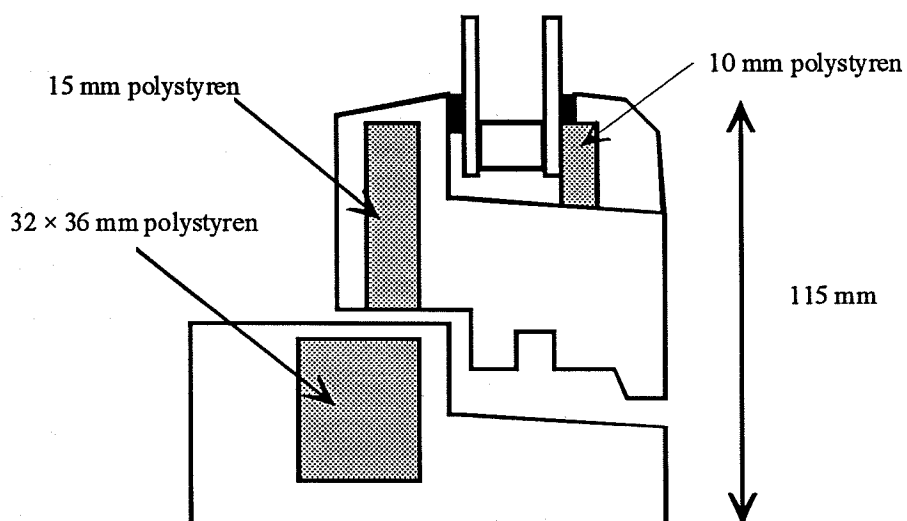


VINDUER MED 30% BEDRE ENERGIBALANCE

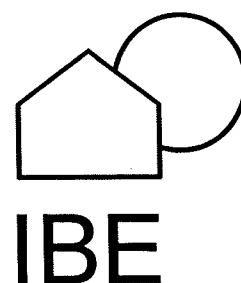
JØRGEN M. SCHULTZ



RAPPORT
R-026
1998

ISSN 1396-4011
ISBN 87-7877-027-0

INSTITUT FOR BYGNINGER OG ENERGI
DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET



FORORD

Nærværende rapport afslutter projektet "Vinduer med 30% bedre energibalance", der er finansieret af Energistyrelsen gennem EnergiForskningsProgrammet '96, j.nr. 1213/96-0015.

Rapporten beskriver de overvejelser der ligger til grund for definition af vinduets energibalance som én fast størrelse. Derudover beskrives teoretiske analyser af varmemønstrene i traditionelle vindueskonstruktioner samt i et nyt vindueskoncept med rammen integreret i ruden. En energimæssigt forbedret ramme/karmkonstruktion til traditionelle forseglede ruder er på basis af analyserne blevet fremstillet i en prototypeversion. Prototypens U-værdi er blevet målt i instituttets forsøgsfaciliteter.

De teoretiske analyser af det nye vindueskoncept omhandler ud over varmemønstrene en vurdering af holdbarhed og fugtforhold. Yderligere undersøgelser er påkrævet før en egentlig prototype kan testes.

Projektet er udført i samarbejde med Rationel Vinduer A/S og Scanglas A/S. Endvidere har projektet indgået i to afgangprojekter fra instituttet, hvorfor der rettes en tak til Charlotte Schiøler, Thomas Warrer og Jens Ole Hansen for deres deltagelse.

INDHOLDSFORTEGNELSE

Forord	i
Indholdsfortegnelse	ii
Resume	iii
Summary	iv
1. Indledning	1
2. Definition af energibalancen	3
3. Energimæssig forbedring af traditionelle rammer og karme	6
3.1 Analyse af varmemstrømme	6
3.2 Forbedring af ramme/karmarelets U-værdi	11
3.2.1 Teoretiske analyser	11
3.2.2 Målte U-værdier og betydning af ventilation af spalte mellem ramme og karm ...	16
3.3 Forbedring af vinduets energibalance gennem reduktion af ramme/karmarealet ..	17
3.4 Opsummering af væsentlige forhold for vinduers termiske ydeevne	21
3.4.1 Betydningen af vinduets totale U-værdi og g-værdi for energibalancen	25
4. Nyt vindueskoncept	26
5. Konklusion	33
6. Litteratur	35

RESUMÉ

Projektets formål har været i samarbejde med Rationel Vinduer A/S og Scanglas A/S at undersøge muligheden for udvikling af termisk set bedre vinduesløsninger baseret på en vurdering af vinduets totale energibalance, d.v.s. vinduets samlede betydning for en bygnings opvarmningsbehov. I vinduets energibalance indgår således både vinduets varmetab og vinduets evne til at transmittere solenergi.

Projektets målsætning var at forbedre energibalancen med 30%, hvilket kræver en referencestørrelse. I nærværende projekt er der som referencevindue valgt en traditionel energirude monteret i en ramme/karmkonstruktion af træ med de ydre mål $1188 \times 1188 \text{ mm}^2$. Det transparente areal udgør ca. 68% af det totale vinduesareal og den samlede U-værdi er beregnet til $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Energibalancen afhænger stærkt af vinduets orientering mod verdenshjørnerne og af det bagvedliggende rums termiske masse. Der er derfor i dette projekt opstillet en metode til beregning af et vindues energibalance, baseret på en vægtning af vinduets betydning i forskellige bygningstyper og bygningsorienteringer. Referencevinduets energibalance er med denne metode fundet til ca. $-50 \text{ kWh}/\text{m}^2$ vinduesareal, d.v.s. at vinduestypen resulterer i et årligt nettovarmetab på $50 \text{ kWh}/\text{m}^2$, hvorved en 30% forbedring af energibalancen svarer til en reduktion af nettovarmetabet med ca. $17 \text{ kWh}/\text{m}^2$ vindue.

Der er valgt at fokusere på vinduets ramme/karmareal og samlingen mellem rude og ramme/karm, der med fremkomsten af nye højisolerende rudetyper har en U-værdi der er væsentlig højere end rudens center U-værdi. En lang række teoretiske analyser ligger til grund for en prototype, der ved beregninger og afprøvning i instituttets "guarded hotbox" viser sig at opfylde projektets målsætning. I prototypen er dele af ramme- og karmkonstruktionen erstattet af polystyrenisolering. Den samlede U-værdi for vinduet reduceres fra referencevinduets U-værdi på ca. $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ til ca. $1,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Andre løsningsforslag baseret på en kombineret reduktion af ramme/karmarealet og en nedsættelse af ramme/karmarealets U-værdi er skitseret.

På baggrund af de udførte analyser, er der skitseret en alternativ vinduesudformning med stor glasafstand og rammen integreret i ruden, hvorved den traditionelle kuldebro i rudens afstandsprofil elimineres. Vinduesudformningen tillader trykudligning med omgivelserne, hvilket giver vinduet en meget lang holdbarhed. Beregninger viser, at ruden vil resultere i en energibalance der er bedre end traditionelle vinduer med superisolerende ruder. Den nye vinduesudformning kræver gennemførelse af yderligere undersøgelser med hensyn til risiko for kondens mellem rudens glaslag, udformning af trykudligningen samt udvikling af beslag til fastgørelse og betjening.

SUMMARY

The aim of the project has been to investigate and to develop thermally improved windows based on an evaluation of the energy balance of the window, i.e. the total influence of the window on the energy consumption for space heating. The energy balance is the net heat flow per window area which means that both energy losses and transmittance of solar radiation is considered.

The final goal of the project was to improve the energy balance of a window with at least 30%. As reference is chosen a common low energy glazing mounted in a wooden frame construction measuring $1188 \times 1188 \text{ mm}^2$. The transparent area forms about 68% of the total window area and the total U-value of the window is about $1.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

The energy balance depends strongly of the window orientation and the thermal mass of the room behind. In order to characterize the energy balance of a window with a single value a method has been developed, which combines the results from several different building types and building orientations. The energy balance of the reference window has been calculated to $-50 \text{ kWh}/\text{m}^2$ window area, i.e. the reference window accounts for a net energy consumption for space heating of $50 \text{ kWh}/\text{m}^2$ window area. A 30% improvement of the energy balance then corresponds to an reduction in net energy loss of $17 \text{ kWh}/\text{m}^2$ window area.

The frame construction and the joint between glazing and frame is the thermally weak part of modern windows compared to centre values of the new super insulating glazings. As a result the main emphasis has been put on improvement of the frame construction and the interaction between frame and glazing. Several theoretical analyses have been carried out and a prototype construction has been made, that meets the goal of a 30% improvement of the energy balance. The prototype has been tested in the guarded hotbox facility at the institute and a total U-value of about $1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ have been measured, which is a reduction compared with the reference window of $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. The improvements have primarily been obtained by replacing parts of the frame construction with polystyrene foam insulation. Other frame solutions have been described based on a combined effect of reducing the frame area and improve the insulating properties of the frame construction.

A new window concept with increased glass distance and part of the frame integrated in the glazing has been described as a result of the analyses carried out in the project. The large glass distance helps to reduce the traditional thermal bridge effect of the spacer and the integrated frame leads to an increase in transmitted solar energy. Furthermore, a controlled air exchange in case of pressure differences between the enclosures in the glazing and the surroundings is included in the concept which strongly improves the life time of the windows. The thermal performance will be better than traditional windows with super insulating glazings.

1. INDLEDNING

Vinduet er den bygningsdel, hvor en videre udvikling kan få den største effekt på bygningers energiforbrug, idet vinduet stadig sammenlignet med den øvrige klimaskærm har en varmetabskoefficient der er 4 - 10 gange højere. Dette forhold har gennem de seneste år ført til fremkomsten af nye rudetyper med U-værdier, der er kommet under $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ målt midt på ruden. Denne store reduktion i U-værdien i forhold til traditionelle termoruder ($U = 3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$) er opnået gennem udskiftning af den atmosfæriske luft mellem glassene med bedre isolerende gasarter som argon, krypton eller xenon, men ikke mindst gennem anvendelse af en eller flere lavemissionsbelægninger og flere lag glas.

Både lavemissionsbelægningerne og flere glaslag bevirker imidlertid, at en mindre del af den solenergi, der rammer ruden, bliver transmitteret, hvorved en del af den opnåede besparelse på varmetabssiden mistes på grund af mindre transmitteret solenergi. Det er derfor vigtigt, at såvel varmetabskoefficient som total solenergitransmittans inddrages i udviklingen af energimæssigt bedre vinduer, hvorfor dette projekt tager udgangspunkt i vinduets energibalance som den parameter, der skal forbedres.

Ramme- og karmkonstruktionen er også af afgørende betydning for vinduets energibalance, idet ramme og karm med fremkomsten af de nye højisolerede ruder er blevet vinduets energimæssigt svage led. U-værdien for en traditionel ramme/karm af træ ligger på ca. $1,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. I modsætning til ruden tillader ramme/karmkonstruktionen ikke sollyset at passere, hvilket skal sammenholdes med at ramme/karmarealet for en typisk vindueskonstruktion ofte udgør 30 - 40% af vindueshullet. En energimæssig optimering af vinduet indebærer derfor en forbedring af ramme/karmarealets U-værdi og/eller en formindskelse af ramme/karmarealet.

I forbindelse med en forbedring af vinduets energibalance spiller afstandsprofilet i ruden en væsentlig rolle. Afstandsprofiler i forseglede ruder er typisk lavet af aluminium eller stål og udgør derfor en væsentlig kuldebro i vindueskonstruktionen. Afstandsprofilet udgør en grå zone mellem ruden og ramme/karmkonstruktionen angående energimæssig forbedring: Skal der fra vinduesproducenternes side sættes ind på at ramme/karmkonstruktion skal medvirke til at begrænse kuldebrovirkningen, eller skal rudeproducenterne udvikle/anvende nye typer afstandsprofiler med bedre isolerende egenskaber, hvorved ramme/karmkonstruktionen ikke skal tage højde for dette?

I forbindelse med tillægget til DS418 /1/ omkring beregning af vinduers U-værdi tillægges der et linjetab for samlingen mellem vinduesramme/karm og rude. Linjetabet er et tillæg til U-værdien opgjort pr. løbende meter rudekant og tillæggets størrelse afhænger af rudetype og ramme/karmtype.

I nærværende projekt behandles to forskellige veje til forbedring af vinduets energibalance: 1) forbedring af den traditionelle vindueskonstruktion i form af et typisk trævindue med en tolags energirude med afstandsprofil af galvaniseret stål og 2) et nyt vindueskoncept, hvor rammen er integreret i ruden, hvorved det traditionelle afstandsprofil kan udelades.

Med hensyn til forbedring af det traditionelle vindue koncentrerer projektet sig om forbedring af vinduets ramme/karmdel, hvor der er valgt at betragte ruden som en fast størrelse, det vil sige, at der ikke regnes med at afstandsprofilet i ruden blive udskiftet med et bedre isolerende profil. De løsningsforslag, der således fremkommer, forsøger derfor at reducere betydningen af afstandsprofilet. Andre løsninger vil måske være bedre, hvis der ikke skulle tages hensyn til afstandsprofilet, men resultaterne i denne rapport er hermed løsninger, der straks kan tages i anvendelse.

Det nye vindueskoncept bryder med den udvikling, der er foregået hidtil på vinduesområdet: 1) glasafstanden øges betydeligt for at give plads til en integration af rammen i rudekonstruktionen, og 2) ruden tillader trykudligning med omgivelserne, hvilket øger rudens levetid, da den ikke kan "punktere", men samtidig forhindres anvendelse af specielle gasarter mellem glassene. Resultatet er en rude med en smal ramme/karmkonstruktion med lille varmetab, der tillader et stort lys- og solindfald og som samtidig har en meget lang levetid.

2. DEFINITION AF ENERGIBALANCEN

Energibalancen for et vindue kan principielt beregnes på to måder, der hver har fordele og ulemper. Forskellen på de to metoder ligger i, om der tages hensyn til udnyttelsesgraden af den transmitterede solenergi eller der kun ses på forskellen mellem varmetabet gennem vinduet og den transmitterede solenergi. Sidstnævnte metode gør resultatet uafhængigt af bygningstypen, hvorved den fundne energibalance optræder som en fast størrelse, der imidlertid er for optimistisk med hensyn til vinduets betydning for energiforbruget. Ved at inddrage den bagvedliggende bygnings termiske forhold opnås en langt mere realistisk værdi for energibalancen, men til gengæld vil værdien være forskellig fra bygning til bygning og kan derfor ikke umiddelbart anvendes som en sammenlignelig størrelse.

I nærværende projekt er der valgt at tage hensyn til bygningens termiske forhold ved beregning af vinduets energibalance. For at udjævne bygningens indflydelse på den beregnede energibalance er der foretaget simuleringer med programmet tsbi3 /2/ for et termisk let og et termisk tungt enfamiliehus og tilsvarende en termisk let og en termisk tung midterlejlighed i en fleretages boligblok. Det termisk lette enfamiliehus er opført med indvendige lette gipsvægge, trægulv på strøer og ydervægge opført som træskeletvægge, mens det tunge enfamiliehus har murede inder- og ydervægge. Den termisk lette lejlighed har indvendige lette gipsvægge, trægulv på strøer og den indvendig del af ydervæggene er af letbeton, mens den termisk tunge lejlighed har murede ydervægge samt gulv og indvendige vægge af beton.

Ud over varmeakkumuleringssevnen i boligen afhænger vinduets energibalance også af fordelingen af vinduerne i forhold til verdenshjørnerne. Simuleringerne er derfor udført for de valgte boligtyper, dels med en optimal placering med hovedparten af glasarealet vendende mod syd og dels med en placering, hvor bygningen er drejet 90°.

For hver boligtype bestemmes det samlede vinduesareals betydning for energiforbruget til opvarmning sammenlignet med en tilsvarende bolig uden vinduer. Energibalancen beregnes som det årlige opvarmningsbehov beregnet for den aktuelle bolig minus det årlige opvarmningsbehov for boligen, hvis alle vinduer har en U-værdi på 0 og en total solenergitransmittans på 0. Denne forskel udtrykker netto energibalancen for den samlede vinduesareal. Den fundne energibalance for vinduerne i hver boligtype divideres med de respektive vinduesarealer, og de fundne energibalancer vægtes sammen, idet der regnes med, at 50% af boligerne ligger energimæssigt optimalt, det vil sige med store glasarealer mod syd.

Boligtyperne er ikke valgt på baggrund af en statistisk undersøgelse, men er valgt ud fra beregningseksemplerne i hhv. DS 418 /3/ og SBI-anvisning 184 /4/. Valget er begrundet i, at bygningerne er vel beskrevet og i forvejen danner en form for "reference".

Ved anvendelse af den ovenstående metode er energibalancen beregnet til -50 kWh/m² pr år for et traditionelt trævindue (Rational Vinduer A/S, Type Domus A21.00) monteret med en energirude med en center U-værdi på ca. 1,3 W/(m² K) og en total solenergitransmittans på 0,64. Beregningsmetode og vægtning er vist i nedenstående tabel 2.1.

Tabel 2.1 Beregnet energibalance for en energirude med en center U-værdi på 1,3 W/(m² K) og en total solenergitransmittans på 0,64 monteret i en ramme/karmkonstruktion af træ.

Bygningstype	Vinduesfordeling				Opvarmning		Energi balance	
	Nord	Øst	Syd	Vest	Uden vinduer	Reel bolig	totalt	pr. m ² vindue
	m ²	m ²	m ²	m ²	kWh	kWh	kWh	kWh/m ²
Enfamiliehus termisk tungt	4,8	1,7	11	0	4870	5360	-430	-25
	0	4,8	1,7	11	4860	5670	-730	-42
Enfamiliehus termisk let	4,8	1,7	11	0	4730	5660	-930	-54
	0	4,8	1,7	11	4730	5850	-1120	-65
Lejlighed termisk tungt	5,8	0	14	0	3250	3780	-530	-27
	0	5,8	0	14	3250	4520	-1270	-65
Lejlighed termisk let	5,8	0	14	0	1560	2670	-1110	-57
	0	5,8	0	14	1570	2920	-1350	-69
Vægtet energibalance = $0,5 \times (-25 - 54 - 27 - 57)/4 + 0,5 \times (-42 - 65 - 65 - 69)/4$								-50

Som det fremgår af ovenstående tabel ligger energibalancen ud fra de valgte forudsætninger på ca. -50 kWh/m² vindue pr. år, hvorfor projektets målsætning om 30% forbedring svarer til en absolut forbedring på ca. 17 kWh/m² vindue pr. år. Forbedringen af energibalancen kan opnås gennem en mindskelse af U-værdien, gennem større solindfald eller en kombination af begge dele.

Der er relativ stor forskel på energibalancen afhængig af den termiske masse i boligen, især med det primære vinduesareal vendende mod syd, hvor netto varmetabet pr m² vindue bliver fordoblet fra ca. 25 kWh/m² til ca. 50 kWh/m².

Hvis forbedringen af energibalancen udelukkende skal ske ved ændring af U-værdien, kræves det at den totale U-værdi for vinduet ændres fra ca. 1,5 W/(m² K) til 1,3 W/(m² K) uden, at solindfaldet berøres, hvilket kun kan ske ved en forbedring af ramme/karmarealets U-værdi, ved

reduktion af kuldebroen i vinduets afstandsprofil, eller ved udskiftning af argon med en bedre isolerende gasart som f.eks. krypton. En sænkning af den totale U-værdi med $0,2 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ kræver f.eks. at ramme/karmkonstruktionens U-værdi ændres fra ca. $1,6 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ til ca. $1,0 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

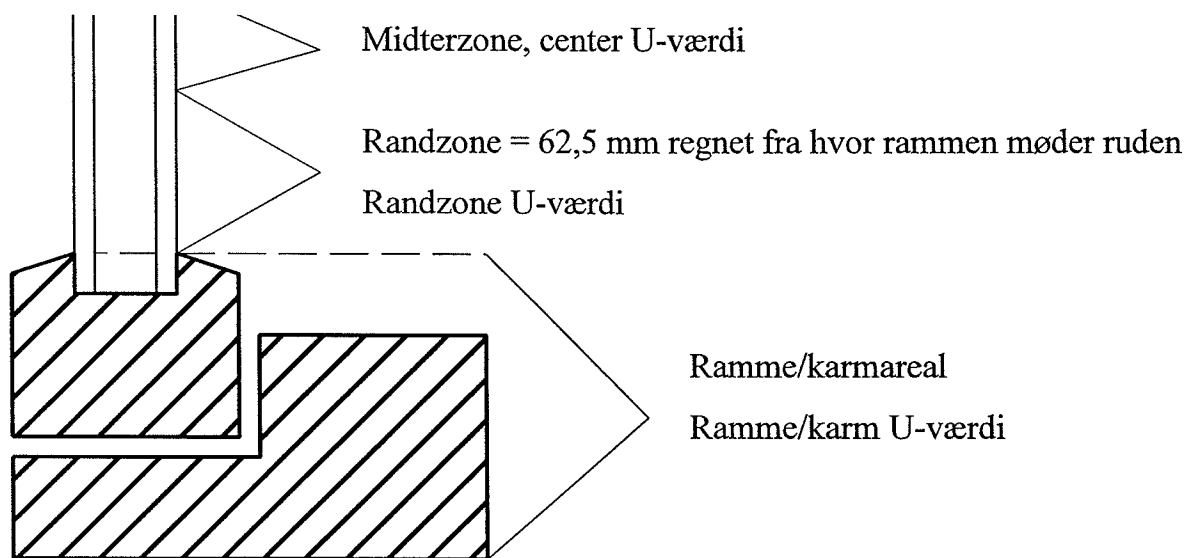
Skal energibalancen derimod forbedres gennem en forøgelse af solindfaldet skal ramme/karm-arealets andel af det samlede vinduesareal formindskes fra ca. 30% til ca. 0 %, uden at vinduets totale U-værdi ændres.

3. ENERGIMÆSSIG FORBEDRING AF TRADITIONELLE RAMMER OG KARME

En forbedring af vinduets energibalance med 30% i forhold til referencevinduet vil umiddelbart kunne opnås ved at anvende en anden rudetype, f.eks. ved erstatning af argon med krypton og anvendelse af en lidt bedre lavemissionsbelægning. Imidlertid vil anvendelse af en bedre isolerende rude medføre, at ramme-/karmkonstruktionen vil blive relativt endnu dårligere. Derfor er der i dette projekt valgt at fokusere på en forbedring af ramme/karmkonstruktionen så den termisk set lever op til de nye rudetyper.

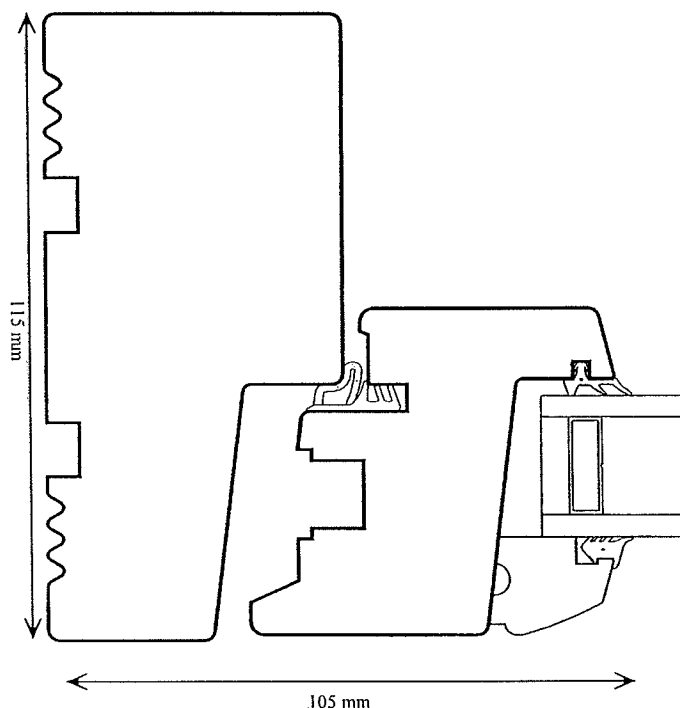
3.1 Analyse af varmestrømme

Med udgangspunkt i referencevinduet er der foretaget en simulering af varmestrømmenes forløb i ramme-/karmkonstruktionen og den yderste del af ruden, således at afstandsprofilets virkning bliver synliggjort. Varmestrømsanalysen er udført med programmet Therm 1.02 /5/, der er et program til beregning af to-dimensionale temperaturfelter under stationære forhold. Programmet gør det muligt at opbygge en præcis geometrisk model af vinduesprofilet. Selve rudens termiske funktion med hensyn til center U-værdi og solenergitransmittans beregnes med programmet WINDOW 4.0 /6/. Vinduets samlede U-værdi beregnes ved areal vægting af midterzonens U-værdi og U-værdierne beregnet med Therm for rudens randzone og for ramme/karmkonstruktionen (se figur 3.1).



Figur 3.1 Definition af midterzone, randzone og ramme/karmdel ved beregning af U-værdien for vinduer.

Referencevinduet måler $1188 \times 1188 \text{ mm}^2$ og den samlede højde af ramme/karmkonstruktionen er 105 mm regnet fra yderside af karm til overside af glaslisten (figur 3.2). Den synlige del af ruden har således målene $978 \times 978 \text{ mm}^2$, hvilket svarer til en glasprocent på ca. 68%. Ramme/karmkonstruktionen er en standard trækonstruktion fra Rationel vinduer. Ruden er en tolags energirude fra Scanglas A/S med en glasafstand på 18 mm og én lavemissionsbelægning med en emittans på 0,09. Hulrummet er argonfyldt, hvilket resulterer i en center U-værdi på ca. $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ og en total solenergitransmittans (g-værdi) på 0,64 for ruden.



Figur 3.2 Vandret snit i sidekarm af referencevindue.

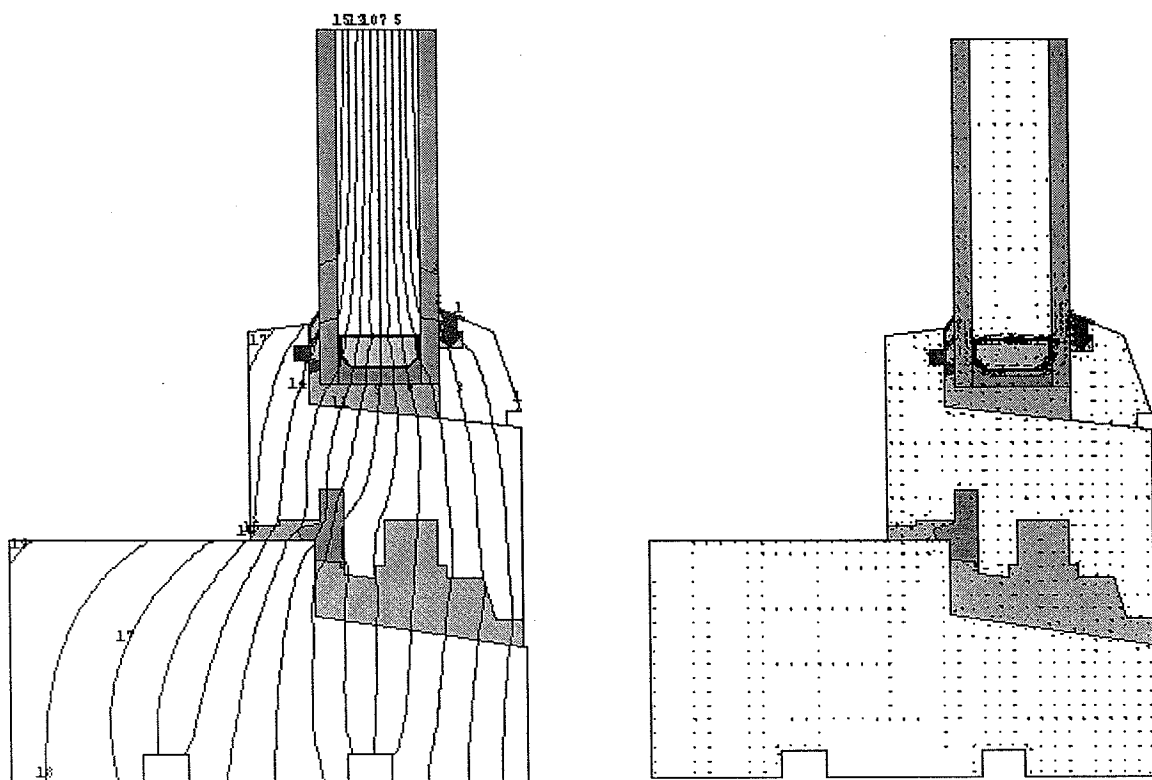
Afstandsprofilet i ruden er af 0,4 mm galvaniseret stål med en slutforseglingen af ca. 3 mm polysulfid. Vindueskonstruktionen er simuleret med programmet Therm og de beregnede U-værdier er vist i tabel 3.1, der også indeholder den totale U-værdi beregnet ud fra en areal vægtning af U-værdien for de enkelte delkonstruktioner samt U-værdien beregnet ved anvendelse af tillægget til DS 418 /1/ omhandlende vinduer og døre.

Tabel 3.1 U-værdier beregnet med Therm samt total U-værdi for referencevinduet beregnet ud fra simuleringerne og total U-værdi beregnet ved anvendelse af tillæg til DS 418 omhandlende vinduer og døre.

Center U-værdi (WINDOW 4.0)	Ramme/karm U-værdi (Therm)	Rand-zone U-værdi (Therm)	Total U-værdi (areal vægtet)	Total U-værdi (DS 418 tillæg)
W/(m ² K)	W/(m ² K)	W/(m ² K)	W/(m ² K)	W/(m ² K)
1,27	1,58	1,57	1,42	1,54

Som det fremgår af ovenstående tabel er midterdelen af ruden termisk set væsentlig bedre end resten af vinduets komponenter, hvor især indflydelsen fra kuldebroen i afstandsprofilet tydeligt kan ses. Tabellen viser også at de nye normkrav for beregning af U-værdier for vinduer og døre i dette tilfælde resulterer i en værdi der er ca. 8% højere end den beregnede.

Nedenstående figur 3.3 viser en optegning af isotermer og de tilhørende varmestrømsvektorer for referencevinduet, hvoraf det fremgår, at der er en meget kraftig varmestrøm gennem området omkring afstandsprofilet i ruden og til dels omkring luftspalten mellem ramme og karm. Simuleringerne er udført med "stillestående" luft i luftspalten, men der er ikke nogen generel viden om, hvor kraftigt ventileret luftspalten vil være i virkeligheden.



Figur 3.3 Beregnede isotermer og varmestrømsvektorer for referencevinduet ved en udetemperatur på 0 °C og en indetemperatur på 20 °C.

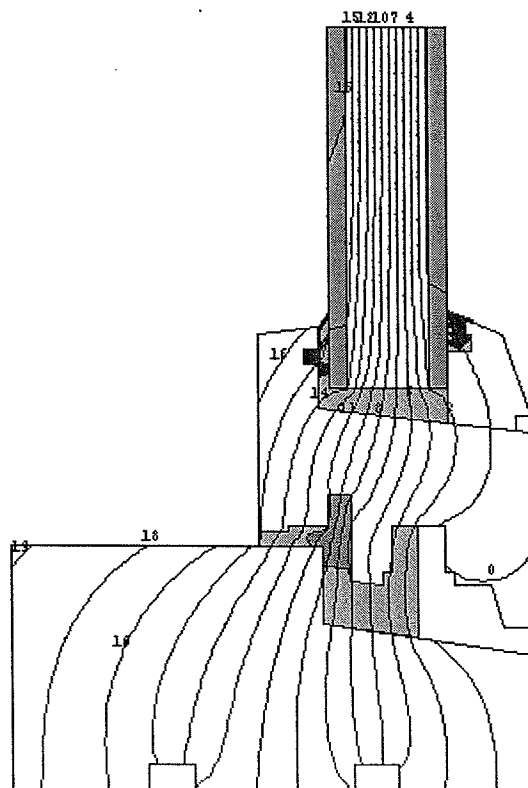
På baggrund af ovenstående resultat er der udført en beregning, hvor afstandsprofilet er “fjernet”, det vil sige at rudens isolerende gaslag regnes aktivt hele vejen til rudekanten, hvorved betydningen af afstandsprofilet kan vurderes gennem en sammenligning med den tidligere beregning. Ligeledes er der udført beregninger, hvor luftspalten mellem ramme og karm henholdsvis regnes ventileret med udeluft til halvdelen af dens dybde og i hele spaltens dybde. Resultatet af beregningerne er vist i nedenstående tabel 3.2.

Tabel 3.2 Beregnede U-værdier for forskellige fiktive variationer af referencevinduet. Rudens center U-værdi = 1,27 W/(m² K).

Parameter	Ramme/karm U-værdi (Therm)	Randzone U-værdi (Therm)	Total U-værdi (areal vægtet)
	W/(m ² K)	W/(m ² K)	W/(m ² K)
Med afstandsprofil, stille luft	1,59	1,57	1,42
Med afstandsprofil, halvt vent.	1,72	1,61	1,47
Med afstandsprofil, helt vent.	2,13	1,64	1,61
Uden afstandsprofil, stille luft	1,45	1,40	1,35
Uden afstandsprofil, halvt vent.	1,59	1,44	1,40
Uden afstandsprofil, helt vent.	2,01	1,47	1,54

Resultaterne i ovenstående tabel viser tydeligt, at vinduets totale U-værdi afhænger stærkt af ventilationsgraden af luftspalten mellem ramme og karm, hvorfor der ved udformning af en termisk god ramme/karmkonstruktion bør tages hensyn til dette. Resultaterne viser også at afstandsprofilet har betydning for både ramme/karmkonstruktionens U-værdi og randzonens U-værdi, der begge reduceres med ca. 10% i tilfældet uden afstandsprofil i forhold til referencevinduet. Selvom kantforseglingen (afstandsprofil+slutforsegling) tildeles samme varmeledningsevne som det argonfyldte hulrum, bliver U-værdien for randzonen alligevel højere end for rudens midte, hvilket skyldes at rammens isoleringsevne er mindre end rudens, hvorved varme ledes fra det inderste glaslag ned gennem rammekonstruktionen og op i det yderste glaslag (figur 3.4).

Indflydelsen på den totale U-værdi udgør ca. 5%. I absolutte størrelser ændres den totale U-værdi for vinduet med 0,07 W/(m² K), hvilket er ca. 1/3 af den krævede U-værdi reduktion for opnåelse af en 30% bedre energibalance.



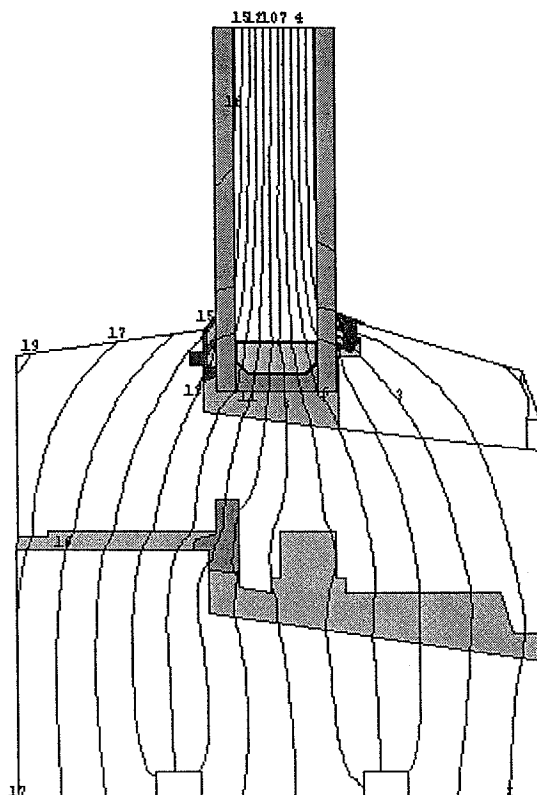
Figur 3.4 Isotermudskrift fra Therm 1.02 i vindue uden afstandsprofil. Spalten mellem ramme og karm er halvt ventileret.

Hvis udgangspunktet er, at afstandsprofilet ikke kan forbedres, bør en termisk bedre ramme/karmkonstruktion eliminere kuldebroen i afstandsprofilet samt generelt set være bedre isolerende, uden at det går væsentlig ud over størrelsen af det transparente areal.

3.2 Forbedring af ramme/karmarelets U-værdi

3.2.1 Teoretiske analyser

En forbedring af ramme/karmarelets U-værdi vil umiddelbart kunne opnås ved en forøgelse af dimensionerne på rammen, således at rammens tykkelse f.eks. svarer til karmprofilets tykkelse, hvorved isotermerne vil få et mere ret forløb gennem konstruktionen. Ruden bør af samme hensyn placeres midt i rammeprofilet. Figur 3.5 viser en udskrift fra Therm af isotermerne forløb gennem konstruktionen.



Figur 3.5 Isotermforløb gennem vindueskonstruktion, hvor rammen er gjort lige så tyk som karmen. Spalte mellem ramme og karm ikke ventileret.

U-værdien for ramme/karmkonstruktionen med tyk ramme er beregnet til $1,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, hvilket svarer til rudens center U-værdi, mens randzonens U-værdi er praktisk taget uforandret på $1,58 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. En nedsættelse af randzonens U-værdi er vanskelig på grund af den relativt høje varmeledningsevne i glas, der bevirker at varmen ledes frem til afstandsprofilet gennem dette og op gennem det udvendige glas til udeluften.

En løsning vil være, at lade rammekonstruktion gå længere op ad ruden for derved at gøre vejlængden for varmestrømmen i glasset større. Dette betyder imidlertid en reduktion af vinduets transparente areal, hvorved der mistes noget af det gratis energitilskud fra solindfaldet. Dette er belyst ved hjælp af en serie beregninger i Therm og tilhørende tsbi3-simulering med hhv. 10, 30 og 60 mm forhøjelse af rammeprofilet. Den resulterende U-værdi og energibalance er vist i nedenstående tabel 3.3.

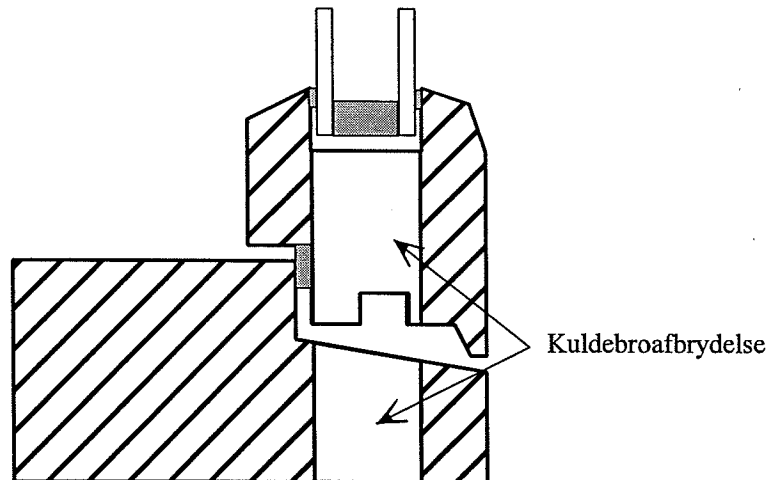
Tabel 3.3 Beregnet U-værdi for referencevinduet med tyk rammekonstruktion og 10, 30 og 60 mm forøgelse af rammehøjden. Beregningen af energibalancen er foretaget for den lette version af enfamiliehuset med største glasareal mod syd.

	$U_{\text{ramme/karm}}$	U_{randzone}	U_{total}	Energibalance
	W/(m ² K)	W/(m ² K)	W/(m ² K)	kWh/m ² pr år
Reference	1,58	1,57	1,42	-54
Reference + tyk ramme	1,28	1,58	1,33	-41
Reference + tyk ramme + 10 mm forøget rammehøjde	1,23	1,51	1,29	-40
Reference + tyk ramme + 30 mm forøget rammehøjde	1,13	1,42	1,24	-40
Reference + tyk ramme + 60 mm forøget rammehøjde	1,03	1,37	1,21	-41

Resultaterne i tabel 3.3 viser, at selvom rammehøjden øges med 60 mm svarende til den oprindeligt definerede højde af randzonen, er U-værdien for den nye randzone ikke kommet ned på niveau med center U-værdien for ruden, hvorimod U-værdien for ramme/karmkonstruktionen når et niveau, der svarer til den endimensionale U-værdi for en 115 mm tyk trækonstruktion.

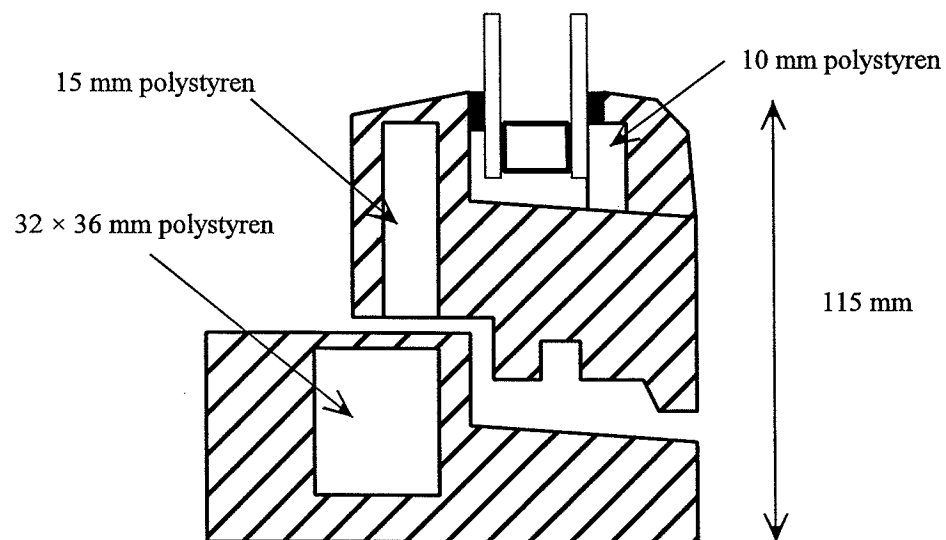
Betragtes resultatet af beregningerne for den lette version af enfamiliehuset med hovedvinduesarealet vendende mod syd, ses det, at energibalancen forbedres med 13 kWh/m² vindue pr. år ved at øge rammetykkelsen til 115 mm (ens ramme- og karmtykkelse), hvorimod en sænkning af U-værdien ved at forøge rammehøjden og dermed rudens forsækning i rammen ikke fører til en forbedring af energibalancen.

En forøgelse af rammekonstruktionens tykkelse medfører imidlertid en væsentlig forøgelse af vinduets vægt samt et øget materialeforbrug, hvilket ud fra et økonomisk og håndteringsmæssigt synspunkt er uheldigt. En alternativ løsning er at forbedre ramme- og karmkonstruktionens U-værdi ved at erstatte noget af konstruktionen med et bedre isolerende materiale, hvilket imidlertid må gøres under hensyntagen til de styrkemæssige forhold, der skal være opfyldt. Den energimæssigt bedste placering af et bedre isolerende materiale vil være i forlængelse af ruden, hvorved den primære isolerende virkning i både rude og ramme/karm vil ligge i samme plan (figur 3.6).



Figur 3.6 Skitse af bedst mulig placering af en "kuldebroafbrydelse" i ramme/karmkonstruktionen.

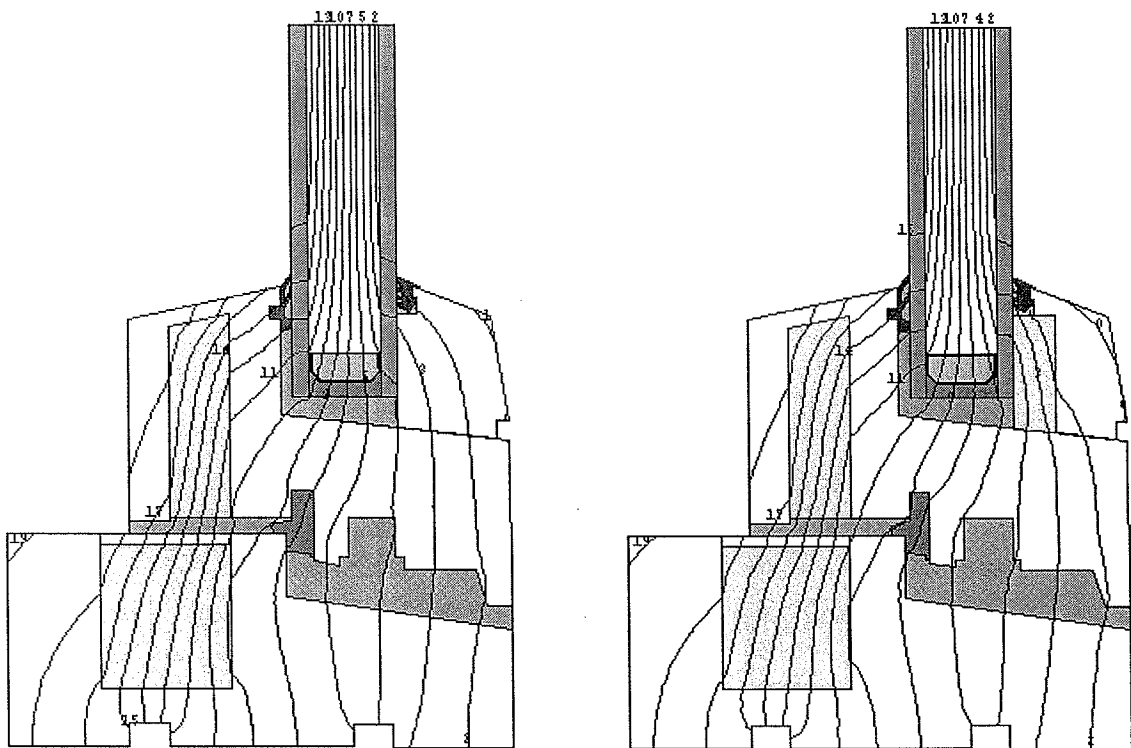
Imidlertid er det netop i dette område af rammen, at kræfterne fra ruden skal overføres til rammekonstruktionen samtidig med, at området også tjener til fastgørelse af beslag. Derudover vil samlingen mellem kuldebroafbrydelse og resten af ramme/karmkonstruktionen være udsat for udendørsforhold med øget risiko for fugtindtrængning i ramme/karmkonstruktionen. Disse ulemper er forsøgt undgået med konstruktionen vist i nedenstående figur 3.7



Figur 3.7 Ramme/karmprofil med polystyrenisolering integreret i ramme og karm.

Hovedformålet med de viste ændringer af det traditionelle ramme/karmprofil er at øge ramme-/karmkonstruktionens samlede U-værdi uden at ændre væsentlig på konstruktionens dimensioner. Ramme- og karmtykkelsen er således kun øget med 10 mm for at give plads til de viste isoleringsområder. Isoleringen i ramme og karm er placeret i områder, der sidder i et beskyttet klima uden risiko for vandindtrængning. Isoleringen er på alle sider beskyttet af træ, hvorved ramme/karmkonstruktionen fremtræder som en traditionel trækonstruktion. Rammehøjden er øget med 10 mm, hvilket kan gøres uden at ændre vinduets energibalance (tabel 3.3), men med en forøgelse af overfladetemperaturen ved samlingen mellem rude og ramme til følge.

Den integrerede isolering i ramme og karm vil føre til, at den yderste del af ramme/karmkonstruktionen vil blive koldere. Da ruden vil være monteret i denne kolde del af rammen, vil det føre til større kuldebrovirkning omkring rudens kantforsegling, hvorfor der udover den integrerede isolering i ramme- og karmkonstruktionen er placeret 10 mm isolering mellem glaslisten og rudens kant. Virkningen af denne isolering fremgår af nedenstående figur 3.8, hvor f.eks. 6 °C isotermer i tilfældet med isolering mellem glasliste og rude er rykket længere ud mod det yderste glas i forhold til, hvis glaslisten er af massivt træ. Ligeledes er den udvendige overfladetemperatur på glaslisten sænket med ca. 1 °C ved anvendelse af den ekstra isolering.



Figur 3.8. Isotermbilleder for termisk set forbedret ramme/karmkonstruktion henholdsvis uden og med isolering mellem glasliste og rudekant.

Betydningen for de forskellige delkonstruktioners U-værdi og vinduets samlede U-værdi er vist i nedenstående tabel 3.4, hvoraf det fremgår, at ramme/karmarealets U-værdi er sænket fra ca. 1,6 W/(m² K) til ca. 0,95 W/(m² K). Projektets forudsætning om 30% bedre energibalance kan dermed opfyldes (jvf. afsnit 2). Energibalancen for det termisk set forbedrede vindue er blevet beregnet i henhold til metoden beskrevet i afsnit 2 og er fundet til -34 kWh/m² vindue pr år.

Tabel 3.4. Beregnede U-værdier og resulterende energibalance beregnet i henhold til afsnit 2 for henholdsvis referencevinduet og den termisk set forbedret vindueskonstruktion.

Vindue	Ramme/karm U-værdi	Rand-zone U-værdi	Total U-værdi	Energibalance
	W/(m ² K)	W/(m ² K)	W/(m ² K)	kWh/m ² pr år
Reference	1,58	1,57	1,42	-50
Forbedret	0,96	1,55	1,2	-34

3.2.2 Målte U-værdier og betydning af ventilation af spalte mellem ramme og karm

Den skitserede ramme/karmkonstruktion opfylder de krav som Rationel Vinduer A/S har opstillet med hensyn til produkttegnethed og en prototype er blevet konstrueret for verifikation af de beregnede U-værdier gennem måling i Institut for Bygninger og Energi's "guarded hotbox" prøvestand. Målinger er gennemført i henhold til på det tidspunkt seneste udkast til CEN standard på området /7/, hvilket indebærer at vinduets udvendige mål skal være 1230 mm × 1480 mm. Dette mål er ikke en repræsentativ størrelse for vinduer i dansk byggeri, hvorfor ramme-/karmarealets U-værdi under målingerne får mindre relativ betydning for den totale U-værdi end det vil være tilfældet for de traditionelt mindre vinduer, der udgør hovedparten af de solgte vinduer.

Prototypen er ikke forsynet med beslag, hvorfor rammen er fastholdt til karmen med 12 små trækiler, der ud over fastholdelsen også sikrer den korrekte luftspalte mellem ramme og karm. Som reference for det termisk set forbedrede vindue er der desuden udført målinger på den traditionelle ramme/karmkonstruktion.

I afsnit 3.1 er problematikken omkring ventilationsgraden af luftspalten mellem ramme og karm blevet diskuteret. Måling af U-værdien i en "guarded hotbox" opstilling udføres ved under kalibreringen at tilpasse vindhastigheden langs prøveemnets yderside indtil der opnås en samlet overgangsisolans på 0,17 (m² K)/W. Denne opadrettede vindhastighed, der er parallel med

prøveemnets overflade, holdes konstant under resten af målingerne på vinduerne. Dette giver mulighed for at undersøge indflydelsen af ventilationsgraden i luftspalten mellem ramme og karm under de påtrykte forhold ved at foretage en måling, hvor spalten lukkes med et stykke tape hele vejen rundt. Målingerne er udført med 20 °C på den varme side og ca. 0 °C på den kolde side af vinduet.

Resultaterne for de udførte målinger er vist i tabel 3.5 sammen med U-værdien beregnet for den aktuelle vinduesstørrelse ud fra de teoretiske beregninger af U-værdierne for ramme/karmarealet, randzonen og rudens midte.

Tabel 3.5 Målte og beregnede U-værdier for henholdsvis referencekonstruktionen og de termisk set forbedrede vindueskonstruktion dels med åben spalte mellem ramme og karm og dels med spalten tapet til.

Vinduestype	Målt U-værdi	Beregnet U-værdi
		ventileret / halvt ventileret / ikke ventileret
Referencevindue, åben spalte	1,50	1,41 / 1,46 / 1,59
Forbedret vindue, åben spalte	1,26	1,21 / 1,25 / 1,29
Referencevindue, lukket spalte	1,45	1,41 / - / -
Forbedret vindue, lukket spalte	1,23	1,21 / - / -

Resultaterne i ovenstående tabel viser god overensstemmelse mellem målte og beregnede værdier. Med hensyn til ventilationsgraden af luftspalten mellem ramme og karm tyder de udførte målinger på, at hvis luftspalten regnes ventileret med udeluft i halvdelen af spaltens dybde, og resten af spalten regnes som stillestående luft, opnås de mest pålidelige resultater.

3.3 Forbedring af vinduets energibalance gennem reduktion af ramme/karmarealet

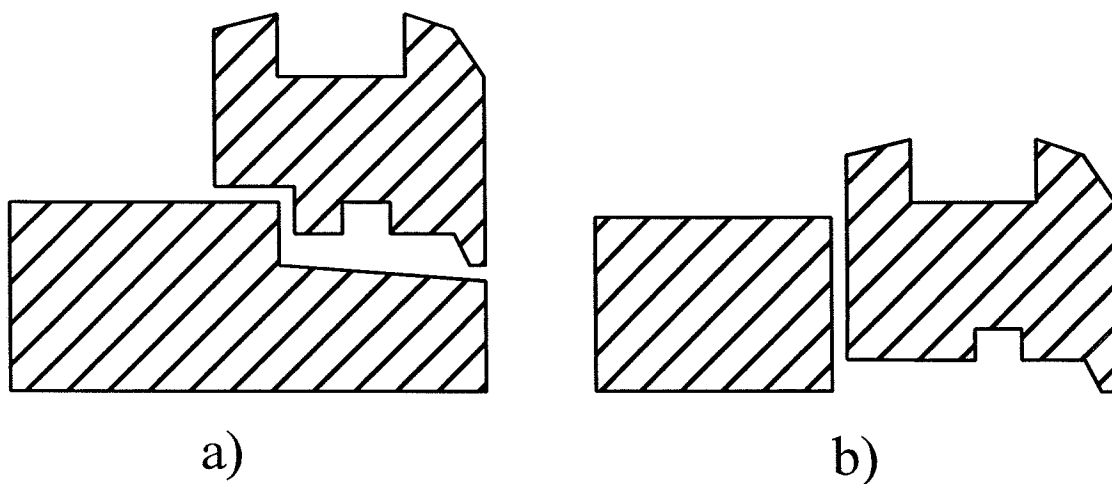
I afsnit 2 blev det undersøgt, hvor meget ramme/karmarealets andel af det samlede vinduesareal skulle mindskes for at opnå en 30% bedre energibalance for vinduet, og resultatet blev at ramme/karmarealet helt skulle fjernes. Dette var under forudsætning af, at vinduets samlede U-værdi ikke blev berørt i negativ retning, hvilket er urealistisk. Hvis ruden kunne monteres og være operationel uden anvendelse af en ramme/karmkonstruktion, vil det betyde større rudedimensioner. Umiddelbart vil det betyde et større midterareal af ruden, hvor rudens center U-værdi vil være uberørt, men til gengæld vil der ikke være nogen form for "indpakning" af rudens kantforsegling, hvorfor kuldebroen her vil slå kraftigere igennem.

I dette afsnit vil der derfor blive givet et par forslag til, hvordan vinduets energibalance eventuelt kan forbedres gennem en kombination af reduceret ramme/karmareal og forbedring af ramme/karmarealets U-værdi.

Fra producentens side er der en række krav til vinduets udformning med hensyn til funktion og fleksibilitet, hvoraf to væsentlige krav er:

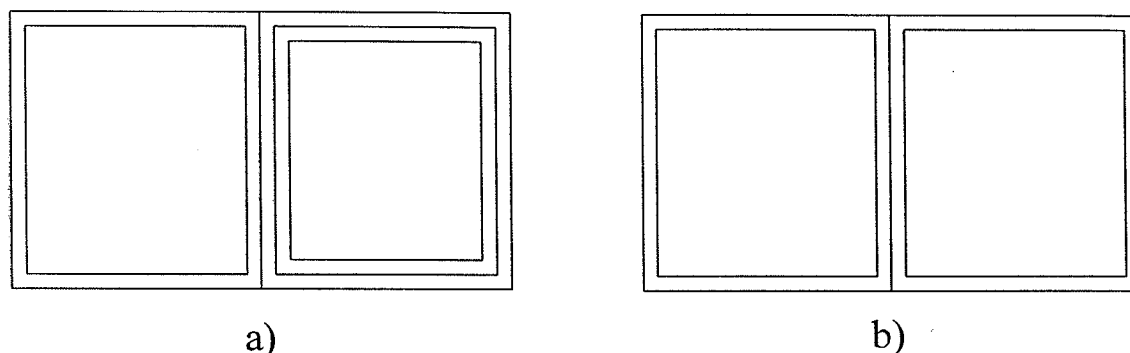
- 1) Vinduer sidder sjældent alene og skal derfor kunne sammenbygges
- 2) Vinduer sidder ofte på steder, hvor det kan være besværligt at pudse dem udefra, hvorfor vinduesdesignet skal tillade fremstilling af vinduer, der kan drejes/vippes så pudsning kan ske indefra.

Skal ramme/karmarealet reduceres kræver det, at det er muligt at gøre konstruktionerne spinklere, eller at noget af konstruktionen helt kan fjernes. Betragtes f.eks. en traditionel vindueskonstruktion af træ, vil det være en oplagt mulighed at fjerne den yderste del af karmen (se figur 3.9) og lade rammen danne afslutningen af vinduet. Herved bliver det transparente areal forøget samtidig med at den traditionelt "tynde" rammekonstruktion så og sige tillægsisoleres af den resterende del af karmen.



Figur 3.9 a) Traditionel vindueskonstruktion i træ og en b) modificeret vindueskonstruktion med større transparent areal.

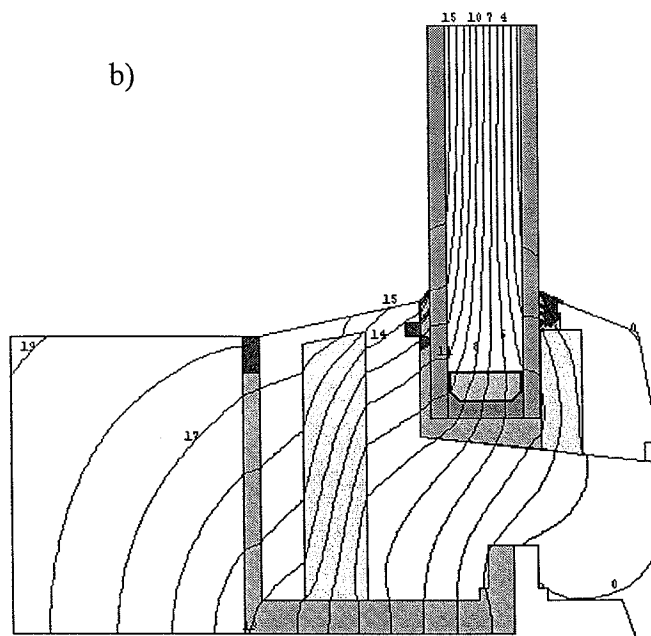
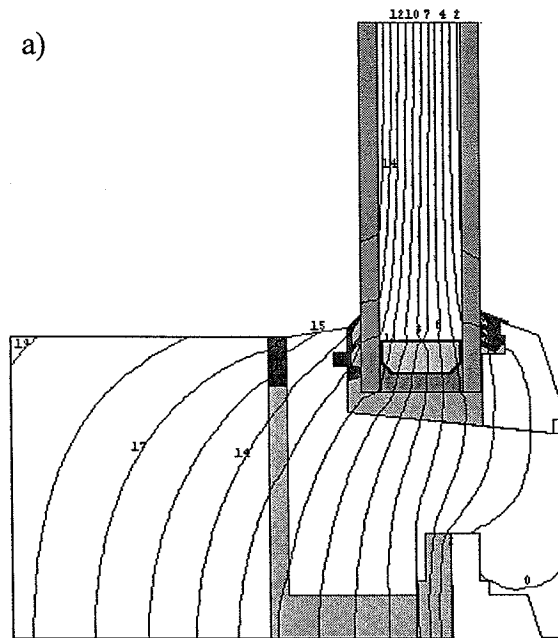
Den nye vindueskonstruktion opfylder kravet om sammenbyggelighed og byder desuden på en arkitektonisk fordel, idet såvel faste vinduer som vinduer med gående ramme udefra vil se ens ud (figur 3.10).



Figur 3.10 Fast vindue og oplukkeligt vindue bygget sammen. a) Traditionel udformning og b) ny udformning, hvor rammen sidder udenpå karmen.

U-værdien for den ændrede vinduesudformning er beregnet til $1,40 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, hvilket er en reduktion med $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ i forhold til referencevinduet, men til gengæld er det gennemskinnelige areal øget med ca. 20%. Den resulterende energibalance for dette vindue er beregnet til $-39 \text{ kWh}/\text{m}^2$ vindue pr. år for den termisk lette version af enfamiliehuset med hovedparten af glasarealet vendende mod syd. Det termisk lette enfamiliehus er valgt som sammenligningsgrundlag, idet dette i de foregående analyser har vist sig at være repræsentativt for det samlede resultat. Energibalancen er således forbedret fra $-54 \text{ kWh}/\text{m}^2$ til $-39 \text{ kWh}/\text{m}^2$, hvilket svarer til en forbedring på 28% på trods af at vinduets totale U-værdi kun er ændret med ca. 5%.

Forbedringen af U-værdien i forhold til referencevinduet er beskeden set i forhold til, at der næsten er 115 mm ubrudt træ regnet fra den indvendige lodrette side af karmen til den udvendige lodrette side af rammen, hvilket skulle resultere i en total U-værdi tæt på $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Årsagen hertil fremgår af nedenstående figur 3.11, der viser isothermforløbet i konstruktionen, hvoraf det fremgår, at der er en kraftig varmestrøm ned gennem den vandrette ramme-/karmside og ud til udeluften (isothermerne krummer meget). Denne varmestrøm vil kunne bremses ved integrering af et isoleringslag i rammen analogt til den forbedrede traditionelle vindueskonstruktion. Isothermforløbet i denne konstruktion er ligeledes vist i figur 3.11.



Figur 3.11 a) Isotermforløb i smal ramme/karmkonstruktion i træ. b) Isotermforløb i smal ramme/karmkonstruktion i træ med integreret isolering i rammen.

Ramme/karmhøjden er øget med 10 mm for at gøre plads til isoleringen og for at dæmpe kuldebrovirkningen af rudens kantforsegling. Vinduetts totale U-værdi bliver $1,34 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ i

dette tilfælde, og vinduets glasareal er øget med ca. 14% i forhold til referencevinduet. Energiforbruget for det lette enfamiliehus er fundet til -37 kWh/m² vindue pr. år, hvilket svarer til en forbedring på ca. 32%.

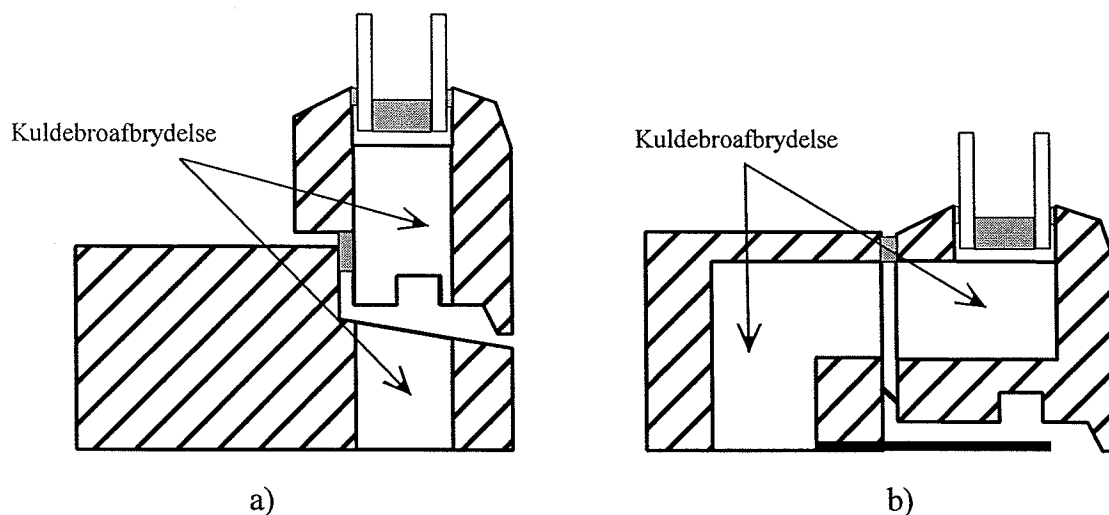
Ovenstående forslag, der opfylder projektets målsætning, kræver imidlertid udvikling af nye beslag for opfyldelse af kravet om, at vinduet skal kunne pudses indefra. Udvikling af sådanne beslag er et projekt i sig selv, hvorfor de skitserede løsningsmuligheder ikke er afprøvet i form af en prototypekonstruktion.

3.4 Opsummering af væsentlige forhold for vinduers termiske ydeevne

Resultatet af de gennemførte analyser har dannet et billede af, hvorledes ramme/karmkonstruktionens U-værdi og størrelsen af det transparente vinduesareal i forhold til det totale vinduesareal påvirker vinduets energibalance. I dette afsnit opsummeres hovedtrækkene, og et teoretisk optimalt vindue baseret på det traditionelle vinduesdesign med opdeling i karm, ramme og rude bliver skitseret.

Afstandsprofilet i ruden giver anledning til en væsentlig forringelse af vinduets isoleringsevne - ikke kun i selve ruden - men virkningen forplanter sig også ned i ramme/karmen, der omslutter rudekanten. Beregningerne i afsnit 3.1 viser, at selv om afstandsprofilet havde samme ækvivalente varmeledningsevne som hulrummet i ruden, opstår der langs rudekanten et felt med en væsentlig forhøjet U-værdi sammenlignet med rudens center U-værdi. Årsagen er, at rammematerialet har en højere varmeledningsevne end den ækvivalente varmeledningsevne i ruden, hvorved der kan strømme varme fra det varme glas ned gennem rammematerialet og op i det udvendige kolde glas. Selvom nye godt isolerende afstandsprofiler kan erstatte de nuværende anvendte, kræves der yderligere en bedre isolerende rammekonstruktion for at undgå en kuldebrovirkning langs rudekanten. Problemet løses ikke ved at rammehøjden øges for at gøre vejlængden for den ekstra varmestrøm gennem glassene længere, idet den forbedrede isoleringsevne opvejes af et mindsket solindfald (afsnit 3.2). Den forbedrede isoleringsevne af rammekonstruktionen skal altså primært være placeret i forlængelse af ruden, hvorved varmestrømmen gennem rammen mellem det inderste og det yderste lag glas afbrydes (figur 3.12 a).

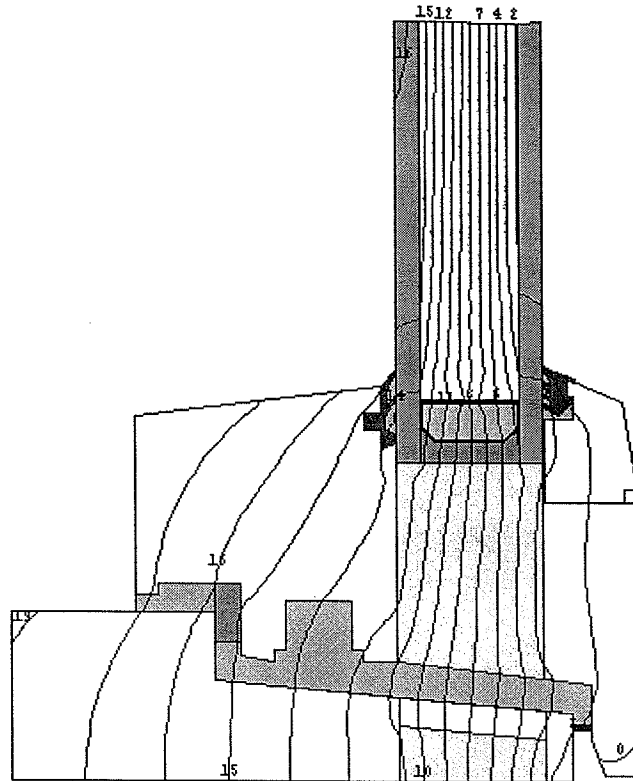
Ideelt set bør isoleringen i forlængelse af ruden føres ret gennem rammen og videre gennem karmen, samtidig med at luftspalten mellem ramme og karm sikres mod unødigt kraftig ventilation. Imidlertid benyttes dette område af ramme og karm traditionelt til fastgørelse af beslag, hvorfor det er nødvendigt at flytte kuldebroafbrydelsen væk fra dette område. Det kunne f.eks. tænkes gjort ved at lade isoleringslaget "bugte" sig gennem konstruktionen uden om de kritiske områder (figur 3.12 b).



Figur 3.12 a) Optimal placering af kuldebroafbrydelse i ramme og karm. b) Løsning hvor kuldebroafbrydelsen føres uden om de kritiske områder i ramme og karmkonstruktionen.

Beregningen af U-værdien for randzone og ramme/karmkonstruktion med Therm giver som resultat en U-værdi for randzonen på $1,65 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ og en U-værdi for ramme/karmkonstruktionen på $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, hvilket ligger meget tæt på værdierne for referencevinduet. Den samlede højde af ramme/karmkonstruktionen er derimod reduceret fra 105 mm til ca. 65 mm, hvilket giver en forøgelse af det transparente areal på ca. 18%. Det er imidlertid bemærkelsesværdigt, at U-værdien på trods af kuldebroafbrydelsen ikke forbedres, hvilket dog skyldes den kraftige flerdimensionale effekt der opstår ved, at isoleringen ikke føres ret gennem konstruktionen.

En anden måde at føre isoleringslaget uden om de kritiske områder for placering af beslagene er at forskyde rudens placering i rammekonstruktionen, hvorved isoleringslaget kan føres ret gennem rammen. Princippet er vist i nedenstående figur 3.13, der også viser det beregnede isothermforløb. U-værdien for henholdsvis randzone og ramme/karmkonstruktion er beregnet til $1,58 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ og $1,33 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, hvilket resulterer i en total U-værdi på ca. $1,33 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Den samlede højde af ramme og karm er ca. 74 mm hvilket er en reduktion på 29 mm i forhold til referencevinduet svarende til en forøgelse af det transparente areal med ca. 13%.

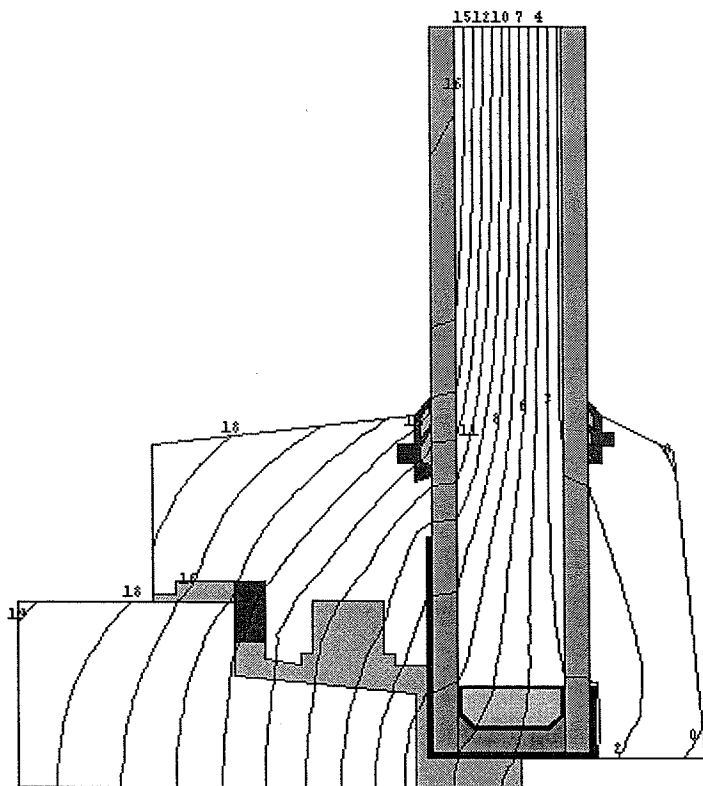


Figur 3.13 Ramme/karmkonstruktion med brudt kuldebro i forlængelse af ruden. Fastgørelse af beslag i rammen sker indenfor kuldebroafbrydelsen. En gummilæbe mellem ramme og karm ved karmens yderside sikrer mod unødigt ventilation af luftspalte mellem ramme og karm.

Energibalancen for konstruktionen er beregnet for det lette enfamiliehus med hovedparten af vinduesarealet vendende mod syd. Beregningerne viser at vinduets energibalance bliver ca. 34 kWh/m² vindue, hvilket er ca. 30 % bedre end for referencevinduet. Det skitserede vindue vil således også kunne opfylde projektets målsætning, men resulterer ikke i en yderligere forbedring i forhold til den testede prototype.

Betragtes isothermforløbet i figur 3.13 ses det, at isothermerne ligger meget tæt i rudens isolerende argonfyldning, mens der er meget større afstand mellem isothermerne i ramme/karmprofilet. Dette viser, at hvis der skal opnås endimensionale forhold i vinduet skal kuldebroafbrydelsen i ramme-/karmkonstruktionen have en varmeledningsevne der svarer til rudens ækvivalente varmeledningsevne, hvilket ikke er muligt med eksisterende isoleringsmaterialer.

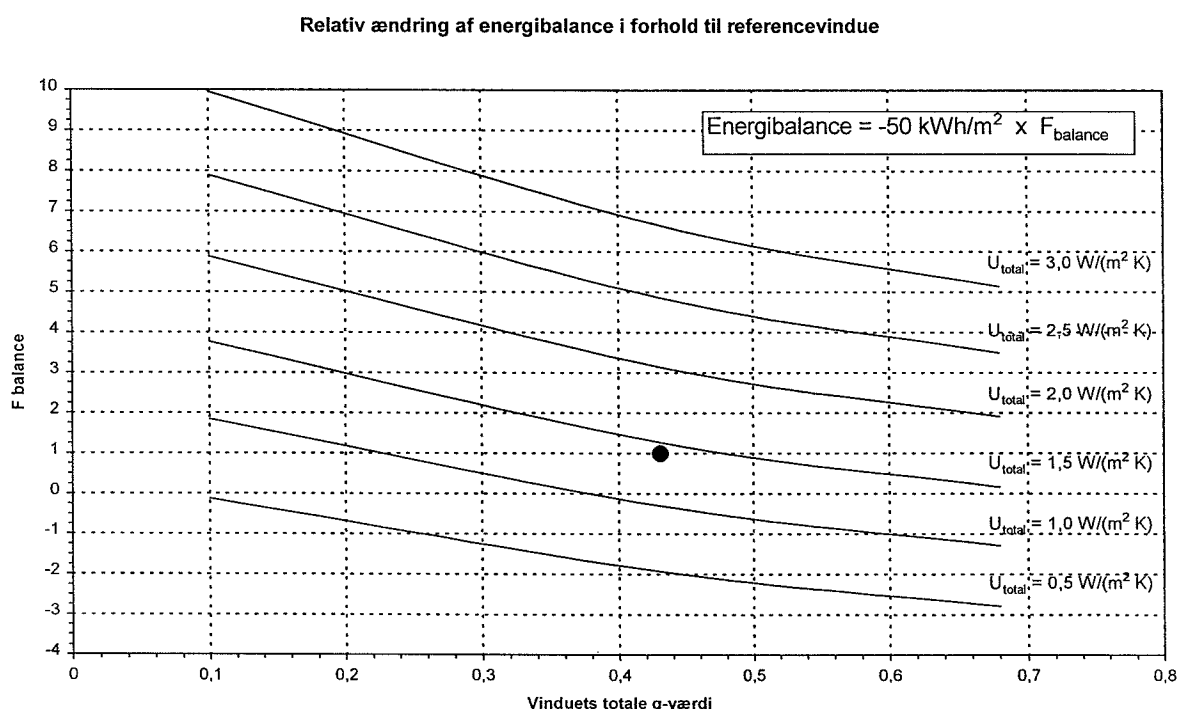
En energimæssig rigtig løsning synes derfor være en udnyttelse af rudens isoleringsevne over hele vinduesarealet, hvilket eventuelt kan gøres ved at "clipse" ruden udvendigt på rammen. Rammens funktion er dels at muliggøre fastgørelse af beslag og dels at tjene som isolering for kuldebroen i rudens afstandsprofil. Princippet er skitseret i nedenstående figur 3.14, hvor der udvendigt på ruden er monteret en "glasliste", der er fastgjort til metalprofilet, der fastholder ruden. Glaslisten har ingen styrkemæssig funktion, men medvirker til at isolere kuldebroen ved rudens afstandsprofil. Figur 3.14 viser også de tilhørende isotermer beregnet med Therm. U-værdien for randzonen er beregnet til ca. $1,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ og U-værdien for ramme/karmkonstruktionen er ligeledes fundet til ca. $1,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, hvorved den samlede U-værdi for vinduet bliver ca. $1,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. U-værdierne er fundet som en vægtning af de beregnede U-værdier for henholdsvis et snit med stålprofil og et snit uden stålprofil. Den samlede højde af ramme/karmkonstruktionen er ca. 60 mm. Isotermforløbet gengivet i figur 3.14 viser, at det ikke er muligt at udnytte rudens isoleringsevne effektivt til reduktion af ramme/karmkonstruktionens U-værdi, idet kuldebroen i afstandsprofilet nu ikke er "pakket ind" i rammen.



Figur 3.14 Isotermforløb i ramme/karmkonstruktion, hvor ruden fastholdes til rammen med enkelte beslag af rustfrit stål.

3.4.1 Betydningen af vinduets totale U-værdi og g-værdi for energibalancen

I dette projekt er der anvendt en definition af vinduets energibalance der tager hensyn til både bygningens termiske masse og vinduernes orientering i forhold til verdenshjørnerne (se afsnit 2). Definitionen er baseret på at vinduesandelen i forhold til gulvarealet samt fordelingen af vinduerne på størrelser er repræsentativ. Med dette som baggrund kan der ved kendskab til et vilkårligt vindues totale U-værdi og totale g-værdi gives et overslag over vinduets energibalance ved aflæsning i nedenstående figur 3.15. Den totale U-værdi refererer til den resulterende U-værdi for hele vinduesarealet, og tilsvarende for den totale g-værdi, hvor f.eks. et vindue med et transparent areal på 70% af det totale vinduesareal og en g-værdi (total solenergitransmittans) for ruden på 0,5 resulterer i en total g-værdi for vinduet på $0,7 \times 0,5 = 0,35$.



Figur 3.15 Diagram til overslagsmæssig vurdering af et vindues resulterende energibalance baseret på forudsætningerne angivet i afsnit 2. Referencevinduet er markeret med ●.

4. NYT VINDUESKONCEPT

Den største vanskelighed for opnåelse af et termisk set perfekt vindue ligger i, at den ækvivalente varmeledningsevne af hulrummet mellem rudens glaslag er meget lav. I dette tilfælde med 18 mm argon og én lavemissionsbelægning med emissiviteten 0,09 er den ækvivalente varmeledningsevne ca. $0,029 \text{ W}/(\text{m K})$, hvilket er lavere end de fleste isoleringsmaterialers varmeledningsevne. Hvis denne isoleringsevne skal føres videre i konstruktionen, kræves der en kantforsegling med samme varmeledningsevne, for at undgå en kuldebrovirkning. Dette findes i dag ikke på markedet, hvor de bedste profiler har en ækvivalent varmeledningsevne, der er 4 - 10 gange større.

Alternativet er at gøre kantforseglingen meget tynd, hvorved kuldebroens areal og dermed virkningen af kuldebroen bliver mindre. Imidlertid skal afstandsprofilet kunne overføre kræfterne fra det ene glas til det andet.

Endelig kan glasafstanden øges, hvorved isolansen af afstandsprofilet vil blive større, hvorimod isolansen af hulrummet i ruden ikke berøres nævneværdigt, det vil sige, at den ækvivalente varmeledningsevne af hulrummet stiger med stigende glasafstand. I nedenstående tabel 4.1 er den resulterende glasafstand for en tolags energirude med argon og én lavemissionsbelægning med emittansen 0,09 beregnet, når isolansen mellem glassene skal svare til isolansen af kantforseglingen.

Tabel 4.1 Resulterende glasafstand for en tolags energirude med argon og én lavemissionsbelægning med emittansen 0,09 beregnet, når isolansen mellem glassene skal svare til isolansen af kantforseglingen.

Kantforseglingstype	Isolans	Beregnet afstand
	$(\text{m}^2 \text{ K})/\text{W}$	mm
0,4 mm galvaniseret stål, højde 7 mm + 3 mm polysulfid	0,375	750
0,15 mm rustfrit stål, højde 7 mm + 3 mm polysulfid	0,455	225
Silikoneskum, højde 7 mm + 3 mm polysulfid	0,528	95
Butyl, højde 7 mm + 3 mm polysulfid	0,511	115

Ovenstående tabel viser, at der kræves en meget stor glasafstand for, at isolansen ved rudens midte og isolansen af kantforseglingen bliver lige store. Dette vil imidlertid betyde en lidt højere U-værdi for ruden. I tilfældet med en kantforsegling af silikoneskum bliver U-værdien for ruden således $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ mod udgangsniveauet på $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Den optimale glasafstand under

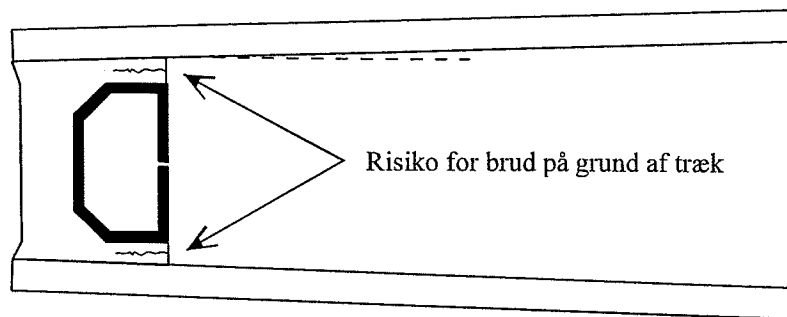
hensyntagen til kuldebroforholdene i kantforseglingen vil derfor ligge et sted mellem de ovenfor beregnede afstande og de traditionelt anvendte glasafstande.

En væsentlig forøgelse af glasafstanden betyder imidlertid større risiko for brud på kantforseglingen på grund af større interne trykvariationer i det forseglede hulrum mellem glassene. Trykvariationerne opstår som følge af opvarmning ved solpåvirkning af det indespærrede gasvolumen. I nedenstående tabel 4.2 er vist resultatet af en beregning af trykstigningen i henholdsvis en tolagsrude og en trelagsrude udsat for en solpåvirkning på 800 W/m^2 ved en temperatur inde og ude på 20°C . Trykket regnes neutralt ved en gastemperatur på 20°C .

Tabel 4.2 Beregnede trykstigninger i tolags- og trelagsruder som funktion af glasafstanden ved en solpåvirkning på 800 W/m^2 og 20°C på begge sider af ruden. Den inderste glasoverflade i hvert hulrum er forsynet med en lavemissionsbelægning med emittansen 0,09.

Rudetype	Glasafstand	Maksimal temperatur i hulrum	Maksimal trykstigning i hulrum
	mm	$^\circ\text{C}$	Pa
Tolagsrude	18	30	20
	50	30	50
	100	30	95
Trelagsrude	2×18	45	90
	2×50	45	240
	2×100	45	465

Temperaturerne i ovenstående tabel er beregnet med programmet WINDOW 4.0 /6/. Trykket i hulrummet vokser proportionalt med forøgelsen af glasafstanden på grund af den større mængde gas/luft, der udvider sig. Trykstigningen bevirker at rudens glaslag vil krumme væk fra hinanden på midten, hvorved kantforseglingen vil blive belastet, jævnfør nedenstående figur 4.1.



Figur 4.1 Belastning af kantforseglingen i en forseglet rude som følge af intern trykstigning i ruden.

Den beskrevne belastning af kantforseglingen vil forekomme mange gange i løbet af et år, idet det tilsvarende fænomen selvfølgelig også optræder ved afkøling af ruden, hvor rudens glas vil krumme ind mod hinanden ved rudens midte på grund af internt undertryk. Belastningen stiger altså med stigende glasafstand og vil tidligere kunne føre til brud i kantforseglingen. Ud over den holdbarhedsmæssige side af sagen betyder krumninger i glaslagene, at der kan opstå forvrængede spejlinger i ruderne.

Ovenstående problematik om den forseglede rudes holdbarhed samt ønsket om større glasafstand af hensyn til kuldebroen i kantforseglingen har ført til en ide om et nyt vindueskoncept, der tillader store glasafstande, og som vil have en meget lang levetid.

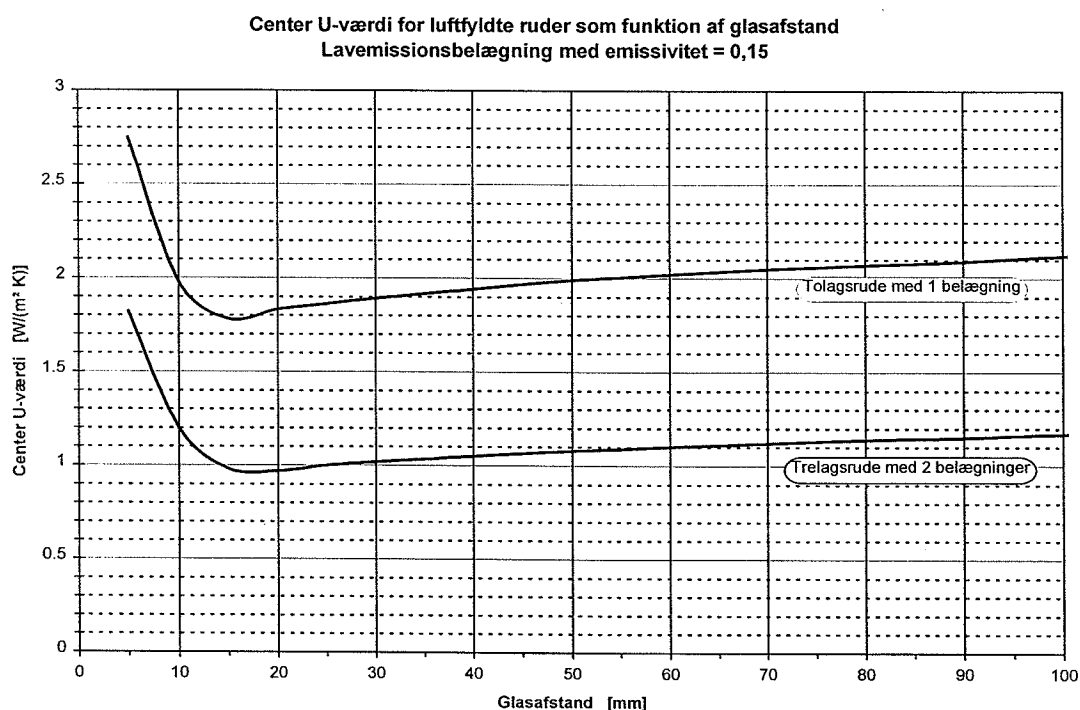
Ideen er, at lade ruden kunne trykudligne med omgivelserne under længerevarende trykændringer i ruden, som f.eks. under opvarmning og afkøling, mens pludselige trykændringer fra f.eks. vindpåvirkning kun vil føre til en minimal luftudskiftning i ruden. Denne trykudlignende funktion kan etableres ved hjælp af en passende lille og veldefineret åbning mellem rudens luftfyldte hulrum og det fri. Ved længerevarende og relativt langsomme trykændringer, vil luften efterhånden som den afkøles/opvarmes kunne sive gennem åbningen og dermed minimere trykforskellen mellem hulrummet og udeluften. Ved en hurtig og kraftig påvirkning fra f.eks. vindstød vil strømningsmodstanden i åbningen være så stor, at der praktisk taget ikke når at ske en luftudveksling med omgivelserne.

Princippet skitseret ovenfor adskiller sig fra de kendte vinduer med koblede rammer, ved at luftudskiftningen er kontrolleret og trykudligningsåbningen udføres med et effektivt filter, der

holder støv og insekter ude, hvorved rengøringsbehovet ikke bliver større end for de traditionelle forseglede rudeløsninger.

Trykudligningen betyder imidlertid, at det ikke er muligt at benytte specielle isolerende gasarter i ruden, og der kan ikke anvendes de såkaldte bløde lavemissionsbelægninger, der ødelægges af kontakt med atmosfærisk luft. Bløde lavemissionsbelægninger er kendetegnet ved at have en lavere emittans end de hårde belægninger, der til gengæld har en bedre solenergitransmittans.

For en såkaldt hård lavemissionsbelægning ligger emittansen på ca. 0,15. I nedenstående figur 4.2 er vist center U-værdien for henholdsvis en luftfyldt tolags- og trelagsrude som funktion af glasafstanden ved anvendelse af en hård lavemissionsbelægning med emittansen 0,15. Belægningen er for tolagsruden anvendt på den side af det inderste glaslag, der vender mod hulrummet og tilsvarende for trelagsruden, hvor belægningen er anvendt på de to inderste lag glas.

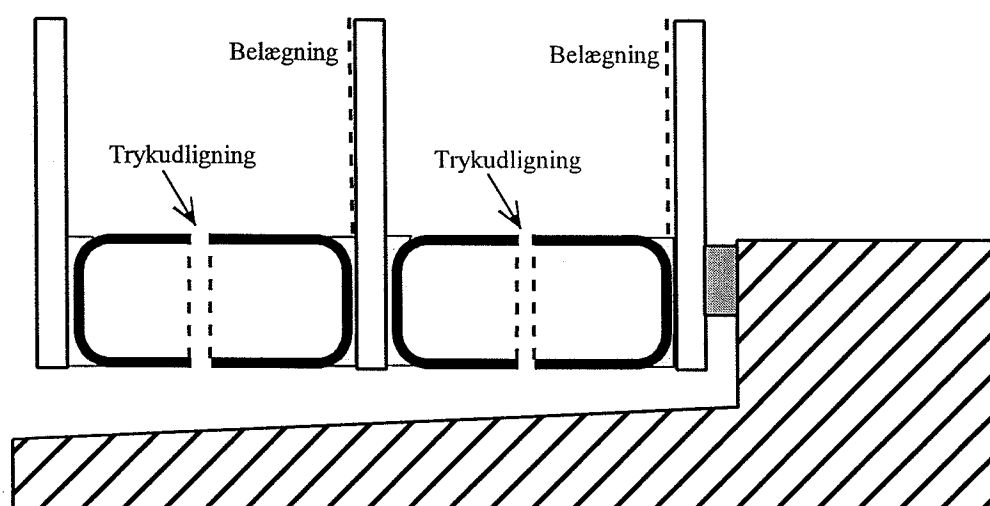


Figur 4.2 Center U-værdi som funktion af glasafstanden for henholdsvis en luftfyldt tolagsrude med en lavemissionsbelægning og en luftfyldt trelagsrude med to lavemissionsbelægninger. Emissiviteten for belægningen er 0,15.

Ovenstående figur viser, at minimum for center U-værdien ligger ved en glasafstand på 15-20 mm, men specielt for trelagsruden stiger U-værdien kun med ca. 10%, hvis glasafstanden øges

til 50 mm. Den mindste U-værdi for den luftfyldte tolagsrude er ca. $1,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, hvorved den netop kan opfylde de nuværende krav i Bygningsreglement 95 /8/, hvis der ikke forekommer nogen kuldebro i afstandsprofilen.

Trelagsruden giver derimod mulighed for at opnå en U-værdi under $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, hvorved den er konkurrencedygtig med traditionelle energivinduer. Nedenstående figur 4.3 viser en principtegning af den trykudlignende rude, hvor ramme og afstandsprofil er integreret i ruden.

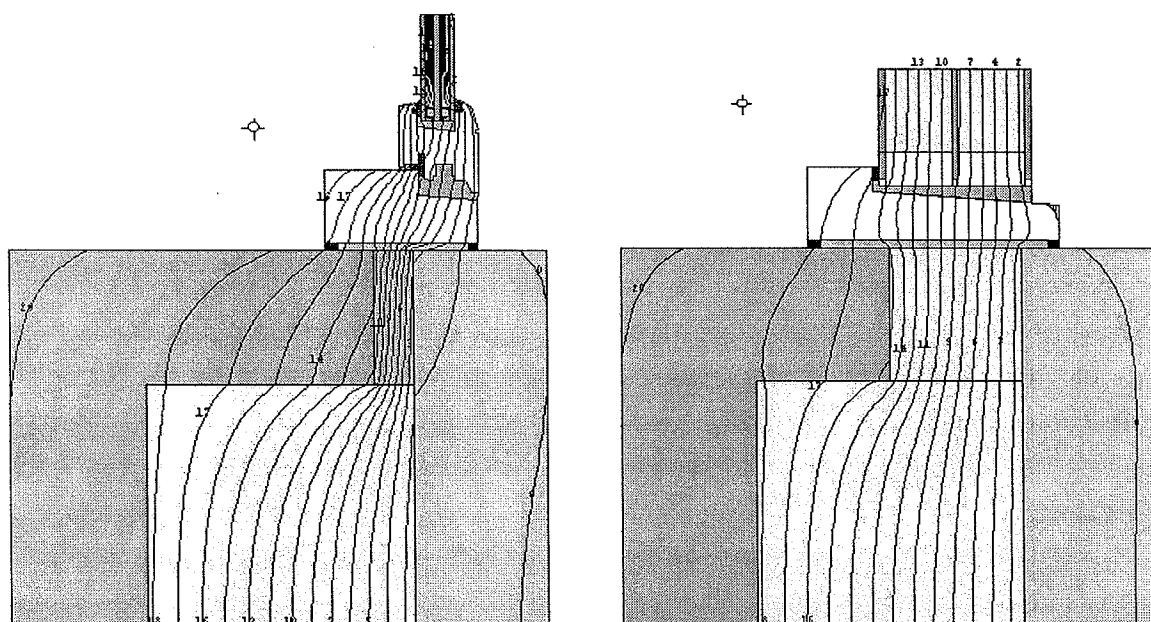


Figur 4.3 Trelagsrude med trykudligning til udeluften og integreret ramme- og afstandsprofil.

Center U-værdien for en forseglede trelagsrude med xenonfyldning og to bløde lavemissionsbelægninger er til sammenligning ca. $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Glasafstanden i xenonruden er ca. 7 mm, hvilket resulterer i en forøget kuldebrovirkning af afstandsprofilen i forhold til ruder med større glasafstand. Ved sammenligning af trelagsrudeløsningerne skal der derfor foretages en samlet beregning af vinduets U-værdi og energibalance.

I tilfældet med den forseglede xenonfyldte rude kræves en meget tæt traditionel kantforsegling, hvorimod der for den luftfyldte rude med trykudligning ikke stilles de samme krav til tætheden. Derfor er der et meget friere materialevalg ved udformning af afstandsprofilen til den trykudlignende rude. Vælges f.eks. et træprofil kan der med en glasafstand på 50 mm opnås samme ækvivalente varmeledningsevne for afstandsprofilen som for luftmellemrummet i ruden, hvorved den totale U-værdi for ruden uanset størrelse er ca. $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Andre materialer kan tænkes anvendt, f.eks. glasfiberarmeret polyester, der har en lidt større varmeledningsevne end træ, men som er væsentlig stærkere, hvorved der kan opnås en spinklere konstruktion.

Den brede/tykke rudeløsning har desuden en positiv indflydelse på varmetabet gennem den omgivende vægkonstruktion, idet rudens tykkelse fører til en mindskelse af de flerdimensionale varmestrømme omkring vindueshullet sammenlignet med traditionelle vinduesløsninger, og der kan anvendes en større tykkelse af kuldebroafbrydelsen i vinduesfalsen. Virkningen er belyst gennem beregninger udført med Therm /5/ på et $1,25 \times 1,50 \text{ m}^2$ vindue monteret i hulmursisoleret vægkonstruktion med 200 mm isolering. Bagmuren er af letbeton mens formuren er af tegl. I beregningerne er der medtaget 283 mm af væggen rundt om vinduet, hvorved væggens samlede areal bliver lig med vinduets areal på $1,88 \text{ m}^2$. Beregningerne er udført for henholdsvis en trelags xenonrude i en traditionel trækarm og for det nye rudekoncept med 50 mm glasafstand og integreret ramme af træ. De resulterende beregnede U-værdier er vist i tabel 4.3.



Figur 4.4 Isothermforløb i vindue- og vægkonstruktion for henholdsvis en traditionel vinduesløsning og den alternative løsning med stor glasafstand.

Tabel 4.3 Beregnede U-værdier for de to vinduesløsninger inklusive 283 mm af den omkringliggende vægkonstruktion. U-værdien (U) er angivet i $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ og arealerne (A) er angivet i m^2 .

Vinduesløsning	Rude		Ramme/karm		Vindue		Væg		Total	
	A	U_c	A	U	A	U	A	U	A	U
3-lags xenon	1,31	0,50	0,57	1,98	1,88	1,07	1,88	0,40	3,75	0,73
3-lags luft	1,51	1,10	0,37	0,87	1,88	1,07	1,88	0,23	3,75	0,65

Det fremgår af ovenstående tabel, at på trods af den meget store forskel i rudernes center U-værdi ender begge vinduer med at have samme totale U-værdi. Den tykke vindueskonstruktion tillader en større kuldebroafbrydelse i væggen, hvorved der opnås en termisk bedre overgang fra væggens isoleringslag til vinduets, hvilket også fremgår af figur 4.4, hvor isotermerne kun i minde grad afbøjes. Resultatet bliver en væsentlig lavere total U-værdi for vindue + væg, som det fremgår af sidste kolonne i tabel 4.3.

Varmetabsmæssigt svarer den ikke forseglede tykke vinduesløsning altså til den forseglede løsning med xenon-fyldning. Dertil kommer, at det transparente areals andel af det totale vinduesareal er væsentlig større ved det nye vindueskoncept end ved den traditionelle løsning på grund af rammens integration i ruden.

Det ovenfor skitserede vindueskoncept med stor glasafstand har både termiske og holdbarhedsmæssige fordele fremfor traditionelle vinduer. Der er imidlertid 3 væsentlige hovedpunkter der kræver en nærmere undersøgelse og udvikling:

- 1) Er der risiko for kondensproblemer i ruden på grund af den meget lille luftudskiftning mellem glassene? Problemerne kan f.eks. tænkes at opstå på grund af døgnsvingninger i udeluftens temperatur og fugtindhold, hvorved luft, der siver ind mellem glassene ved afkøling af ruden om aftenen, indeholder så meget fugt, at der f.eks. tidligt om morgenen dannes dug indvendigt på rudens yderste glaslag. Foreløbige undersøgelser tyder på, at hvis der vælges et rammemateriale, der kan virke som en fugtbuffer, kan problemet undgås.
- 2) Luftudskiftningen må ikke give anledning til at støv og insekter trænger ind mellem rudens glaslag. Der skal beregnes og udvikles en optimal udformning af trykudligningsåbningen, der sikrer en tilstrækkeligt lille luftudskiftning ved pulserende vindpåvirkning samtidig med at der opnås en tilstrækkelig trykudligning ved temperaturstigninger. Åbningen skal forsynes med et meget effektivt filter, der let kan udskiftes.
- 3) Vinduesløsningen skal udvikles med hensyn til design, fastholdelse af glas og betjening, det vil sige, at ruden med den integrerede ramme skal åbne indad eller kunne vende 180° for pudsning af den udvendige rudeside.

Hele vindueskonceptet skal således optimeres teoretisk og praktisk, hvilket ligger ud over rammerne for dette projekt.

5. KONKLUSION

I nærværende projekt er der opbygget en model for på en entydig måde at kunne beskrive et vindues energibalance. Modellen er baseret på simulering af opvarmningsbehovet for 8 forskellige bygninger i henhold til nedenstående tabel 5.1. For hver enkelt bygning beregnes det årlige opvarmningsbehov, dels hvor alle vinduer antages at have et varmetab på 0 og en solenergitransmittans på 0 og dels med de faktiske vinduesdata. Forskellen i det årlige opvarmningsbehov mellem de to simuleringer angiver da det samlede vinduesareals energibalance, der omregnes til energibalancen pr. m² vinduesareal. Den resulterende energibalance udregnes som middelværdien af energibalancen for de 8 tilfælde.

Tabel 5.1 Oversigt over 8 bygningstyper anvendt til beregning af vinduers energibalance.

Bygningstype	Varmekapacitet	Orientering
Et-plans enfamiliehus (DS 418 huset)	Termisk tungt	Facader mod Syd/Nord
		Drejet 90°
	Termisk let	Facader mod Syd/Nord
		Drejet 90°
Midterlejlighed i boligblok (SBI 184 etageboligblok)	Termisk tungt	Facader mod Syd/Nord
		Drejet 90°
	Termisk let	Facader mod Syd/Nord
		Drejet 90°

Projektets målsætning om udvikling af vinduer med 30% bedre energibalance kræver en reference, der er valgt som et traditionelt trævindue fra Rationel Vinduer A/S monteret med en to-lags energirude fra Scanglas A/S med 18 mm argonfyldning og en lavemissionsbelægning. Energifalancen er for referenceruden beregnet til -50 kWh/m² vindue pr. år, d.v.s. at netto varmetabet gennem vinduet er 50 kWh/m² vindue pr. år. Vinduets totale U-værdi er beregnet og målt til ca. 1,4 W/(m² K).

Der er i projektet blevet udviklet en ramme/karmkonstruktion til traditionelle rudetyper, der opfylder målsætningen om 30% bedre energibalance sammenlignet med referencevinduet. Konstruktionen gør anvendelse af polystyrenisolering integreret i ramme/karmkonstruktionen uden at dennes dimensioner bliver væsentlig forøget. I samarbejde med Rationel Vinduer A/S og Scanglas A/S er der blevet fremstillet en prototype. Prototypens totale U-værdi er målt til ca. 1,2

W/(m² K), hvilket er lidt mindre end rudens center U-værdi. Prototypekonstruktionen er af Rational Vinduer A/S vurderet som produktionseget.

En række andre løsningsforslag til termisk set forbedrede vindueskonstruktioner beregnet for forseglede ruder er blevet behandlet teoretisk, med hovedvægten lagt på reduktion af ramme/karmarealet. Forskellige andre forslag viser således mulighed for opnåelse af 30% bedre energibalance gennem en kombination af reduceret ramme/karmareal og forbedret U-værdi for ramme/karmkonstruktionen.

De gennemførte simuleringer og analyser er samlet i en let overskuelig figur, der gør et muligt at give et overslag over forskellige vinduers resulterende energibalance baseret på de tidligere beskrevne forudsætninger.

De udførte analyser viser, at den relative lille glasafstand i forseglede ruder samtidig med anvendelsen af termisk godt ledende afstandsprofiler i rudernes kantforsegling gør det næsten umuligt at opnå en yderligere termisk forbedring af traditionelle vinduer. En forøgelse af glasafstanden vil føre til større risiko for brud på kantforseglingen og dermed kortere levetid. Som en del af projektet er der derfor skitseret et forslag til fremtidens vinduesløsning baseret på en trelagsrude, hvor rammen er integreret i ruden og således også virker som afstandsprofil. Glasafstanden er øget til ca. 50 mm, hvorved den traditionelle kuldebro i afstandsprofilet bliver elimineret. Hulrummet mellem rudens glaslag står i forbindelse med udeluften gennem en veldefineret trykudligningskanal forsynet med et effektivt støvfilter. Trykudligningen dimensioneres så kortvarige og kraftige påvirkninger fra vindstød kun medfører en meget begrænset luftudskiftning, mens langsommere trykændringer ved opvarmning/afkøling af luften mellem glassene udlignes effektivt.

Den skitserede vinduesløsning vil være kendetegnet ved at have en meget stor holdbarhed samt en samlet termisk ydelse, der er bedre end de bedste forseglede trelagsruder på markedet. Konceptet kræver yderligere undersøgelser blandt andet med hensyn til kondensrisiko mellem glassene, udformning af trykudligningen samt udvikling af beslag til betjening af vinduet.

6. LITTERATUR

- /1/ *DS 418 Beregning af bygningers varmetab. Tillæg omhandlende vinduer og yderdøre.* Dansk Standard, 1997.
- /2/ *tsbi3 brugervejledning.* Kjeld Johnsen, Karl Grau, Jørgen E. Christensen. SBI, 1993.
- /3/ *DS 418 Beregning af bygningers varmetab.* 5. udg. Dansk Standard 1986.
- /4/ *SBI-anvisning 184. Bygningers Energibehov.* Søren Aggerholm et al. SBI, 1995.
- /5/ *Therm. A PC Program for Analyzing Two-Dimensional Heat Transfer Through Building Products.* Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, USA, 1996.
- /6/ *WINDOW 4.1. A PC Program for Analyzing Window Thermal Performance in Accordance with Standard NFRC Procedures.* Arasteh, D.K. et al. LBL Report 35928, Lawrence Berkeley National Laboratory, USA.
- /7/ *CEN/TC 89 N 216 E rev. 10.1995: Windows and Doors - Thermal Transmittance - Calibrated and Guarded Hot Box Method - part 1.* 1995
- /8/ *Bygningsreglement.* Boligministeriet, Bygge- og Boligstyrelsen, København 1995.