

Silica aerogel-ruder i den danske boligmasse

En vurdering af energibesparelspotentialiet

Olaf Bruun Jørgensen



MEDDELELSE NR. 208

JULI 1989

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

FORORD

Denne rapport beskriver energibesparelspotentialiet ved anvendelse af højisolerende vinduer i den danske boligmasse og er en del af projektet "Højisolerende vinduer og skodder med transparent isolering (silica aerogel)", der udføres ved hhv. Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, og Varme- og Installationsteknik, TI. Projektet er finansieret af Energiministeriet og er en del af forskningsområdet: "Energianvendelse i bygninger" under ministeriets forskningsprogram EFP-87. Projektets journal-nr. hos SBI er 1213-701-01-02.

Undersøgelsen er udført på Laboratoriet for Varmeisolering med deltagelse af nedenstående medarbejdere:

Olaf Bruun Jørgensen, civilingeniør.

Casper Paludan-Müller, civilingeniør, lich. techn.

Svend Aage Svendsen, lektor, civilingeniør, lich. techn.

Grethe Larsen, sekretær.

Sally Lykke Høgsted, programmør (tegninger).

RESUMÉ

Det overordnede formål med den foreliggende rapport har været at beskrive det energibesparelspotentiale, der ligger i en udskiftning af alle vinduer i den danske boligmasse med højisolerende ruder med monolitisk silica aerogel, de såkaldte Airglass-ruder. Til det formål er først givet en beskrivelse af boligmassen gennem en række forskellige boligtyper inddelt efter art, alder og antal. Herefter følger en beskrivelse af de benyttede ruders udformning og optiske og varmeisolerende egenskaber. Disse egenskaber er baseret på både målte og teoretiske værdier. For Airglass-ruderne er bestemt en transmittans, der blot er 13 % mindre end transmittansen for almindelige 2-lags termoruder. Rudernes varmetabskoefficient varierer typisk mellem 0,6 og 0,8 W/m²K, idet der er taget hensyn til kuldebrovirkning i rudernes rand.

Efter ovenstående beskrivelse er de mulige energibesparelser beregnet, ligesom der er foretaget en vurdering af eventuelle komfortgener som følge af rudeudskiftningen. Undersøgelsen viser, at der ved en udskiftning af alle vinduer kan opnås en reduktion af energiforbruget til rumopvarmning på ca. 18 %. Besparelserne udgør typisk ca. 220 kWh/m² udskiftet rude, uafhængigt af boligens art og alder. Analyser vedrørende termisk komfort viser, at der ikke vil ske nogen forværring af det termiske indeklima i form af overtemperaturer, ligesom der praktisk talt ikke vil være kold nedfaldsluft ved vinduerne, idet disses indvendige middelloverfladetemperatur i vintermånederne vil variere omkring 18,5°C. Gennem omfattende EDB-simulering er herefter vurderet forskellige parametres indflydelse på energibesparelserne. Disse er bl.a. forskellige udformninger af rudernes kantkonstruktion, anvendelse af forskellige tykkelser af Airglass, etc. Til slut er foretaget en økonomisk vurdering, hvori den maksimale pris for Airglass-ruderne er bestemt således, at en udskiftning som den her beskrevne bliver rentabel.

SUMMARY

The main purpose of this rapport has been to describe the potential energy saving by replacing all windows in the Danish building stock by highly insulated windows with monolithic silica aerogel, the so-called Airglass-windows. For this purpose a description of the buildings is given by describing different types of buildings concerning type, age and number. A description is then given of the design of the applied windows and their optical and thermal insulating abilities. These characteristics are based on both measured and theoretical values. The transmittance of the Airglass-windows has been set to only 13 % less than the transmittance of ordinary double-pane windows. The heat loss coefficient of the windows typically varies between 0.6 and 0.8 W/m²K, when due consideration has been given to the cold bridges at the edge of the windows.

According to the building stock description the possible energy saving is calculated, and an evaluation of possible discomfort, due to the replacement of the windows has been made. The examination shows that by changing all windows a reduction of the energy consumption for room heating of 18 % can be obtained. Typically savings of 220 kWh per m² changed window, no matter the age and condition of the dwelling, can be expected. Analyses concerning the thermal comfort shows that there will be no aggravation of the thermal indoor climate concerning surplus heating. Furthermore draught from cold window surfaces practically will not occur, since the inside mean surface temperature of the windows in the wintertime will fluctuate around 18.5°C. An estimate of the influence of different parameters on the energy savings is made by extensive computer simulations. They include among other things different improvements of the construction of the edge of the windows, the use of different thicknesses of Airglass etc. Finally an economic evaluation is carried out, in which the maximum price of the Airglass-windows has been calculated, so that a replacement, as described here, becomes profitable.

INDHOLDSFORTEGNELSE

RESUMÉ

SUMMARY

1.	INDLEDNING	1
1.1.	Baggrund	1
1.2.	Formål	1
2.	BESKRIVELSE AF DEN EKSISTERENDE BOLIGMASSE	3
2.1.	Kildemateriale	3
2.2.	Boliger inddelt efter art, alder og antal	3
2.3.	Ækvivalente værdier for areal og varmetransmissionskoefficienter for forskellige bygningsdele.....	4
2.3.1.	Isoleringstilstand for den ældre boligmasse ...	5
2.3.2.	Varmetransmissionskoefficienter	5
2.3.3.	Varmetransmissionsarealer	12
2.3.4.	Godt og dårligt isolerede boliger	14
3.	BESKRIVELSE AF AIRGLASS	15
3.1.	Klarhed	15
3.2.	Soltransmittans	15
3.3.	Varmetransmissionskoefficient for Airglassruder	16
4.	BEREGNINGER	21
4.1.	EDB-model	21
4.2.	Beskrivelse af boligtyper	22
4.2.1.	Grundmodeller	22
4.2.2.	Energiforbrug og gratisvarme	23
4.3.	Airglass-ruder anvendt i hele boligmassen	23
4.3.1.	Mulige energibesparelser	24
4.3.2.	Termisk komfort	26
4.4.	Airglass-ruder anvendt som sekundære vinduer ..	34
4.4.1.	Mulige energibesparelser	35
4.5.	Parametervariationer	37
4.5.1.	Parameterændringer vedr. rudernes rand og geometri	38

4.5.2.	Optiske og varmetransmissionsmæssige variationer	42
4.5.3.	Bygningsorientering og skyggevirksomhed	45
5.	ØKONOMISK VURDERING	47
5.1.	Metode og forudsætninger	47
5.2.	Airglass-rudernes rentabilitet	48
6.	KONKLUSION	51
REFERENCER		53
APPENDIX		55
A1.	Kuldebrovirkning fra rudernes kantkonstruktion	57
A2.	Tilnærmelser ved beregning af Airglass-ruders transmittans	61
A3.	Forskningsudvalget for Energianvendelse i bygninger, april 1987	64

1. INDLEDNING

1.1. Baggrund

I de senere år er der gjort ihærdige anstrengelser for at forbedre vinduers varmetekniske egenskaber. Dette er især sket gennem "coatning" af glasset og gasfyldning af hulrummet i termoruder, ("energiruder"). Alligevel er det stadig gennem vinduerne, og især i nattetimerne, at en væsentlig del af varmetabet forekommer. Imidlertid er der nu mulighed for at forbedre vinduers varmetekniske egenskaber så meget, at det ikke af energisparehensyn bliver nødvendigt med meget små vinduesarealer.

Et nyt materiale, monolitisk silica aerogel, har nemlig så gode egenskaber med hensyn til soltransmission og isoleringsevne, at vinduer kan isoleres særdeles effektivt uden væsentlig reduktion af lys- og soltransmittansen. Airglass, som produktet kaldes, er på nuværende tidspunkt ikke tilstrækkelig transparent til at opfylde de "klarhedskrav", der stilles ved en evt. udskiftning af de eksisterende vinduer. Herudover sker der pga. lysspredning i Airglass'et en vis gul- eller blåfarvning af dette. Disse problemer vil dog ifølge producenterne kunne løses indenfor den nærmeste fremtid.

1.2. Formål

Dette projekt har til formål at undersøge, hvor store energibesparelser der kan opnås ved anvendelse af højisolerende Airglass-termoruder i den eksisterende boligmasse. Under forudsætning af at der opnås tilfredsstillende egenskaber for Airglass'et, mht. klarhed, beregnes de mulige energibesparelser ved en udskiftning af alle vinduer i den eksisterende boligmasse. Energibesparelsesmulighederne, hvis ikke der opnås ovennævnte egenskaber, vurderes desuden for "sekundære" vinduer (entré- og badeværelsesvinduer, ovenlys, etc.).

Det er også hensigten at undersøge, om disse højisolerende vinduer giver anledning til lokal diskomfort i form af for høje indetemperaturer, hvilket vil kræve en øget mekanisk ventilation.

2. BESKRIVELSE AF DEN EKSISTERENDE BOLIGMASSE

2.1. Kildemateriale

De her benyttede data til beskrivelse af den eksisterende boligmasse stammer fra en række rapporter udført ved Danmarks Statistik, Teknologisk Institut og DTH (Fysisk Laboratorium III og Laboratoriet for Varmeisolering). Det har for at undgå alt for mange beregninger været nødvendigt at formulere et begrænset antal typiske boliger, både hvad angår art og alder. Det er naturligvis umuligt i ét enkelt hus at beskrive, hvordan f.eks. alle parcelhuse fra perioden 1940 - '59 er udformet. Derfor bør de senere formulerede boligtyper ses som et udtryk for, hvordan en typisk "gennemsnitsbolig" ser ud.

De forskellige kildematerialer beskriver i grove træk boligmassen frem til 1981. Udformningen af de boliger, der er opført fra 1981 og frem til 1985, antages at opfylde de krav, der er formuleret i bygningsreglementet, [1], [2]. Antallet af opførte bygninger i 80-erne findes af [3].

2.2. Boliger inddelt efter art, alder og antal

For at lette beregningsarbejdet er de forskellige boligtyper i Danmark inddelt i 15 klasser efter hhv. art og alder. Den benyttede inddeling svarer til den i "Bygnings- og Bolig-Registret", [4], anvendte. Boligernes art beskrives gennem 3 typer, (A, B, C):

- A : parcel- og stuehuse
- B : række- og kædehuse
- C : etage- og flerfamilieboliger

Inddelingen i ovenstående 3 boligtyper kan ofte være temmelig problematisk, idet det for flere huses vedkommende kan være svært at afgøre, hvorvidt et hus er et etagebyggeri eller et rækkehus. Desuden er flere ældre parcelhuse i dag overtaget af kollektiver eller ombygget til ejerlejligheder. Ovenstående gruppering er derfor behæftet med en vis usikkerhed.

Udviklingen i den eksisterende danske boligmasse frem til 1985 beskrives gennem følgende 5 perioder:

- I : - 1939
- II : 1940 - 1959
- III : 1960 - 1969
- IV : 1970 - 1979
- V : 1980 - 1985

Antallet af boliger i hver af disse perioder findes vha. [5], der er opgjort pr. 1/1 - '81, samt [3], der er opgjort pr. 1/1 - '87. Det i [5] anførte antal boliger opført før 1939 reduceres svarende til antallet af nedrevne boliger mellem 1981 og 1985. Hermed fås en fordeling indenfor de valgte grupper som vist i tab. 2.1.

	I	II	III	IV	V	Sum
A	417208	157137	214364	239209	59316	1087234
B	33589	35440	28040	59219	11310	167598
C	461074	192889	149465	120281	49691	973400
Sum	911871	385466	391869	418709	120317	2228232

Tabel 2.1. Antal boliger i Danmark fordelt efter art og alder.

2.3. Ækvivalente værdier for areal og varmetransmissionskoefficient for forskellige bygningsdele

For at kunne bestemme det årlige energiforbrug til rumopvarmning er det nødvendigt med en detaljeret beskrivelse af boligmassens byggetekniske udformning. Da der kun udføres beregninger på én eller 2 boliger i hver af de i tab. 2.1 beskrevne boligtyper, er det nødvendigt at bestemme nogle typiske middelværdier for de forskellige komponenter i klimaskærmen.

Den eksisterende boligmasses klimaskærm er desværre kun beskrevet i meget ringe omfang, hvorfor der er stor usikkerhed på de her bestemte værdier. I [6] er udvalgt en række repræsentative huse for hver af de 15 boligtyper. Beboerne i hvert hus har udfyldt et spørgeskema, hvori boligens størrelse og isoleringsmæssige

stand bl.a. er beskrevet. Derudover er der i [7] og [8] angivet, hvordan hhv. ydervægge, lofter, gulve, vinduer, etc. typisk er opbygget.

2.3.1. Isoleringstilstand for den ældre boligmasse

Med udgangspunkt i ovenstående samt [1] er i afsnit 2.3.2 angivet typiske værdier for varmetransmissionskoefficienter for de relevante bygningskomponenter i hver af de 15 boligtyper. Med hensyn til vinduer, ydervægge og lofter er der især for ældre huse sket store forbedringer i form af opsætning af forsatsruder, udskiftning af 1-lags-ruder med 2- og 3-lags termoruder og efterisolering af hulmure og lofter.

For de ældre boligtyper er der derfor beskrevet to boliger i hver kategori, nemlig en godt, G, og en dårligt, D, isoleret bolig. Den dårligt isolerede bolig har en uisoleret hulmur som ydervæg og ét lag glas i vinduerne, mens den godt isolerede har en velisoleret hulmur og 2-lags termoruder. Disse to typer antages at være så udbredte, at de beskriver den ældre boligmasse på rimelig vis. For de dårligst isolerede huse er også gulve og lofter ringere isoleret end i de godt isolerede ditto. Den procentvise fordeling mellem hhv. godt og dårligt isolerede bygningskomponenter skønnes vha. [6], [7] og [8]. Der er i de senere beregninger set bort fra de såkaldte energiruder, idet disse endnu har begrænset udbredelse.

2.3.2. Varmetransmissionskoefficienter

Vinduer

Ved udskiftning af vinduer kan det især for ældre vinduer overvejes at udføre en del af de nye vinduer med et mindre ramme/karm-areal for derved dels at øge solindfaldet dels at få en mindre varmetabskoefficient, (Airglass-ruders isolans er større end karmtræts). Udskiftningen bør dog ikke ske i et sådant omfang og på en sådan måde, at bygningernes arkitektoniske udtryk ødelægges. Der er derfor i de senere beregninger antaget vindues-udformninger svarende til de allerede eksisterende. Vinduerne har typisk en udformning, som vist i fig. 2.1, idet

størrelsen dog kan variere en hel del. I fig. 2.1 er desuden angivet forholdet mellem rudernes perimeter og areal, der her er defineret som omkredsen af det enkelte stykke glas divideret med dettes areal.

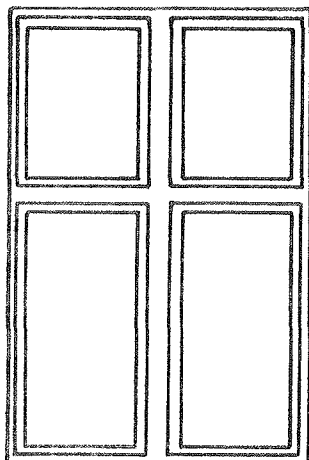
Vinduernes varmetabskoefficient afhænger af forholdet mellem glas- og ramme/karm-arealet. For at lette beregningerne antages følgende glasprocenter, [9], der gælder for alle boligtyper i hver af de 5 perioder:

I	:	glas-procent	=	55 %
II	:	-	=	65 %
III, IV, V	:	-	=	78 %

I tab. 2.2 er angivet U-værdier for hhv. "gode" og "dårlige" vinduer samt, i parentes, den procentvise fordeling af de forskellige U-værdier. Hvor intet andet er angivet, gælder U-værdier for alle boliger i den pågældende gruppe, (100). For 2-lags termoruder er angivet en U-værdi, der tager hensyn til kuldebrovirkningen fra afstandsprofilet mellem ruderne. Dette er nærmere beskrevet i appendix A1.

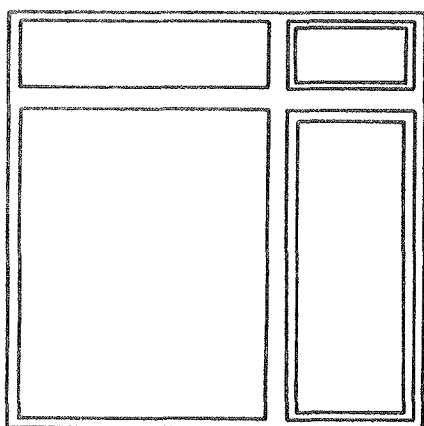
	I	II	III	IV	V
A	D 6,0 (20)	6,0 (6)			
	G 3,5 (80)	3,4 (94)	3,28	3,28	3,28
B	D 6,0 (20)	6,0 (6)			
	G 3,5 (80)	3,4 (94)	3,28	3,28	3,28
C	D 6,0 (30)	6,0 (10)			
	G 3,5 (70)	3,4 (90)	3,28	3,28	3,28

Tabel 2.2. U-værdier, $[W/m^2K]$, og disses procentvise andel for vinduer i den ekst. boligmasse.



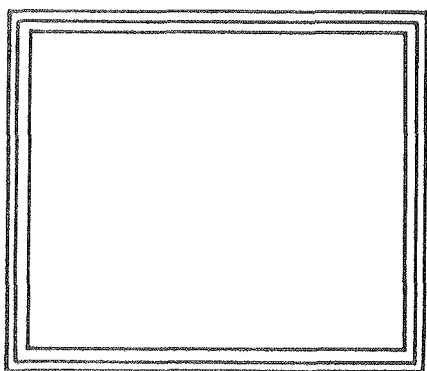
Typisk vinduesudformning for boliger opført i periode I (frem til 1939).

Det ved beregningerne benyttede perimeter/areal-forhold er 8,2.



Typisk vinduesudformning for boliger opført i periode II (1940 - 1959).

Det ved beregningerne benyttede P/A-forhold er 6,5.



Typisk vinduesudformning for boliger opført i perioderne III, IV og V (1960 - 1985).

Figur 2.1. Typiske udformninger og det dertil svarende perimeter/areal-forhold, P/A, for vinduer i dansk byggeri.

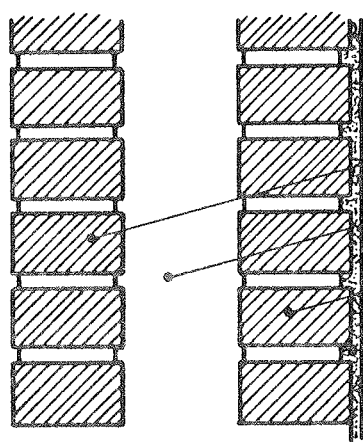
Ydervægge

Som allerede nævnt beskrives ydervægge ved 2 typer, nemlig en isoleret og en uisoleret væg. For parcelhuse benyttes i alle tilfælde hultmure med og uden isolering, mens der for rækkehuse og etageboliger desuden anvendes ydervægge opbygget som sandwichkonstruktioner med forskellige grader af isolering. Ydervægge i den danske boligmasse kan således i grove træk beskrives ved de i fig. 2.2 viste udformninger.

Hermed fås de i tab. 2.3 anførte U-værdier for hhv. gode og dårlige ydervægge.

		I	II	III	IV	V
A	D	1,41 (44)	1,41 (31)	1,41 (8)		
	G	0,38 (56)	0,38 (69)	0,38 (92)	0,35	0,35
B	D	1,41 (44)	1,41 (31)	1,41 (8)		
	G	0,38 (56)	0,38 (69)	0,38 (92)	0,38	0,35
C	D	1,41 (55)	1,41 (30)			
	G	0,38 (45)	0,38 (70)	0,38	0,35	0,35

Tabel 2.3. U-værdier, $[W/m^2K]$, og disses procentvise andel for ydervægge i den ekst. boligmasse.



Uisoleret hulmur

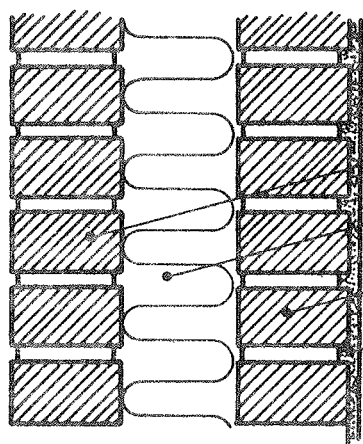
Formur, 11 cm tegl

Uisoleret hulrum, faste bindere

Bagmur, 11 cm tegl

Pudslag, 1 cm

Anvendes ved beregningerne i alt ældre byggeri med dårligt isolerede ydervægge.



Isoleret hulmur

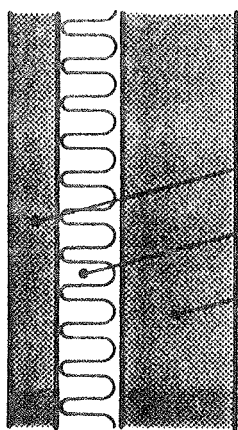
Formur, 11 cm tegl

Isoleret hulrum, varierende tykkelser

Bagmur, 11 cm tegl

Pudslag, 1 cm

Anvendes ved beregningerne i alle parcelhuse samt ældre rækkehuse og etageboliger med godt isolerede ydervægge.



Beton-element facade

Udvendig betonskive, 4 cm

Mineraluld, varierende tykkelser

Indvendig betonskive, 10 cm

Anvendes ved beregningerne i nyere rækkehuse og etageboliger.

Figur 2.2. Typiske ydervægskonstruktioner i den ekst. boligmasse.

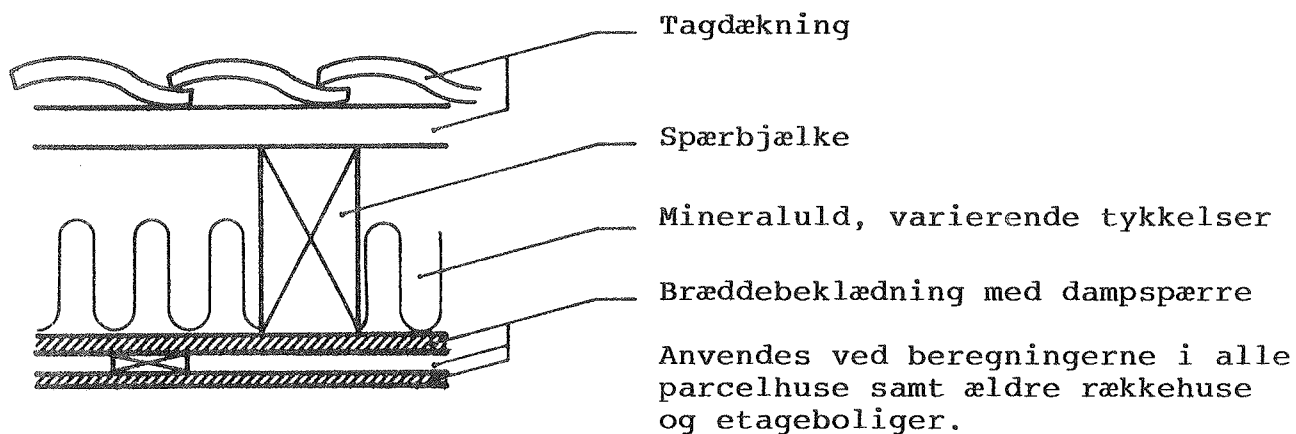
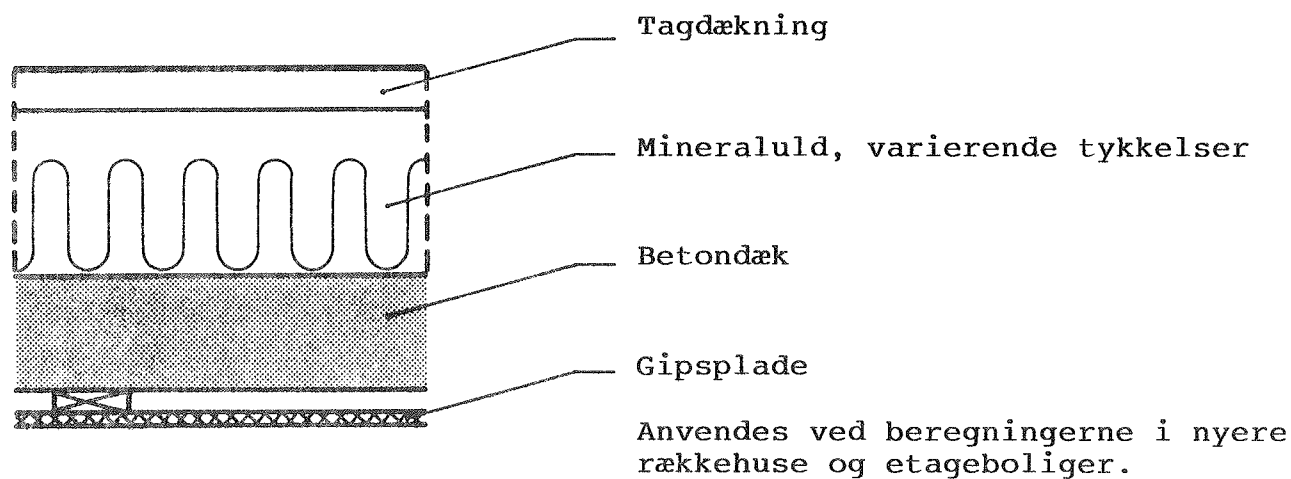
Tage og lofter

Tage og lofter er for alle parcelhuse og de fleste rækkehuse og etageboliger udført som spær bjælker med mere eller mindre isolering mellem disse: Underst en brædebeklædning og, afhængig af boligens alder, evt. en dampspærre, øverst en for den pågældende periode traditionel tagdækning. For rækkehuse og etageboliger anvendes desuden en konstruktion med, set indefra, en gipsplade, betondæk, isolering og yderst en traditionel tagdækning. De i beregningerne benyttede udformninger er i princippet opbygget som vist i fig. 2.3.

U-værdier for godt og dårligt isolerede tage og lofter er vist i tab. 2.4.

	I	II	III	IV	V
D	0,93 (46)	0,93 (24)	0,93 (6)		
A G	0,39 (52)	0,39 (76)	0,32 (94)	0,28	0,20
D	0,93 (46)	0,93 (24)	0,93 (6)		
B G	0,39 (52)	0,39 (76)	0,32 (94)	0,28	0,20
D	0,93 (39)				
C G	0,39 (61)	0,39 (76)	0,32	0,26	0,20

Tabel 2.4. U-værdier, $[W/m^2K]$, og disses procentvise andel for tage og lofter i den ekst. boligmasse.

Tag med træ-spærTag med betondæk

Figur 2.3. Typiske tag- og loftskonstruktioner i den ekst. boligmasse.

Terrændæk

Boligernes afgrænsning mod jord er for alle parcel- og rækkehuse beskrevet ved terrændæk. I en del boliger indgår imidlertid også enten krybekælder eller fuld kælder. Hvor dette er tilfældet er disses isolans medregnet ved bestemmelse af "terrændækkets" U-værdi. Det er i dette projekt ikke undersøgt, hvordan terrændæk i etagebyggeri er udformet, da disse ikke indgår i de i kap. 4.2.1. beskrevne lejlighedstyper. For parcelhuse og rækkehuse er benyttet 2 forskellige udformninger, som er vist i fig. 2.4.

I tab. 2.5 er vist U-værdier for de skitserede terrændæk.

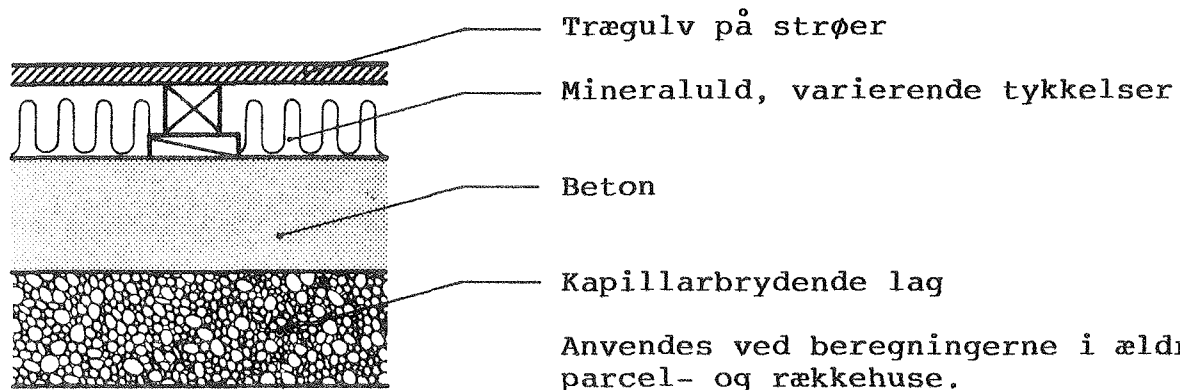
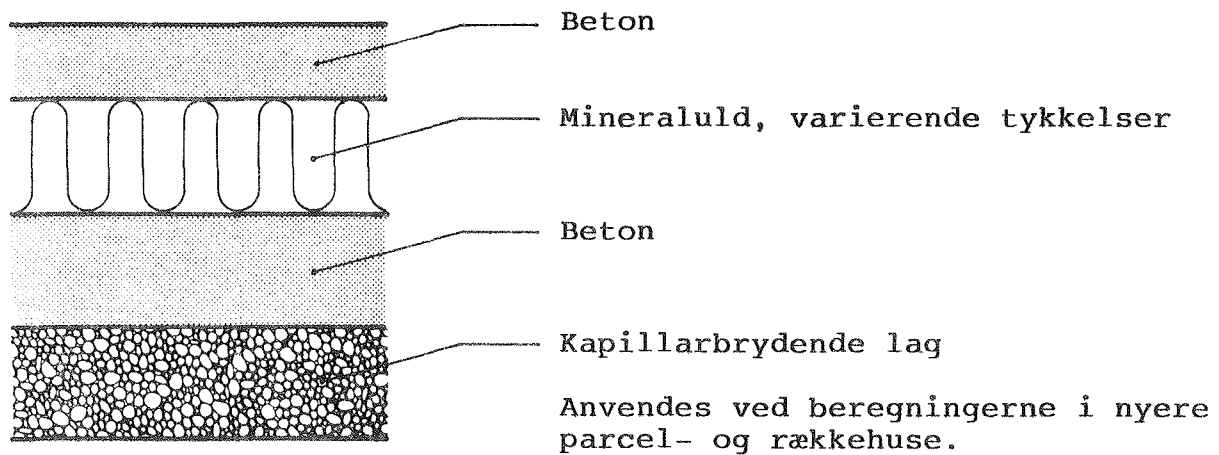
	I	II	III	IV	V
D	0,54 (76)	0,52 (59)	0,52 (23)		
A					
G	0,39 (24)	0,39 (41)	0,39 (77)	0,32	0,30
D	0,47 (76)	0,47 (59)	0,49 (23)		
B					
G	0,34 (24)	0,37 (41)	0,38 (77)	0,32	0,30

Tabel 2.5. U-værdier, $[W/m^2K]$, og disses procentvise andel for terrændæk for ekst. parcel- og rækkehuse.

Den store variation af værdierne i tab. 2.5 skyldes, at jordens isoleringsevne varierer kraftigt med boligens størrelse.

2.3.3. Varmetransmissionsarealer

En af de dårligst beskrevne parametre for den eksisterende boligmasse er arealet af de forskellige dele af klimaskærmen. De i beregningerne benyttede transmissionsarealer er for hovedparten baseret på de i [6] fundne værdier. I tab. 2.6 er angivet typiske værdier for vinduesarealerne i de forskellige boligtyper. Herudover er benyttet etage- og rumhøjder svarende til de for de aktuelle boligtyper typiske værdier, dvs. varierende mellem 2,3 og 3,1 m. Der er naturligvis stor usikkerhed på de benyttede middelarealer, men disse må alligevel betragtes som de bedst dokumenterede i det sparsomme kildemateriale.

Terrændæk m. trægulvTerrændæk m. betongulv

Figur 2.4. Typiske terrændæk for parcel- og rækkehuse i den ekst. boligmasse.

	I	II	III	IV	V
A	23,0	21,6	27,8	31,1	25,3
B	5,5	13,6	25,1	18,2	18,1
C	9,2	8,5	6,5	13,6	15,0

Tabel 2.6. Typiske vinduesarealer for de forskellige boligtyper.

2.3.4. Godt og dårligt isolerede boliger

Som allerede nævnt er der for flere boligtypers vedkommende behov for at udføre en beregning for både et velisoleret og et ringe isoleret hus. Det fremgår af tab. 2.2 - 2.5, at der for de forskellige bygningdele ikke er den samme fordeling mht. god og dårlig isolering. Der er for at undgå for mange beregninger derfor antaget den i tab. 2.7 viste generelle fordeling mellem godt, G, og dårligt, D, isolerede boliger. De angivne værdier er skønnet ud fra både fordelingen af og forskellen mellem de gode og dårlige U-værdier i tab. 2.2 - 2.5. Antallet af godt og dårligt isolerede boliger kan således findes vha. tab. 2.1 og 2.7.

		I	II	III	IV	V
A	D	30	28	10		
	G	70	72	90	100	100
B	D	30	28	10		
	G	70	72	90	100	100
C	D	35	11			
	G	65	89	100	100	100

Tabel 2.7. Procentvis fordeling mellem godt, (G), og dårligt, (D), isolerede boliger i forskellige boligtyper.

3. BESKRIVELSE AF AIRGLASS

For at kunne vurdere de energimæssige aspekter i anvendelsen af Airglass-termoruder, er det nødvendigt at beskrive disses optiske og varmetransmissionsmæssige egenskaber. De optiske egenskaber beskrives af hhv. lys- og soltransmittansen. Varmetransmissionskoefficienten beskrives gennem en U-værdi, der tager hensyn til kuldebroeffekten fra tætnings- og afstandsprofilet i randen af selve termoruden.

3.1. Klarhed

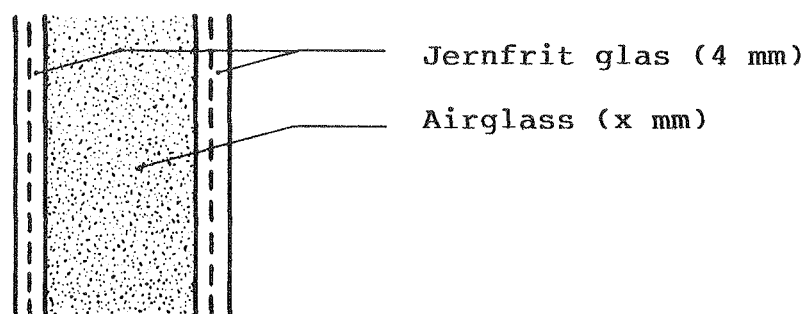
I sin nuyærende form er Airglass-ruder ikke i stand til at opfylde brugerens krav om tilstrækkelig klarhed. Dette skyldes en spredning af lyset ved passage gennem Airglass'et. Spredningen har 2 forskellige virkninger: Den væsentligste er, at Airglass'et endnu er af en sådan beskaffenhed, at det fremstår som svagt "mælket", hvorved motiver bag ruden vil være uskarpe. En anden mindre gene er, at der vil forekomme en svag gul- eller blåfarvning af, hvad der ses gennem ruden, afhængigt af om dettes baggrund er lys eller mørk. Den manglende klarhed er naturligvis uacceptabel, hvis vinduet skal erstatte de eksisterende 2- og 3-lags termoruder. Imidlertid forventes det fra producenternes side, at lystransmittansen kan forbedres så meget, at det vil blive attraktivt at producere disse Airglass-termoruder.

3.2. Soltransmittans

For at opnå status som alternativ til termoruder er det vigtigt, at rudernes soltransmittans er så stor, at en udnyttelse af solindfaldet er mulig.

Airglass-ruderne tænkes opbygget med 1 lag jernfrit glas på hver side af Airglass'et, se fig. 3.1. Der kan evt. benyttes hærdet glas for at undgå sprængning eller revnedannelser som følge af eventuelle større temperaturgradienter, der vil give træk- og trykspændinger i ruden. Lignende spændinger vil kunne optræde ved evakuering af Airglass'et. Det antages imidlertid, at spændingerne er så små, at sandwich-konstruktionen, som den

evakuerede Airglass-rude er, vil være stærk nok til at optage disse spændinger. Hvad enten der benyttes hærdet glas eller ej, er det af hensyn til maksimal soltransmission rimeligt at foreskrive brug af jernfrit glas. Hermed fremstår ruden som opbygget af 3 transparente lag. Den samlede transmittans kan således let beregnes, når Airglass'ets optiske parametre er kendt. De nødvendige parametre er brydningsindekset og ekstinktionskoefficienten.



Figur 3.1. Snit gennem Airglass-ruden.

Brydningsindex

I [10] er fastsat en densitetafhængighed af brydningsindekset for Airglass, nemlig:

$$n = 1,0 + 0,21 \cdot \rho$$

hvor ρ er Airglass'ets densitet.

For Airglass anvendt i termoruder vil densiteten typisk ligge i intervallet 75-140 kg/m³. Hermed fås et brydningsindeks på 1,02.

Ekstinktionskoefficient

For ekstinktionskoefficienten gælder, at denne afhænger stærkt af bølgelængden på det indfaldende lys. I [10] er vist måleresultater, der indikerer nedenstående sammenhæng mellem lysets bølgelængde, λ , og den dertil svarende ekstinktionskoefficient, K :

$$K = 2,6 \cdot 10^{-24} / \lambda \quad [\text{m}^{-1}]$$

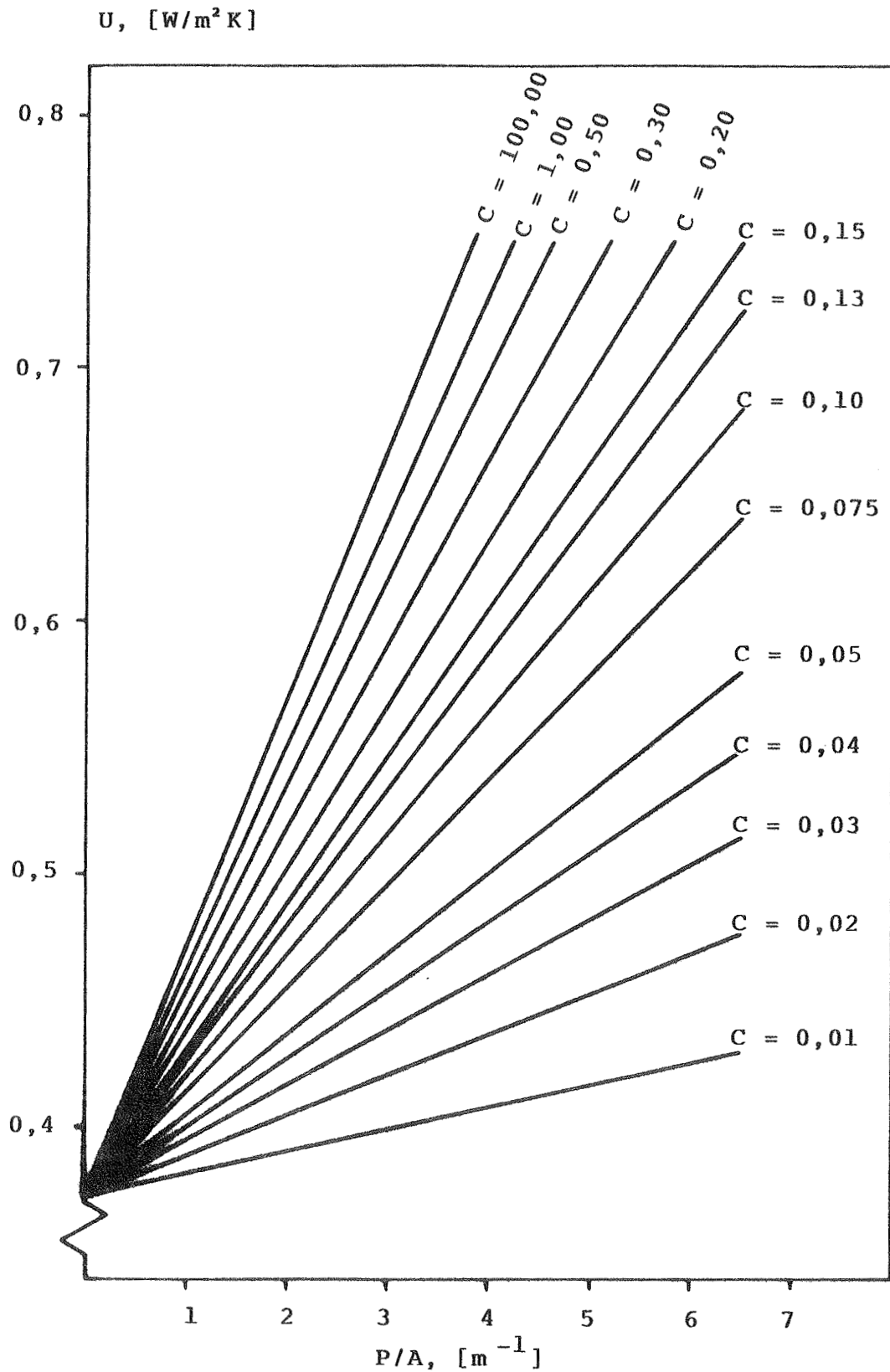
Ud fra ovenstående sammenhæng kan der ved brug af middelværdier for 20 "bølgebånd", der beskriver lysets spektralfordeling, fast-

sættes en middelektinktionskoefficient på $12,6 \text{ m}^{-1}$. Der er imidlertid ikke tale om en egentlig absorption i Airglass'et, men snarere en diffus spredning, Rayleigh-spredning. Det antages, at denne spredning er næsten 100 % diffus, hvorfor ca. halvdelen af den "absorberede" stråling transmitteres gennem Airglass'et, og resten reflekteres til omgivelserne. Hermed bliver den regningmæssige ekstinktionskoefficient ca. det halve af den ovenfor beregnede middelværdi. Forsøg udført ved Laboratoriet for Varmeisolering indikerer en værdi omkring $5,3 \text{ m}^{-1}$. På denne baggrund benyttes i de efterfølgende beregninger en ekstinktionskoefficient på 6 m^{-1} .

3.3. Varmetransmissionskoefficient for Airglass-ruder

Airglass-ruden kan udføres enten med evakueret eller uevakueret Airglass. I dette projekt benyttes evakueret Airglass, da dettes varmeledningsevne er næsten 3 gange mindre end det uevakuerede Airglass'. Varmeledningsevnen for evakueret Airglass ved temperaturer svarende til typiske danske klimaforhold er i [11] bestemt til $0,008 \text{ W/mK}$.

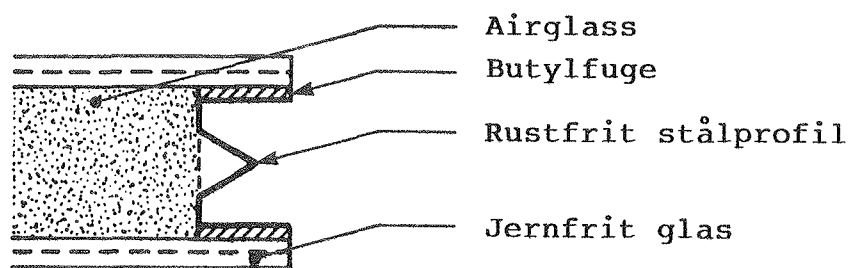
Ved opbygning af Airglass-termoruder vil der, pga. den kraftige kuldebrovirkning fra kantkonstruktionen, i selve ruden være tale om en mere eller mindre 2-dimensional varmestrøm. Dette betyder, at den lave varmeledningsevne ikke er tilstrækkelig til at bestemme rudens varmetransmissionskoefficient, U . Denne afhænger i høj grad af 2 andre størrelser, nemlig rudens perimeter/arealforhold, P/A , og kantprofilets varmetabskoefficient. Med udgangspunkt heri er der i [12] opstillet den i fig. 3.2 viste sammenhæng mellem P/A -forholdet, kantprofilets varmetabskoefficient pr. løbende meter, C , og den deraf følgende ækvivalente U -værdi for Airglass-ruden, U .



Figur 3.2. Ækvivalent U -værdi, $[W/m^2 K]$, for en Airglass-termorude som funktion af perimeter/areal-forholdet, P/A , og kantprofillets varmetabskoefficient pr. løbende meter, C , $[W/mK]$.

Det ses af fig. 3.2, at der således skal benyttes meget store rudearealer for at opnå U-værdier mellem 0,4 og 0,8 W/m²K, der må være målet, hvis Airglass-ruderne skal kunne konkurrere med de allerede eksisterende lavemissions-energiruder. Af figuren ses desuden, at den afgørende indflydelse på rudens ækvivalente U-værdi ligger i udformningen af kantkonstruktionen. Det er da også derfor, at der på LfV pt. arbejdes på at udvikle en kantkonstruktion med så lille varmetabskoefficient, at U-værdier indenfor intervallet 0,4 - 0,8 W/m²K bliver realistiske.

Af de hidtidige resultater virker en udformning som den i fig. 3.3 viste umiddelbart som den mest lovende; både fordi den har en lav varmetabskoefficient og forventes at kunne udføres tilstrækkeligt tæt, og fordi den vil være relativt enkel at udføre.



Figur 3.3. Kantkonstruktion i Airglass-ruder som i dag virker mest lovende.

Den viste kantkonstruktion har en varmetabskoefficient pr. løbende meter, C, på 0,13 W/mK, se appendix A1. Hermed kan den ækvivalente U-værdi for Airglass-termoruder for forskellige værdier af P/A bestemmes vha. fig. 3.2.

Da vinduers perimeter/areal-forhold varierer meget med vinduets størrelse, vil der være tale om en lang række forskellige U-værdier for hver bolig. For at lette beregningerne er der derfor benyttet én P/A-værdi for hver boligtype. Den benyttede P/A-værdi er vist i fig. 2.1. Hermed fås de i tab. 3.1 viste U-værdier for Airglass-termoruder anvendt i den ekst. boligmasse, idet der benyttes samme værdi i hver af de 3 boligtyper (parcelhuse, rækkehuse, etageboliger).

	I	II	III	IV	V
$P/A, [m^{-1}]$	8,2	6,5	4,2	4,2	4,2
$U, [W/m^2K]$	0,82	0,72	0,6	0,6	0,6

Tabel 3.1. P/A-forhold og ækvivalent U-værdi for Airglass-termoruder.

Ved erstatning af eksisterende ruder med Airglass-ruder kan det i flere tilfælde være nødvendigt at opbygge nye ramme/karm-profiler af hensyn til en eventuelt større afstand mellem glassene. For ikke at ødelægge bygningernes arkitektoniske udtryk antages ændringerne kun at forekomme i "dybden" af ramme/karm-profilerne. Herved sker der ingen ændringer af facadens "ansigt", og der vil derfor være samme forhold mellem rudernes perimeter og areal før og efter udskiftningen.

4. BEREGNINGER

De energibesparelsmuligheder, der ligger i en udskiftning af vinduer i den eksisterende boligmasse, er vurderet vha. et EDB-program. Undersøgelsen er baseret på beregning af det årlige energiforbrug til rumopvarmning for alle de i afsnit 2.2. beskrevne boligtyper. I de efterfølgende beregninger omtales både totale og "normerede" energibesparelser. De totale besparelser, Q_b , bestemmes som forskellen mellem energiforbruget før, Q_f , og energiforbruget efter, Q_e , en udskiftning med Airglass-ruder. Den "normerede" besparelse, q_b , udtrykker besparelsen pr. m^2 udskiftet rude:

$$q_b = \frac{Q_f - Q_e}{A_{rud}}$$

hvor A_{rud} er rudearealet i den pågældende boligtype. Endelig omtales også den relative besparelse, R , der er defineret ved:

$$R = \frac{Q_f - Q_e}{Q_f}$$

4.1 EDB-model

Det anvendte EDB-program, "SUNCODE", [13], [14], kan simulere varmestrømme, temperaturforhold, etc., i løbet af et "normal-år". De benyttede vejrdata stammer fra det danske referenceår, TRY, [15]. "SUNCODE" er en PC-version af det amerikanske "main-frame" program "SERI-RES", og er baseret på et termisk netværk, hvor diverse temperaturer bestemmes som timemiddelværdier ved en explicit metode.

Programmet "SUNCODE" er valgt, fremfor "TSBI" og "BLAST", da det dels er betydeligt mere avanceret end "TSBI" i dettes nuværende form, og dels meget mere brugervenligt end "BLAST". Ved simuleringen opdeles boligen i flere zoner, hvorved det bliver muligt at vurdere de interne varmestømme fra f.eks. sydvendte til nordvendte rum. Ydermere beskrives bygningens termiske masse meget detaljeret. Resultater fra beregninger med "SUNCODE" har vist sig at give udmærket overensstemmelse med måleresultater i andre projekter udført ved LfV, [6], [14], [16].

Ved beregningerne er det antaget, at diverse varmetabskoefficienter er uafhængige af temperaturforholdene. Dette er især for Airglass-ruderne en noget grov simplificering, da varmestraling gennem Airglass afhænger af glassenes temperatur. Inden for det temperatur-interval, der er relevant for boligmassen, er variationerne dog af mindre betydning. Der er desuden pga. mangler ved "SUNCODE" benyttet visse tilnærmelser og "tricks" i forbindelse med beregning af soltransmission gennem Airglass-ruderne. Disse er nærmere beskrevet i appendix A2.

4.2 Beskrivelse af boligtyper

Beregningen af den ekst. boligmasses energiforbrug er baseret på 3 forskellige boligtyper, der hver især principielt er ens i hver af de allerede beskrevne opførelsesperioder. De eneste variationer fra periode til periode er boligens isoleringstilstand, dens størrelse, antallet og placeringen af vinduer samt boligens orientering. De 3 forskellige grundmodeller er beskrevet nedenfor.

4.2.1 Grundmodeller

Parcelhuse

Alle parcelhuse betragtes som rektangulære ét-plans huse inddelt i 4 zoner. Zonerne udgør hver sit "hjørne" af huset. Der forekommer varmetab gennem alle boligens begrænsningsflader.

Rækkehuse

Rækkehusene beskrives som rektangulære ét-plans huse inddelt i 2 zoner. Zonerne er overvejende nord- eller sydvendte. Boligen afgrænses i "siderne" af tilsvarende boliger, og der forekommer derfor kun varmetab gennem de 2 "nord- og sydvendte" facader samt gulv og loft.

Etageboliger

Alle etageboliger betragtes som rektangulære ét-plans lejligheder inddelt i 2 lige store zoner (nord- og sydvendte). Under og ved siden af lejligheden findes tilsvarende boliger, hvorfor

der kun sker varmetab gennem de 2 facader og loftet. Denne antagelse er baseret på, at ca. halvdelen af alle etageboliger er "pakket ind" mellem andre lejligheder, og således kun har tab gennem de 2 frie facader. Typiske varmetab opnås derfor ved også at regne med varmetab gennem loftet.

4.2.2 Energiforbrug og gratisvarme

Gratisvarmetilskud til boligerne kommer dels som solindfald, dels fra personer, belysning, etc. Solstråling gennem vinduer fordeles til boligen som angivet i [17]. Det antages, at halvdelen af den absorberede solstråling tilføres møbler o.lign., og pga. disses lave varmekapacitet og store overfladeareal afgives varmen umiddelbart efter til rumluften. Den anden halvdel overføres til boligens termiske masse.

Den konvektive varmeudveksling gennem døråbninger mellem "varme" og "kolde" zoner er beregnet som beskrevet i [18].

Gratisvarmebidraget til boligen fra personer, belysning, etc. bestemmes som vist i [19], idet det gennemsnitlige antal beboere fremgår af [5]. For de 3 boligtyper fås bidrag på hhv., A: 16 kWh/døgn, B: 15 kWh/døgn, C: 13 kWh/døgn.

En del af de velisolerede boliger opvarmes af et radiatorsystem således, at en rumlufttemperatur på 20°C sikres fra kl. 6 om morgenen til kl. 10 om aftenen. I nattetimerne er temperaturen mindst 17°C. I alle de øvrige boliger opvarmes i fyringssæsonen til 20°C hele døgnet. Hvis rumlufttemperaturen overstiger 24°C ventileres med udeluft, såfremt denne er koldere end indeluften.

4.3 Airglass-ruder anvendt i hele boligmassen

En udskiftning af alle ekst. vinduer giver mulighed for meget store energibesparelser. Disse er vurderet i det følgende. En sådan udskiftning indebærer desuden en vis risiko for overophedning og dermed termisk diskomfort, hvorfor også risikoen herfor er vurderet.

4.3.1 Mulige energibesparelser

Energiforbruget til rumopvarmning i den eksisterende boligmasse er beregnet til 36,1 TWh/år. Den store usikkerhed herpå taget i betragtning sandsynliggør den i kap. 2 beskrevne udformning af den danske boligmasse, da det beregnede energiforbrug er af samme størrelsesorden som det af Energistyrelsen oplyste, [20].

De mulige energibesparelser ved en udskiftning af samtlige vinduer i den eksisterende boligmasse er beregnet for hver af de 15 boligtyper. Resultaterne er angivet i tab. 4.1. Den totale besparelse udgør ca. 6,5 TWh/år, hvilket svarer til en reduktion af energiforbruget til rumopvarmning på 18 %. Beregningerne viser desuden, at langt de største besparelser opnås ved en udskiftning af ruder i parcelhuse.

	I	II	III	IV	V	Sum
A	1570	648	1024	1237	250	4729
B	29	92	118	180	33	452
C	706	245	156	250	111	1468
Sum	2305	985	1298	1567	394	6549

Tabel 4.1. Totale energibesparelser, [GWh/år], ved en udskiftning med Airglass-ruder i hele den ekst. boligmasse.

Den forventede gennemsnitlige energibesparelse for hver enkelt bolig, hvad enten denne er godt isoleret eller ej, er angivet i tab. 4.2. Tilsvarende er i tab. 4.3 vist, hvor store relative besparelser der kan opnås. Den enkelte boligejer kan således vha. tab. 4.2 og 4.3 vurdere, hvorvidt en udskiftning af ruder energimæssigt vil være interessant.

Af tab. 4.3 ses, at de største relative besparelser opnås for nye etageboliger, hvilket skyldes de enkelte bygningsdeles høje isoleringsstandard, og dermed boligens meget lave specifikke varmetab pr. m² gulvareal.

		I	II	III	IV	V
A	D	6034	6802	5362		
	G	2791	3079	4713	5172	4212
B	D	1434	4284	4733		
	G	634	1947	4141	3043	2916
C	D	2345	2564			
	G	1093	1109	1041	2078	2241

Tabel 4.2. Gennemsnitlig energibesparelse, [kWh/år], ved en udskiftning med Airglass-ruder i forskellige boligtyper.

		I	II	III	IV	V
A	D	12	14	12		
	G	13	16	25	29	28
B	D	7	16	16		
	G	7	16	32	30	34
C	D	14	22			
	G	16	30	22	42	44

Tabel 4.3. Relative besparelser, [%], ved en udskiftning med Airglass-ruder i forskellige boligtyper.

Et nøgletal ved vurdering af rentabiliteten af en forbedring af klimaskærmen, som den her beskrevne, er, hvor store besparelser der kan forventes pr. m² udskiftet rude. Disse besparelser er vist i tab. 4.4. Heri er desuden i parentes angivet de mulige energibesparelser for en del af boligerne, hvis vinduerne i stedet blev udskiftet med "energiruder". Det fremgår af tabellen, at der for ældre dårligt isolerede boliger med 1 lag glas, ligegyldigt hvilken boligtype der er tale om, kan opnås endog særdeles store besparelser ved en udskiftning med Airglass-ruder.

	I	II	III	IV	V
A	D 475 (361)	486	221		
	G 220	220	228 (112)	221 (109)	211 (110)
B	D 478 (363)	481	243		
	G 211	219	245 (96)	219 (112)	203
C	D 469 (357)	466			
	G 219	202	208 (105)	204 (102)	187

Tabel 4.4. Mulige energibesparelser, [kWh/m²år], pr. m² udskiftet Airglass- og i parentes "energirude".

Besparelsen for ældre dårligt isolerede boliger udgør over 450 kWh/m²år, mens der for stort set alle godt isolerede boliger er tale om besparelser på over 200 kWh/m²år. Dette tal er af samme størrelsesorden som de energibesparelser, der kan forventes ved brug af solvægge med dæklag opbygget af Airglass-termoruder, [21]. Forskellen er imidlertid, at besparelsen på over 200 kWh/m²år ved brug af solvægge i eksisterende boliger kun kan opnås for dårligt isolerede boliger, hvorimod Airglass-ruderne giver samme besparelse uafhængigt af boligtypen.

4.3.2 Termisk komfort

Hvis alle vinduer i en bolig udskiftes med Airglass-ruder, er der pga. disses meget høje isolans risiko for overtemperaturer i boligen. Denne risiko er størst i velisolerede boliger, hvorfor problemerne med termisk diskomfort i form af overtemperaturer primært er analyseret for boliger opført i 80'erne.

Der vil derimod kunne forventes en positiv effekt af vinduesudskiftningen i form af højere overfladetemperaturer på indersiden af vinduerne, hvorved strålingstemperatursymmetrien vil blive begrænset. Dette vil især kunne observeres i ældre boliger med kun 1 lag glas i vinduerne samt i boliger med store vinduesarealer.

Overtemperaturer

Termisk diskomfort undgås ved bortventilering af den varme indeluft. Dette kan ske enten ved åbning af vinduer eller ved mekanisk ventilation, hvilket i den danske boligmasse endnu kun eksisterer i begrænset omfang.

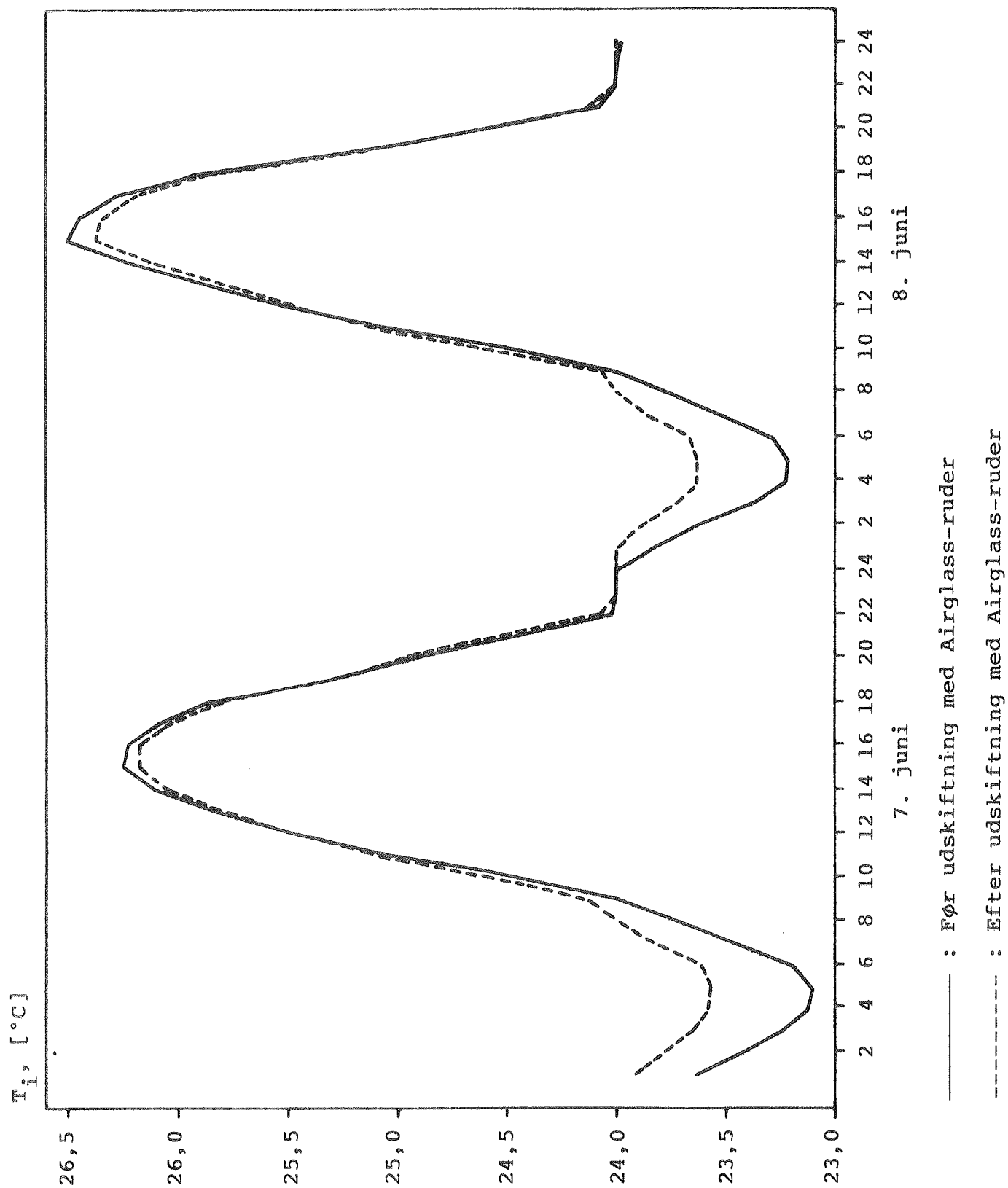
Det er her undersøgt, om en udskiftning med Airglass-ruder reducerer varmetabet så meget, at det i meget solrige perioder bliver problematisk at bortventilere den varme indeluft således, at den termiske komfort kan genoprettes. Ventilationen sker som nævnt ved åbning af vinduer, idet luftskiftekoeficienten i EDB-simuleringerne sættes til 3,0 pr. time, når middel-indeluft-temperaturen, T_i , overstiger 24°C . Vurderingen er foretaget ved at sammenligne indelufttemperaturen i forskellige boliger før og efter en udskiftning med Airglass-ruder.

En særlig varm og solrig periode er ifølge [15] dagene omkring d. 7/6 og 8/6, hvor udeluftens temperatur i dagtimerne er så høj ($20 - 25^{\circ}\text{C}$), at en ventilation med udeluft ikke vil reducere eventuelle overtemperaturer i boligen væsentligt. Indelufttemperaturens variation over døgnet før og efter en udskiftning med Airglass-ruder i et sydvendt rum med et vinduesareal på $0,14 \text{ m}^2/\text{m}^2$ gulvareal er for et nyere velisoleret parcelhus vist i fig. 4.1. Tilsvarende er indelufttemperaturens variation for en etagebolig vist i fig. 4.2.

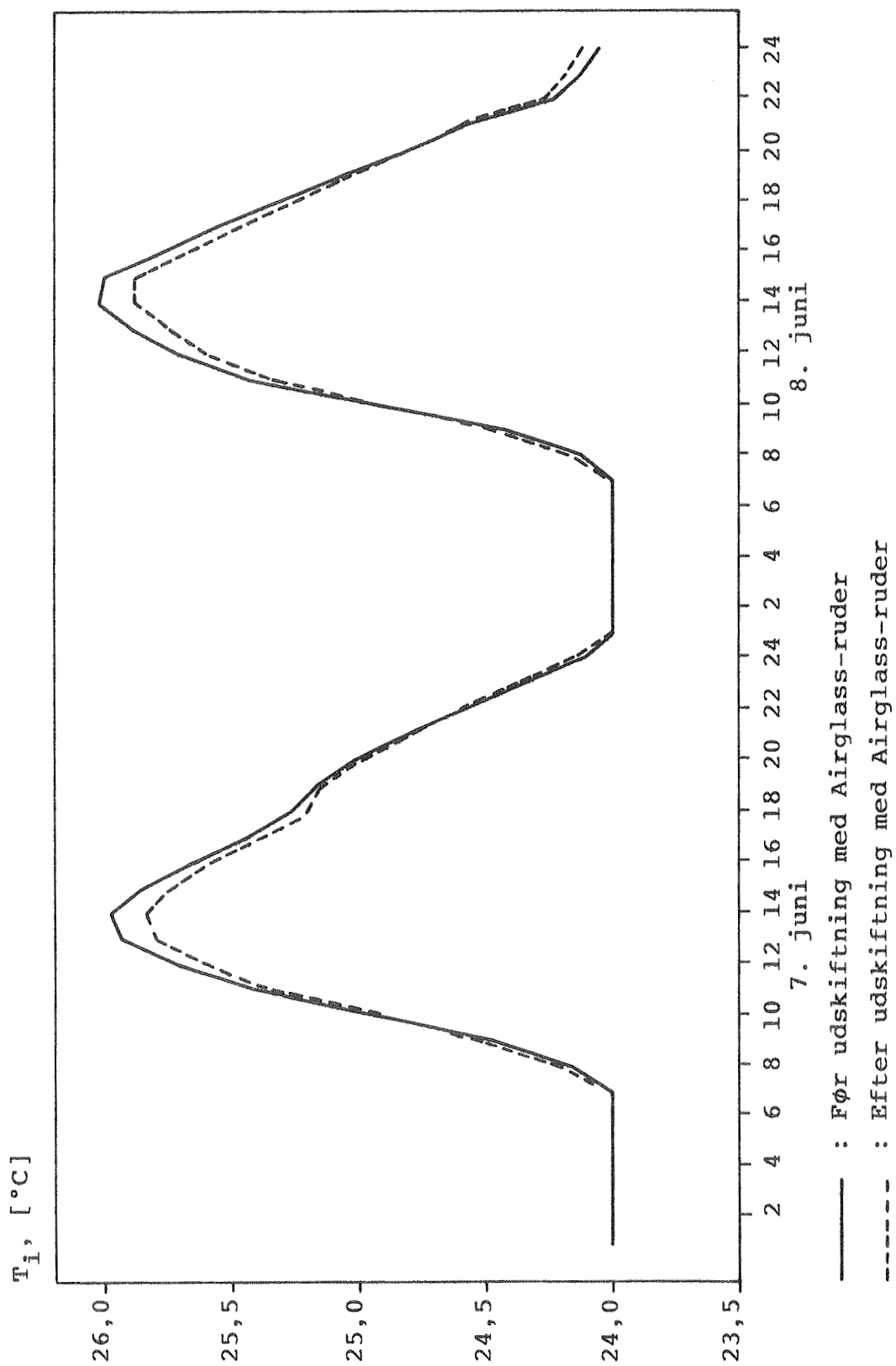
Det ses af fig. 4.1 og 4.2, at der som forventet vil opstå termisk diskomfort i form af overtemperaturer både i boliger med alm. termoruder og i boliger med Airglass-ruder. Det ses imidlertid også, at de maksimale indetemperaturer i boliger med Airglass-ruder bliver mindre end i boliger med alm. 2-lags termoruder, hvilket skyldes Airglass-rudernes mindre soltransmittans.

Beregningerne viser, at der ved en udskiftning med Airglass-ruder ikke sker en forværring af det termiske indeklima, da den relative reduktion af boligens specifikke varmetab, $\Delta(U \cdot A)'$, svarer til den relative reduktion af den indfaldende solstråling, $\Delta(q_{\text{sol}})'$. Disse ændringer er alle på ca. 13 %.

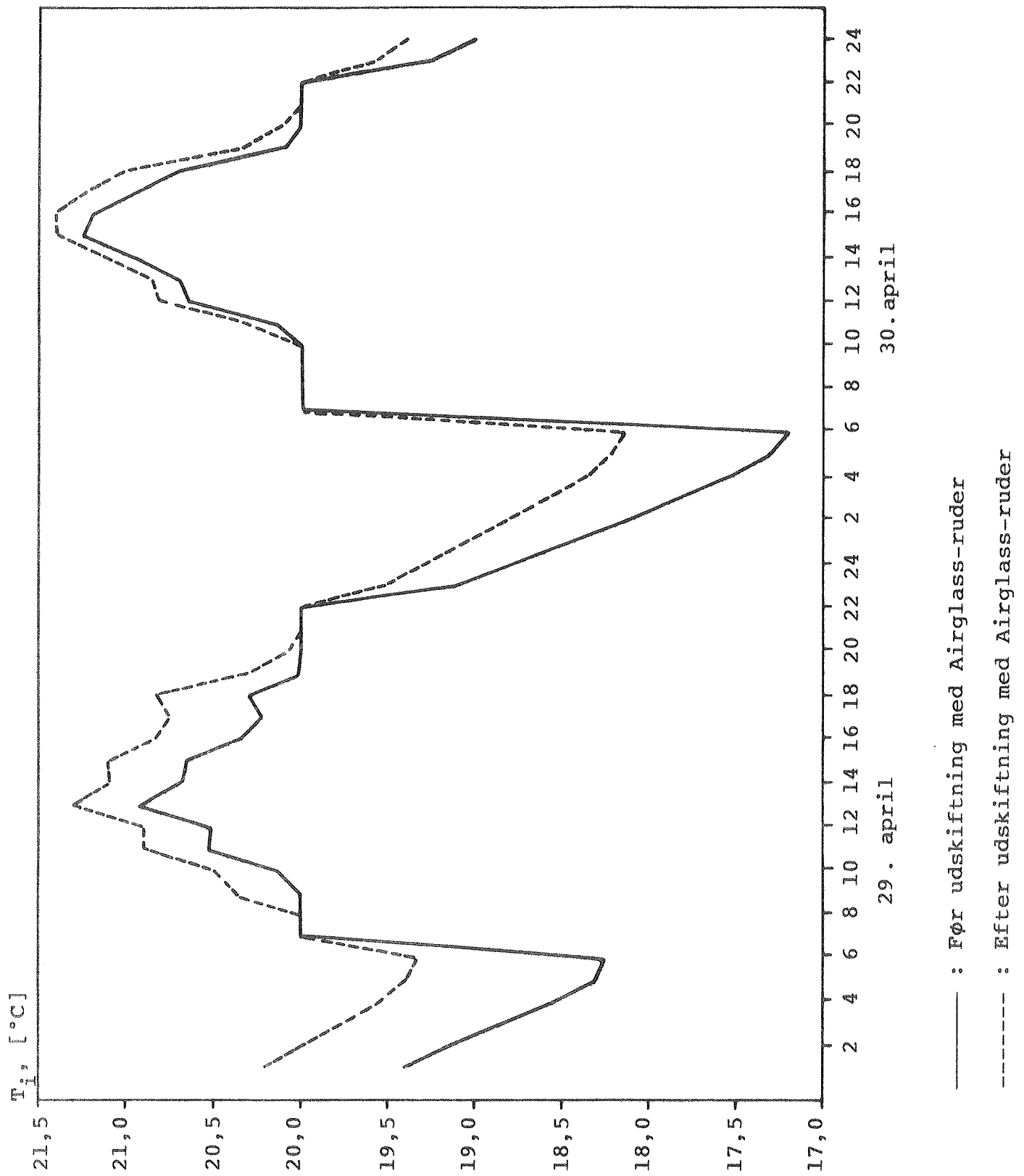
Det er desuden undersøgt, om andre perioder med stærk sol vil give anledning til overtemperaturer. Den valgte periode er slutningen af april, hvor udetemperaturen er så høj, at risikoen for overtemperaturer er til stede. Udeluftens temperatur i dagtimerne er her så lav ($3 - 9^{\circ}\text{C}$), at indetemperaturer over 24°C let vil kunne undgås ved blot at åbne nogle vinduer. Indeluftens temperaturvariationer i parcelhuse og etageboliger i et sydvendt rum i denne periode er vist i fig. 4.3 og 4.4.



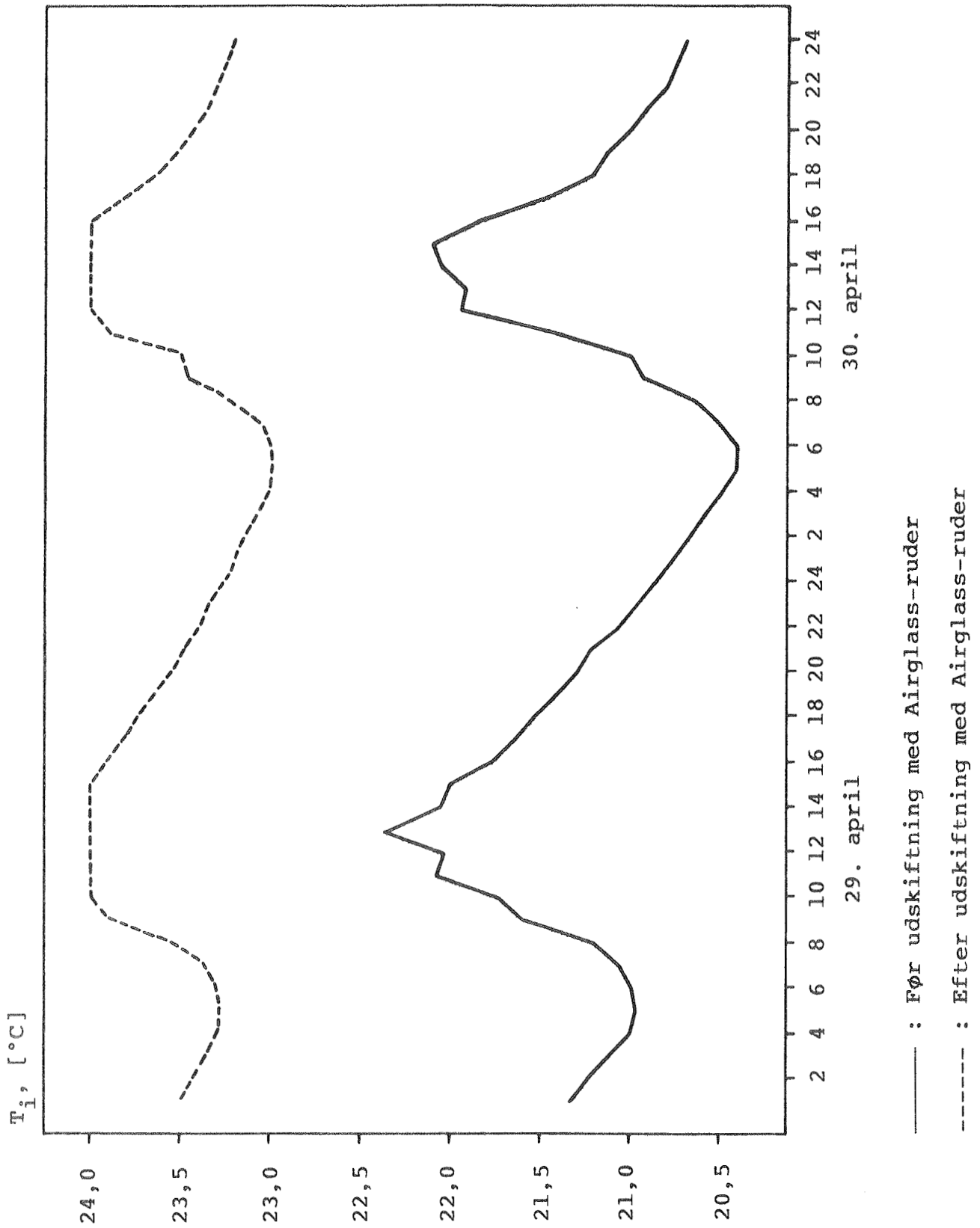
Figur 4.1. Middel-indelufttemperaturens, T_i , variation i starten af juni i et parcelhus fra 80'erne.



Figur 4.2. Middel-indelufttemperaturens, T_i , variation i starten af juni i en etagebolig fra 80'erne.



Figur 4.3. Middel-indelufttemperaturens, T_i , variation i slutningen af april i et parcelhus fra 80'erne.



Figur 4.4. Middel-indelufttemperaturens, T_i , variation i slutningen af april i en etagebolig fra 80'erne.

Det ses af fig. 4.3, at den maksimale indetemperatur i parcelhuse i denne periode bliver ca. $21,4^{\circ}\text{C}$, og højst $0,4^{\circ}\text{C}$ større end indetemperaturen i en bolig med alm. 2-lags termoruder. Der vil altså ikke ske nogen væsentlig forringelse af det termiske indeklima og slet ikke opstå termisk diskomfort.

Af fig. 4.4 ses derimod, at der i etageboliger er stor forskel på indetemperaturen, alt efter om der benyttes Airglass- eller alm. 2-lags termoruder. Den maksimale indetemperatur i boligen med Airglass-ruder bliver $24,0^{\circ}\text{C}$, hvilket er mindst $1,6^{\circ}\text{C}$ mere end i boligen med alm. 2-lags termoruder. Denne temperatur opnås i 5 timer fra kl. 10^{00} til kl. 15^{00} , hvor der således vil være behov for bortventilering af den varme indeluft.

Den relative reduktion af solindfaldet ved en udskiftning med Airglass-ruder er ens for både etageboliger og parcelhuse. At det i etageboliger i modsætning til parcelhuse alligevel bliver nødvendigt at ventilere for overtemperaturer i april skyldes, at den relative reduktion af det specifikke varmetab pr. m^2 boligareal for etageboligen er betydeligt større end for parcelhuset. Dette betyder, at selv perioder med solindfald som f.eks. sidst i april (75 % af juni-solindfaldet) i nogle tilfælde kan give anledning til overtemperaturer. En anden årsag til overtemperaturerne er, at varmetilskuddet fra lys, el, personer, etc., der er ens i de 2 boliger, i etageboligen udgør så stor en del af varmebehovet, at den for meget tilførte varme ikke kan fjernes ved transmission og infiltration alene, men må fjernes ved en forøget ventilation, f.eks. ved åbning af vinduer.

Beregninger for boliger opført før 1980 viser, at disses specifikke varmetab er så store, at der kun er tale om et forringet termisk indeklima i ganske få dage om året og vel at mærke kun i mindre, nyere boliger.

Strålingstemperatursymmetri

I eksisterende boliger med dårligt isolerende ruder eller store vinduesarealer vil der ofte kunne optræde strålingstemperatursymmetri i nærheden af vinduerne pga. disse ruders meget lave indvendige overfladetemperatur. Denne termiske diskomfort kom-

penserer beboerne ofte for ved at øge rumtemperaturen og dermed energiforbruget. Dette forøgede energiforbrug er pga. vanskelighederne ved beskrivelsen af omfanget heraf ikke medtaget i dette projekt.

Beregninger viser, at den ovenfor omtalte strålingstemperatur-asymmetri ved en udskiftning med Airglass-ruder vil reduceres væsentligt. Rudernes indvendige middelloverfladetemperatur i vintermånederne vil ligge omkring $18,5^{\circ}\text{C}$ i modsætning til 1-lags rudernes $5,5^{\circ}\text{C}$ og 2-lags rudernes $12,2^{\circ}\text{C}$. Til sammenligning kan nævnes, at middelloverfladetemperaturen på indersiden af de såkaldte "energiruder" med gasfyldning og lavemissionsbelægning i vintermånederne vil variere omkring $15,5^{\circ}\text{C}$.

En udskiftning med Airglass-ruder vil således kun give anledning til termisk diskomfort i korte perioder af året, og kun i en lille del af den eksisterende boligmasse. For en stor del af boligmassen vil der oven i købet blive tale om et forbedret indeklima i form af mindre maximumtemperaturer i løbet af døgnet, ligesom strålingstemperaturasymmetri praktisk talt ikke vil forekomme. Sidstnævnte vil desuden, da det ikke vil være nødvendigt af komfortsyn at hæve rumtemperaturen, medvirke til en reduktion af energiforbruget.

4.4 Airglass-ruder anvendt som sekundære vinduer

Hvis det ikke lykkes at fremstille Airglass-ruderne, så de bliver tilstrækkeligt klare til at kunne erstatte de nuværende termoruder, er det undersøgt, hvor store besparelser der kan forventes ved anvendelse af Airglass-ruderne som sekundære vinduer. Disse kan f.eks. være ovenlys, entré- og badeværelsesvinduer samt en del vinduer, hvis primære opgave er at give lys i boligen. De sekundære vinduer skønnes at udgøre nedenstående andele af boligernes vinduesarealer:

parcelhuse : 1/2-delen af de nordvendte vinduer

etage- og

rækkehuse : 1/4-del af de nordvendte vinduer.

4.4.1 Mulige energibesparelser

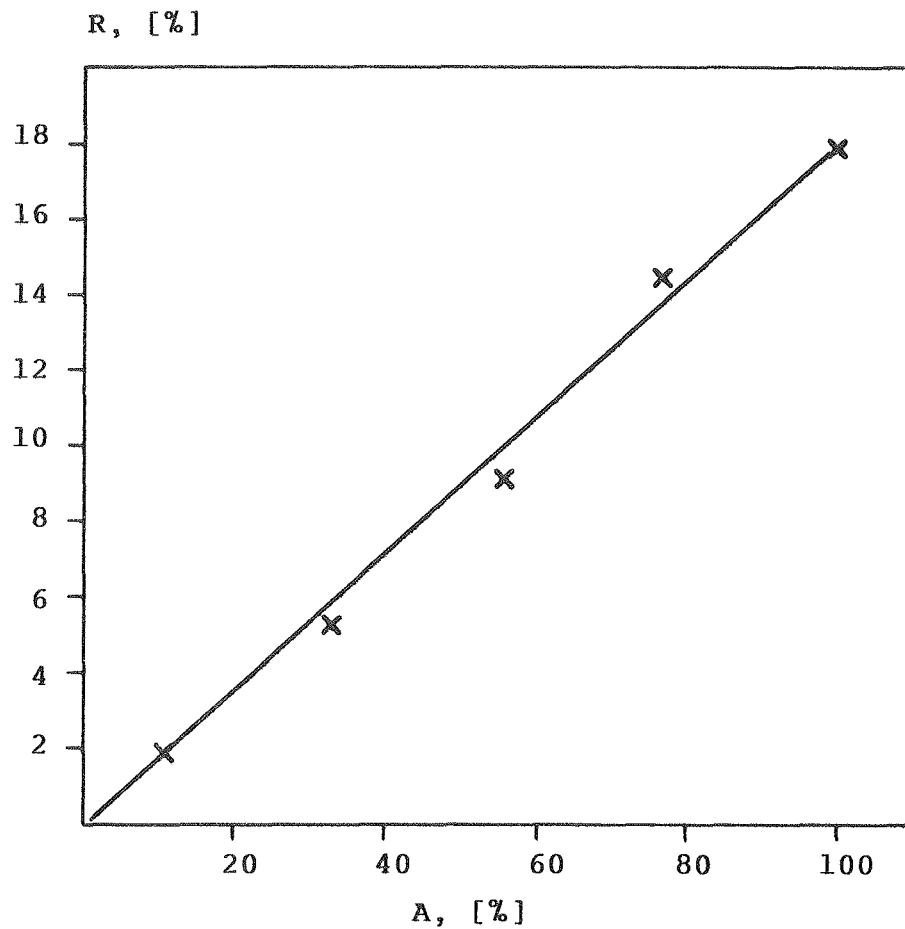
Med de ovenfor nævnte arealer og placeringer af Airglass-ruder, kan de mulige energibesparelser for hver enkelt boligtype beregnes. Resultaterne fremgår af tab. 4.5.

	I	II	III	IV	V
A	D	727	848	547	
	G	346	392	557	685
B	D	161	582	481	
	G	78	232	452	293
C	D	304	302		
	G	117	117	106	207

Tabel 4.5. Mulige energibesparelser, [kWh/år], ved anvendelse af Airglass i sekundære vinduer i forskellige boligtyper.

Beregningerne viser, at der ved anvendelse af Airglass-ruder som sekundære vinduer kan forventes en reduktion af energiforbruget til rumopvarmning på omkring 2 %, hvilket svarer til ca. 700 GWh/år. De udskiftede vinduer udgør 11 % af det samlede vinduesareal.

Det er i den forbindelse interessant at se på, hvor store besparelser der opnås pr. m² udskiftet rude. Sammenlignes disse med besparelsesmulighederne ved en udskiftning af alle boligens vinduer, fås en meget ensartet fordeling og størrelse af energibesparelserne for de enkelte boligtyper. Det er derfor undersøgt, hvorvidt der er en lineær sammenhæng mellem Airglass-rudernes andel af det samlede vinduesareal, A, og den hertil svarende relative energibesparelse, R. Resultatet er vist i fig. 4.5. De med X markerede punkter er beregnede værdier.



Figur 4.5. Relativ energibesparelse, R , som funktion af Air-glass-rudernes andel af vinduesarealet, A .

Det ses af fig. 4.5, at energibesparelserne varierer proportionalt med antallet af m^2 udskiftede ruder.

Det kan desuden forventes, at der ved erhvervs- og institutionsbyggeri kan spares endnu større energimængder, da der i sådanne byggerier findes betydeligt flere kvadratmeter "sekundære" vinduer end i boligbyggerier.

4.5 Parametervariationer

En god vurdering af Airglass-rudernes anvendelighed opnås ved at undersøge betydningen af de parametre, der beskriver rudernes udformning og placering. Disse parametervariationer er beskrevet nedenfor.

Analyserne udføres hovedsageligt for Airglass-ruder placeret i parcelhuse, da dette er den mest udbredte boligtype herhjemme. Beregningerne er foretaget for Airglass-ruder placeret i boliger fra perioderne I, III og V for at belyse en evt. sammenhæng med boligens øvrige isoleringstilstand. Hvor intet andet er nævnt er benyttet Airglass-ruder opbygget af 20 mm evakueret Airglass mellem 2 lag jernfrit glas, da denne udformning er kendt fra tidligere projekter, [12] og [21].

Parametervariationerne er delt i 3 sektioner, der beskriver hver sin type variationer:

Variationer vedr. rudernes rand og geometri

- 1) Forskellige varmetabskoefficienter for kantkonstruktionen.
- 2) Forskellige perimeter/areal-forhold.

Optiske og varmetransmissionsmæssige variationer

- 3) Forskellige solstrålingstransmittanser.
- 4) Forskellige tykkelser af Airglass.
- 5) Anvendelse af uevakueret Airglass.

Bygningsorientering og skyggevirkning

- 6) Forskellige orienteringer af boligen.
- 7) Skyggevirkning fra boligens omgivelser.

4.5.1 Parameterændringer vedr. rudernes rand og geometri

Optimal kantkonstruktion

Det er allerede i kap. 2. nævnt, at kantkonstruktionens udformning pga. kuldebrovirkningen herfra kan have stor betydning for rudens ækvivalente varmetabskoefficient.

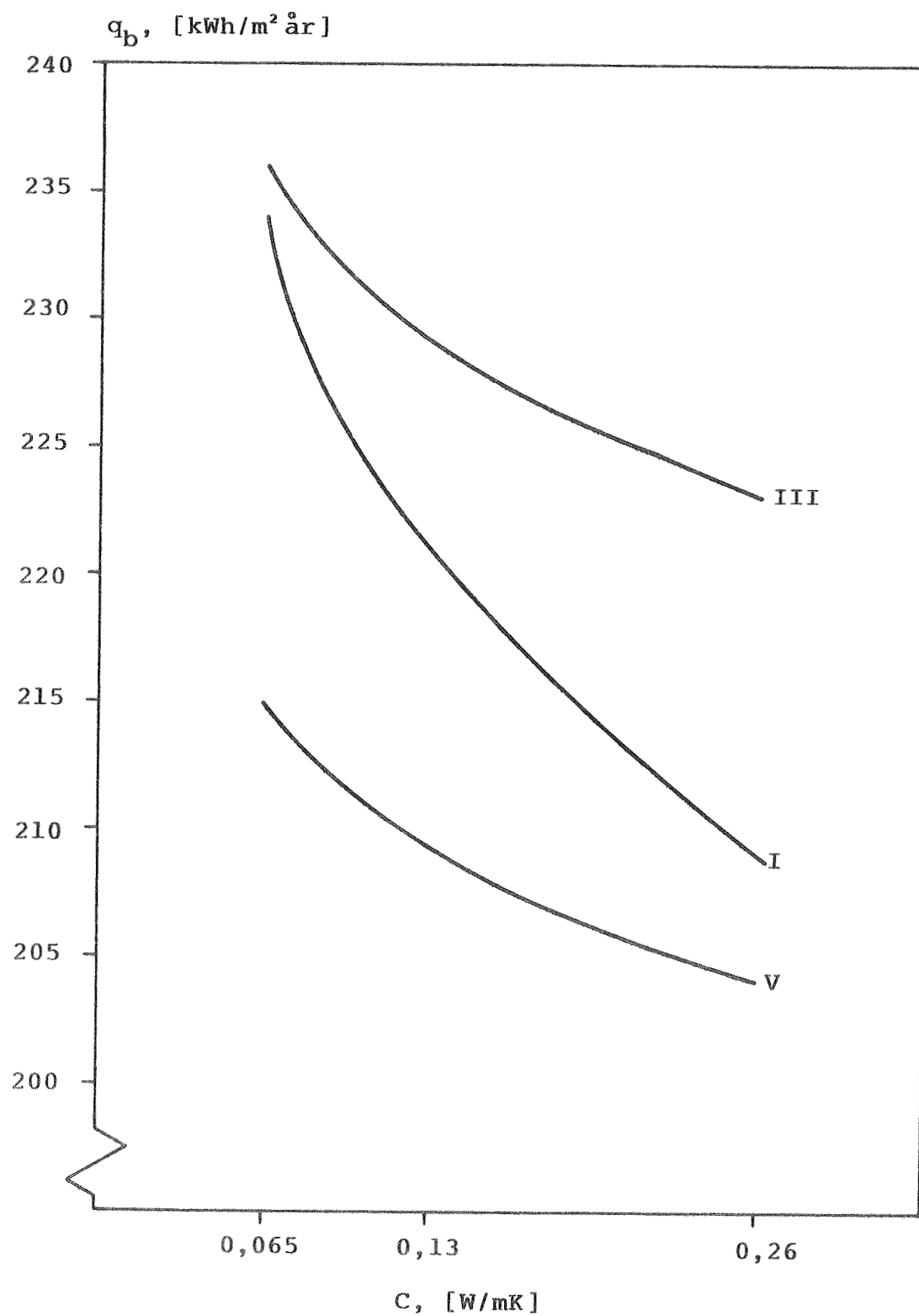
Det er derfor undersøgt, hvilken indflydelse en "halvt" og en "dobbel" så god kantkonstruktion, som den i fig. 3.3 viste, vil have på den samlede energibesparelse. De benyttede varmetabskoefficienter pr. løbende meter bliver derfor $C_D = 0,26 \text{ W/mK}$ og $C_B = 0,065 \text{ W/mK}$. Hermed fås følgende ækvivalente U-værdier:

$$U_{I,D} = 0,94 \text{ W/m}^2\text{K}, U_{III,D} = 0,66 \text{ W/m}^2\text{K}, U_{V,D} = 0,66 \text{ W/m}^2\text{K},$$

$$U_{I,B} = 0,69 \text{ W/m}^2\text{K}, U_{III,B} = 0,53 \text{ W/m}^2\text{K}, U_{V,B} = 0,53 \text{ W/m}^2\text{K},$$

idet første index angiver boligens alder (I, III, V), og andet index hvorvidt kantkonstruktionen er dårligere, D, eller bedre, B, end den i fig. 3.3 viste.

De beregnede energibesparelser pr. m^2 rude er vist i fig. 4.6. Det ses heraf, at der ved en halvering af kantkonstruktionens C-værdi, specielt for de ældre boliger, sker en markant stigning af energibesparelserne. Der kan således opnås større besparelser, hvis det bliver muligt at forbedre den her anvendte kantkonstruktion så meget, at der kan opnås C-værdier omkring $0,065 \text{ W/mK}$. Til sammenligning kan det nævnes, at den i termoruder benyttede kantkonstruktion almindeligvis har C-værdien $0,58 \text{ W/mK}$.



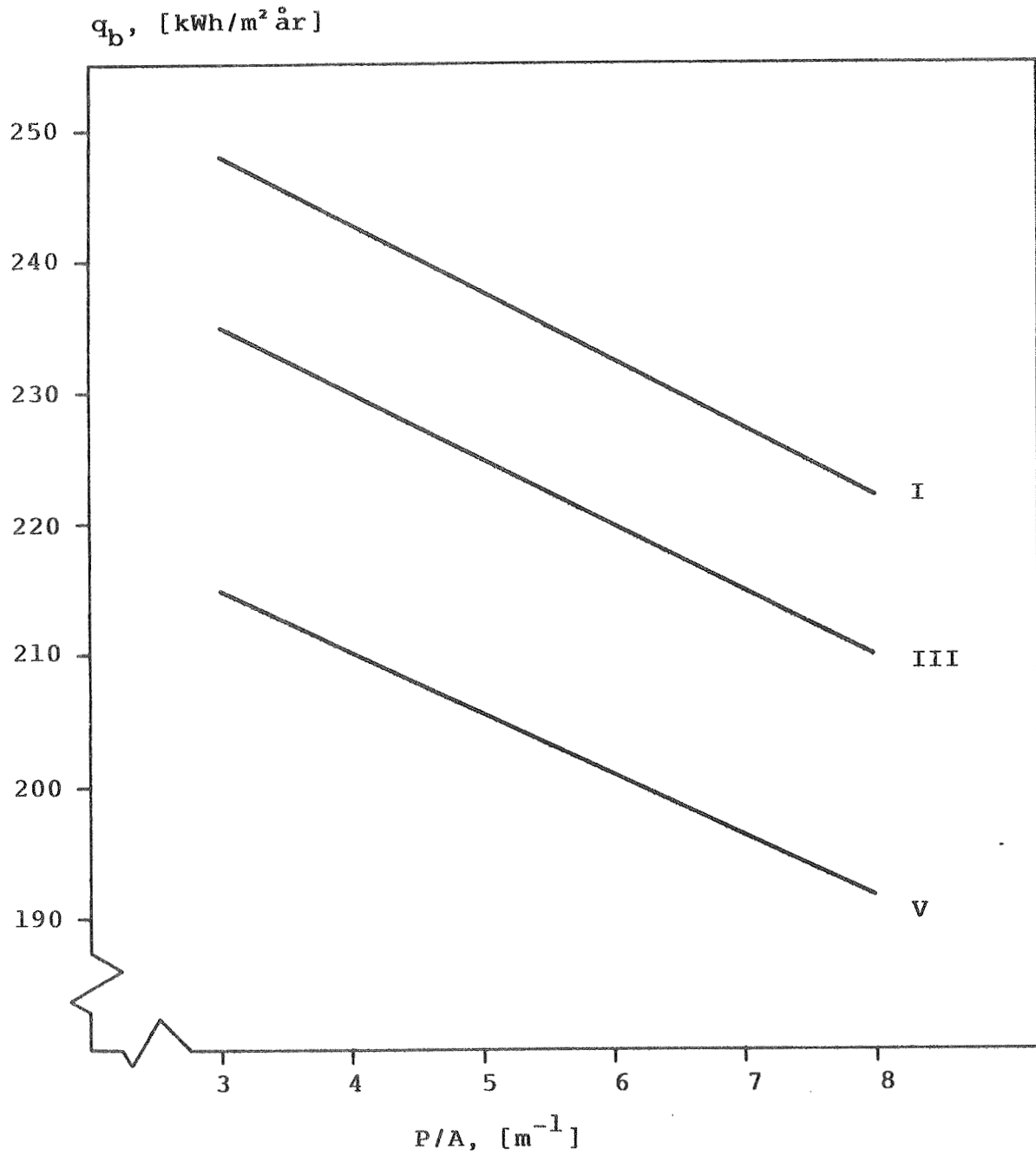
Figur 4.6. Årlig energibesparelse pr. m^2 rude, q_b , som funktion af kantkonstruktionens C -værdi for 3 forsk. boligtyper.

Forskellige perimeter/areal-forhold for ruderne

I kap. 3 er desuden vist, at perimeter/areal-forholdet for godt isolerende ruder kan have stor betydning for rudens regningsmæssige U-værdi. P/A-forholdet er bestemt af rudens geometri og varierer typisk mellem 3 og 8 m^{-1} .

De mulige energibesparelser for Airglass-ruder med forsk. P/A-forhold anvendt i 3 forsk. parcelhuse er vist i fig. 4.7. Beregningerne viser, ikke overraskende, da U-værdien for ruder varierer lineært med P/A-forholdet, en lineær sammenhæng mellem energibesparelsen og P/A-forholdet. Det ses desuden, at energibesparelserne for alle boligtyper, uafhængigt af P/A-forholdet, er større end $200 \text{ kWh/m}^2\text{år}$.

Hvis det, mod alle forventninger, ikke lykkes at fremstille Airglass-ruderne i større formater end de $0,40 \times 0,60 \text{ m}^2$ ruder, det i dag er muligt, fås et P/A-forhold på 8,3. Det ses af fig. 4.7, at der således stadig vil være tale om meget store energibesparelsemuligheder.



Figur 4.7. Årlige energibesparelsmuligheder pr. m² rude, q_b , for Airlglass-ruder med forsk. P/A -forhold anvendt i 3 forsk. boligtyper.

4.5.2 Optiske og varmetransmissionsmæssige variationer

Forskellige solstrålingstransmittanser

De bestemmende optiske parametre for Airglass er brydningsindexet og ekstinktionskoefficienten. Brydningsindexets densitetafhængighed er allerede beskrevet i afsnit 3.2. Det ses her, at en fordobling af densiteten blot forøger brydningsindexet med knap 2 %, hvorfor parametervariationer vedr. Airglass'ets solstrålingstransmittans kun er interessante i forbindelse med ekstinktionskoefficienten.

Airglass er et meget porøst materiale med en pore- og kornstørrelse, der overvejende er mindre end lysets bølgelængde. Dette giver derfor ingen problemer, når solstrålingen passerer gennem Airglass'et. En mindre del af kornene er imidlertid så store, at de bevirker den allerede omtalte Rayleigh-spredning af solstrålingen. Dette resulterer i et "absorptionstab" svarende til en ekstinktionskoefficient på ca. 6 m^{-1} .

Hvis det lykkes at reducere de største porer og korn i Airglass'et således, at disse bliver mindre end lysets bølgelængde, kan der, udover et betydeligt klarere dæklag, opnås mindre ekstinktionskoefficienter og dermed en større transmittans. Dette betyder, at energiforbruget mindskes. Effekten af mindre ekstinktionskoefficienter er undersøgt for ekstinktionskoefficienter i intervallet $2 - 6 \text{ m}^{-1}$. Resultatet er angivet i tab. 4.6.

	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
I	235	232	227	224	221
III	240	237	233	231	229
V	218	216	213	211	209

Tabel 4.6. Årlig energibesparelse pr. m^2 rude, $[\text{kWh}/\text{m}^2\text{år}]$, for forsk. ekstinktionskoefficienter anvendt i 3 forskellige boligtyper.

Af tabellen ses, at der ved en forbedret ekstinktionskoefficient fra 6 til 2 m^{-1} blot opnås besparelser på mellem 4 og 6 %. Der

sker således ikke nogen markant forbedring i energimæssig forstand, hvorimod der sker større forbedringer mht. anvendelsesmuligheder i kraft af den betydeligt større klarhed.

Forskellige tykkelser af Airglass

Hidtil er kun undersøgt ruder med en Airglass-tykkelse på 20 mm. Der kan være flere grunde til at undersøge udformninger med andre tykkelser, både mindre tykkelser (der opnås en større soltransmission, ruderne bliver lettere at håndtere, da de opnår samme dimensioner som alm. termoruder), og større tykkelser (der opnås en bedre isolans).

Der er derfor undersøgt udformninger med Airglass-tykkelser i intervallet 5 - 30 mm. Det er antaget, at en tykkelse på 5 mm Airglass har tilstrækkelig optisk dybde til, at varmetransmission ved ledning og stråling stadig kan beskrives ved en ækvivalent varmeledningsevne på 0,008 W/mK. De beregnede besparelser er vist i fig. 4.8.

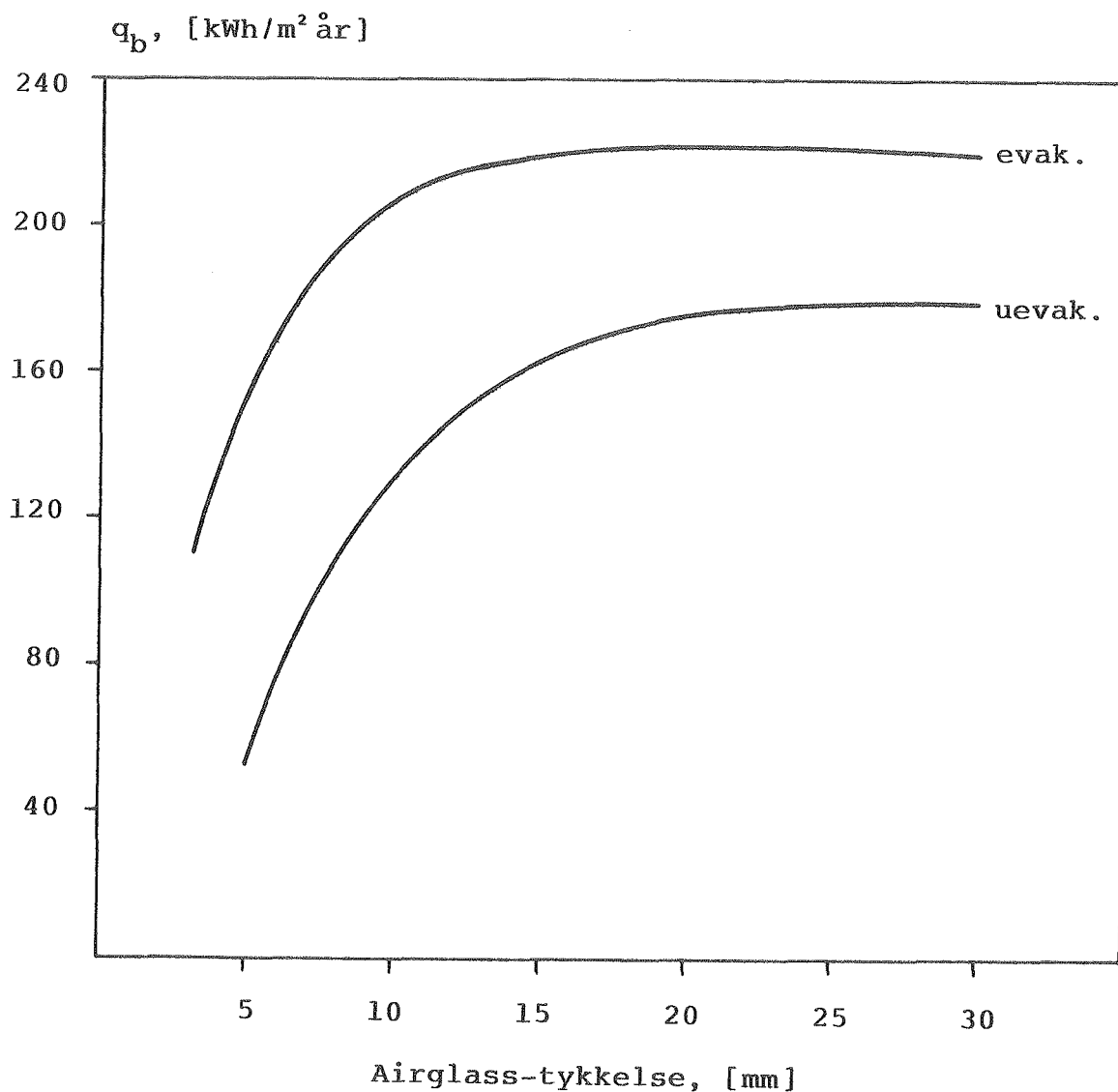
Anvendelse af uevakueret Airglass

Et af de større problemer ved fremstilling af evakuerede Airglass-ruder er at sikre tilstrækkelig tæthed i rudernes kantkonstruktion. Hvis de evakuerede ruders kantkonstruktion ikke er tæt, vil der med tiden ske en trykudligning, således at ruderne til slut ikke længere er evakuerede. Dette betyder, at rudernes isolans mindskes betydeligt. Effekten heraf er undersøgt for uevakuerede Airglass-ruder med Airglass-tykkelser i intervallet 5 - 30 mm. De beregnede energibesparelser fremgår af fig. 4.8.

Figuren viser, at den optimale tykkelse for evakuerede og uevakuerede Airglass-ruder er hhv. 20 og 30 mm. De evakuerede ruder giver besparelser, der ved optimal tykkelse er ca. 25% større end for de uevakuerede ruder.

Det ses imidlertid også, at de evakuerede ruder giver ganske store besparelser selv ved tykkelser på blot 10 mm, hvorimod der for de uevakuerede ruder sker en mærkbar reduktion af energibesparelsen allerede ved tykkelser under 15 mm. Udskiftes

termoruder med evakuerede Airglass-ruder med en glasafstand på 12 mm, vil det være muligt at reducere anlægsudgifterne, da den ekst. vinduesramme således stadig kan benyttes.



Figur 4.8. Årlige energibesparelser pr. m² rude, q_b , for hhv. evakuerede og uevakuerede Airglass-ruder.

4.5.3 Bygningsorientering og skyggevirkning

Ændret orientering af boligen

For at få et indtryk af boligens orienterings betydning for energibesparelsen ved en udskiftning med Airglass-ruder, er den mulige besparelse beregnet for 5 "rotationer". Disse er øst (-90°), sydøst (-45°), syd (0°), sydvest (45°) og vest (90°). Det må forventes, at de største besparelser opnås for "store" rotationer svarende til et stærkt reduceret solindfald, da solindfaldet gennem Airglass-ruderne og de eksisterende 2-lags-termoruder er af samme størrelsesorden, mens der er betydelige forskelle på rudernes U-værdi.

Beregninger viser imidlertid, at der kun er ringe forskel på energibesparelserne, når f.eks. huset er sydvendt eller vestvendt. For parcelhuse udgør besparelserne typisk omkring $220 \text{ kWh/m}^2\text{år}$.

Skyggevirkning fra boligens omgivelser

For maksimal udnyttelse af solindfald er det vigtigt, at dette ikke reduceres væsentligt af nabohuse, træer, buske, etc. Betydningen heraf er undersøgt for 4 forskellige skyggevirkninger svarende til horisontafskæringer på hhv. 0° , 15° , 30° og 45° . Som i forrige afsnit må det forventes, at en udskiftning med Airglass-ruder vil give større besparelser jo mindre solindfaldet er. I tab. 4.7 er angivet de årlige energibesparelser for 3 forsk. typer parcelhuse med de nævnte horisontafskæringer.

Det ses af tabellen, at besparelserne varierer med op til 10 % for horisontafskæringer mellem 0° og 45° . Det ses dog også, at den relative besparelse for hver enkelt boligtype er meget konstant og udgør hhv. 13, 25 og 28 %.

		0°	15°	30°	45°
I	q_b [kWh/m ² år]	215	221	226	232
	R [%]	13	13	13	13
III	q_b [kWh/m ² år]	218	224	232	239
	R [%]	26	26	25	25
V	q_b [kWh/m ² år]	204	209	215	222
	R [%]	29	28	27	27

Tabel 4.7. Årlig energibesparelse pr. m² rude, q_b , samt relativ besparelse, R, for Airlglass-ruder anvendt i parcelhuse med forsk. horisontafskæringer.

5. ØKONOMISK VURDERING

Beregningerne i kap. 4 viser, at energiforbruget til rumopvarmning i den ekst. boligmasse kan reduceres betydeligt ved en udskiftning med Airglass-ruder. Hvorvidt en sådan udskiftning også er økonomisk rentabel, er vurderet i det følgende. En privatøkonomisk vurdering er foretaget vha. Nu-værdimetoden, [22].

5.1 Metode og forudsætninger

Nu-værdimetoden udtrykker resultatet af et investeringsprojekt i den kr-værdi, der er gældende på investeringstidspunktet (nu-værdien). Et investeringsprojekt er kun lønsomt, såfremt den beregnede nu-værdi er positiv. Ved en sammenligning af flere investeringsprojekter er det projekt med den største nu-værdi mest lønsomt. Metoden er baseret på en række skøn over udviklingen af renten på kreditforeningslån, inflationen, energipriserne, beskatningsprocenten, etc. i løbet af en længere årrække.

Da der endnu hersker stor usikkerhed om prisen på Airglass-ruder, er der i stedet for en nu-værdi for den aktuelle investering beregnet, hvad ruderne må koste, for at investeringerne bliver rentable.

For Airglass-ruderne regnes med en økonomisk levetid på mellem 15 og 25 år. Lånerenten antages at være 12 %, skattefradrag på lån at andrage 50 %, inflationen sættes til 4 %, energiprisstigningerne sættes hhv. 0, 3 og 6 % større end inflationen. I den økonomiske vurdering betragtes alle boliger som opvarmet med olie-, gas- eller naturgasfyret centralvarme eller vha. fjernvarme. For alle opvarmningsformer skønnes en gennemsnitlig virkningsgrad på 0,80, [19]. Brændselsprisen sættes til 360 kr/MWh, [23], hvorved der opnås en besparelse på $360/0,8 = 450$ kr pr. sparet MWh.

Investeringsbeløbet ved en udskiftning af vinduer, udover prisen på selve ruden, er sammensat af materialeudgifter og udgifter til stillads og arbejds løn. Materialeudgifterne dækker udgifter

til vinduesrammer, glaslister, skruer, etc. og udgør incl. moms og en mængderabat på 15 % ca. 300 kr/m².

Selvom der ved de fleste parcelhuse ikke skal benyttes stillads er udgifterne til arbejds løn og stillads alligevel lige store for alle 3 boligtyper. Dette skyldes, dels at udgiften til stilladser udgør en lille del af de samlede udgifter, dels at arbejdet ved række- og etageboliger kan lægges mere rationelt an, samtidig med at der kan forventes en vis rabat på større arbejder. Udgifter til arbejds løn og stillads sættes til 660 kr/m² incl. moms.

5.2 Airglass-rudernes rentabilitet

Ved vinduesudskiftningen optræder 3 forskellige situationer:

- 1 - Vindueskonstruktionen er i så dårlig stand, at en udskiftning er påkrævet, f.eks. en ældre etagebolig med vinduer med kun 1 lag glas.
- 2 - Vindueskonstruktionen er i så dårlig stand, at en udskiftning er påkrævet, f.eks. en etagebolig med termoruder.
- 3 - Boligens energiforbrug ønskes reduceret vha. Airglass-ruder, selv om det ikke er nødvendigt at udskifte de ekst. vinduer, f.eks. et parcelhus fra 70'erne.

Der bliver derfor tale om 3 forskellige materialepriser på Airglass-ruderne. I tilfælde 1 og 2 skal energibesparelserne blot kunne betale, hvad den færdige Airglass-rude må koste. I disse beregninger medtages derfor ikke udgifter til arbejds løn, stilladser og materialer, da det er udgifter, der alligevel vil optræde i forbindelse med en vinduesudskiftning. I tilfælde 3 derimod, skal alle udgifter i forbindelse med udskiftningen betales af energibesparelserne. I tilfælde 1 sættes energibesparelsen til 475 kWh/m² år, mens besparelsen i både tilfælde 2 og 3 sættes til 220 kWh/m²år.

I tabel 5.1 er vist de maksimalt tilladelige priser for Airglass-ruderne i forskellige anvendelsessituationer og for forskellige økonomiske levetider og energiprisstigningstakter, hvorved både meget gunstige og mindre gunstige forholds betydning kan vurderes.

Levetid [år]	anvendelses- situation	energiprisstigningstakt		
		[4 %]	[7 %]	[10 %]
15	1	3240	4070	5140
	2	1500	1875	2440
	3	370	740	1320
20	1	4140	5550	7590
	2	1920	2565	3660
	3	790	1435	2530
25	1	4960	7120	10550
	2	2280	3280	5140
	3	1155	2155	4010

Tabel 5.1. Maksimale priser for Airglass-ruder anvendt enten i forbindelse med vinduesrenovering, 1 og 2, eller udelukkende som energibesparende foranstaltning, 3, for forskellige økonomiske levetider og energiprisstigningstakter.

Af tabellen fremgår, som det må forventes, at der er stor forskel på, om den udskiftede rude er en 1- eller 2-lags rude. Derudover ses, at der er stor forskel på, om der er tale om en egentlig vinduesrenovering, eller om udskiftningen blot sker med henblik på en energibesparelse. Dette er især tydeligt for de korte levetider (15 år), hvor den relative forskel for 2-lags termoruder er op til 400 % (ved en energiprisstigningstakt på 4 %). Det bør dog bemærkes, at de beregnede maksimale priser for disse ruder er så små, at det ikke vil være muligt at fremstille ruderne uden tab. Til sammenligning kan oplyses, at en alm. 2-lags termorude hos glarmestre typisk koster 500 kr/m², incl. moms, [24]. Det ses også, at forskellen på de 2 anvendelser bliver relativt mindre jo længere levetid, ruderne har.

Beregningerne viser således, at det i stort set alle tilfælde vil være økonomisk forsvarligt at udskifte alle vinduer i den danske boligmasse med Airglass-ruder, såfremt prisen på disse ikke overstiger ca. 1000 kr/m².

6. KONKLUSION

Resultatet af dette projekt viser, at der ligger et stort energibesparelspotentiale i en erstatning af alle eksisterende vinduer i den danske boligmasse med Airglass-ruder. Den effektive soltransmittans for disse er blot 13 % mindre end transmittansen for alm. 2-lags termoruder. Airglass-rudernes varmetabskoefficient er bestemt således, at der er taget hensyn til kuldebrovirkningen i rudernes rand; koefficienten varierer typisk mellem 0,6 og 0,8 W/m²K, hvilket er 4 - 5 gange mindre end varmetabskoefficienten for alm. 2-lags termoruder.

Ved en udskiftning af alle vinduer kan opnås en reduktion af energiforbruget til rumopvarmning på 6,5 TWh/år $\approx$ 18 %, hvilket for forbrugerne p.t. svarer til ca. 2900 mio. kr. om året. Af beregningerne fremgår desuden, at der ved en udskiftning af 2-lags termoruder typisk opnås en besparelse på 220 kWh/år pr. m² udskiftet rude, mens der ved en udskiftning af vinduer med 1 lag glas typisk spares 475 kWh/m²år. Begge tal er uafhængige af boligens art og alder.

Analyser vedr. det termiske indeklima viser, at Airglass-ruderne kun i ringe omfang vil give anledning til termisk diskomfort, og endda i flere tilfælde vil resultere i et forbedret termisk indeklima, primært i form af en i vintermånederne betydeligt højere overfladetemperatur på indersiden af ruderne. Temperaturen vil stige fra 12,2°C for 2-lags termoruder til 18,5°C for Airglass-ruderne.

Såfremt det ikke lykkes at fremstille Airglass-ruderne med en klarhed, der svarer til klarheden af alm. 2-lags termoruder, vil det stadig være muligt at anvende ruderne i sekundære vinduer. En sådan anvendelse udgør ca. 11 % af boligmassens samlede vinduesareal og bevirker en energibesparelse på 2 %. Nærmere analyser viser, at der, ligegyldigt hvor mange m² ruder der udskiftes, opnås samme "udbytte" pr. m² udskiftet rude.

I projektet er desuden bestemt en, i energimæssig sammenhæng, optimal Airglass-tykkelse på 20 mm, men selv ved Airglass-tykkel-

ser på 12 mm opnås besparelser på over 210 kWh/år pr. m² udskiftet rude. Idet en glasafstand på 12 mm ofte anvendes i alm. termoruder, vil en evt. udskiftning kunne billiggøres betydeligt, da det ikke vil være nødvendigt også at udskifte vinduesrammerne.

I forbindelse med en økonomisk vurdering er beregnet de maksimalt tilladelige kvadratmeter-priser for Airglass-ruderne, for at en udskiftning bliver rentabel. Af beregningerne fremgår, at en udskiftning, som den her beskrevne, vil være rentabel, hvis prisen for Airglass-ruderne ikke overstiger 1000 kr/m². Selv om prisen for ruderne overstiger 1000 kr/m², vil det dog stadig i langt de fleste tilfælde være lønsomt at benytte Airglass-ruder.

Endelig bør det erindres, at en anvendelse af Airglass-ruder i erhvervs- og industribyggeri, hvor en udskiftning, pga. disse byggeriers noget lavere omkostninger pr. købt energimængde, ikke umiddelbart vil være aktuel, vil reducere forbruget af fossilt brændsel og dermed miljøforureningen betydeligt. Der vil derfor på langt sigt være store fordele ved også at anvende Airglass-ruder i ovennævnte byggerier, såfremt det bliver muligt at fremstille ruderne i en acceptabel kvalitet.

REFERENCER

- [1] "Bygningsreglement, 1982", (BR 82). Publikation nr. 54. Byggestyrelsen, 1982.
- [2] "Bygningsreglement for småhuse", (BR 85-S). Publikation nr. 75. Byggestyrelsen, 1985.
- [3] "Statistisk Årbog, 1987". Danmarks Statistik, 1987.
- [4] "Bygnings- og Boligregistret pr. 1. april 1977". Danmarks Statistik, 1977.
- [5] "Boligtællingen 1. januar 1981". Danmarks Statistik, 1982.
- [6] "Survey of the existing Building Stock to assess the Passive Solar Potential". O. Olesen, LfV, DTH. Udgives medio 1989.
- [7] "Eksisterende bygningers energimæssige tilstand". F. Christensen, P.V. Jungmark, TI, Byggeteknik, 1981.
- [8] "Bolig og Varme". J. Nørgård, Fys. Lab. III, DTH, 1977.
- [9] "Passiv Solvarme - Projekteringsvejledning". TI, Varmeteknik & LfV, DTH. Energiministeriets solvarmeprogram, rapport nr. 30, 1985.
- [10] "Production of Silica Aerogel". Physica Scripta, 23, pp. 697-702. S. Henning, L. Svensson, 1981.
- [11] "Thermal Conductivity of Evacuated Highly Transparent Silica Aerogel". Solar Energy, 3, pp. 89-94. D. Büttner, J. Fricke, 1985.
- [12] "Højisolerende transparent dæklag". K.I. Jensen. Meddelelse nr.204, LfV, DTH, 1989.

- [13] "SUNCODE-PC. A program user's manual". M.J. De La Hunt. Ecotope, 1985.
- [14] "EDB-programmer til beregning af passiv solvarme". J. E. Christensen. Meddelelse nr. 185, LfV, DTH, 1987.
- [15] "Vejrdata for VVS og Energi. Dansk referenceår TRY". B. Andersen m.fl. Statens Byggeforskningsinstitut, 1982.
- [16] "Performance of passive solar houses in Ladakh, India". C. Paludan-Müller. Rapport nr. 88-5, LfV, DTH, 1988.
- [17] "Solar engineering of thermal processes". J.A. Duffie, W.A. Beckmann, by John Wiley & Sons, 1980.
- [18] "Inter-zone convective heat transfer in buildings: a review". S.A. Barakat. Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 109, 1987.
- [19] "Beregning af energiforbrug i småhuse". K. Johnsen, A. Nielsen. SBI-rapport 148. Statens Byggeforskningsinstitut 1984.
- [20] "Danmarks Energistrømme, 1987". Energistyrelsens årsopgørelse, 1988.
- [21] "Solvægge i den eksisterende boligmasse". C. Paludan-Müller, O.B. Jørgensen. Energiministeriets solvarmeforskningsprogram, rapport nr. 47. Meddelelse nr. 193, LfV, DTH, 1988.
- [22] "Økonomisk vurdering af energibesparende foranstaltninger". K. Johnsen, M. Kvetny, H.S. Andersen. SBI-anvisning 132. Statens Byggeforskningsinstitut, 1982.
- [23] "Energipriser, solenergi og graddage". VVS 10, 1988.
- [24] Samtale med glarmester-firmaet "H.P. Olsen & Søn", januar 1989.

APPENDIX

A1. Kuldebrovirkning fra rudernes kantkonstruktion

Ruders kantkonstruktion har en varmetabskoefficient, som ofte er meget større end varmetabskoefficienten i rudens midterfelt. Dette giver anledning til en 2-dimensional varmestrøm i rudens randfelter. I EDB-programmet "SUNCODE" beskrives ruders varmetabskoefficient ved en 1-dimensional parameter. Pga. kuldebrovirkningen fra kantkonstruktionen er det derfor nødvendigt at bestemme ækvivalente varmetabskoefficienter, U , for både almindelige 2-lags- og Airglass-fyldte termoruder.

Beregningsmodel

I [12] er opstillet en beregningsmodel til at bestemme ækvivalente U -værdier for vinduer, idet der er taget hensyn til kantkonstruktionens kuldebrovirkning. Den ækvivalente U -værdi bestemmes heri som:

$$U = U_0 + P \cdot \frac{q_k}{A \cdot (T_a - T_0)} \quad \text{hvor}$$

U_0 = rudens varmetabskoefficient i midterfeltet

P/A = rudens perimeter/areal-forhold

q_k = varmestrømmen i rudens kantkonstruktion

T_a = boligens indetemperatur. Her = 20°C

T_0 = omgivelsernes temperatur. For de her benyttede ruder viser nærmere analyser, at der opnås samme resultater, hvad enten der benyttes $T_0 = 5, 0, -5$ eller -12°C . For nemheds skyld benyttes derfor $T_0 = 0^\circ\text{C}$.

Varmestrømmen gennem kantkonstruktionen bestemmes af :

$$q_k = C \cdot (T_1 - T_2) \quad \text{hvor}$$

C = kantkonstruktionens varmetabskoefficient pr. løbende meter.

$$T_2 = \frac{\frac{B + E}{A} + \frac{E}{C}}{1 + \frac{D}{C} + \frac{D}{A}}$$

$$T_1 = \frac{T_2 \cdot (C+D) - E}{C} \quad \text{hvor}$$

$$A = \frac{h_i + h_f}{m_1}$$

$$B = \frac{h_i \cdot T_a + h_f \cdot T_m}{m_1}$$

$$D = \frac{h_t + h_u}{m_2}$$

$$E = \frac{h_t \cdot T_m + h_u \cdot T_o}{m_2} \quad \text{hvor}$$

h_i = rudens indvendige varmeovergangstal = 7,69 W/m²K

h_u = rudens udvendige varmeovergangstal = 25,0 W/m²K

h_t og h_f er varmeovergangstal, der beskriver varmetransporten mellem de 2 lag glas:

$$h_t = h_f = \frac{2}{\frac{1}{U_o} - h_i - h_u - \frac{2 \cdot d_g}{\lambda_g}} \quad \text{hvor}$$

d_g = tykkelsen af 1 lag glas = 4 mm

λ_g = glas' varmeledningsevne = 0,8 W/mK.

$$m_1 = \frac{h_i + h_f}{\lambda_g \cdot d_g}$$

$$m_2 = \frac{h_t + h_u}{\lambda_g \cdot d_g}$$

T_m = temperaturen midt i ruden. Denne bestemmes som en middeltemperatur mellem det inderste og det yderste lag glas' middeltemperatur, bestemt over rudens midterfelt.

Bestemmelse af ækvivalente U-værdier

Alm. 2-lags termorude

For en alm. 2-lags termorude med en glasafstand på 12 mm er U_o = 3,05 W/m²K. Kantkonstruktionens C-værdi kan, ved at betragte denne som et I-profil, beregnes til C = 0,58 W/mK. Idet der benyttes værdier for T_a og T_o på hhv. 20°C og 0°C, fås den i

fig. A.1 viste sammenhæng mellem rudens perimeter/areal-forhold og den ækvivalente U-værdi. Hermed kan U-værdier for de forskellige opførelsesperioder let bestemmes. De benyttede værdier findes i tab. 2.2.

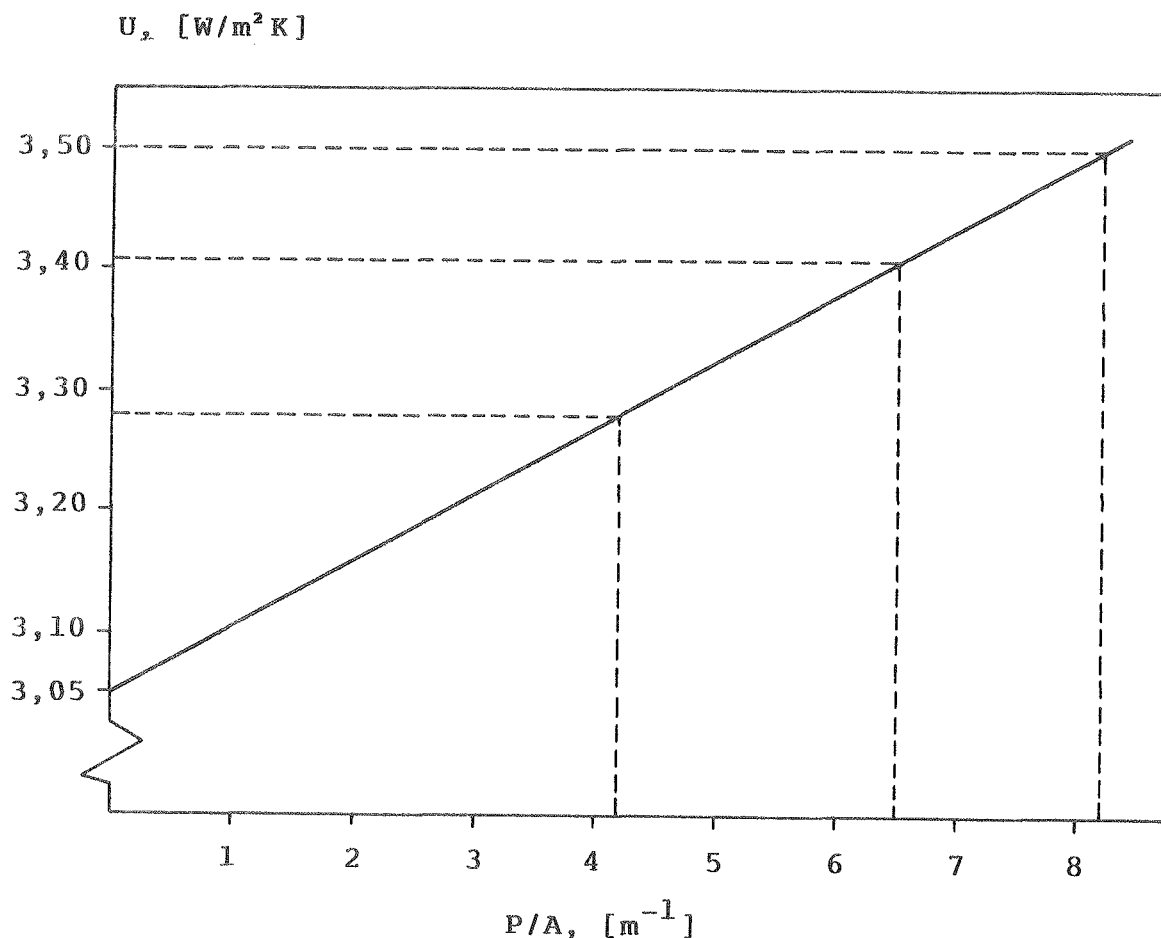


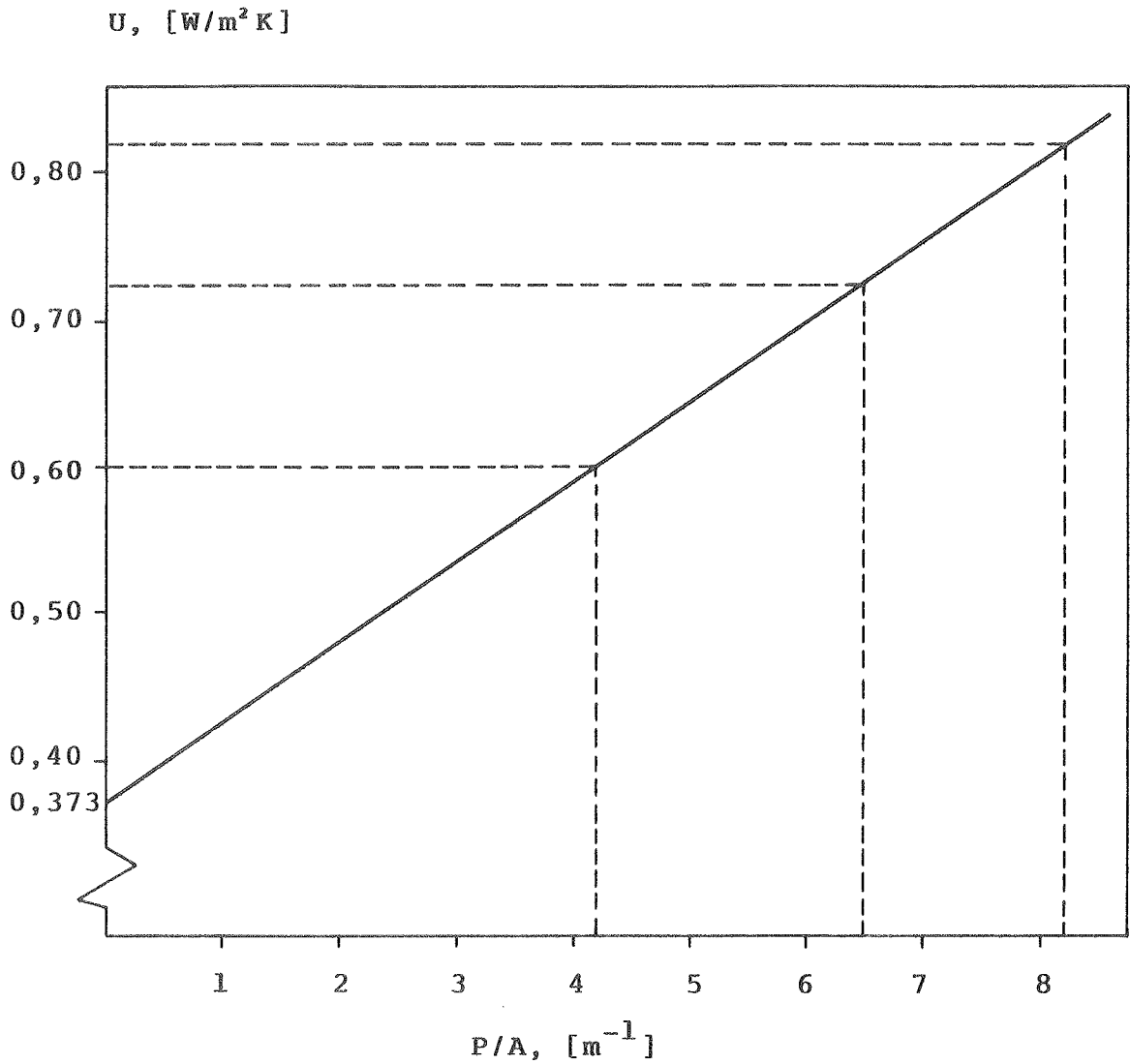
Fig. A.1. Ækvivalente U-værdier, U_e , for alm. termoruder med en C-værdi på 0,58 W/mK, som funktion af rudens P/A-forhold.

Airglass-termorude

I [11] er varmeledningsevnen for evakueret Airglass under typiske danske vejrforhold bestemt til $\lambda_{\text{Air}} = 0,008$ W/mK. Rudens opbygning er vist i fig. 3.1. Glastykkelsen er 4 mm, Airglass-tykkelsen er 20 mm. Hermed kan U_0 bestemmes til $U_0 = 0,373$ W/m²K. Den anvendte kantkonstruktion er vist i fig. 3.3. Stålprofilets "længde", d_{rfs} , er 30 mm, varmeledningsevnen, $\lambda_{\text{stål}}$, er 15 W/mK, godstykkelsen, t_{rfs} , er 0,3 mm, butylfugens tykkelse, t_{but} , er 2 mm, varmeledningsevnen, λ_{but} , er 0,2 W/mK, butylfugens bredde, b_{but} , er 10 mm. Kantkonstruktionens C-værdi bestemmes som vist på næste side:

$$C = \left(\frac{d_{\text{rfs}}}{\lambda_{\text{rfs}} \cdot t_{\text{rfs}}} + \frac{t_{\text{but}}}{\lambda_{\text{but}} \cdot b_{\text{but}}} \right)^{-1} = 0,13 \text{ W/mK}.$$

Med T_a og T_o lig hhv. 20°C og 0°C fås hermed den i fig. A.2 viste sammenhæng mellem rudens P/A -forhold og den ækvivalente U -værdi. De i de forskellige opførelsesperioder benyttede U -værdier findes i tab 3.1.



Figur A.2. Ækvivalent U -værdi, U , for Airglass-ruder med en C -værdi på $0,13 \text{ W/mK}$, som funktion af rudens P/A -forhold.

A2. Tilnærmelser ved beregning af Airglass-ruders transmittans

I "SUNCODE" betragtes en rude som opbygget af et vist antal simple identiske dæklag. Da Airglass-ruden er opbygget af forskellige dæklag, er det ikke umiddelbart muligt at beregne transmittansen heraf. I stedet betragtes ruden i beregningerne som opbygget af ét homogent lag, idet der bestemmes nogle pseudo-værdier for rudens ekstinktionskoefficient, K , brydningsindex, n , og reduktionsfaktor, SC , der samtidig indeholder eventuelle gardiner og planters reduktion af solindfaldet, (10 %).

For Airglass-ruden kan det effektive transmittansabsortansprodukt, $(\tau\alpha)_e$, bestemmes af:

$$(\tau\alpha)_e = ((\tau\alpha) + a_1 \cdot (1 - T_{a,1}) + a_2 \cdot \tau_1 \cdot (1 - T_{a,2}) \dots) \cdot SC \quad \text{hvor}$$

$(\tau\alpha)$ = rudens transmittans-absorptansprodukt.

τ = rudens samlede transmittans.

α = absorbtansen af det bagvedliggende rum.

a_i = den del af den i det i'te dæklag absorberede solstråling, der transmitteres til det bagvedliggende rum som varme-stråling.

$T_{a,i}$ = transmittans mht. absorption alene i det i'te dæklag.

τ_i = transmittansen af det i'te dæklag.

Da ruden betragtes som ét homogent lag fås, idet $a_1 = 0,23$:

$$\begin{aligned} (\tau\alpha)_e &= ((\tau\alpha) + a_1 \cdot (1 - T_a)) \cdot SC \\ &= (1,01 \cdot T_r \cdot T_a \cdot \alpha + (1 - T_a) \cdot 0,23) \cdot SC \end{aligned}$$

I beregningerne benyttes et brydningsindex på 1,0 i stedet for 1,02, hvilket betyder at $T_r = 1,0$. Den fejl, der hermed begås, er ubetydelig, idet T_r reduceres med under 1 %. For $(\tau\alpha)_e$ er effekten heraf endnu mindre pga. bidraget fra den i dæklaget absorberede solstråling. Dvs.:

$$\begin{aligned} (\tau\alpha)_e &= (1,01 \cdot T_a \cdot \alpha + (1 - T_a) \cdot 0,23) \cdot SC \\ &= (T_a \cdot (1,01 \cdot \alpha - 0,23) + 0,23) \cdot SC \end{aligned}$$

I "SUNCODE" udregnes den til rummet transmitterede solvarme som:

$$(\tau\alpha)_e = T' \cdot \alpha' \cdot SC$$

hvor T' indeholder korrektion for den dæklagsabsorberede varme og α' indeholder hensyn til den udnyttede del af reflektioner mellem ruden og det bagvedliggende rum.

Idet $\alpha' = 1,01 \cdot \alpha$ og $\alpha = 0,95$ fås:

$$\begin{aligned} T' &= ((\tau\alpha)_e / (\alpha' \cdot SC)) \\ &= (T_a \cdot (1 - 0,23/0,96) + 0,23/0,96) \\ &= (T_a \cdot 0,76 + 0,24) \end{aligned}$$

hvor T_a er defineret ved:

$$T_a = \exp(-KL/\cos b) \quad \text{hvor}$$

L = dæklagets tykkelse

b = brydningsvinklen

Pseudo-værdierne for K og SC bestemmes således, at de af programmet bestemte værdier for $(\tau\alpha)_e$ for direkte ($i = 0^\circ$) og diffus ($i = 60^\circ$) stråling svarer til de korrekte værdier:

$$\begin{aligned} (\tau\alpha)_e &= (T_a \cdot 0,76 + 0,24) \cdot 0,96 \cdot SC \\ (\tau\alpha)_{e,0} &= (\exp(-KL/\cos 0^\circ) \cdot 0,76 + 0,24) \cdot 0,96 \cdot SC \\ (\tau\alpha)_{e,60} &= (\exp(-KL/\cos 60^\circ) \cdot 0,76 + 0,24) \cdot 0,96 \cdot SC \end{aligned}$$

idet brydnings- og indfaldsvinklen er ens, når brydningsindex'et er 1,0.

Dæklagstykkelsen er sat til 4 mm. Hermed kan K og SC bestemmes ved først at bestemme K således, at $(\tau\alpha)_{e,60}/(\tau\alpha)_{e,0}$ har den korrekte værdi. Dernæst bestemmes SC således, at $(\tau\alpha)_{e,0}$ har den korrekte værdi. De effektive transmittansabsorbtans-produkter for $i = 0^\circ$ og $i = 60^\circ$ er beregnet til $(\tau\alpha)_{e,0} = 0,72$ og $(\tau\alpha)_{e,60} = 0,57$. Ved beregningerne er gjort den antagelse, at intet af den i det yderste lag glas absorberede solstråling og al den i det inderste lag glas absorberede solstråling pga. Airglass'ets høje isolans vil transmitteres ind i boligen som varmestråling. Dvs.:

$$\frac{0,57}{0,72} = \frac{(\exp(-K \cdot 0,004 / \cos 60^\circ) \cdot 0,76 + 0,24)}{(\exp(-K \cdot 0,004 / \cos 0^\circ) \cdot 0,76 + 0,24)} \Rightarrow$$

$$\underline{K = 90,13 \text{ m}^{-1}} \Rightarrow$$

$$SC = \frac{0,72}{(\exp(-90,13 \cdot 0,004) \cdot 0,76 + 0,24) \cdot 0,96}$$

$$= 0,97408$$

Den beregnede værdi for SC skal desuden korrigeres svarende til skyggeeffekten fra gardiner og planter. Hermed fås:

$$\underline{SC = 0,87667}$$

A3. Forskningsudvalget for Energianvendelse i bygninger, april 1987

J. Kelnæs afd.leder, Teknologisk Institut, Byggeteknik (formand)
Ole Jensen, civilingeniør, Statens Byggeforskningsinstitut (sekretær)

M.R. Byberg, lektor, civilingeniør, Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole

Erik Christophersen, afd.leder, civilingeniør, Statens Byggeforskningsinstitut

Vagn Korsgaard, professor, civilingeniør, Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole

M. Malte Johansen, afd.chef, Jysk Teknologisk

P.J. Snare, eksped.sekr., Energistyrelsen

Bent Pedersen, kontorchef, Byggestyrelsen

Peter Steensen, civilingeniør, Teknologisk Institut, Varme- og Installationsteknik

Olaf Smith-Hansen, civilingeniør, Rockwool A/S

Knud Hallgreen, ingeniør, Danfoss A/S

Jørgen S.R. Nielsen, civilingeniør, Birch & Krogboe K/S

Peter Dorph-Petersen, fuldmægtig, Energiministeriet