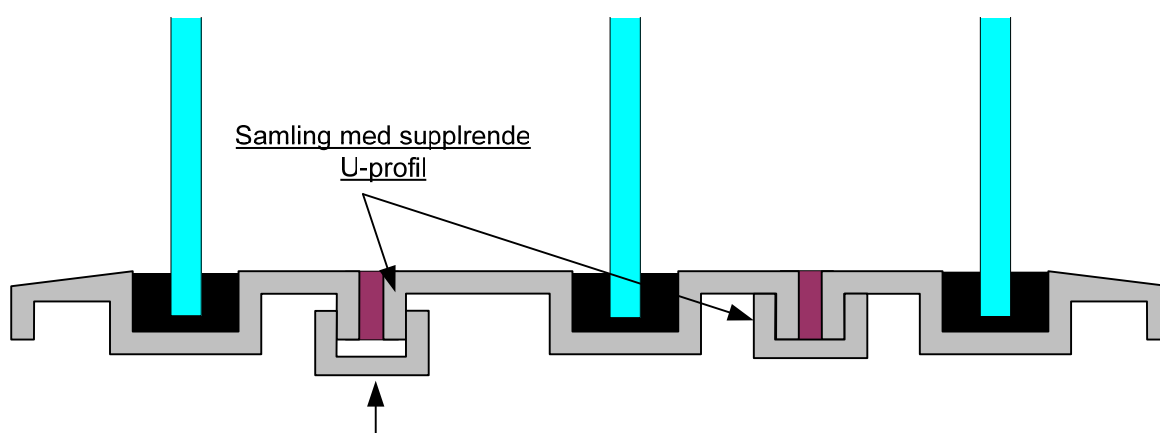
Figur 20 Fugning af glasset med silikone

3) Samlingen af rammerne til én ramme

Mellem rammerne placeres en tætningsliste af EPDM med massiv flade (3 mm) og fleksibel hoved med luftkammer i enderne. Rammerne sammenspændes ved en simpel bolt-møtrik samling som vist på Figur 21. Bolt afstand ca. 200 mm.



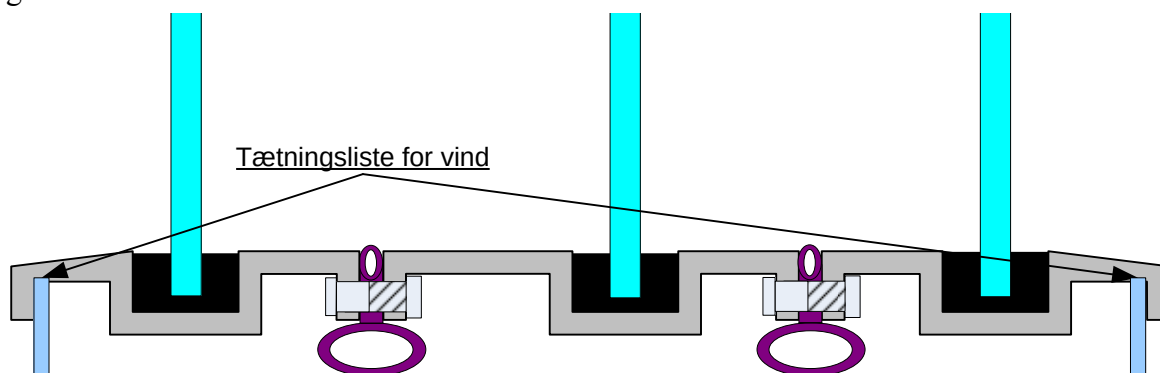
Figur 21 Samling af rammer med møbelbolte. Mellem rammerne anbringes først tætningsliste med luftkammer
Alternativt kunne et supplerende U-profil i glasfiber armeret polyester benyttes som vist på Figur 22. Tætningsliste skal dog herved flyttes og fastgøres med anden metode.



Figur 22 Samling af rammer med supplerende U-profil også i glasfiberarmeret polyester

4) I sætning af tætningslister

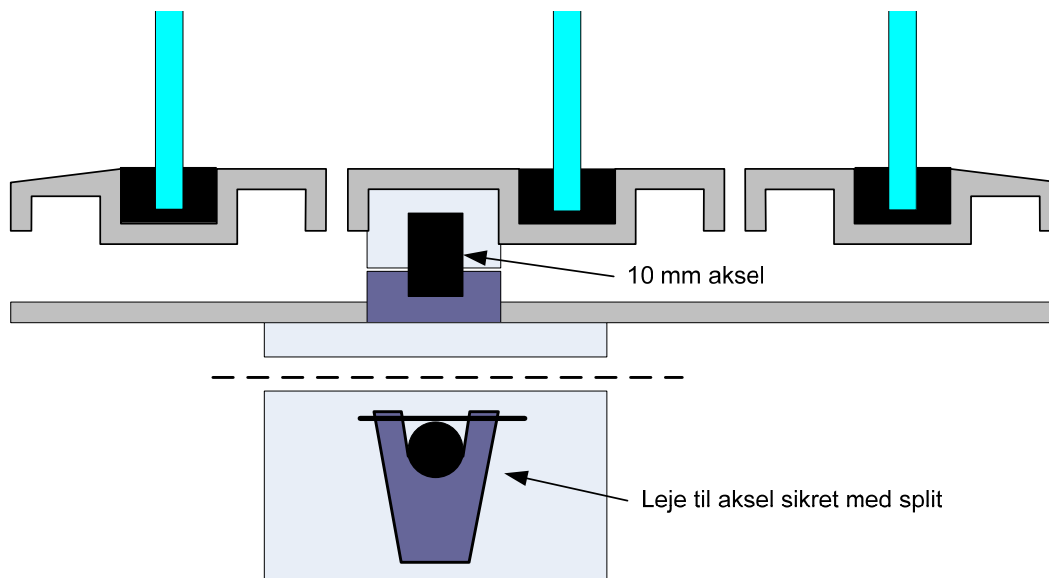
Tætningslister for vindtæthed monteres ved brug af lim. Tætningslisten kunne være af 2 mm plant gummi.



Figur 23 Tætningslister for vind monteres inderst og yderst.

5) Hængsel og omdrejningsaksel

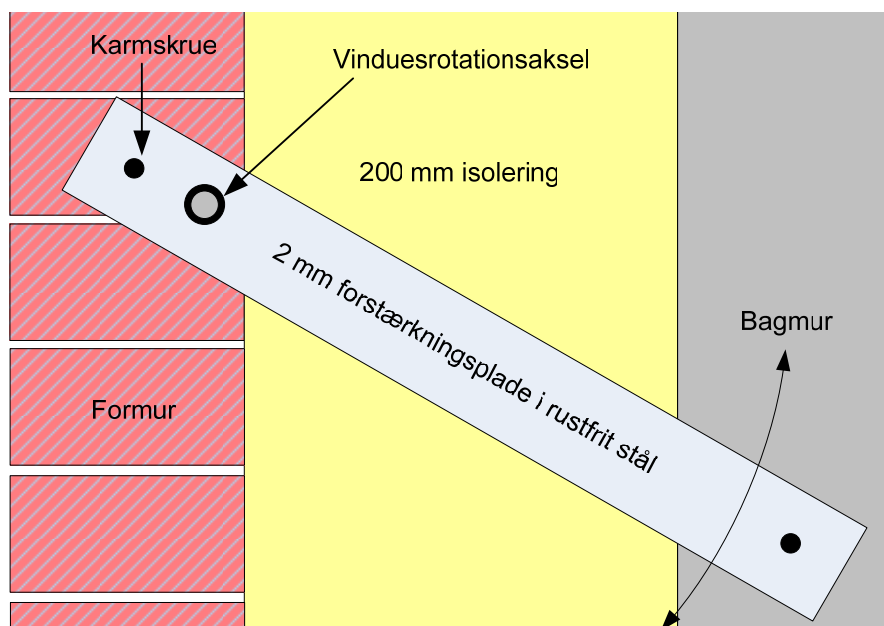
Leje for vandret aksel placeres i U-profil symmetrisk mellem top og bund.



Figur 24 Lejeskål til aksel sikret med split

3.7 Montage af vinduet

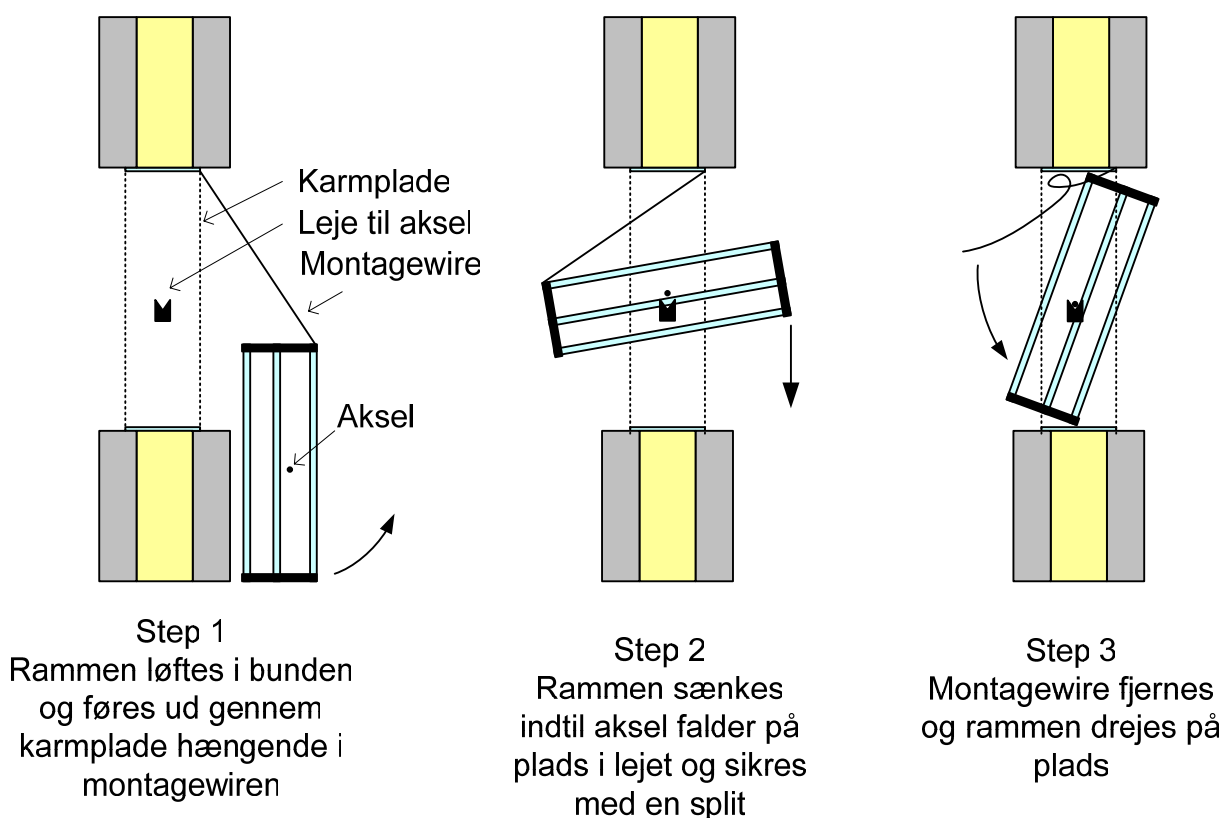
Selve montagen af vinduet foretages ved først at fastgøre selve karmpladen i murhullet. Forstærkningspladen, der bærer selve vinduesrammerne, kan roteres således at denne kan fastgøres med karmskruer til for- og bagmur (Se Figur 25). Ujævnheder mellem murhul og karmpladen må efterfølgende fuges. Såfremt der haves større isoleringstykkelse øges forstærkningspladens længde, således at denne kan spænde over hele isoleringstykkelsen.



Figur 25 Tværsnit af vinduesmurhul med angivelse af fastgørelsesprincip af forstærkningsplade til for- og bagmur

Dernæst kan selve vinduesrammen monteres ved hjælp af den medfølgende montagewire, der fastgøres øverst i karmen og rammen i begge sider (Se Figur 26). Mens montagewiren holdes spændt kan vinduesrammen løftes i bunden og føres vandret ind gennem karmen. Når rammen er halvt igennem vindueshullet sænkes denne således at vinduesakslen sænkes ned i lejet (Figur 24). For at sikre akslen i lejet indskydes en split. Herefter fjernes montagewiren og rammen kan vippe på plads.

Vertikalt snit af murhul



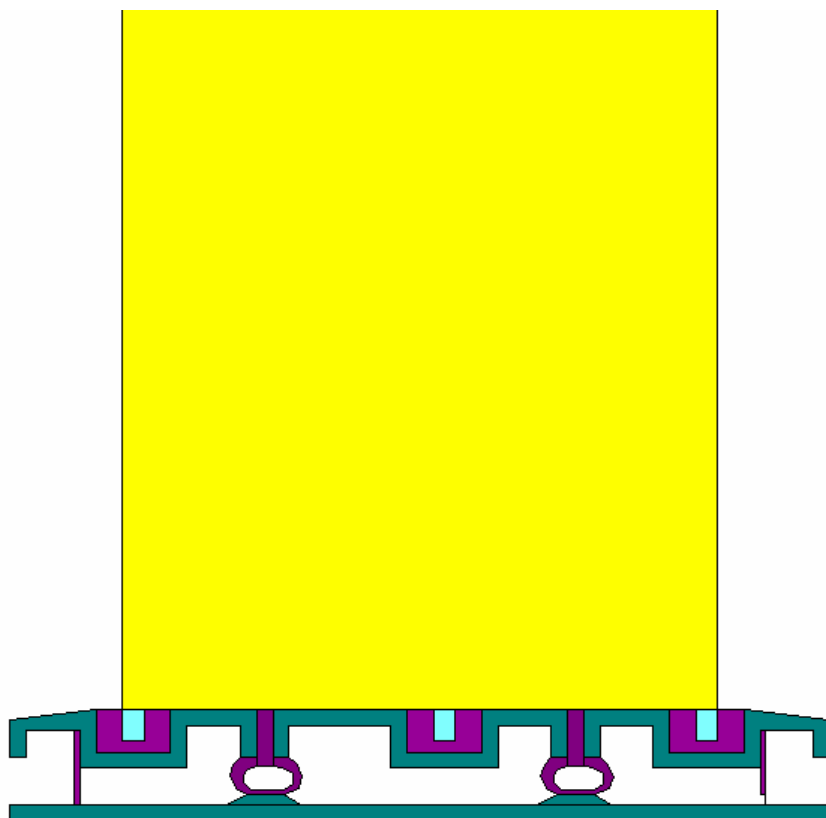
Figur 26 Illustration af montage af vinduet foretaget indefra

Med denne montagemetode skulle det i princippet være muligt for to personer at montere vinduet indefra.

3.8 U-værdi beregning

Til detaljeret beregning af vinduers U-værdier benyttes normalt standarden EN ISO 10077-2 /7/, men heri er ikke beskrevet nogen entydig metode for vinduer, hvor ruden er opbygget af separate glas, der ikke er forseglede omkring et kantprofil. Følges standardberegningsmetoden erstattes ruden (incl. kantprofil) af et isoleringspanel ved bestemmelse af ramme/karm profilets U-værdi. For ruder med separate glas (uden kantprofil) er det ikke beskrevet, hvorledes et isoleringspanel skal indsættes. Det er valgt at indsætte et isoleringspanel, der erstatter den synlige del af ruden jf. Figur 27 nedenfor.

Der findes på markedet flere forskellige beregningsværktøjer på markedet, der kan anvendes til bestemmelse af vinduers U-værdier. For at teste beregningsmetoden anvendes i dette projekt både programmet *Therm* /8/ og programmet *BISCO* /9/. Da vinduet består af en rude med store lufthulrum og et ramme/karm profil også med lufthulrum, er det interessant at undersøge, hvordan disse programmer regner på konvektions- og strålingsudvekslingen i hulrum. Da dette er afgørende for vinduets samlede U-værdi er der i det følgende foretaget en sammenligning af beregningsprogrammernes resultater. Det er tilstræbt at lave modellerne i de to programmer, så ens som muligt.



Figur 27 Indsættelse af isoleringspanel i simuleringsprogrammet THERM

Til den følgende analyse er benyttet formlerne (1) til (4). Til beregningerne benyttes simuleringssultaterne for de todimensionale varmemstrømme benævnt L^{2d} . Nederst på siden ses de øvrige symbolforklaringer.

Ramme/karmens U-værdi bestemmes på følgende måde jf. /7/:

$$U_f = \frac{L^{2d,panel} \cdot l_{tot} - U_p \cdot l_p}{l_f} \quad (1)$$

Linietabet for samlingen mellem rude og ramme/karm /7/:

$$\Psi_s = L^{2d,rude} \cdot l_{tot} - U_g \cdot l_g - U_f \cdot l_f \quad (2)$$

Ramme/karm U-værdien og linietabsværdien kan samles i en værdi kaldet U_{joint} , der gør en sammenligningen af ramme/karmens varmetabskoefficient mere overskuelig.

$$U_{joint} = \frac{U_f \cdot l_f + \Psi_s}{l_f} \quad (3)$$

U_{joint} er således varmetransmissionskoefficienten for ramme/karm inklusiv det ekstra varmetab i samlingen mellem rude og ramme/karm.. U_{joint} er derfor kun gældende for ramme/karm profilet med den aktuelle rude.

Vinduets samlede U-værdi beregnes efterfølgende som:

$$U_w = \frac{U_f \cdot A_f + U_g \cdot A_g + \Psi_s \cdot l_s}{A_{tot}} \text{ eller } U_w = \frac{U_{joint} \cdot A_f + U_g \cdot A_g}{A_{tot}} \quad (4)$$

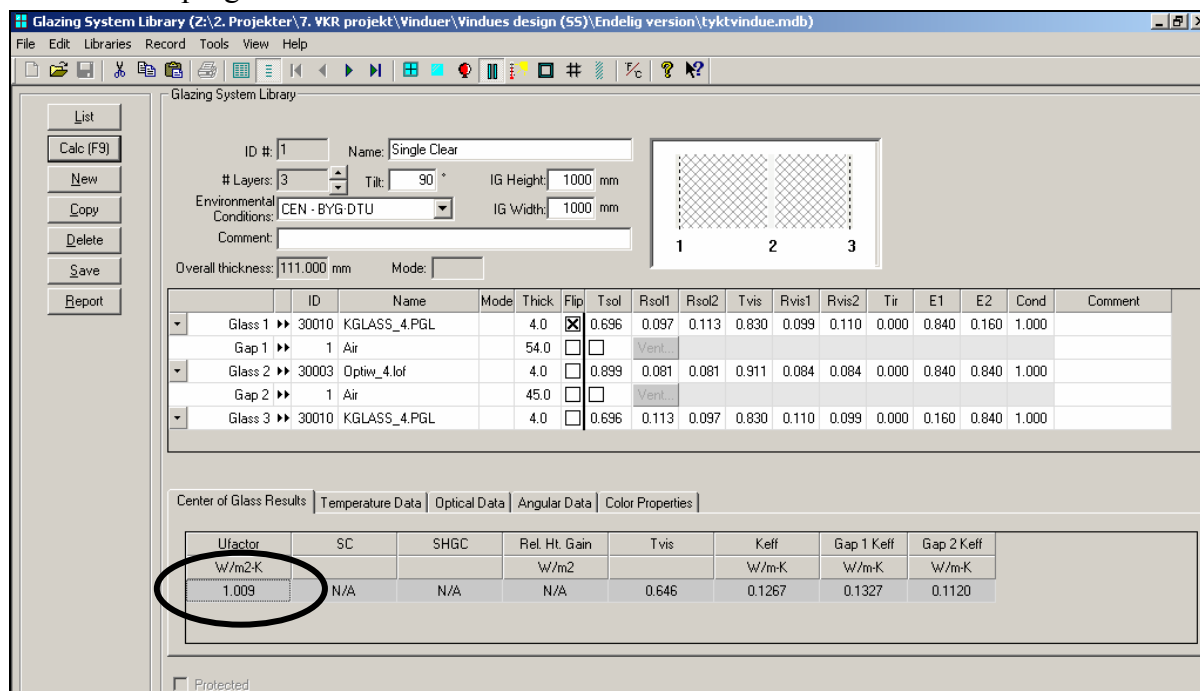
hvor

A_f	ramme/karm arealet	[m ²]
A_g	glasarealet	[m ²]
A_{tot}	det totale vinduesareal	[m ²]
$L^{2d,panel}$	den todimensionale varmemstrøm med isoleringspanel (simulering)	[W/m ² K]
$L^{2d,rude}$	den todimensionale varmemstrøm med ruden (simulering)	[W/m ² K]
l_{tot}	total højde af simuleringsmodel	[m]
l_g	rudens højde	[m]
l_p	isoleringspanelets højde	[m]
l_f	ramme/karm højde	[m]
l_s	længden af samlingen mellem rude og rammen	[m]
U_g	rudens center U-værdi	[W/m ² K]
U_p	isoleringspanelets U-værdi	[W/m ² K]
U_f	ramme/karm U-værdi	[W/m ² K]
U_w	vinduets samlede U-værdi	[W/m ² K]
Ψ_s	linietabskoefficient for samlingen mellem rude og ramme/karm	[W/mK]

Det er valgt at lave beregningerne ud fra en total højde af vinduet på 1480 mm (standardmålet).

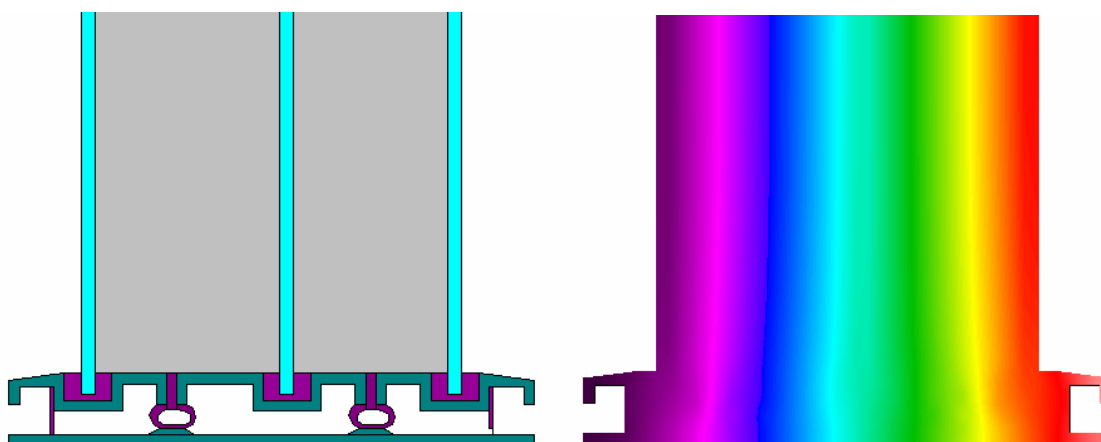
3.8.1 U-værdi beregning med *THERM* og *WINDOW6*

I det følgende beskrives beregningen af vinduets U-værdi med den tidligere beskrevne ramme/karm og rudeopbygning. Beregningerne er foretaget med en programpakke fra LBNL software /8/, hvor ramme/karm konstruktionen opbygges i programdelen *Therm* og ruden opbygges i programdelen *Window6* og importeres herefter til *Therm*. *Window6* benytter importerede glasdata fra programdelen *Optics5* og regner i henhold til ISO 15099. Efter at rudedataene er importeret i *Window6* kan rudens U-værdi beregnes inden den importeres i *Therm* modellen. Ruden får ved beregning med *Window6* én center U-værdi på 1,009 W/m²K, som det fremgår af Figur 28, der viser et screendump fra *Window6* programmet.



Figur 28 Screendump fra programmet Window6.

Ruden fra *Window6* med konvektions og strålingsmodel importeres herefter i *Therm* modellen med ramme/karm profilet, hvilket er vist på Figur 29.



Figur 29 Simulering af ramme/karm konstruktion med programmet Therm

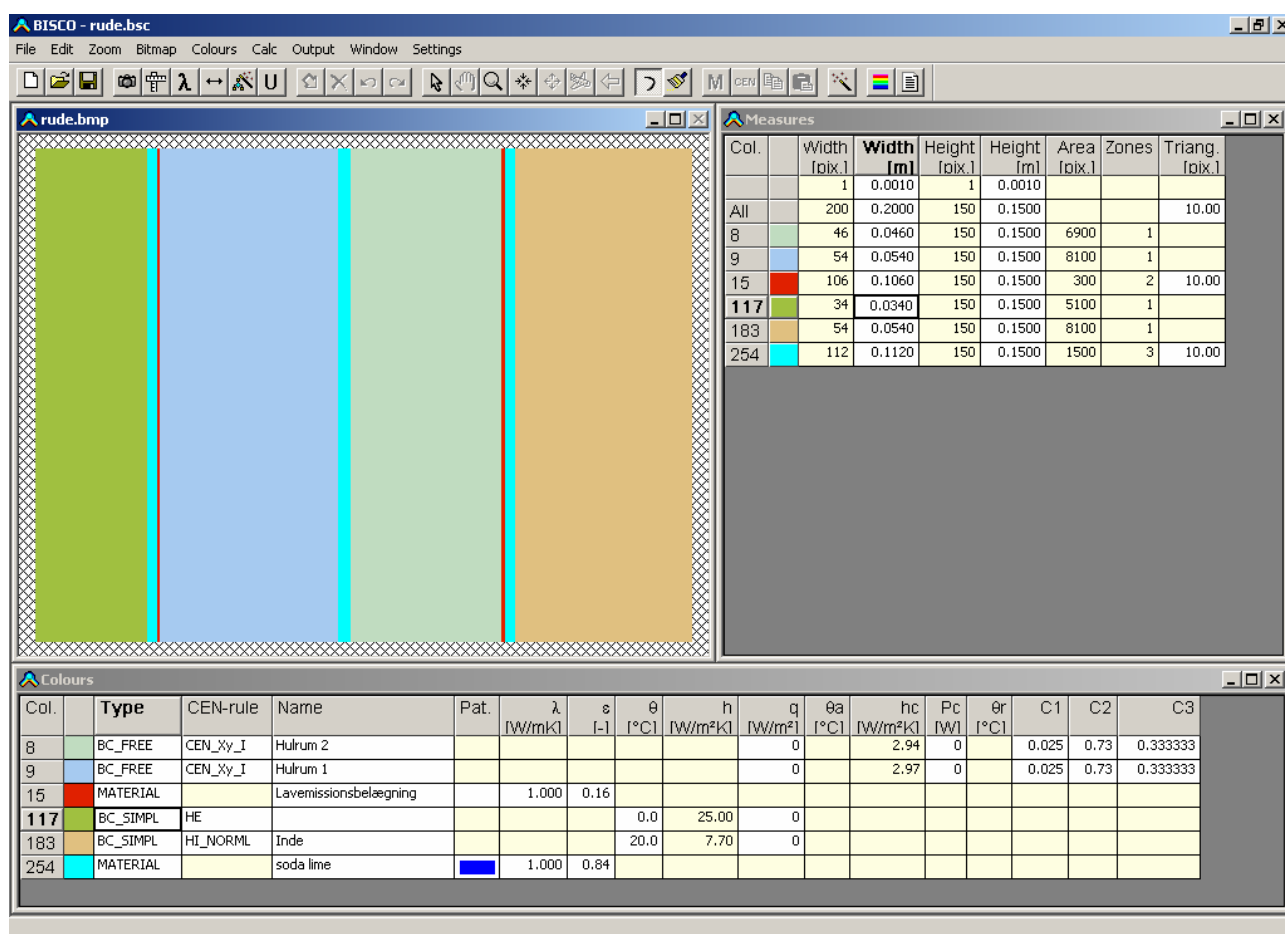
Resultater fra *Therm*

Benyttes standardmetoden for uventilerede hulrum i *Therm* (simple radiation model), fås at ramme/karmen har en U_F -værdi på 1,406 W/m²K og en linietafskoefficient på 0,0001 W/mK. Regnes hulrummene i ramme/karmen med en detaljeret strålingsmodel fås en U_F -værdi på 1,236 W/m²K og et linietaf på 0,0002 W/mK. Samles U_F og Ψ i én værdi kaldet U_{joint} , fås 1,412 W/m²K og 1,245 W/m²K for hhv. den simple og detaljerede strålingsmodel. Varmetabet gennem ramme/karmen reduceres således med ca. 12% ved at benytte den detaljerede strålingsmodel i hulrummene i ramme/karmen.

3.8.2 U-værdi beregning med *BISCO* og *RADCON* modul

En beregningsmodel af samme vinduesløsning er ligeledes opbygget i programmet *BISCO* /9/, der også kan simulere de 2-dimensionelle varmestrømme i ramme/karm profilet og rudeløsningen. Programmet har et tillægs modul *RADCON*, der kan regne detaljeret på stråling og konvektion i hulrum.

Først er der opbygget en model af selve ruden med de tre lag glas. Belægningen er lavet ved at erstatte den yderste millimeter af glasset med et materiale med samme varmeledningsevne som glas, men med en emissionsfaktor på 0,16. Modellen ses på Figur 30 nedenfor.

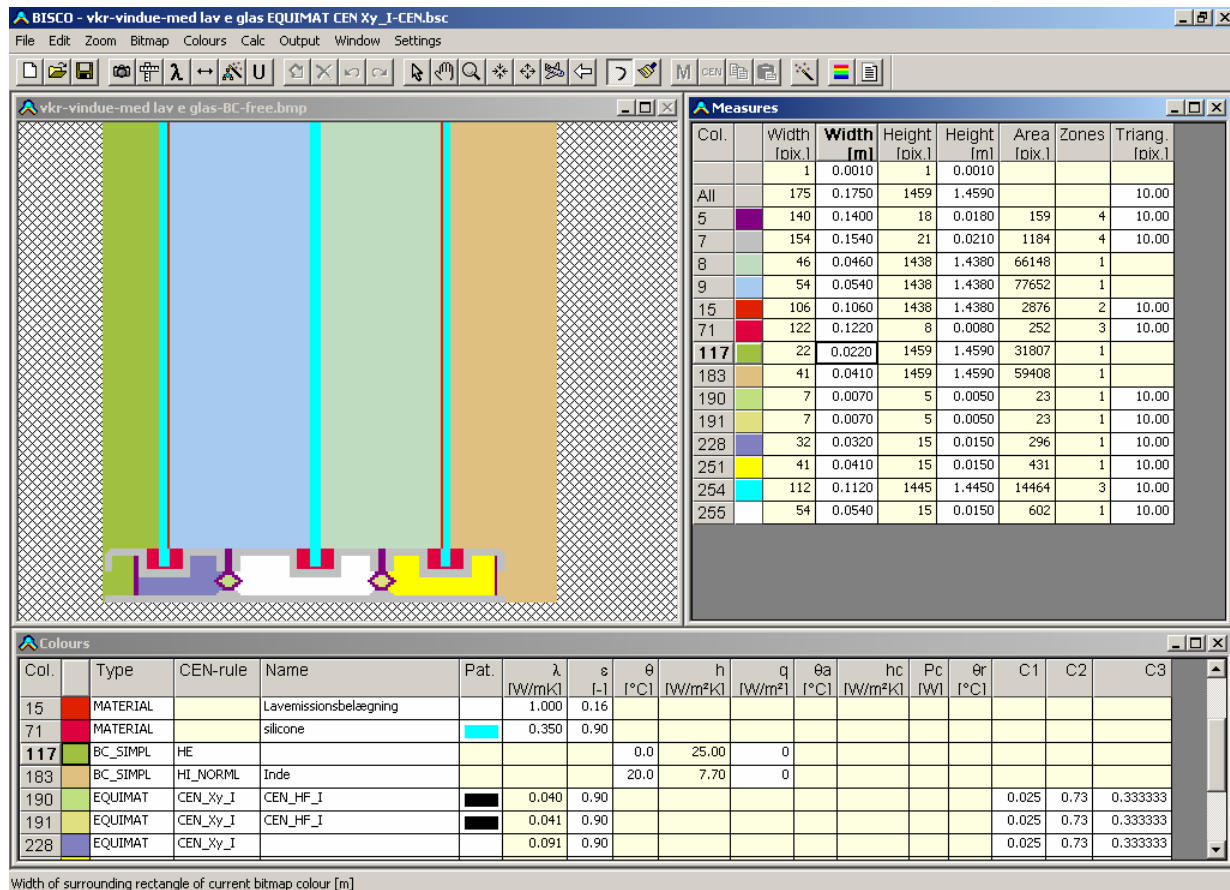


Figur 30 Screenshot fra programmet BISCO med model af rudeløsningen

Der benyttes randbetingelser svarende til standarden EN ISO 10077-2 /8/. De to hulrum mellem glassene simuleres med *RADCON* med en model kaldet CEN_CON, der inkluderer stråling og konvektion, men ikke ledning.

Efter simulering fås en center U-værdi for ruden på 1,055 W/m²K. Sammenlignes dette med resultatet fra *Therm/Window6*, hvor U-værdien blev beregnet til 1,009 W/m²K, ses en forskel på ca. 4 %.

Efterfølgende laves to modeller: En model af ramme/karm profilet med ruden og en tilsvarende model, hvor ruden er erstattet af et isoleringspanel. Figur 31 viser *BISCO* modellen af ramme/karm og ruden.



Figur 31 Screenshot fra *BISCO* med model af ramme/karm profilet. Programmet viser et zoom af ramme/karmen.

I *BISCO* er det ligeledes muligt at simulere lufthulrummene med forskellige modeller. Der findes to modeller benævnt *EQUIMAT* og *BC_Free*. *EQUIMAT* beregner en simpel ækvivalent varmeledningsevne for hulrummet, mens *BC_Free* benytter en detaljeret beregning af stråling og konvektion vha. tillægsmodul *RADCON*.

Resultater fra *BISCO*

Simuleringen med *BISCO* giver en U_{joint} værdi for ramme/karmen på 1,481 W/m²K og 1,812 W/m²K ved anvendelse af hhv. *EQUIMAT* og *BC_Free* modellerne.

3.8.3 Sammenfatning af simuleringresultater

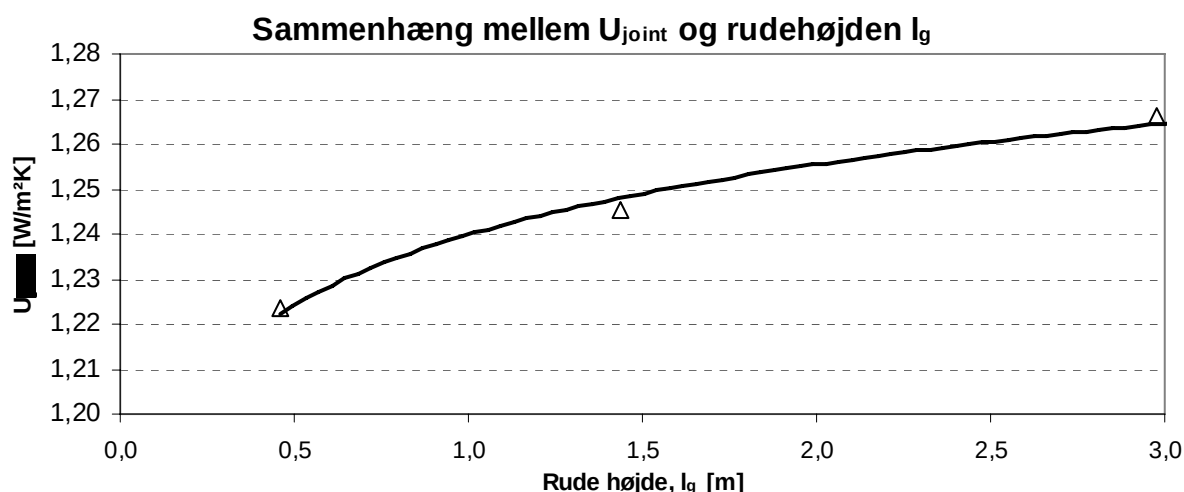
I Tabel 5 ses en sammenfatning af resultaterne fra simuleringen med *Therm* og *BISCO*, med angivelse af hvilke beregningsmodeller for stråling og konvektion i hulrummene der er benyttet.

Tabel 5 Sammenfatning af simuleringresultater ved anvendelse af forskellige metoder til beregning af stråling og konvektion i hulrummene foretaget med programmerne *THERM* og *BISCO*.

Simuleringsprogram		<i>THERM</i>	<i>THERM</i>	<i>BISCO</i>	<i>BISCO</i>
Konvektions og strålingsmodel i hulrum i profilet		Simpel strålingsmodel	Detaljeret strålingsmodel	EQUIMAT	BC_Free RADCON
Simuleret varmestrøm, L^{2d}	[W/m ² K]	1,016	1,013	1,061	1,065
Center U-værdi rude, U_g	[W/m ² K]	1,009	1,009	1,055	1,055
Rude højde, l_g	[m]	1,438	1,438	1,438	1,438
Ramme/karm højde, l_{joint}	[m]	0,021	0,021	0,021	0,021
U_f for ramme/karm	[W/m ² K]	1,403	1,236	1,436	1,744
Ψ_s for samling	[W/mK]	0,0001	0,0002	0,0010	0,0014
Ramme/karm, U_{joint}	[W/m ² K]	1,41	1,25	1,52	1,81
Samlet U-værdi for vindue	[W/m ² K]	1,03	1,02	1,08	1,10

Ovenstående resultater er udregnet for et vindue i standard dimensionen, hvor vinduet har en højde på 1480 mm. Det er antaget at ramme/karm U_f -værdien er den samme for top, side og bundprofil. Samlet set viser resultaterne, at det er af forholdsvis stor betydning for ramme/karm U_f -værdien, hvilken metode/beregningsmodel, der anvendes til simuleringen af varmestrømmene i lufthulrummene, men da ramme/karmarealet er relativt lille i forhold til rudearealet fås alligevel kun en beskedne afvigelse for vinduets totale U-værdi.

Da konvektionen i hulrummene mellem glassene er afhængig af hulrumshøjden er der foretaget simuleringer for et lille vindue (500 mm) og et stort vindue (3000 mm). Dette har en lille indflydelse på U_{joint} værdien, som det ses af Figur 32. Beregningen af U_{joint} er udført med den detaljerede strålingsmodel i ramme/karm hulrummene i therm modellen.



Figur 32 U_{joint} værdien som funktion af rudehøjden. Det ses at når rudehøjden stiger øges U_{joint} værdien

Som det ses af Figur 32 stiger U_{joint} værdien svagt når rudehøjden øges, hvilket må forklares ved en øget konvektiv varmetransport.

I Tabel 6 er vist en sammenfatning af energimærkningsdataene for det optimerede vinduesdesign samt beregningen af energitilskuddet for Danmark og Grønland. Værdien for U_{joint} er angivet for beregning af lufthulrummene i ramme/karmen med den simpel strålingsmodel jf. ISO 10077-2 /8/.

Tabel 6 Energimærkningsdata og beregnet energitilskud for det optimerede vinduesdesign i standard dimensionen 1480 mm x 1230 mm. Det årlige energitilskud er beregnet for Danmark (E_{dk}) og for Grønlands to zoner (se afsnit 1).

Ramme/karm		Rude		Vindue		Energitilskud		
U_{joint}	l_b	g_g	U_g	g_w	U_w	E_{dk}	$E_{\text{gr,zone 1}}$	$E_{\text{gr,zone 2}}$
W/m ² K	mm	-	W/m ² K	-	W/m ² K	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²
1,41	21	0,58	1,01	0,54	1,03	13	74	59

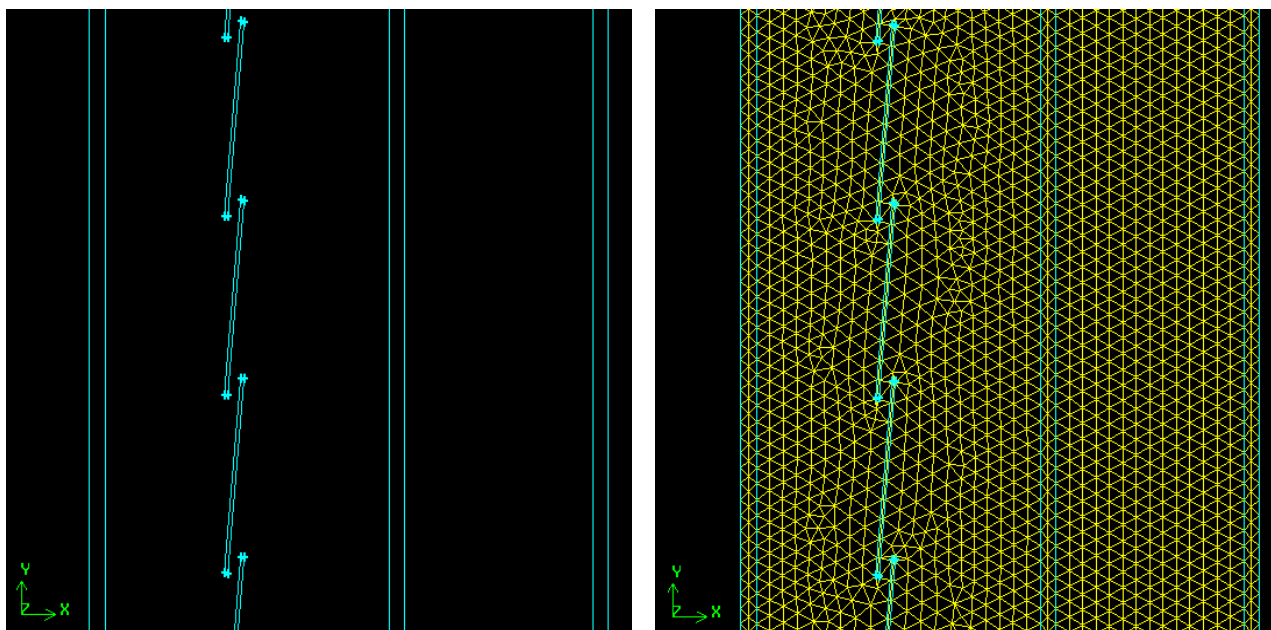
Som det ses af Tabel 6 opnår det optimerede vinduesdesign et energitilskud i Danmark på 13 kWh/m², hvilket skal sammenlignes med energitilskuddet for et typisk standardvindue i træ på -56 kWh/m² (Se Tabel 1). Forskellen i Danmark ses derved at være ca. 70 kWh/m² pr. år og forskellen i Grønland vil være endnu større.

4 CFD simulering af luftstrømninger i 3-lagsrude

En CFD simulering er en detaljeret beregning af fluidstrømme og varmetransport i en fastlagt geometrisk model. Simuleringen foretages ved numerisk løsning af ligninger for masse-, moment-, transport- og energibalance. Konstruktionen der skal simuleres opdeles i et antal små kontrolvolumener, hvori disse ligninger løses. Til dette projekt er en detaljeret CFD simulering af luftstrømningerne i en 3-lags rude opbygget i programmet *GAMBIT* /10/ og simuleret med *FLUENT* /11/. Efter at rudemodellen er valideret ved en sammenligning af resultatet for center U-værdien med andre programmers resultater, indsættes en persienne for at analysere betydningen af denne for rudens U-værdi. Af hensyn til simuleringstiden er det valgt at simplificere modellen til kun at være en 2-dimensional model, idet randeffekterne i denne sammenhæng er af mindre betydning.

4.1 Geometri og beregningsnet

Selve geometrien (i form af flader) og beregningsnettet opbygges med underprogrammet *GAMBIT* /10/. Ruden er opbygget efter standardmål, hvilket vil sige at højden er 1480 mm fratrukket ramme/karm højden. I *GAMBIT* defineres om en given flade er en fluid eller et fast stof. På Figur 33 ses et udsnit af den opbyggede rudegeometri (til venstre) og det genererede beregningsnet (til højre). For at reducere simuleringstiden er det ønskværdigt at konstruere nettet med færrest mulige beregningsceller uden at resultatet ændres.



Figur 33 Udsnit af rudegeometrien med persienne (til venstre) og netopbygningen (til højre) fra programmet Gambit

Som det ses af Figur 33 benyttes et trekantsnet med en lidt finere netinddeling i persiennens lameller. Det samlede antal beregningsceller er for ovenstående eksempel ca. 30.000 for hele ruden med standard højden 1480 mm.

4.2 Simulering med *FLUENT*

I *FLUENT* gives en række input, der kort beskrives i det følgende. Valget af de forskellige simuleringsparametre er desuden sammenlignet med arbejdet udført i /12/, hvor varmetransporten i en mindre termorude også er simuleret med *FLUENT*.

4.2.1 Randbetingelser og materialedata

Der benyttes standardrandbetingelser for den indre og ydre overgangsisolans. Dvs. udvendigt benyttes 0°C og 0,04 m²K/W og indvendigt 20°C og 0,13 m²K/W. I top og bund anvendes adiabater.

Modellen indeholder kun materialet glas. De benyttede materialedata for glas er vist i Tabel 7 og i Tabel 8 ses de benyttede data for luften mellem glassene.

Tabel 7: Materialedata anvendt til CFD simuleringen

Materiale	Massefylde [kg/m ³]	Varmeledningsevne [W/(m·K)]	Varmekapacitet [J/(kg·K)]
Glas	2500	1	840

Tabel 8: Materialedata for luft

Luft			
Massefylde (Boussinesq model)	1,2807	[kg/m ³]	
Varmeledningsevne	0,024817	[W/(m·K)]	
Viskositet	1,7724·10 ⁻⁵	[kg/(m·s)]	
Varmekapacitet	1005,2	[J/(kg·K)]	
Molar vægt	28,996	kg/(kg·mol)	
Absorptions koefficient	0,15	[1/m]	
Termisk udvidelses koefficient	0,0035317	[1/K]	

4.2.2 Strålingsmodel

Simuleringsmodellen benytter en simpel strålingsmodel ved navn P-1, til beregning af strålingsudvekslingen mellem glassene. Med denne model er det muligt at indtaste specifikke emissiviteter for de forskellige overflader. Til simuleringen er benyttet 0,16 for den hårde lavemissionsbelægning og 0,84 for glas uden coatning.

4.2.3 Turbulent eller laminar luftbevægelse

Det er afgørende for resultatet at der benyttes den korrekte konvektionsmodel for luftstrømningerne i de to hulrum mellem glassene. Til at afgøre dette beregnes Raleightallet for de to luft hulrum:

Hulrum 1:

$$Ra_{L,1} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_H - T_C) \cdot L^3 \cdot Pr}{\nu^2} = \frac{9,82 \cdot \frac{1}{278} \cdot (283 - 273) \cdot 0,054^3 \cdot 0,69}{(13,9 \cdot 10^{-6})^2} \approx 5,1 \cdot 10^5 \quad (5)$$

Hulrum 2:

$$Ra_{L,2} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_H - T_C) \cdot L^3 \cdot Pr}{\nu^2} = \frac{9,82 \cdot \frac{1}{288} \cdot (293 - 283) \cdot 0,049^3 \cdot 0,69}{(13,9 \cdot 10^{-6})^2} \approx 1,4 \cdot 10^5 \quad (6)$$

hvor		
g	tyngdeaccelerationen	[m/s ²]
β	Udvidelseskoeficient	[K ⁻¹]
T _H	Overfladetemperatur varm side	[K]
T _V	Overfladetemperatur kold side	[K]
L	Karakteristisk længde (glasafstand)	[m]
Pr	Prandtl tallet	[-]
ν	Viskositet	[m ² /s]

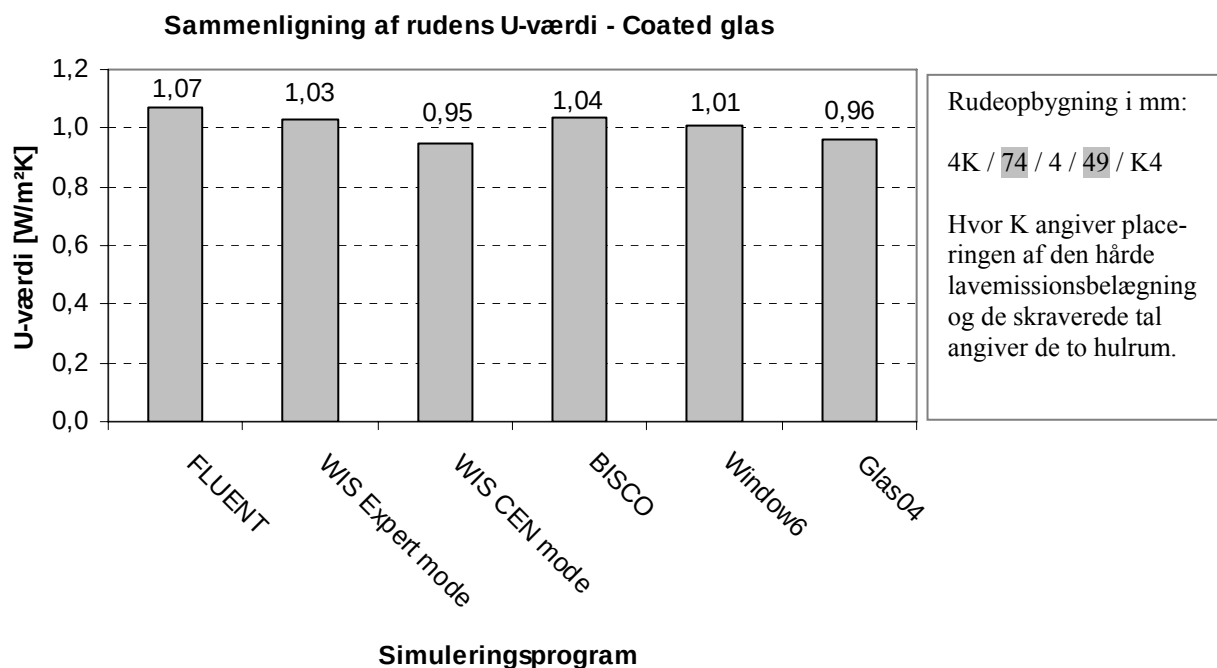
Det ses at begge Raleigh tal er mindre end 10⁸, hvilket vil sige at luftstrømningen er laminar.

4.3 Resultater for CFD simulering

Simuleringen af luftstrømningerne og varmetransporten gennem ruden er stoppet når varmestrømmen gennem ruden er konstant.

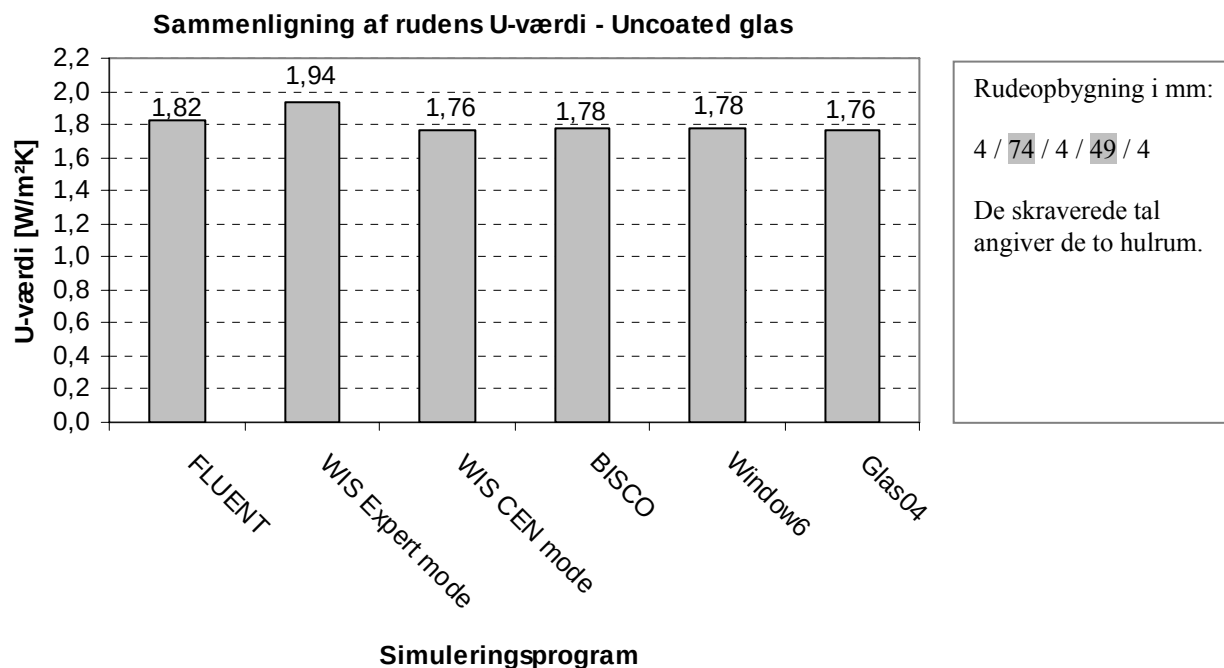
4.3.1 Validering af model

Figur 34 viser en sammenligning af den beregnede center U-værdi for rudeopbygningen uden persiennen. Resultatet beregnet af *FLUENT* er sammenlignet med andre simple beregningsprogrammers resultater for samme rudeopbygning. De simple beregningsprogrammer, som der er foretaget en sammenligning med er *WIS* /13/, *GLAS04* /14/ og *WINDOW6* /8/.



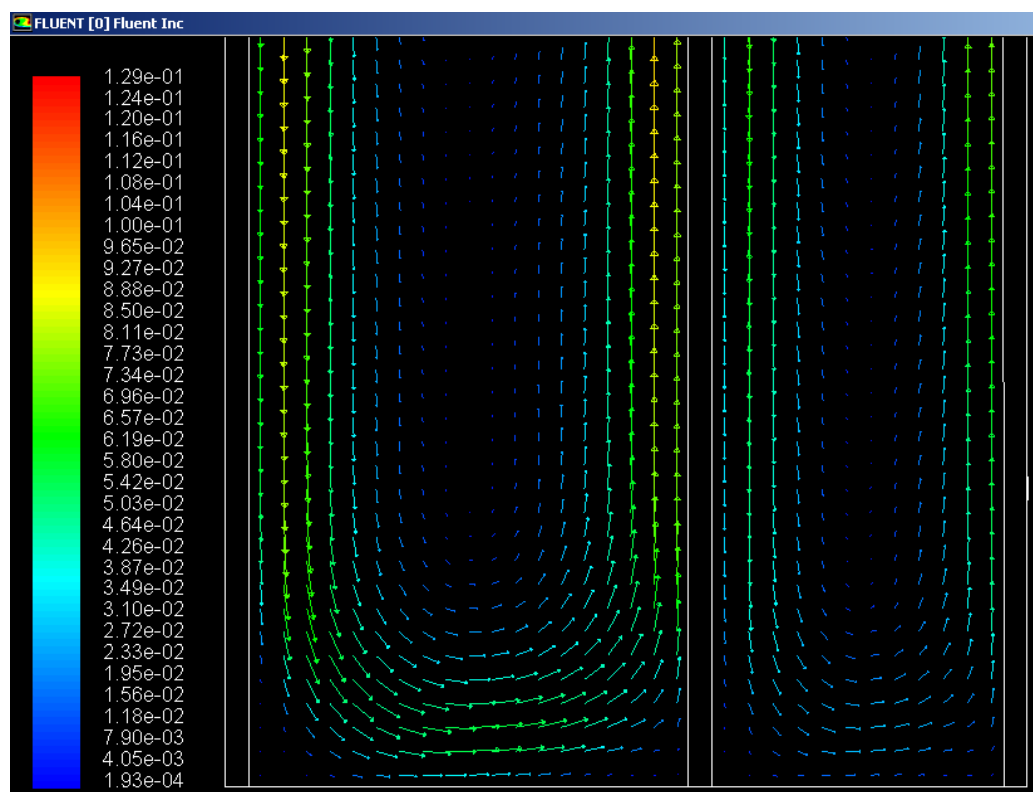
Figur 34 Sammenligning af U-værdi for rude med lavemissionsbelægninger yderst ved brug af *FLUENT* og andre simple beregningsprogrammer

Det ses at resultatet fra *FLUENT* ligger meget tæt på de mere simple beregningsprogrammers resultater. En tilsvarende sammenligning er vist Figur 35 med modeller for samme rudeopbygning, men med brug af almindeligt 4 mm glas uden coatning. Dvs. at alle overflader har en emittans på 0,84.

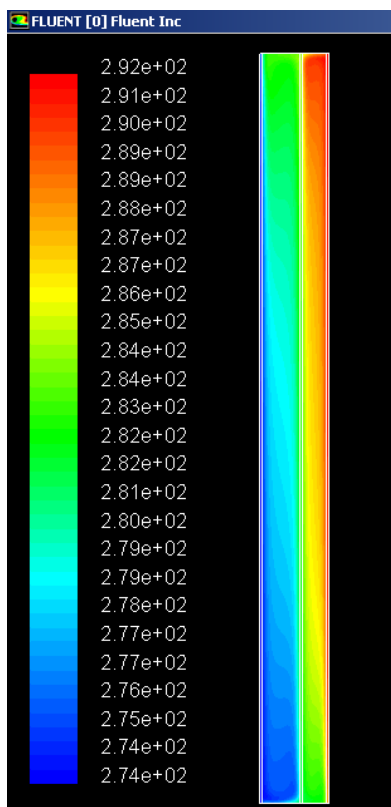


Figur 35 Sammenligning U-værdi for rude med almindelige glas ved brug af FLUENT og andre simple beregningsprogrammer.

På Figur 36 ses et vektorplot af luftstrømningens hastighed i bunden af ruden med coatede glas og Figur 37 viser et temperaturprofil af hele ruden.



Figur 36: Vektorplot af luftstrømningens hastighed nederst i ruden.



Figur 37 Temperaturplot af hele rudemodellen

Det ses at der nederst i ruden haves de koldeste temperaturer. Det midterste glas har under de anvendte grænsebetingelser en overfladetemperatur på ca. 10 °C, hvilket som tidligere nævnt kan være et problem såfremt fugtig rumluft kan trænge ind i hulrummet og kondensere.

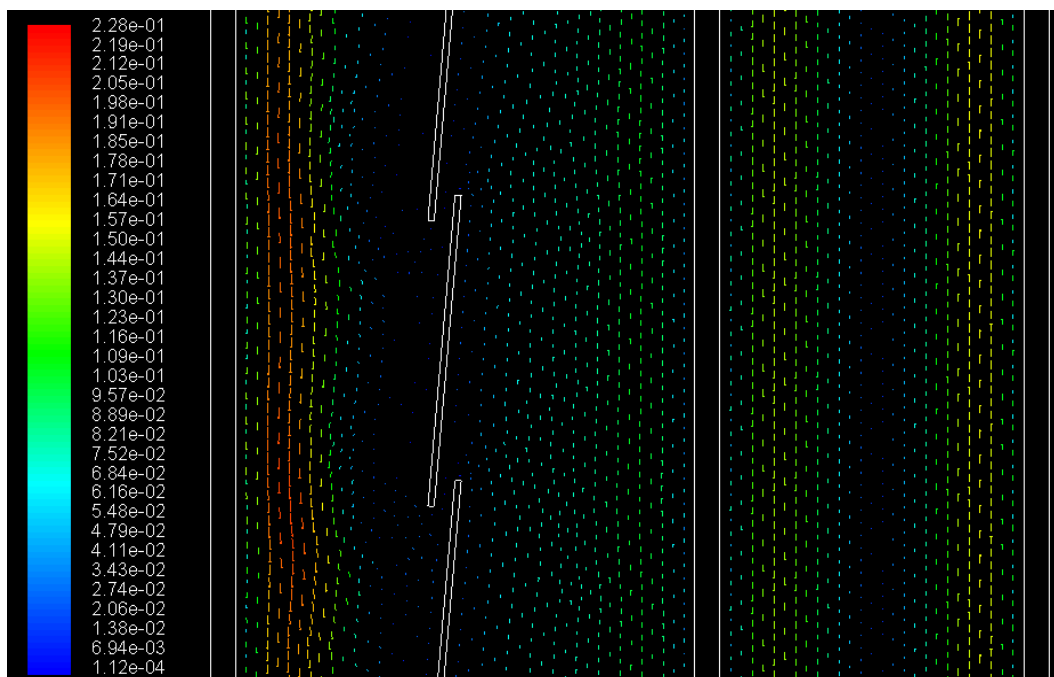
Da rudemodellen således giver troværdige resultater sammenlignet med andre programmer kan modellen anvendes til at undersøge påvirkningen fra en indbygget persienne.

4.3.2 Persiennens betydning for rudens U-værdi

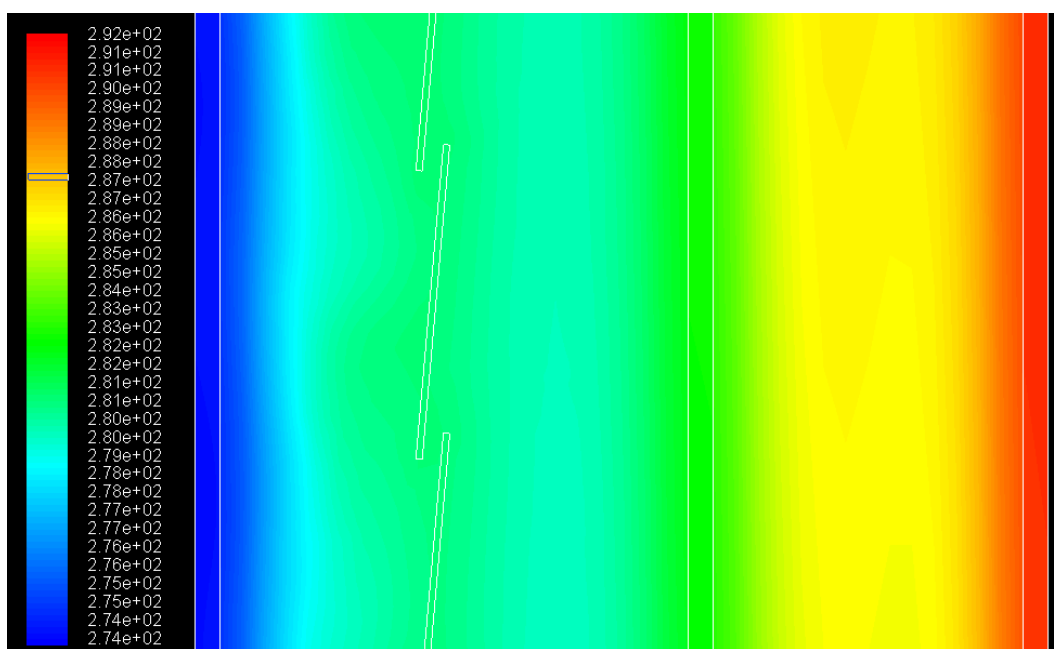
Den ovenfor beskrevne rudemodell udbygges i det følgende med en intern persienne placeret mellem det yderste og midterste glas. Persiennen er af aluminium og har en lamel dybde på 50 mm og en godstykkelse på 1 mm. Det interessante er nu at se, hvordan denne påvirker rudens U-værdi.

Forskellige hældninger af persiennen er simuleret, idet 0° svarer til at persiennen er helt åben og 85° svarer til at persiennen er lukket. Figur 38 viser et nærbillede af luftstrømningerne i ruden med den indbyggede persienne i lukket tilstand og Figur 39 viser det tilhørende temperaturprofil.

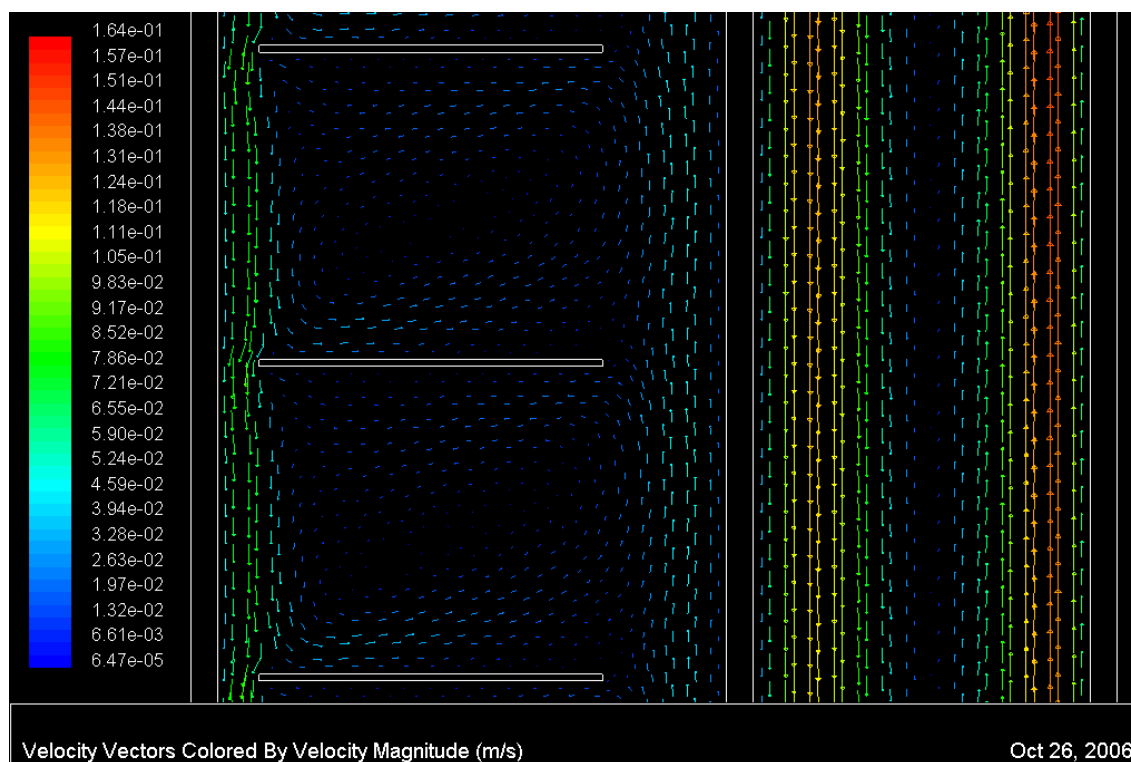
Figur 40 viser en simulering, hvor persiennen er i åben tilstand. I åben tilstand vil konvektionen i det yderste hulrum reduceres af persiennen, hvor i mod strålingsudvekslingen kun påvirkes marginalt.



Figur 38 Simuleret luftstrømninger med FLUENT i ruden med indbygget persienne

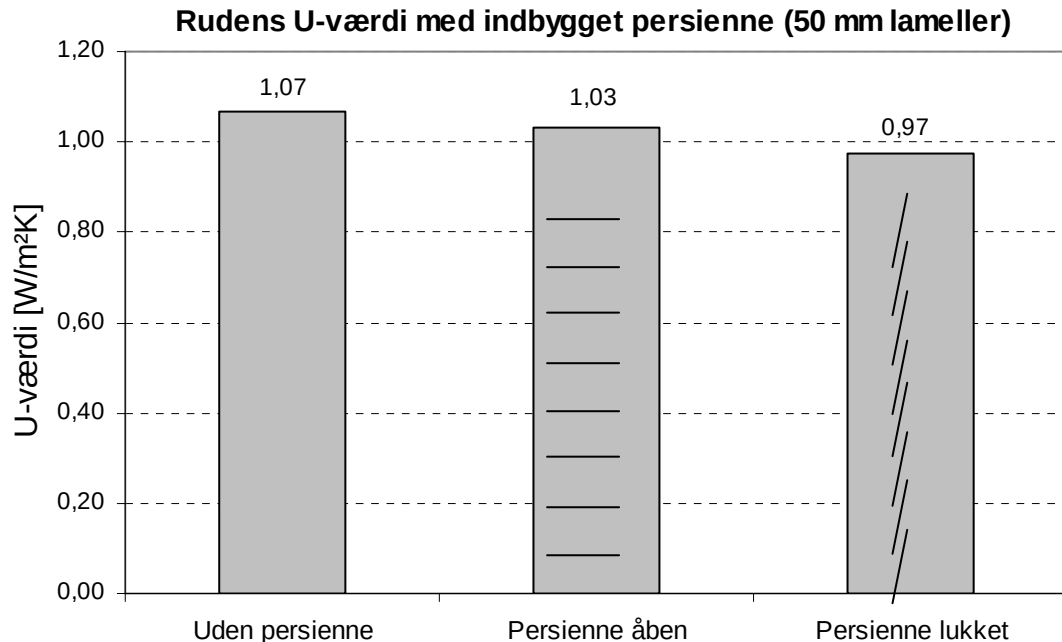


Figur 39 Temperaturprofil gennem ruden med indbygget persienne



Figur 40 Luftstrømningen i rude med indbygget persienne.

Den simulerede U-værdi fra simuleringen med den indbyggede persienne er på Figur 41 sammenlignet med den tilsvarende rudeopbygning uden persiennen. Det ses at rudens U-værdi både reduceres med persiennen i åben og lukket tilstand.



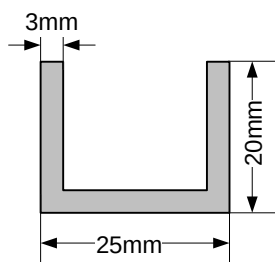
Figur 41 Simulering af persiennens betydning for rudens U-værdi

Udover at virke som traditionel solafskærmning kan der altså opnås en beskednen forbedring af vinduets U-værdi ved at montere en persienne i hulrummet. Persiennens primære funktion er dog at skulle afhjælper problemer med overtemperaturer i perioder med stort solindfald.

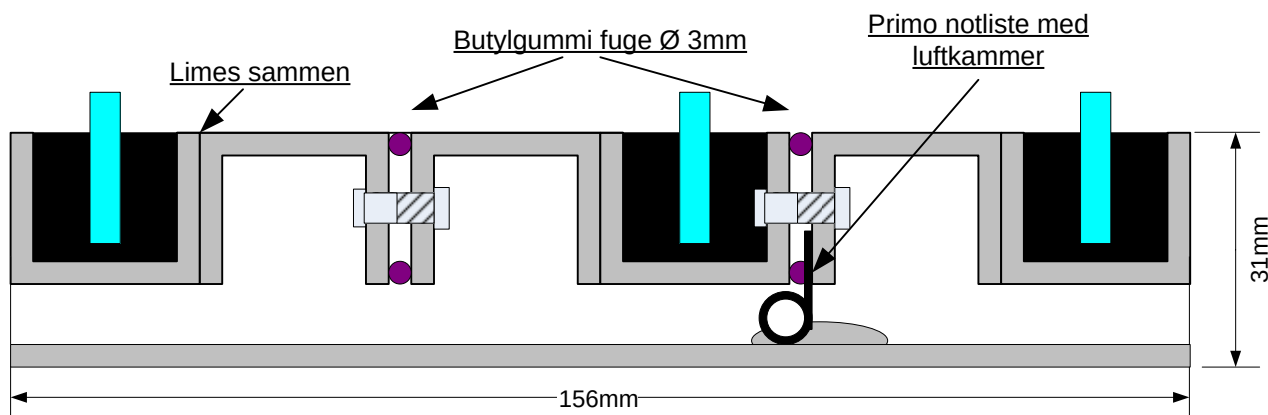
5 Model af vinduet

Med et standardprofil af glasfiberarmeret polyester fra producenten Fiberline Composites A/S er en første prototype af vinduet med smal ramme/karm og separate glas konstrueret på BYG-DTU's værksted.

Rammerne sammenbygges af et standard U-profil som vist på Figur 42 og Figur 43.



Figur 42 Standard U-profil

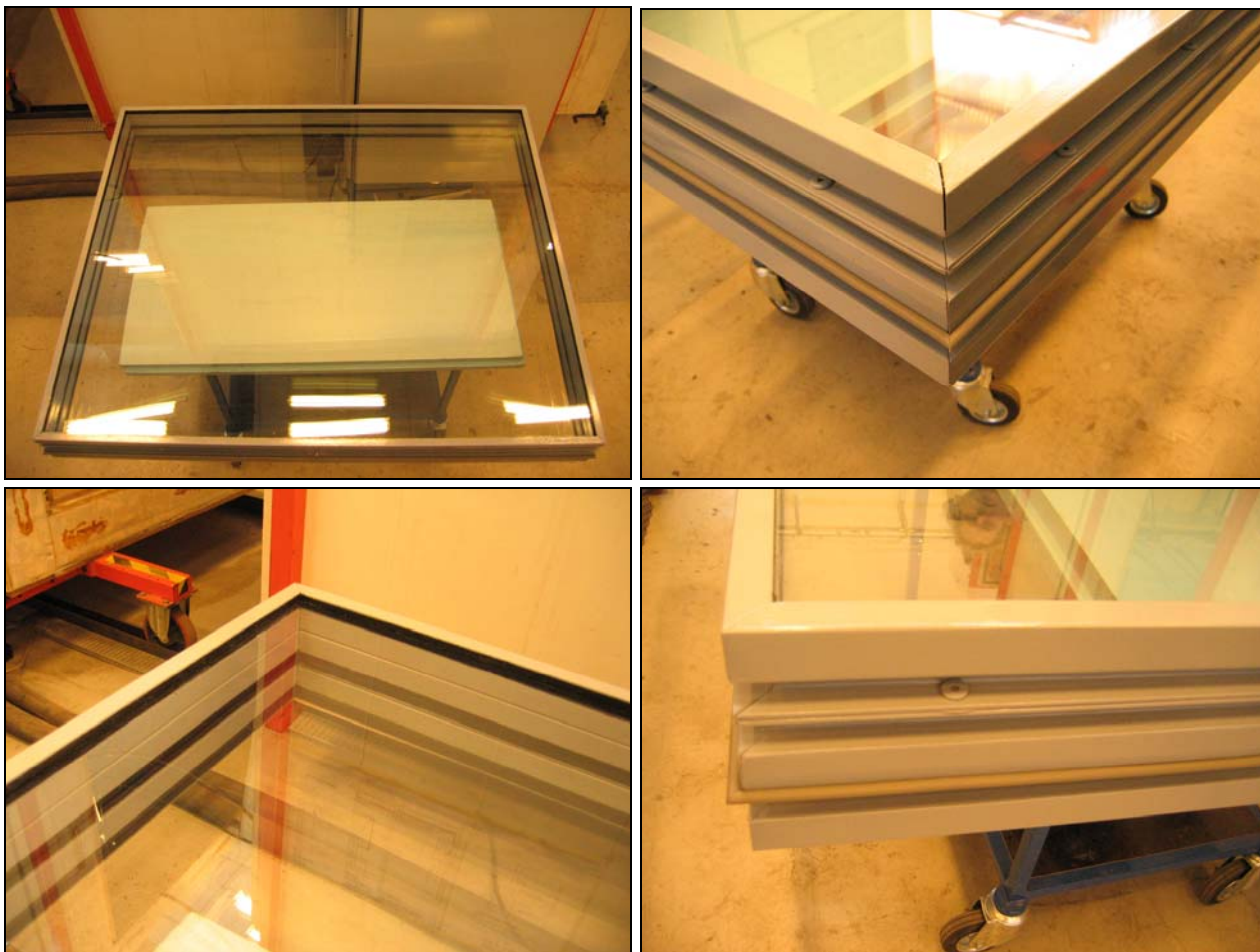


Figur 43 Opbygning af vinduesrammen ved brug af standard U-profil

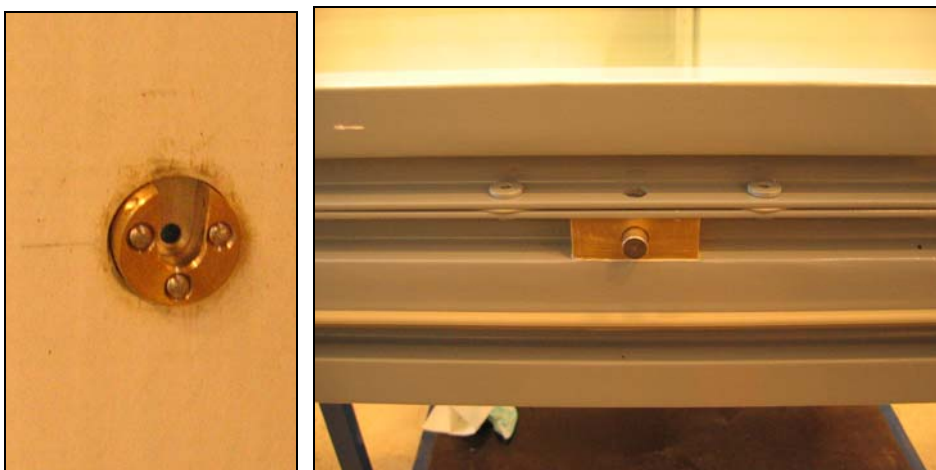
Rudeløsning består af to stk. 4 mm glas med hård lav-emissionsbelægning og et 4 mm jernfattigt glas som tidligere beskrevet. Lufthulrummene ændres dog til at være hhv. 74 mm og 49 mm brede. U-værdi for ruden er uændret $1,009 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Profilerne limes sammen med SIKADUR 330, der er specielt egnet til dette. Rammerne sammen-spændes med møbelbolte pr. ca. 200 mm omkring 3mm butylgummi og en Primo notliste med luftkammer indsættes som vist på Figur 43.

Figur 44 og Figur 45 viser nærbilleder af vinduet. Nederste højre billede viser placeringen af om-drejningsakslen samt boltene der samler profilerne til en ramme. I samlingen mellem de to nederste profiler ses desuden placeringen af tætningslisten med luftkammer.



Figur 44 Nærbilleder af vinduet efter samling af rammen til en enhed

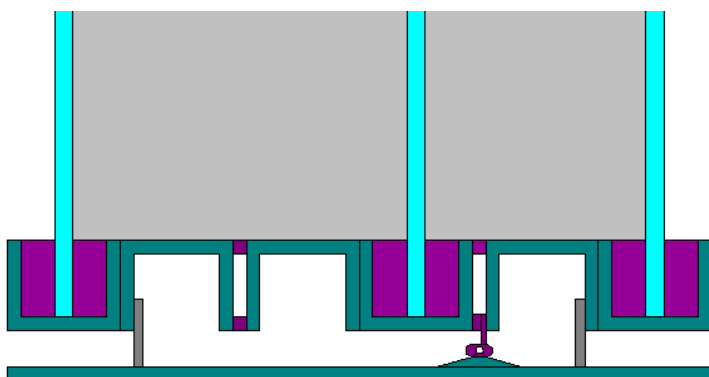


Figur 45 Nærbilleder af akselleje (til venstre) og omdrejningsakslens placering i rammen (til højre)

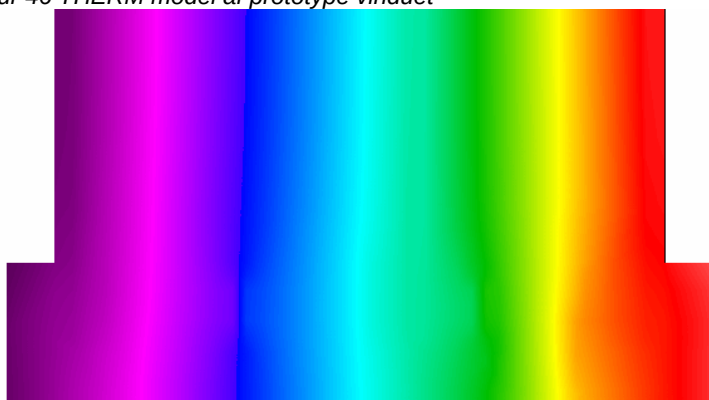
Aksellejet er til prototypen monteret på en 3 mm rustfristålplade limet bag på karmpladen, idet der ikke haves en for og bagmur til fastgørelse, som vinduet ellers er designet til.

5.1 Beregning af U-værdi for prototype

Med programmet *THERM* er foretaget en beregning af prototypens U_{joint} værdi. Anvendes den simple model for hulrummenes ækvivalente varmeledningsevne fås at ramme/karmen har en U_{joint} værdi på $1,31 \text{ W/m}^2\text{K}$, hvilket giver en samlet U-værdi for hele vinduet på $1,04 \text{ W/m}^2\text{K}$ (beregnet for standard dimensionen $1480 \times 1230 \text{ mm}$). Figur 46 og Figur 47 viser hhv. *THERM* modellen og et tilhørende temperaturplot.



Figur 46 THERM model af prototype vinduet



Figur 47 Temperaturplot af THERM model

Tabel 9 viser prototypens energimærkningsdata med en tilhørende beregning af energitilskuddet for et vindue i standard dimensionen ($1480 \times 1230 \text{ mm}$). Energitilskuddet er beregnet for både Danmark og Grønland.

Tabel 9 Prototypens energimærkningsdata og beregnet energitilskud for vindue i standard dimensionen $1480 \text{ mm} \times 1230 \text{ mm}$. Energitilskuddet er beregnet for Danmark (E_{dk}) og for Grønlands to zoner (se afsnit 1).

Ramme/karm		Rude		Vindue		Energitilskud		
U_{joint}	l_b	g_g	U_g	g_w	U_w	E_{dk}	$E_{\text{gr,zone 1}}$	$E_{\text{gr,zone 2}}$
$\text{W/m}^2\text{K}$	mm	-	$\text{W/m}^2\text{K}$	-	$\text{W/m}^2\text{K}$	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2
1,31	31	0,58	1,01	0,53	1,04	10	66	50

Som det ses af Tabel 9 har prototypen et markant bedre energitilskud sammenlignet med traditionelle vinduer, der har et negativt energitilskud.

6 Hot box måling af prototypens U-værdi

Til at bestemme vinduets U-værdi eksperimentelt er anvendt en såkaldt guarded hot box opstilling. En guarded hot box er opbygget af en kold (0°C) og varm (20°C) sektion adskilt af en isoleret skillevæg. I skillevæggen mellem den kolde og varme sektion monteres vinduet. Rundt om vinduet i den varme sektion monteres en isoleret målekasse med et elpanel.

Hot boxen er i forbindelse med projektet blevet renoveret. Se beskrive af det udførte arbejde i bilag 4.

6.1 Styringsprincip

Et elpanel i guard kassen reguleres efter at temperaturen skal være $20,0^{\circ}\text{C}$. I målekassen sidder ligeledes et elpanel, der reguleres efter at temperaturforskelle over målekassen skal være 0°C , hvorved der ikke vil være nogen varmestrøm over målekassens sider. Dermed er den effekt, der afsættes i målekassen for at opretholde de 20°C , et mål for vinduets varmetab. Den målte effekt korrigeres dog for evt. varmestrømme gennem skillevæggen, målekassen samt linietaf. Da ramme/karm dybden er større end 150 mm foreskriver standarden /15/ at linietafskoefficienten sættes til 0 W/mK .

I den kolde sektion haves desuden en ventilator, der kalibreres til at give den ønskede konvektion, som resulterer i en udvendig overgangsisolans på $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$. Figur 48 viser et billede af hot box i åben tilstand.



Figur 48 Hot box forsøgsopstillingen i åben tilstand

6.2 Tæthedstest

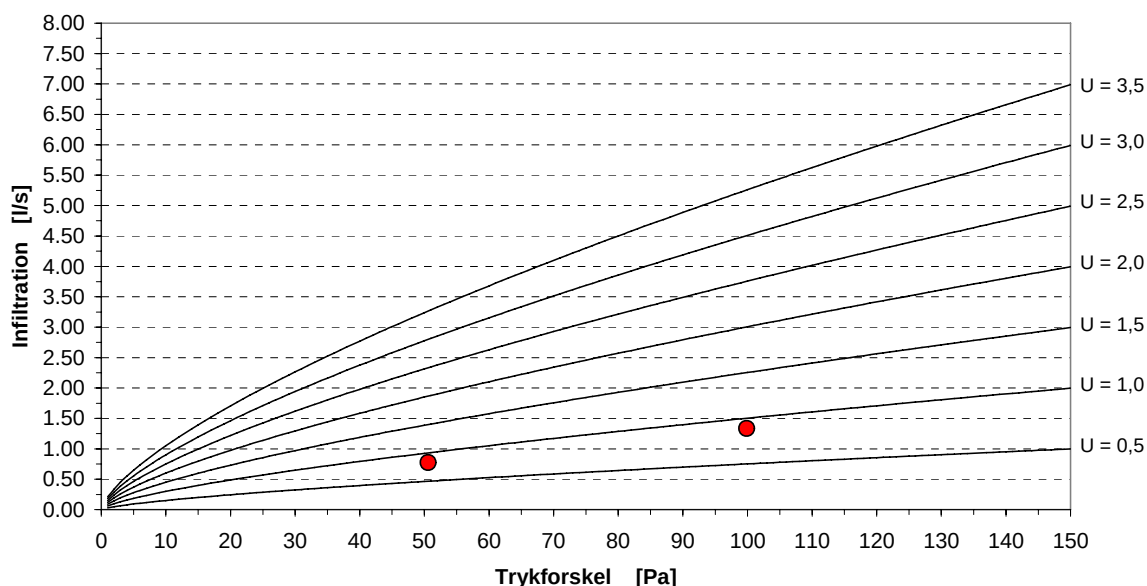
For at sikre at målekassen er monteret korrekt laves en tæthedstest der viser fejlen ved evt. lækager. Testen laves ved et overtryk i målekassen på hhv. 50 og 100 Pa. Tabel 10 viser måledataene fra tæthedstesten.

Tabel 10 Måledata fra tæthedstest før U-værdi måling

	Overtryk	Volumenstrøm
	Pa	l/s
Test 1	50 Pa	0,84
Test 2	100 Pa	1,36

Måledataene er indsat i Figur 49, der viser kurver for maksimal 1 procents målefejl pga. infiltration, som funktion af vinduets U-værdi. Jf. afsnit 5.1 er vinduets U-værdi beregnet til 1,04 W/m²K.

Kurver for maksimal målefejl = 1% pga. infiltration
som funktion af prøveemnets U-værdi

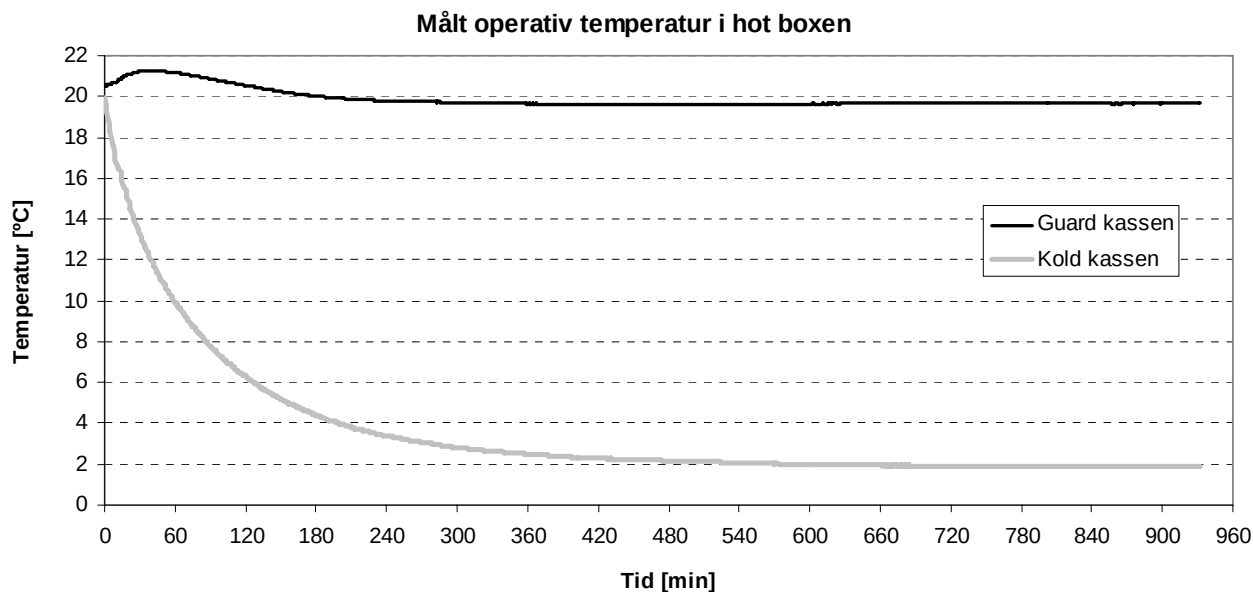


Figur 49 Kurver for maksimal 1 % målefejl som funktion af vinduets U-værdi

Som det ses af Figur 49 ligger punkterne under 1 % kurven gældende for et vindue med en $U=1,0$ W/m²K. Det vil sige at målefejlen er mindre end 1 %, hvilket dermed er acceptabelt.

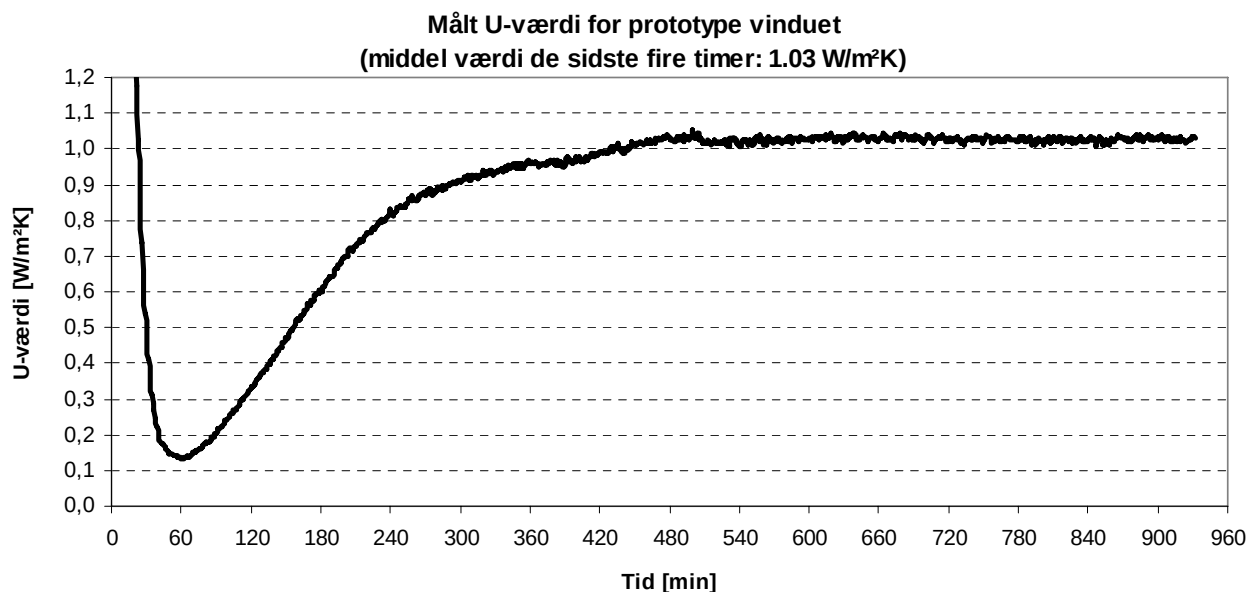
6.3 Forsøgsresultater

Efter at temperaturforholdene er blevet stabile i forsøgsopstillingen kan der foretages en måling af vinduets U-værdi. Figur 50 viser temperaturindsvingningsforløbet for den operative temperatur i den kolde og varme kasse.



Figur 50 Temperaturerne i hot boxen de sidste fire timer af forsøget. Det ses at stationære forhold er opnået. Temperaturerne er vist for den kolde og varme sektion.

Figur 51 viser vinduets U-værdi beregnet løbende gennem måleperioden. Efter at temperaturen i den kolde og varme kasse har indstillet sig, ses at U-værdien for vinduet stabiliserer sig på lidt over 1 W/m²K.



Figur 51 Måling af vinduets U-værdi foretaget med hot box forsøgsopstillingen

Beregnes middelværdien for de sidste fire timer af forsøgets fås 1,03 W/m²K, hvilket stemmer meget fint med den beregnede værdi på 1,04 W/m²K.

7 Konklusion

Der er i projektet arbejdet med at udvikle en ny type lavenergivindue med størst muligt energitilskud og lang holdbarhed til et nordeuropæisk eller arktisk klima. Vinduet er opbygget af smal ramme/karm af glasfiberarmeret polyester og rude bestående af 3 separate glas med store hulrum som ikke er forseglede. De to yderste lag glas har en hård lavemissionsbelægning vendende mod hulrummene.

I modsætning til traditionelle forseglede ruder der med tiden punkterer, vil denne uforseglede rude i princippet have en uendelig lang holdbarhed. Tætningslisterne vil dog, som i almindelige vinduer, skulle udskiftes med jævne mellemrum for at bevare rudens lave U-værdi.

De hårde lavemissionsbelægninger giver anledning til lidt lavere sollystransmittans sammenlignet med bløde lavemissionsbelægninger og det blev derfor med et testpanel undersøgt om den hårde lavemissionsbelægning evt. gav forringede dagslysforhold. Testresultatet viste at dette ikke var tilfældet.

For at optimere vinduets samlede solenergitransmittans er det midterste glas jernfattigt og ramme/karmen er optimeret med henblik på at gøre bredden mindst mulig. Ved denne optimering opnås en solenergitransmittans for det optimerede vinduesdesign på 0,54. Selve ramme/karmen er konstrueret i glasfiberarmeret polyester, da dette materiale har en lav varmeledningsevne, stor styrke og er yderst vejrbestandigt. Ved at anvende en stor glasafstand mellem de uforseglede glas opnås en dyb og derved velisolerende ramme/karm konstruktion. Den relativ store glasafstand giver mulighed for evt. indbygning af en persienne eller et rullegardin som solafskærmning. Disse vil i lukket tilstand desuden virke yderligere isolerende.

En CFD simulering af den foreslåede rudeopbygning viste en reduktion af center U-værdien for ruden på ca. 10 % ved indbygning af en persienne.

U-værdien for det foreslåede vinduesdesign er beregnet til $1,03 \text{ W/m}^2\text{K}$, hvilket giver et energitilskud for Danmark på 13 kWh/m^2 og Grønland på 74 og 59 kWh/m^2 (for hhv. zone 1 og 2).

På baggrund af det foreslåede optimerede vinduesdesign blev en prototype af vinduet opbygget i standard dimensionen $1480 \times 1230 \text{ mm}$ på BYG·DTU's værksted. Ruden blev opbygget som tidligere beskrevet og rammen blev sammenbygget af et standard U-profil i glasfiberarmeret polyester. Ramme/karmens U_{joint} værdi blev beregnet til $1,32 \text{ W/m}^2\text{K}$, hvilket gav en samlet U-værdi for vinduet på kun $1,04 \text{ W/m}^2\text{K}$ og et årligt energitilskud for Danmark på 10 kWh/m^2 og for Grønland 66 og 49 kWh/m^2 (for hhv. zone 1 og 2).

Den opbyggede prototype blev testet i BYG·DTU's guarded hot box forsøgsopstilling, der kan måle et vindues U-værdi. Forsøgsresultatet viste at prototypen havde en U-værdi på $1,04 \text{ W/m}^2\text{K}$.

8 Referencer

-
- | | |
|-----|---|
| /1/ | Nielsen, T. R., Duer, K., Svendsen, S (2000). Energy Performance of Glazings and Windows. <i>Solar Energy</i> Vol. 69(Suppl.), Nos. 1–6, pp. 137–143, 2000. |
|-----|---|
-
- | | |
|-----|--|
| /2/ | Kragh, J. (2005). Weather Test Reference Years of Greenland. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark. |
|-----|--|
-
- | | |
|-----|--|
| /3/ | Grønland Bygningsreglement 2006, 1. udgave, Direktoratet for boliger og Infrastruktur, 3900 Nuuk, Greenland. |
|-----|--|
-
- | | |
|-----|---|
| /4/ | By & Byg (2002). Bsim 2002 – Building simulation program, Dansih Building and Urban, Research, Hørsholm, Denmark. |
|-----|---|
-
- | | |
|-----|---|
| /5/ | The Passivhaus Institut, Darmstadt, http://www.passiv.de/ |
|-----|---|
-
- | | |
|-----|---|
| /6/ | CEN/TC 129, Glass in building – Structural sealant glazing - Part 3: Assembly rules |
|-----|---|
-
- | | |
|-----|---|
| /7/ | EN ISO 10077-2. 2003. European Standard. Thermal performance of windows, doors and shutters – calculation of thermal transmittance – Part 2: Numerical method for frames. |
|-----|---|
-
- | | |
|-----|---|
| /8/ | <i>THERM 6.0</i> Research Version, Finite element simulator, (2005), LBNL, Lawrence Berkley National Labrotory, USA |
|-----|---|
-
- | | |
|-----|--|
| /9/ | <i>BISCO 7.0w</i> , Computer program to calculate two-dimensional steady state heat transfer in free-form objects, PHYSIBEL SOFTWARE, Consulting Energineers, Research – Advice – Software, Maldegem (B) |
|-----|--|
-
- | | |
|------|---|
| /10/ | <i>GAMBIT</i> version 2.2.30, Fluent Inc., 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, (U.S.A) |
|------|---|
-
- | | |
|------|---|
| /11/ | <i>FLUENT</i> Release 6.1.22, Fluent Inc., 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, (U.S.A) |
|------|---|
-
- | | |
|------|---|
| /12/ | Simulation of natural convective heat transfer of 3D glazing cavity. February 2003, Bhaskar Adusumalli, Building Energy Efficient Program, CEERE, Amherst |
|------|---|
-
- | | |
|------|--|
| /13/ | <i>WIS 3.0.1</i> , TNO. (2004). <i>Advanced Window Information System, WIS –window simulation program</i> , TNO Building and Construction Research, Delft (NL). 2004 |
|------|--|
-
- | | |
|------|---|
| /14/ | <i>GLAS04</i> , Pilkington Glas04©.dk, version 1.3, 2006, Pilkington Danmark A/S, Farverland 1A, 2600 Glostrup (DK) |
|------|---|
-
- | | |
|------|--|
| /15/ | ISO 12567-1 Thermal performance of windows and doors – Determination of thermal transmittance by hot box method: Part 1 Complete windows and doors, first edition, september, 2000 |
|------|--|
-

Bilag 1:

Paper: Improved Windows for cold climates

Nordic Symposium on Building Physics, Reykjavik 13-15 June 2005

Improved Windows for Cold Climates

*Jacob Birck Laustsen, Assistant research Professor
Technical University of Denmark;
jbl@byg.dtu.dk www.byg.dtu.dk*

*Svend Svendsen, Professor,
Technical University of Denmark;
ss@byg.dtu.dk www.byg.dtu.dk*

KEYWORDS: *Windows, Energy performance, Heat transfer, Solar gain, Net energy gain*

SUMMARY:

A large part of the energy consumption in countries in Nordic and Arctic climates is used for space heating in buildings. In typical buildings the windows are responsible for a considerable part of the heat losses. Therefore there is a large potential for energy savings by developing and using windows with improved energy performance.

Traditionally evaluation of the energy performance of windows has focussed on the thermal transmittance, but as windows differ from the rest of the building envelope by allowing solar energy to enter the building, the total solar energy transmittance is equally important. In the heating season in cold climates the solar gain through windows can be utilized for space heating which results in a corresponding reduction in the energy production that is often based on fossil fuels. A suitable quantity for evaluating the energy performance of windows in a simple and direct way is therefore the net energy gain, which is the solar gain minus the heat loss during the heating season. Especially in arctic climates where the heating season covers the whole year there is a large potential for exploiting the solar gain during the summer season. Furthermore the presence of snow increases the solar radiation because of the reflection.

In this paper the energy saving potentials for different window types have been examined by determining the net energy gains in Danish and Greenlandic climates. Furthermore the windows have been evaluated by performing building simulations of the heating demand in typical single-family houses in Denmark and Greenland. The examined windows are typical new windows from Nordic countries and new proposals of improved windows with low thermal transmittance and high total solar energy transmittance.

The results show that net energy gain can be increased considerably by reducing the frame width, which results in a larger transparent area causing a larger solar gain but still maintaining a low thermal transmittance. Using three layers of glass with large gaps, using very slim frame profiles, and omitting the edge constructions that normally causes thermal bridges achieve this. Applying shutters or low emissivity coated roller blinds incorporated in the glazing that are activated during night time can improve the energy performance of windows.

The results from this work show that it is possible to develop windows with a positive net energy in a fairly simple way, which means that it contributes to the space heating of the building.

1. Introduction

In this paper the possibilities of improving the energy performance of windows in cold climates are examined. The background for using windows with improved energy performance is the need to reduce the energy consumption in buildings. Since the heat loss through windows often represents half the total heat loss from houses, much energy can be saved by developing and using better windows with respect to energy performance. The main purpose of having windows in houses is that they provide daylight and view, but windows also provide solar gain that can be utilized as a contribution to the space heating in the building. Therefore the windows also have a positive influence on the energy balance of buildings.

To evaluate the possibilities for developing better windows with respect to energy performance when used in Nordic and arctic climates, seven different window types have been examined in terms of the net energy gain and simulations of the energy consumption in buildings with focus on domestic houses.

2. The net energy gain

In order to evaluate the energy performance of windows both the U value and g-value must be taken into account. The energy balance of windows over the heating season can be described by the net energy gain, which is the solar heat gain transmitted in through the window, minus the heat loss out through the window during the heating season. Thus, the net energy gain expresses the heat balance in one single number and is therefore a good measure to evaluate and compare the energy performance of windows in a simple and direct way.

The net energy gain, E , [kWh/m²] is given by the expression below (Nielsen, T. R. et al, 2000)

$$E = I \cdot g - G \cdot U \quad (1)$$

Where

I is the solar radiation during the heating season corrected for the g-value's dependency on the incidence angle [kWh/m²]

G is the degree hour during the heating season [kKh]

I and G are dependent on the climate and I is also dependent on the orientation of the window.

A negative net energy gain indicates that the heat loss is larger than the solar gain.

2.1 Danish climate

The expression of the net energy gain for the Danish climate is based on the period from 24/9 to 13/5 (heating season) and the following distribution of the windows:

- South: 41%
- North: 26%
- East/West: 33%

A shadow factor of 0.7 is used for the corrections for the effects of shadows. The net energy gain for Danish conditions is then given as (Nielsen, T. R. et al, 2000)

$$E_{DK} = 196.4 \cdot g - 90.36 \cdot U \quad [\text{kWh/m}^2] \quad (2)$$

2.2 Greenlandic climate

In order to evaluate the energy performance of the windows in arctic climates, an expression of the net energy gain, E_{GL} , for Greenland were developed. E_{GL} is based on a reference house (typical in Greenland) with the following distribution of the windows:

- South: 41%
- North: 26%
- East/West: 33%

As the climate in Greenland varies from north to south the country is divided into two zones (Kragh, J. (2005)). The two zones cover Greenland north and south of the Arctic Circle respectively as shown in Figure 1.

Based on the reference years for the two zones developed by (Kragh, J. (2005)) the following two expressions of the net energy gain were determined assuming that the heating season is a whole year.

$$E_{GL,1} = 490 \cdot g - 186 \cdot U \quad \text{Zone 1} \quad [\text{kWh/m}^2] \quad (3)$$

$$E_{GL,2} = 532 \cdot g - 223 \cdot U \quad \text{Zone 2} \quad [\text{kWh/m}^2] \quad (4)$$

A shadow factor of 0.7 is used for the corrections for the effects of shadows.

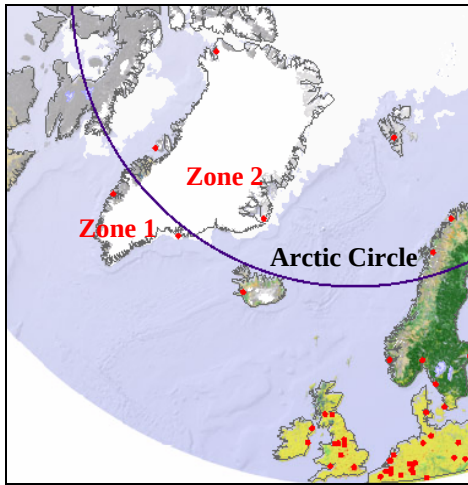
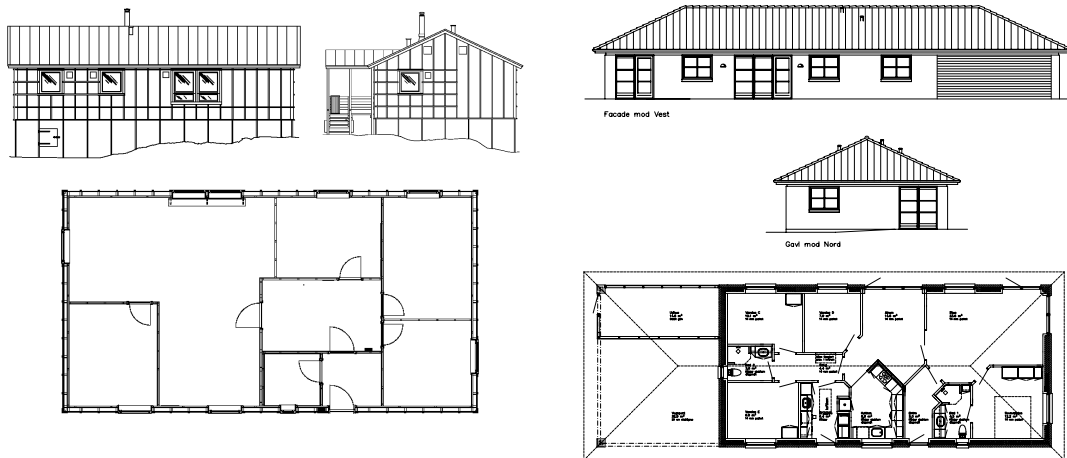


Figure 1.: Climate zones in Greenland. Zone 1 south of the Arctic Circle and zone 2 north of the Arctic Circle (Kragh, J. (2005))

2.3 Description of the reference houses

Two single-family houses were used for the calculations. The first one (A) is a typical house from Greenland that meets the Danish building code BR95, and the second house (B) is a typical Danish house that meets the new Danish building code BR2005.



House A: (Arctic climate, Greenland)

House B: (Danish climate)

Figure 2. The two houses used in the simulations in Bsim2002.

Data for the two houses used in the simulations are shown in Table 1

Table 1 Data for the two houses used in the calculations

	Area	Window area
House A, Arctic climate, Greenland	101.2 m ²	12.3 m ²
House B, Danish climate	134.5 m ²	30.1 m ²

3. Description of the examined windows

The energy performance was examined for seven different window types that will be described in the following.

Type 1

The standard window that is used in house A. The window is made of wood and has a double glazing unit with argon and low emissivity in position 3.

Type 2

The standard window that is used in house B. The window is made of wood and has a double glazing unit with argon and low emissivity in position 3.

Type 3

The third window shown in Figure 3 is developed at Technical University of Denmark. The frame profiles are made of wood covered with aluminium. The used glazing is a double layer low energy glazing 4-15-4 mm with 90/10% argon filling in the gap and a low-emittance coating on the inner pane on the surface facing the gap. To get a high g-value the outer pane is made of float glass with low iron content.

The used edge construction is a “warm edge”. The spacer is made of plastic with a very thin stainless steel film, which ensures that the edge construction is tight and the argon gas stays inside the glazing. The low thermal conductivity of the plastic material ensures that the equivalent thermal conductivity is several times lower than for traditional edge constructions of steel or aluminium.

The aluminium on the outside reduces the need for maintenance. Moving the sash out in front of the outer frame reduces its width to approximately 5 cm. Hereby the glazing area is increased by 15% (for the standard window dimensions: 1.48 x 1.23 m) compared to a corresponding window of wood with a frame width of 10 cm. In the bottom between the aluminium and the wood a weather strip of flexible elastomeric foam is mounted to prevent ventilation of the cavity between the aluminium and the wood. This reduces the U-value. (Laustsen, J. B et al (2003)).

When optimising the energy performance of windows, it should be taken into account that the wall construction has a great effect on the edge loss between window and wall. Thus a cut of the thermal bridge at the rebate with a thermal bridge insulation is important to reduce the thermal loss. By increasing the thermal break at the rebate the U-value and Ψ -value can be reduced. Therefore the frame is made very deep (226 mm) to make it possible to cover a wide layer of insulation in the wall. Mounting a 3mm PVC plate in the bottom of the frame facilitates this.

Type 4

Window type 4 shown in Figure 4 is a proposal for a frame construction of fibre glass reinforced polyester, which is both very slim and deep. There is room for 3 panes of glass with an unusually large gap, which has the effect that the depth of the frame is as much as 150 mm. The frame can be made even deeper, however, and thus cover large insulation thicknesses in the wall. The window is called the combination window, as it combines glazing and sash into a more total construction.

As the total area of the window is 1.23 m · 1.48 m and the frame width is 25 mm, the glass percentage is 93%. The centre U-value of the glazing is 0.93 W/m²K and the g-value is 0.58. The glazing consists of three layers of glass: 4 mm float glass with hard low-e coating, 100 mm air, 4 mm float glass, 25 mm air and 4 mm float glass with hard low-e coating.

Type 5

This window is identical with type 4, but insulating shutters are mounted on the outside of the window. When the shutters are closed the U-value is reduced considerably. Closing the shutter when it is dark outside and there is no need for view out will therefore result in a reduced heat loss from the windows. The thermal resistance of the shutters is set to 1 m²K/Wm, which corresponds to a thickness of 40 mm and a thermal conductivity of 0.039 W/mK. The thermal resistance of the extra cavity between the glazing and the shutter is neglected.

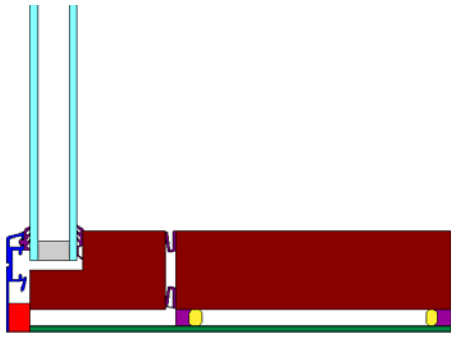


Figure 3. Type 3. Slim frame profile (5 cm) made from wood covered with aluminium.

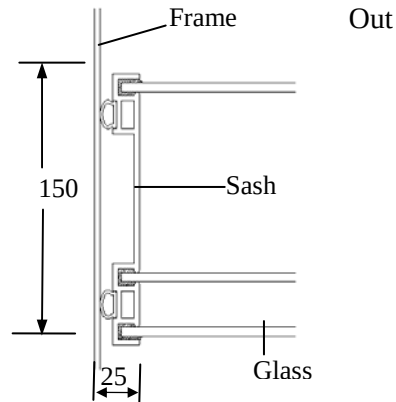


Figure 4. Type 4. Frame profile made from fibre glass reinforced polyester with three layers of glass.

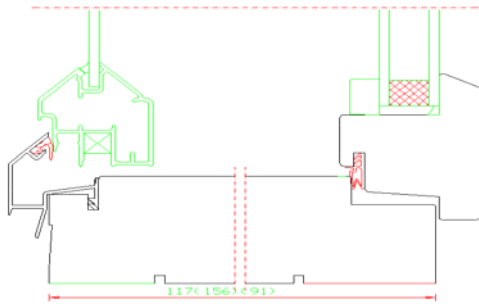


Figure 5. Type 6. Finnish window, 1+2 glazing. Frame made from wood and aluminium

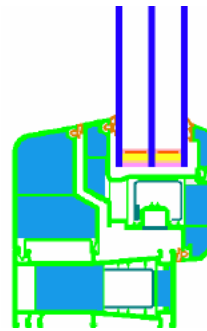


Figure 6. Type 7. PVC frame profile with PU foam in the cavities. Triple glazing unit. (Passivhaus.de.)

Type 6

Typical Finnish window with a so-called “1+2” glazing. Frame and sash are made of wood and aluminium. The glazing consists of one 4 mm layer float glass outermost, a large cavity of air and an insulating double glazing unit to the inside. The DGU has argon in the cavity and low emissivity coating in position 5. Window type 6 is shown in Figure 5.

Type 7

This is a German window that fulfils the requirements for the Passivhaus standard system. The frame profile is made of PVC insulated with PU-foam in the internal cavities, which results in a very low U-value. The glazing is a three layer low energy glazing (4/16/4/16/4) with argon in the cavities and two low emittance coatings. Window type 6 is shown in Figure 6.

3.1 Data for windows

For each of the windows the thermal and optical properties were determined. The thermal transmittance, U , the linear thermal transmittance, Ψ , and the total solar energy transmittance, g , were determined in accordance with the standards EN ISO 10077-1 and 2 (CEN, 2003). Detailed calculations of U and Ψ were performed in the program Therm (LBNL (2003)). The net energy gain was determined for Danish climate and Greenlandic climate for zone and zone 2. In order to give a quick comparison of energy performance of the windows the net energy gain was determined for a standard size window. In Table 2 data and results for the examined windows are shown.

Table 2. Data for the examined windows. All windows measure the standard dimensions 1.23 m x 1.48 m.

	Glazing				Frame			Window 1.48 x 1.23 m		Net energy gain		
	Glazing	U_g	g	τ	Width	U_f	Ψ	U_{tot}	g_{tot}	E_{ref} Dk	E_{ref} Zone 1	E_{ref} Zone 2
Type		W/m ² K			m	W/m ² K	W/mK	W/m ² K		kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²
1	2 layers	1.28	0.63	0.66	0.1	1.3	0.128	1.61	0.46	-56	-76	-116
2	2 layers	1.17	0.63	0.79	0.1	1.37	0.047	1.34	0.46	-32	-26	-57
3	2 layers	1.15	0.67	0.80	0.054	1.33	0.034	1.27	0.58	-2	41	18
4	3 layers	0.93	0.58	0.65	0.025	1.49 *)	-	0.97	0.54	18	83	70
5	3 layers	0.93	0.58	0.65	0.025	1.49 *)	-	0.97 (0.49**)	0.54 (0.0**)	45		
6	1 + 2.	1.01	0.60	0.71	0.11	1.32	0.040	1.20	0.43	-23	-10	-36
7	3 layers	0.70	0.52	0.70	0.13	0.75	0.03	0.79	0.33	-6	16	0

*) Calculations of the thermal properties of glazings/windows with large cavities do not include a linear thermal transmittance, Ψ , because of the special method used (Jensen, C. (2001)). Any extra two dimensional heat losses due to the interaction between frame and glazing is included in the thermal transmittance, U , for the frame.

**) With shutters. Shutters are closed when it is dark. In Danish climate 63% of the degree hours in the heating season occur when it is dark. (Madsen, T.T. (2004)).

The calculations of the net energy gains show that the goal of developing windows for Nordic and arctic climates with positive net energy gain can be obtained with the proposed new windows. The window type 3, 4(5) and 7 have the largest net energy gains. Although window 7 has the lowest U-value window 3 and 4 have higher net energy gains, which indicate that increasing the g-value by reducing the frames width has a positive impact on the net energy gain because more solar energy is transmitted.

4. Simulations of energy consumption

In order to carry out a more detailed examination of the energy performance of the windows when mounted in a building, simulations of the energy consumption were performed in the program Bsim2002 (By & Byg (2002)). The simulation results were also used to evaluate the net energy gain method. The simulations were performed for the two houses shown in Figure 2 with the different windows inserted. For house A calculations were carried out for Greenland (weather data zone 1 and zone 2) assuming heating season during the whole year. For house B calculations were carried out for Danish weather data (Copenhagen) assuming heating season from September 7. to May 6. Window 1 was not examined in house B. The results of the simulations for Greenland are shown in Table 3 and Figure 7 - Figure 8. The results for Denmark are shown in Table 4 and Figure 9.

Table 3. Energy consumption in house A, Greenland (Zones 1 and 2) with different windows.

Window			Zone 1			Zone 2		
Type	U_{tot} W/m ² K	g_{tot}	Heating kWh/year	Solar gain kWh/year	Venting kWh/year	Heating kWh/year	Solar gain kWh/year	Venting kWh/year
1	1.61	0.46	11427	3016	-247	14751	3324	-200
2	1.34	0.46	10744	3016	-275	13930	3324	-230
3	1.23	0.58	10024	3830	-558	13254	4107	-460
4	0.97	0.54	9488	3578	-498	12434	3956	-462
5	0.97–0.49	0.54–0.0	9294	3536	-498	12090	3896	-459
6	1.20	0.43	10455	2872	-252	13580	3166	-210
7	0.79	0.33	9830	2204	-136	12811	2426	-113

Heating: Energy consumption for space heating in the building.

Solar gain: Solar energy transmitted through the windows to the building, kWh.

Venting: Heat loss due to ventilation by opening windows and doors. Set point: 24 °C, kWh.

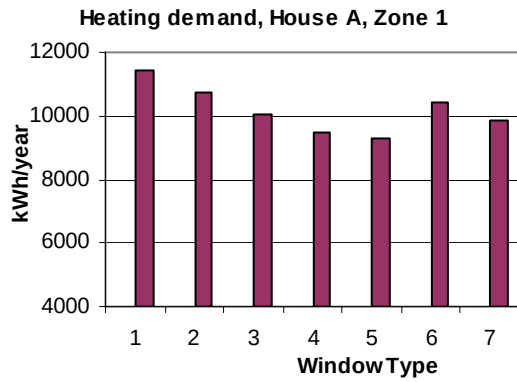


Figure 7. Heating demand for house A with different windows, Greenland, zone 1.

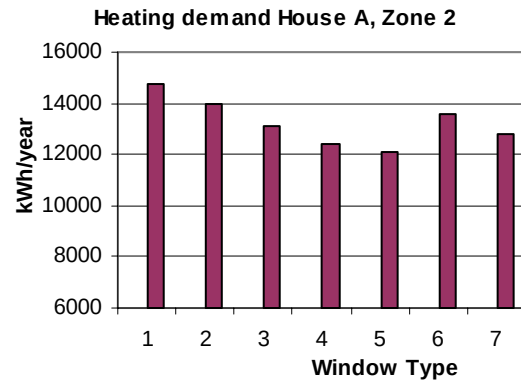


Figure 8 Heating demand for house A with different windows, Greenland, zone 2.

Table 4. Energy consumption for house B (Denmark) with different windows.

Type	U_{tot} W/m ² K	g_{tot}	Heating kWh/year	Solar gain kWh/ year	Venting kWh/ year
2	1.34	0.46	5274	1891	-136
3	1.23	0.58	4401	2705	-423
4	0.97	0.54	4032	2373	-344
5	0.97 – 0.49	0.54 – 0.0	3949	2349	-353
6	1.20	0.43	4836	1901	-162
7	0.79	0.33	4093	1582	-131

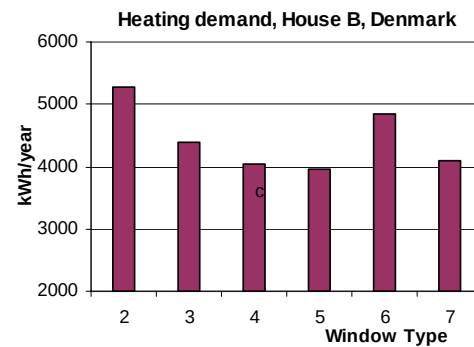


Figure 9. Heating demand for house B with different windows, Denmark

It appears from the calculations that considerable energy savings can be achieved by improving the existing windows (types 1 and 2).

Type 3, which is based on quite simple improvements (slim frame and the best DGU on the Danish market) saves between 12-17% of the energy consumption.

Type 4 reduces the energy consumption by 17-24%. The advantage of this window is the large glazing area due to the extremely narrow frame profile in combination with the low U-værdi.

Type 5 (= type 4 + shutter) results in savings of 19-25% due to the further reduced U-value during night time when the shutters are closed.

Type 6 only saves about 8% of the heating demand. However, it is expected that reducing the frame width and applying hard low-e coating on the outermost glass pane can improve the energy performance of this window type. Furthermore, a thermal break in the aluminium sash will reduce the U-value.

Type 7 results in energy savings of 14-22% due to the very low U-value of both the frame profile and the glazing. However, the wide frame profile and the three layers of glass with two low-e coatings have the effect that the total solar energy transmittance is only 0.33 for which reason the window does not exploit the solar gain to optimum effect.

The results show that the largest energy savings are obtained using the window types 4, 5 and 7. By developing hybrid solutions that combine type 7's very low U-values of both frame and glazing with the slim frame construction in type 4, which increases the g-value, it will be possible to obtain even higher net energy gain. It appears that the windows type 3 and 4/5 that have high g-values due to large glazing areas provide a large solar gain, which is good for the energy balance, but this can also result in overheating problems in warm periods with sunny days. Therefore, the demand for venting is higher for these windows. Applying solar shading devices can solve most of these problems.

5. Comparison of the net energy gain and the building simulations

By comparing Table 2, Table 3 and Table 4, it appears that using the net energy gain or the building simulations for evaluating the energy performance of the windows gives almost the same overall results. The larger net energy gain, the lower energy consumption for heating. The BSim simulations show that there are minor venting heat losses for all the windows during the heating season. The venting heat loss is less than 10 % of the solar gain for type 1, 2 and 6, 7 and less than 15 % for the windows with highest g-values type 3, 4, and 5. Furthermore the heating load is typically between 2 and 3 times larger than the solar gain. This means that, for domestic buildings, almost all the solar gain is utilized for space heating and a change in the net energy gain will have almost full effect on the heating load of the building. Hence, the energy savings for space heating can be estimated as the change in the net energy gain, which is therefore useful for an initial evaluation of the energy performance of windows for domestic houses.

6. Conclusion

Based on the calculations of the net energy gain and the heating consumption of seven different windows it is concluded that there are good possibilities for developing windows with improved energy performance for cold and arctic climates. The windows type 3,4,5 and 7 result in the highest net energy gains and the lowest energy consumptions in the houses.

For type 7 the good result is due to the very low thermal transmittance. An unfortunate effect of the combination of the wide frame profile and the three-layer glazing is that the total solar energy transmittance is quite low resulting in a low solar gain. The good results for window type 3,4 and 5 show that the g-value has a significant influence on the energy performance. A simple and efficient way to improve the g-value is by increasing the glazing area by reducing the frame width. In the new developed window type 4 this is implemented with a frame width of only 25 mm and still keeping a low U-value. The 3- layer glazing with large gaps ensures that use of edge constructions that normally results in a thermal bridge can be avoided. Since the windows with low U-value and high g-value result in positive net energy gain they will contribute to the space heating of the houses. During periods with sunny days the high solar gain can cause overheating problems. Therefore there is a need for developing windows with integrated solar shading devices.

7. References

- By & Byg (2002). *Bsim 2002 – Building simulation program*, Dansih Building and Urban Research, Hørsholm, Denmark.
- CEN (2000). EN ISO 10077-1. 2000. European Standard. Thermal performance of windows, doors and shutters – calculation of thermal transmittance – Part 1: Simplified method.
- CEN (2003). EN ISO 10077-2. 2003. European Standard. Thermal performance of windows, doors and shutters – calculation of thermal transmittance – Part 2: Numerical method for frames.
- Jensen, C. F. 2001 Beregningsprocedure for de energimæssige forhold for forsatsvinduer. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark.
- Kragh, J. (2005). Weather Test Reference Years of Greenland. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark.
- Laustsen, J. B. Svendsen, S. (2003). Windows with improved energy performances. ISES Solar World Congress, Göteborg, Sweden, 2003.
- LBNL (2003). Therm ver. 5.2, Finite element simulator, (2003), Lawrence Berkley National Laboratory, USA.
- Madsen, T. T. (2004). *Vinduer med bedre energimæssige egenskaber*. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark.
- Nielsen, T. R., Duer, K., Svendsen, S (2000). Energy Performance of Glazings and Windows. *Solar Energy* Vol. 69(Suppl.), Nos. 1–6, pp. 137–143, 2000.
- TNO. (2004). *Advanced Window Information System, WIS –window simulation program*, TNO Building and Construction Research, Delft (NL). 2004

Bilag 2: Powerpoint præsentation af paper: Improved Windows for cold climates,

♦ Nordic Symposium on Building Physics, Reykjavik 13-15 June 2005

♦ April 12th – 14th 2005 · Symposium in Sisimiut

Improved Windows for Cold Climates

Jacob Birck Laustsen
and
Svend Svendsen

Technical University of Denmark

Technical University of Denmark



Aim of project

Investigate the possibilities for developing
windows with improved energy performance
for cold climates.

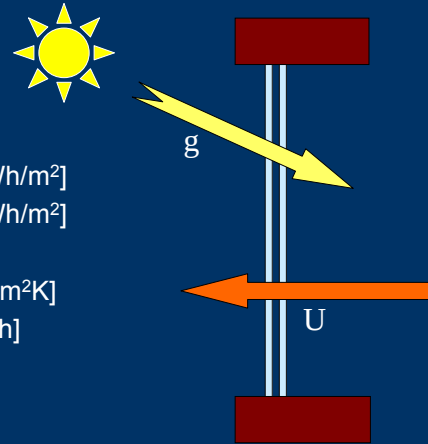
Technical University of Denmark



Net Energy Gain

$$E = I \cdot g - U \cdot G$$

E	Net energy gain	[kWh/m ²]
I	Solar radiation	[kWh/m ²]
g	Total solar energy transmittance	
U	Thermal transmittance	[W/m ² K]
G	Degree hours	[kKh]



Focus on residential buildings

Based on reference house with certain distribution of the windows

Shadow factor of 0.7

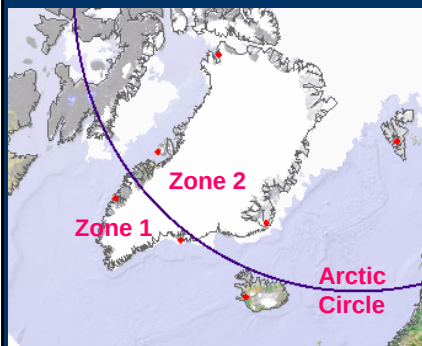
Technical University of Denmark



Climate of Greenland

Divided into two zones:

- Zone 1 South of the Arctic Circle
- Zone 2 North of the Arctic Circle



$$E_{GI_1} = 490 g - 186 U \text{ [kWh/m}^2\text{]}$$

$$E_{GI_2} = 532 g - 223 U \text{ [kWh/m}^2\text{]}$$

Technical University of Denmark



Danish Climate

Heating season:
24 September to 13 May

Shadow factor of 0.7

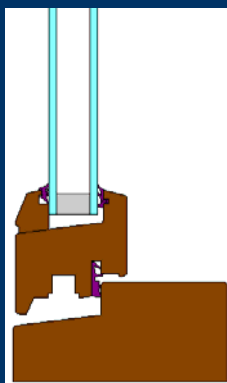
Net Energy gain:
 $E_{Dk} = 196 g - 90 U \text{ [kWh/m}^2\text{]}$

Technical University of Denmark



Window types

The energy performance was evaluated for 7 different windows



Type 1 and 2

Typical frame profile of Wood. Width 10 cm
Standard low energy glazing

Type 1:

$$U_f = 1.30$$

$$U_w = 1.61$$

$$U_g = 1.28$$

$$g_w = 0.46$$

$$\Psi = 0.128$$

Type 2:

$$U_f = 1.37$$

$$U_w = 1.34$$

$$U_g = 1.17$$

$$g_w = 0.46$$

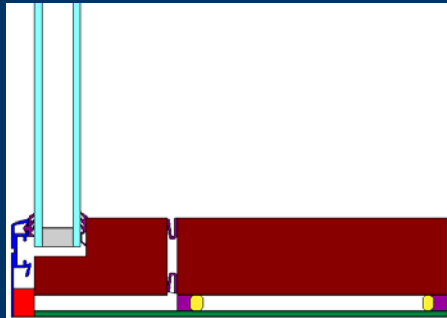
$$\Psi = 0.047$$

Technical University of Denmark



Improved Window Type 3

- Energy glazing with low iron glass
- Warm edge
- Slim frame of wood



- Low heat loss
- High solar gain

$$U_f = 1.33$$

$$U_w = 1.27$$

$$U_g = 1.15$$

$$g_w = 0.58$$

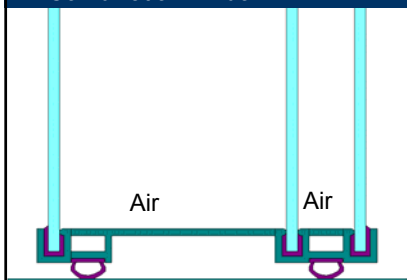
$$\Psi = 0.034$$

Technical University of Denmark



Window With Positive Net Energy Gain Type 4

Combination window



- Extra slim frame profile of 2.5 cm.
- Fibre glass reinforced polyester.
- Three layers of glass.
- Two hard low-e coatings
- Air gaps micro ventilated
- Air pressure neutralized through tubes with filters to outside

Non-sealed air gaps in glazing → longer service life

Large air gaps → integration of solar shading in glazing

$$U_f = 1.49$$

$$U_w = 0.97$$

$$U_g = 0.93$$

$$g_w = 0.54$$

$$\Psi = -$$

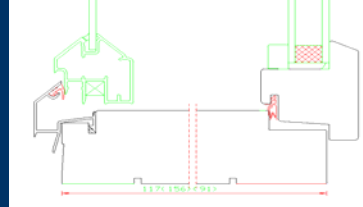
Technical University of Denmark



Window types

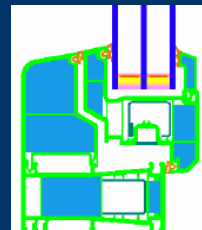
Type 6. Typical Finnish window. 1 + 2
Wood + aluminium. Frame width 11 cm

$$\begin{array}{lll} U_f = 1.32 & U_g = 1.01 & \Psi = 0.040 \\ U_w = 1.20 & g_w = 0.43 & \end{array}$$



Type 7. Typical "Passivhaus" window
PVC + PU-foam. Frame width 13 cm

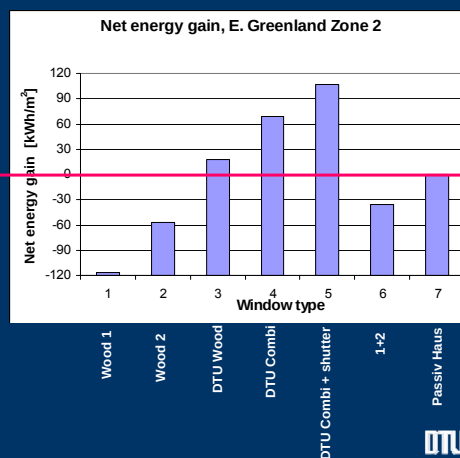
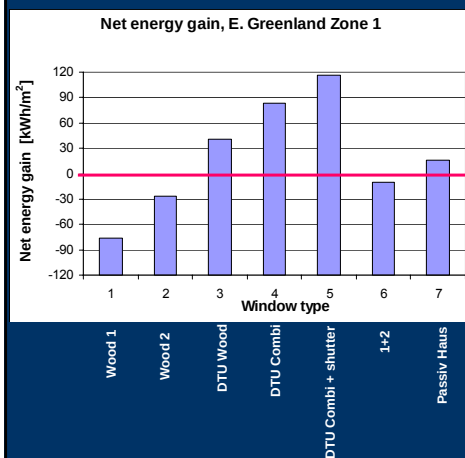
$$\begin{array}{lll} U_f = 0.75 & U_g = 0.7 & \Psi = 0.03 \\ U_w = 0.79 & g_w = 0.33 & \end{array}$$



Technical University of Denmark



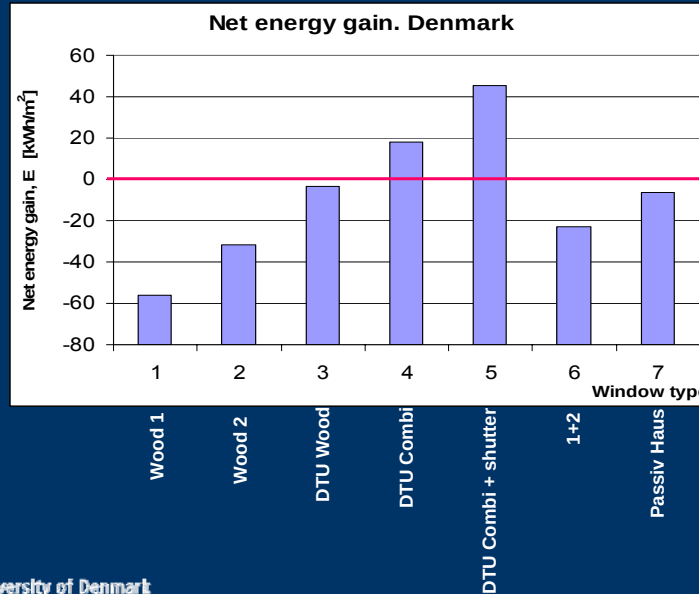
Net energy gain. Greenland



Technical University of Denmark



Net energy gain in Denmark



Simulations in BSim 2002

Energy consumption for heating and ventilation were determined for the windows used in typical houses in Greenland and Denmark



House A: (Arctic climate, Greenland)
Ilorput



House B: (Danish climate)
Snekkersten

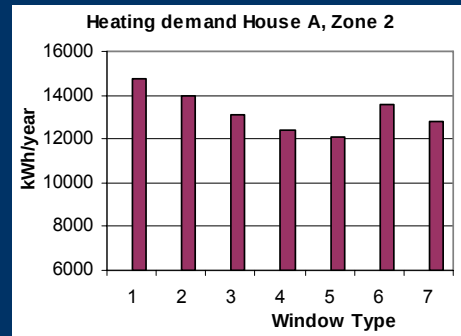
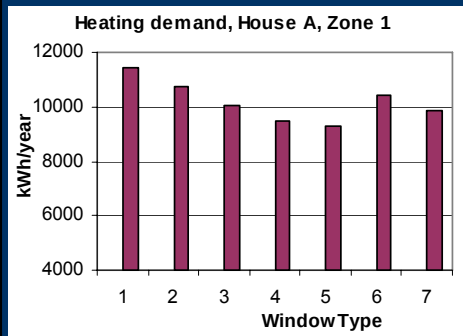
Technical University of Denmark



Energy consumption Greenland

Heating demand of building with the 7 window types.

Building simulations performed in BSim 2002



Technical University of Denmark



Energy consumption Greenland

Heating demand of building with the 7 window types.

Building simulations performed in BSim 2002

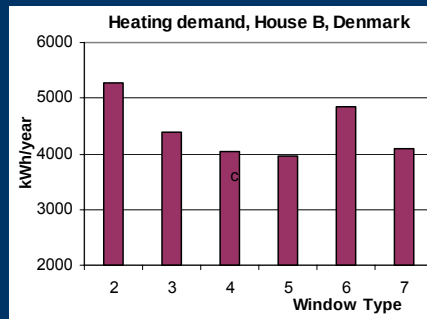
Window			Zone 1			Zone 2		
Type	U_{tot} W/m ² K	g_{tot}	Heating kWh/year	Solar gain kWh/year	Venting kWh/year	Heating kWh/year	Solar gain kWh/year	Venting kWh/year
1	1.61	0.46	11427	3016	-247	14751	3324	-200
2	1.34	0.46	10744	3016	-275	13930	3324	-230
3	1.23	0.58	10024	3830	-558	13254	4107	-460
4	0.97	0.54	9488	3578	-498	12434	3956	-462
5	0.97– 0.49	0.54– 0.0	9294	3536	-498	12090	3896	-459
6	1.20	0.43	10455	2872	-252	13580	3166	-210
7	0.79	0.33	9830	2204	-136	12811	2426	-113

Technical University of Denmark



Energy consumption Denmark

Building simulations performed in BSim 2002



	U_{tot}	g_{tot}	Heating	Solar gain	Venting
Type	W/m^2K		kWh/year	kWh/ year	kWh/ year
2	1.34	0.46	5274	1891	-136
3	1.23	0.58	4401	2705	-423
4	0.97	0.54	4032	2373	-344
5	0.97 – 0.49	0.54 – 0.0	3949	2349	-353
6	1.20	0.43	4836	1901	-162
7	0.79	0.33	4093	1582	-131

Technical Unit



Conclusion

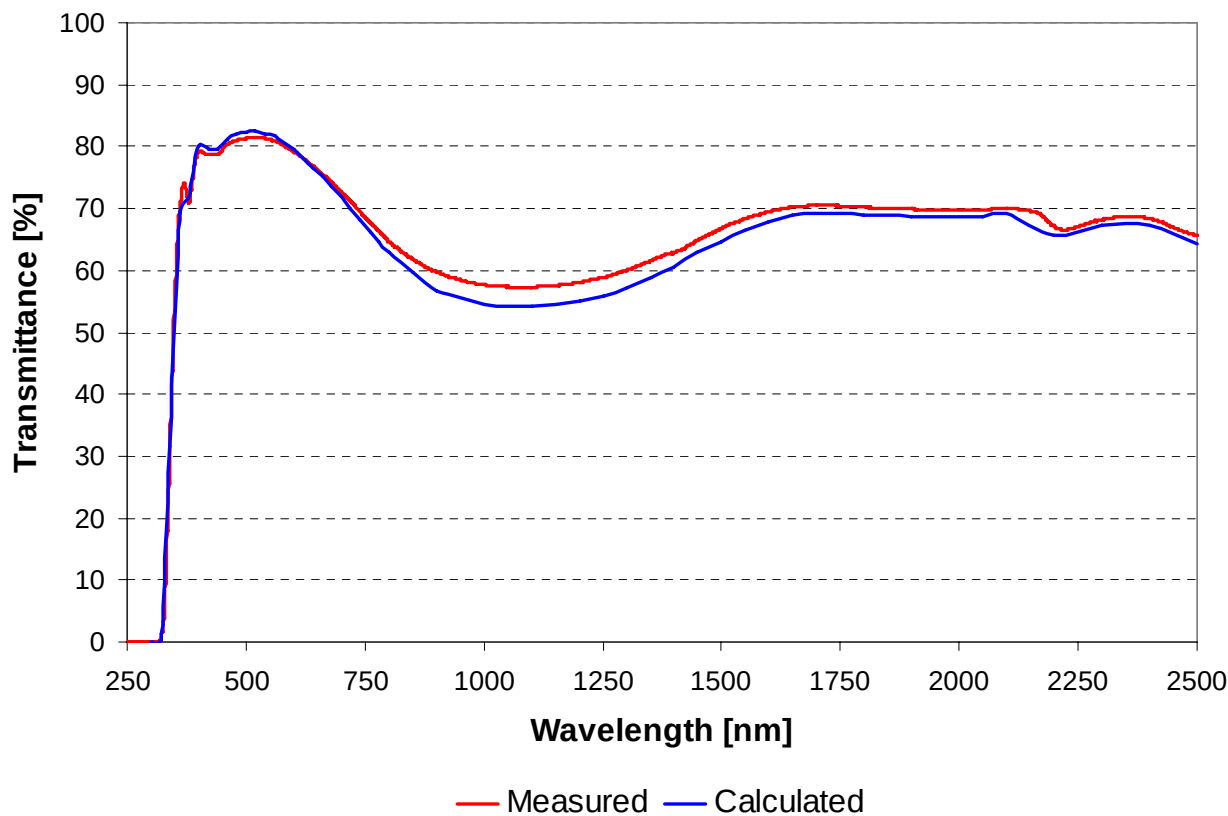
- It is possible to develop windows with positive net energy gain in cold climates
- Increased glazing area → higher net energy gain
- Further improvements possible based on new window types
- Integrate solar shading devices in the new windows

Technical University of Denmark



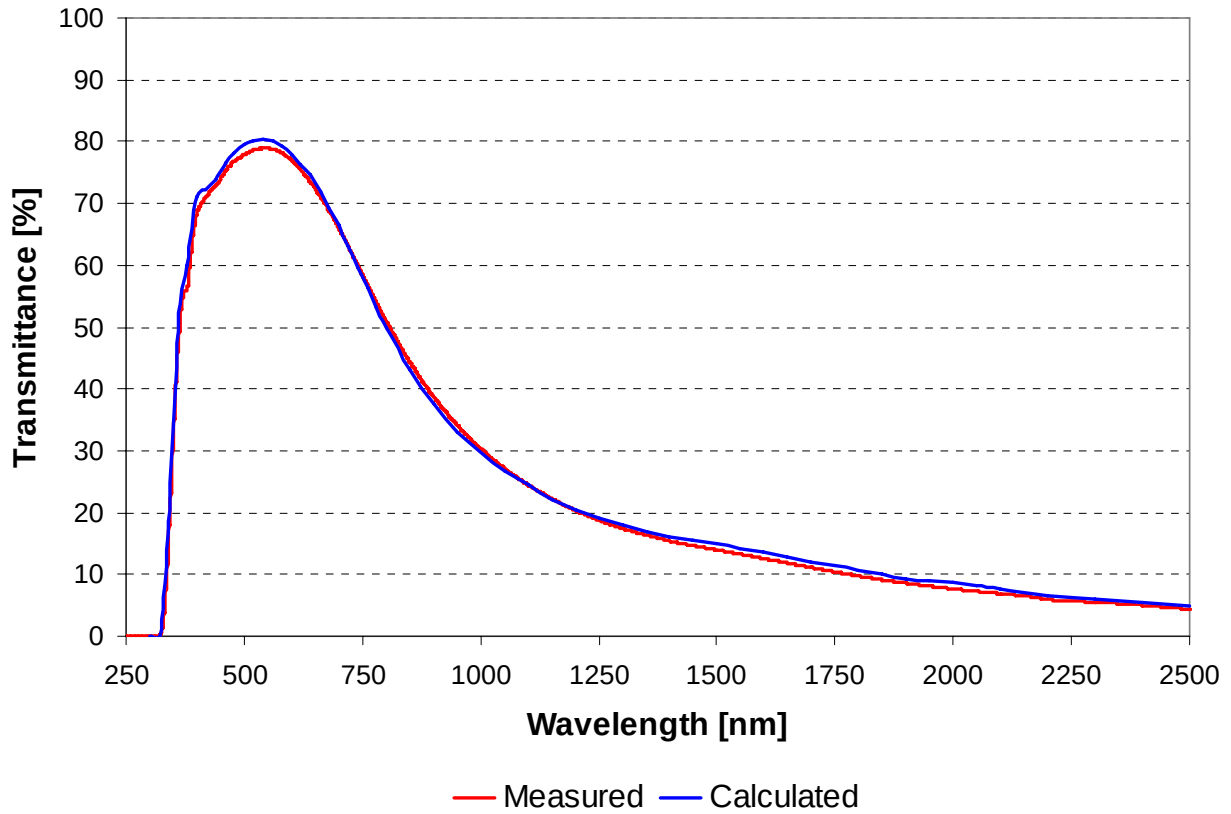
Bilag 3 Måledata fra spektrofotometer

Pilkington 4-15Ar-4



Optifloat Clear 4 mm Glazing cavity 15 mm Optifloat Clear 4 mm			
	Solar direct transmittance, τ_e [%]	Light transmittance, τ_v [%]	UV transmittance, τ_{UV} [%]
Measured at DTU (Varian Cary 5E spectrophotometer)	70	80	44
Database in WIS (www.WinDat.org)	69	81	44

Pilkington 4-15Ar-SN4



Optifloat Clear 4 mm Glazing cavity 15 mm Optitherm SN 4 mm			
	Solar direct transmittance, τ_e [%]	Light transmittance, τ_v [%]	UV transmittance, τ_{UV} [%]
Measured at DTU (Varian Cary 5E spectrophotometer)	53	78	29
Database in WIS (www.WinDat.org)	53	79	32

Bilag 4 Renovering af forsøgsopstilling - Hot Box

En ældre forsøgsopstilling på BYG·DTU er blevet renoveret og opdateret i forbindelse med projektet for at kunne foretage målinger på det nyudviklede vindue samt forskellige rudeløsninger bestående af flere lag glas med stor glasafstand.

Opstillingen, der i det følgende benævnes Hot box'en, kan måle vinduers varmetransmissionskoefficient også kaldet U-værdien. Hot box'en er som udgangspunkt designet til at måle på vinduer i standarddimensionen 1,48 x 1,23 m. Et billede af Hot box'en er vist på Figur 1.



Figur 1 Billede af Hot box'en i BYG·DTU's forsøgshal.

Hot boxen består af:

- En kold sektion
- En målesektion der omslutter målemnet (vinduet)
- En guard sektion der omslutter målekassen.

I den kolde sektion findes et kølesystem samt en vindsimulator

I målekassen findes ét elpanel

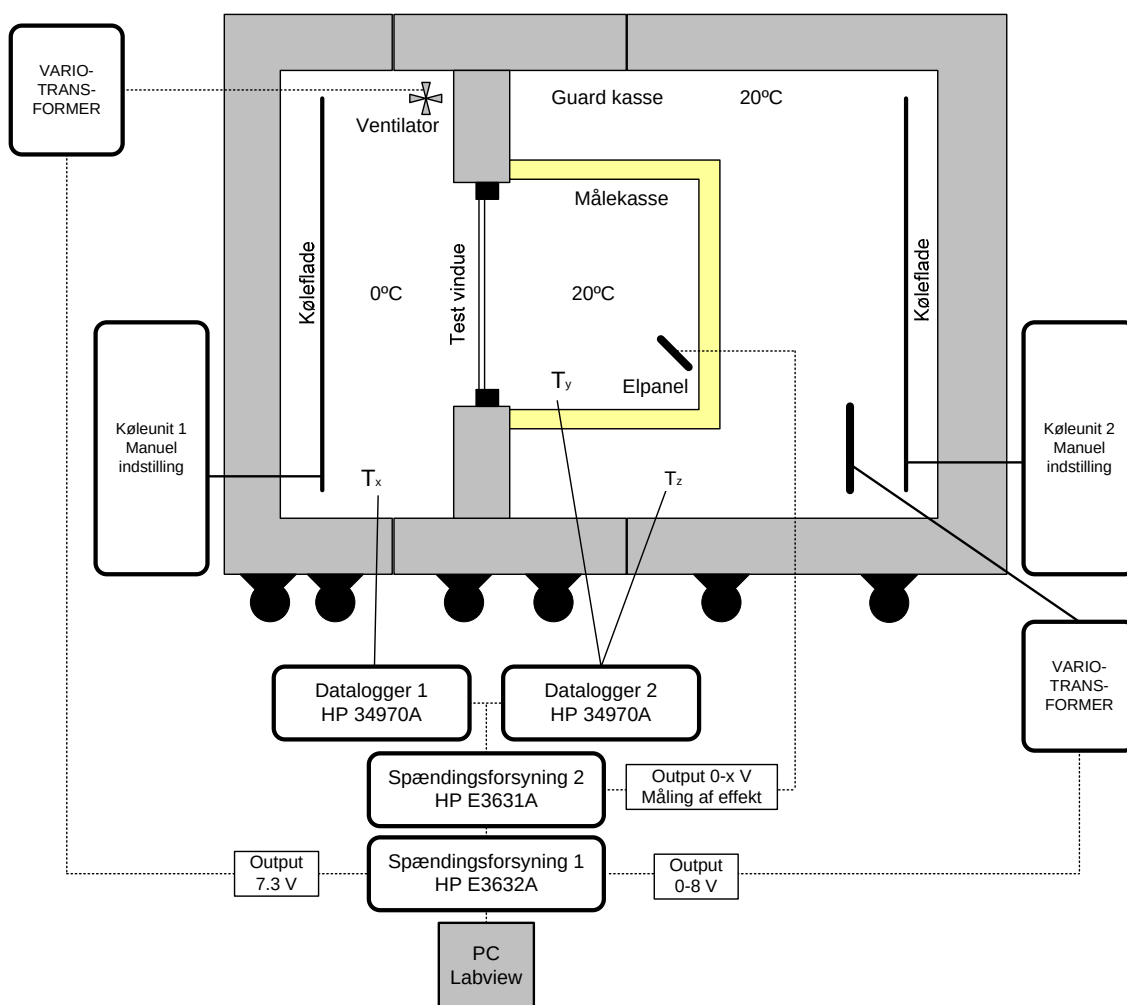
I guardsektion findes et kølesystem samt et elpanel

Figur 2 viser en skitse af opstillingen. Princippet i forsøgsopstillingen er at der haves en temperaturforskel over vinduet på 20°C og en temperaturforskel over målekassens sider tæt på 0°C, således at der ikke er nogen varmestrøm gennem målekassen. Den effekt der afsættes i målekassen

for at opretholde de ønskede 20°C vil derfor udelukkende transmitteres ud gennem vinduet og er dermed et mål for, hvor stort varmetabet er gennem vinduet.

To separate køleenheder er koblet til hhv. den kolde kasse og guard kassen. Det i dette projekt opbyggede måleprogram styrer to HP 34970A dataloggere til opsamling af temperaturmålinger, én HP E3632A spændingsforsyning til styring af lufthastigheden i den kolde kasse og til styring af et elpanel i guard kassen, samt én HP E3631A spændingsforsyning til styring af elpanelet i selve målekassen.

Principskitse af Hot box



Figur 2 Principskitse af Hot box'en med tilhørende måle- og styrestem.

For at benytte Hot box'en i dette projekt har det været nødvendigt at opdatere opstillingen med et nyt måleprogram samt datalogningsudstyr mm. Ligeledes har det været nødvendigt at udføre en omfattende kalibrering efter gældende standard ISO 12567-1 *Thermal performace of windows and doors – Determination of thermal transmittance by hotbox*.

Til kalibreringen blev lavet to kalibreringspaneler opbygget af ét lag EPS150 beklædt med 4 mm glas på begge sider. Kalibreringspanelernes samlede tykkelse var hhv. 28 mm og 58 mm. EPS materialets varmeledningsevne blev målt af producenten ved en "Lambda 10" måling, hvorved kalibreringspanelernes samlede isolans er kendt med stor nøjagtighed. Dette udnyttes bl.a. til at bestemme den samlede overgangsisolans som vinduesmålingen senere korrigeres for og derfor skal kendes nøjagtigt.

En tidligere undersøgelse på DTU har vist, at den traditionelle metode til måling af overfladetemperaturer ved fastgørelse af termoelementtråde med tape er behæftet med mindre fejl, idet omgivelsernes temperatur fejlagtigt indgår i målingen med en andel på ca. 10 %. Derfor blev der udviklet en ny måleteknik som bruges til måling af kalibreringspanelernes overfladetemperaturer. Den nye metode anvender fladklemte termoelementtråde som er limet fast på ruden og malet hvide, hvilket bevirker at andelen af målt omgivelsestemperatur reduceres til ca. 2 %.

Det blev valgt at benytte softwareprogrammet Labview til programmering af måleprogrammet. Måleprogrammet styrer de to HP 34970A dataloggere der opsamler ca. 120 temperaturmålinger samt de to spændingsforsyninger (HP E3631A og HP E3632A) der leverer en styrespænding til vindsimulator og til de to elpaneler i hhv. guard kassen og målekassen.

Styringsprincip

Princippet i forsøgsopstillingen er at temperaturdifferensen over målekassens sider styres efter at være 0 °C, hvorved der ikke haves nogen varmestrøm gennem disse flader. Den effekt der afsættes i målekaske er derved et mål for varmestrømmen gennem måleemnet.

Følgende styres af måleprogrammet:

Temperaturen i guard kassen styres med et setpunkt for elpanelet på 20,0 °C. Kølesystemet køler konstant med en temperatur på ca. 12 °C. Herefter varmes op med et elpanel til de 20,0 °C, idet elpanelet er lettere og hurtigere at regulere med. Styringen vil dermed også virke selvom temperaturen i forsøgshallen er højere end 20 °C.

Den effekt der afsættes af elpanelet i målekaske styres efter at temperaturdifferensen over målekaske skal være 0,0 °C. Derved ligger temperaturen i målekassen meget tæt på 20 °C også.

Temperaturen i den kolde kaske styres/sættes manuelt ved brug af den udvendige styrenhed på køleenheden. Det er ikke så afgørende hvad temperaturen sættes til blot skal denne være konstant over flere timer således at stationære temperaturer er opnået.

Vindsimulatoren i den kolde sektion styres af en styrespænding. Styrespændingen er en fast værdi som er fundet under kalibreringen (mellem 0-8 V).

Kalibreringen

Kalibreringen består af tre målinger med det tynde panel og tre målinger med det tykke panel. Den første måling foretages med det tynde kalibreringspanel ved en temperatur i den kolde kasse på 0 °C og 20 °C i målekassen. Målingen skal bl.a. benyttes til at bestemme styresignalet til vindsimulatoren i den kolde kasse, således at den samlede overgangsisolans bliver 0,17 m²K/W. Med det tynde panel foretages endnu to andre målinger ved andre temperaturniveauer hvorefter tilsvarende målinger foretages med det tykke kalibreringspanel.