

BYG•DTU

DANMARKS
TEKNISKE
UNIVERSITET



Jørgen M. Schultz
Finn H. Kristiansen

Energimæssig helhedsvurdering af vinduer

Rapport
BYG•DTU R-035
2002
ISSN 1601-2917
ISBN 87-7877-093-9

Energimæssig helhedsvurdering af vinduer

Jørgen M. Schultz
Finn H. Kristiansen

Department of Civil Engineering
DTU-bygning 118
2800 Kgs. Lyngby
<http://www.byg.dtu.dk>

2002

FORORD

Denne rapport afslutter projektet ”Helhedsvurdering af vinduer – mulige produktforbedringer inden for en tidshorisont på 5 år” finansieret af Energistyrelsens Energiforskningsprogram EFP-99, journal nr. 1213/99-0015.

Projektet er udført i samarbejde med Pilkington Danmark A/S, Scan-Gobain Glass Nordic A/S og Vinduesbranchens Samarbejdsorganisation (VSO). Projektets formål har været at danne et gennemarbejdet grundlag for en energimæssig optimering af vinduer til det danske boligmarked baseret på vinduesarealets samlede indvirkning på boligens energiforbrug og indeklima. Projektet adskiller sig således fra de mere produktudviklingsrettede projekter, hvor der i langt større grad fokuseres på selve komponenten.

Den gennemgribende analyse omfatter også forhold, der kan udgøre en barriere for yderligere udvikling på vinduesområdet blandt andet problemet med udvendig kondens på godt isolerende ruder samt markedsmæssige og konstruktionsmæssige barrierer.

RESUMÉ

Dette projekt har beskæftiget sig med energimæssig vurdering af udviklingsmulighederne på vinduesområdet på kort sigt. Udviklingsmulighederne er vurderet ud fra en helhedsbetragtning af vinduets indflydelse på både energiforbrug og termisk indeklima, og eventuelle barrierer for udviklingen er forsøgt identificeret.

Helhedsvurderingen er gennemført som en beregning af det resulterende energiforbrug til rumopvarmning samt den nødvendige køleenergi til at holde indetemperaturen på maksimum 24 °C. Beregningen af køleenergien anvendes som et mål for overtemperaturproblemerne knyttet til de forskellige vinduesløsninger, og summen af opvarmningsbehovet og køleenergien er anvendt som vurderingsgrundlag for sammenligning af de forskellige mulige vinduesløsninger. Generelt set vil der være en positiv energimæssig virkning af at øge vinduernes g-værdi og sænke U-værdien undtagen for lavenergihuse, hvor der kan findes et optimum for g-værdien. Størrelsen afhænger af den aktuelle vinduesfordeling på de fire verdenshjørner. Installation af køleanlæg kan undgås ved at anvende solafskærmende ruder, men energimæssigt og komfortmæssigt er de to løsninger omtrent ligeværdige på grund af, at solindfaldet også reduceres i perioder, hvor der er behov for energitilskuddet. Den optimale løsning er en mobil solafskærmning, der kun træder i funktion, når indetemperaturen begynder at stige eller en forceret ventilation/udluftning ved stigende indetemperaturer. Begge muligheder skal være automatisk virkende, så de begyndende overtemperaturer imødegås fra start.

U-værdien for ramme/karmkonstruktionen har i Danmark ikke fulgt med udviklingen på rudeområdet, mens der i Tyskland er udviklet isolerende ramme/karmkonstruktioner i forbindelse med det såkaldte "Passiv Haus" koncept. Herhjemme er de fleste forsøg på udvikling af bedre ramme/karmkonstruktioner udført på forskningsinstitutionerne, men uden at resultaterne er taget i anvendelse af industrien. Udviklingen af smalle ramme/karmkonstruktioner er en lovende og umiddelbar vej for dels at reducere varmetabet gennem ramme/karmarealet og dels at øge glasandelen af det samlede vinduesareal med deraf følgende større sol- og dagslysendfald uden at ændre på rudens opbygning.

En forbedret U-værdi kan direkte opnås ved at anvende isolerende afstandsprofiler i den forseglede rudeløsning. Afstandsprofilerne findes på markedet, men anvendes stadig kun i meget begrænset omfang primært på grund af en lidt højere pris end for den traditionelle løsning.

En tolags energirude har en center U-værdi meget tæt på 1 W/m²K. Yderligere reduktion af U-værdien kræver tilføjelse af et ekstra lag glas, hvorved U-værdien kan sænkes yderligere til omkring 0,5 W/m²K. Dette medfører til gengæld en væsentlig reduktion i rudens g-værdi og i dagslystransmittansen. Derudover udgør udvendig kondens på godt isolerende ruder en væsentlig anvendelsesmæssig gene. Fænomenet, der skyldes underafkøling af den yderste glasoverflade ved udstråling til himlen, optræder i Danmark ved U-værdier omkring 1,3 W/m²K og nedefter. Der er i dette projekt opbygget et program, der kan beregne kondenshyppigheden som funktion af en række faktorer. Programmet er anvendt til at undersøge en række muligheder for at eliminere problemet. Den mest effektive løsning er at anvende en hård lavemissionsbelægning på det yderste lag glas, hvilket praktisk taget løser kondensproblemet for ruder med U-værdier ned til 0,5 W/m²K. Løsningen indebærer imidlertid en reduktion i rudens g-værdi. En anden løsning kan være de nye hydrofile belægninger, der ikke påvirker sol- og lystransmittansen. Belægningernes primære mål er at mindske rengørings-

behovet, idet belægningen bevirker, at der ikke kan dannes vanddråber på overfladen, men at de trækkes ud over hele ruden. Det vides endnu ikke, hvordan ruden opfører sig i frostvejr. Elopvarmning af det yderste lag glas enten permanent til lige over luftens dugpunkt eller om morgenen efter behov er måske en attraktiv løsning, der rent energimæssigt er en god investering, hvis det kan fremme brugen af bedre isolerende rudeløsninger.

Både g -værdi og lystransmittans kan øges ved anvendelse af glas med lavt jernindhold og /eller antirefleksionsbehandling af glasoverfladerne – løsninger der er udviklet, men som ikke finder anvendelse. Glas med lavt jernindhold er væsentlig dyrere end almindeligt glas på grund af produktionsmæssige forhold, hvorfor der ikke kan forventes en væsentlig prisreduktion ved øget efterspørgsel.

Baseret på de gennemførte analyser bør udviklingen af vinduer gå i retning af opnåelse af højere g -værdi og lavere U -værdi. På kort sigt ligger udviklingsmulighederne primært i udvikling af smalle ramme/karmkonstruktioner til indbygning i velisolerede vægkonstruktioner uden, at isoleringstykkelsen skal reduceres i væggen. Derudover er der en væsentlig besparelsesmulighed i anvendelse af isolerende afstandsprofiler i ruderne. Den smalle ramme/karmløsning medfører automatisk en større g -værdi for vinduet, og for selve ruden er anvendelse af antirefleksionsbehandlet glas en økonomisk attraktiv løsning til forbedring af vinduernes g -værdi. Jernfattigt glas ser derimod ikke ud til at være en økonomisk rentabel løsning til forbedring af g -værdien på trods af, at der samtidig opnås en mindre farvning af det transmitterede lys. Anvendelse af trelagsruder anses ikke for økonomisk rentabelt, før der er udviklet ramme/karmsystemer, der isoleringsmæssigt kan matche de lave rude center U -værdier.

Forbedring af vinduernes energimæssige forhold kræver, at der ved projekteringen tages hensyn til de indeklimamæssige konsekvenser gennem projektering af en effektiv automatisk styret solafskærmning og/eller udluftning af bygningen når der er behov for det.

SUMMARY

The scope of this project has been an energetic evaluation of possible developments of windows within a few years time horizon. The development possibilities are evaluated based on the calculated overall influence from the window on the energy consumption for space heating as well as on the indoor thermal environment. Beside, eventual barriers for further developments are tried identified.

The overall evaluation has been carried out as a calculation of the required space heating demand and the required cooling demand for keeping the indoor temperature at a maximum of 24 °C. Calculation of the cooling needs is used as a measure of the overheating problem related to the different window solutions and the sum of required heating and cooling energy forms the basis for comparison of different window solutions. In general increase of the g-value and decrease of the U-value will lead to an improved energetic performance except for low energy buildings, where increase in g-value above a certain value will increase the required total energy consumption (sum of heating and cooling). The optimum g-value depends on the distribution of the windows on orientations. Mechanical cooling can be avoided using solar control glazing, but from an energetic and comfort point of view the two solutions are equivalent as the solar energy transmittance is reduced also in periods when the solar energy is usable for space heating. The optimum solution is windows with high g-value and low U-value combined with a dynamic solar control system and/or enhanced venting at rising indoor temperatures. The solar control may not reduce the solar energy transmittance except when active. Both solutions for prevention of overheating should be automatically controlled in order to meet the temperature increase from the very start.

In Denmark the U-value of the framing systems has not been developed as far as the development of the glazing, while the "Passiv Haus" concept in Germany has lead to the development of insulating frame constructions. Research institutions have mainly carried out the Danish development of better insulating framing systems, but the window industry has not made use of the results. Development of slim frame constructions is a promising and straightforward route for reduction of the frame heat loss and increase of the transparent area leading to increased solar energy and daylight transmission without changing the glazing composition.

An improved U-value is directly accessible by exchanging the traditional steel spacer with insulating spacers in the sealed glazing units. The insulating spacers are already on the market, but are rarely applied due to a small cost increase relative to the traditional solution.

A double glazed sealed energy glazing has a centre U-value close to 1 W/m²K. Further reduction requires an extra layer of glass in which case the U-value can come as low as 0.5 W/m²K, but at the same time the g-value is decreased as well as the daylight transmittance. Beside, outside condensation on the highly insulating glazing will make the application problematic. The outside condensation, which is caused by supercooling of the outer glass surface due to radiation to a clear sky during nighttime, occurs on glazing with centre U-values of 1.3 W/m²K and below. As part of this project an Excel spreadsheet program has been developed for calculation of the amount of condensation as function of several parameters. The program has been used for evaluation of a series of different solutions to the problem. The most efficient solution is the application of a hard low emissive coating on the outer glass surface, that almost prevent any condensation for glazing U-values as low as 0.5 W/m²K. However, the low emissive coating leads to a decrease in the solar energy

transmittance. A possible solution that does not change the solar energy transmittance could be the newly developed hydrophilic coatings primarily developed for reducing the cleaning frequency. The hydrophilic surface prevents drop formation on the surface as the water is suspended to a thin water film on the total glazing surface. However, the effect at freezing temperatures still needs to be investigated. Finally, electrical heating of the outer glass layer, either permanently to just above the dew point or just in the morning if required, could be an attractive solution from an energy point of view, if it could enhance the use of the better insulating glazing solutions.

Both the solar energy transmittance and the daylight transmittance can be increased if the ordinary glass is exchanged with low iron glass and/or an anti-reflective coating of the glass surfaces. Both solutions are commercially available but are not used by the glazing industry. Low iron glass is rather expensive due to increased energy consumption for melting the raw materials and an important cost reduction should not be expected even if the sales volume increases.

Based on the analyses carried out the general conclusion is that the window development from an energetic point of view still should focus on increased solar transmittance and lower U-values. On a short time basis this should mainly be achieved by development of slim frame constructions designed for use in highly insulated wall constructions allowing for a minimum decrease of the wall insulation thickness in the wall. Furthermore, a significant energy saving could be achieved if insulating spacers are used in the glazing units. The slim frame construction automatically leads to an increased solar energy transmission, which further can be increased by application of anti-reflective surface treatment of the glass layers. This treatment is one of the few economical attractive measures for increasing the energetic performance of the glazing, while use of low iron glass is too expensive for the moment.

The possible increase in the energetic performance of windows requires that the planning of building projects incorporates the consequences on the indoor thermal environment of such windows by ensuring an efficient automatic controlled dynamic solar shading and/or venting of the building when required.

FORORD

RESUME

SUMMARY

INDHOLDSFORTEGNELSE	1
1. INDLEDNING	2
2. UDVENDIG KONDENS PÅ HØJISOLERENDE VINDUER	4
2.1 Beskrivelse af program.....	5
2.2 Mulige løsninger til undgåelse/fjernelse af kondens.....	7
2.3 Analyser udført med programmet	11
2.4 Sammenfatning fra mulige løsninger og af beregninger.....	21
3. BESKRIVELSE AF VURDERINGSMETODE	23
4. U- OG g-VÆRDIENS BETYDNING FOR ENERGIFORBRUG OG OVERTEMPERATURER.....	27
5. ANALYSE AF OVERTEMPERATURPROBLEMATIKKEN.....	30
6. KONKLUSION AF DE GENNEMFØRTE TEORETISKE ANALYSER.....	38
7. TEKNISKE MULIGHEDER FOR OPNÅELSE AF LAVERE VARMETAB OG HØJERE SOLENERGITRANSMITTANS	40
8. MULIGE PRODUKTFORBEDRINGER PÅ KORT SIGT	50
9. KONKLUSION.....	53
10. REFERENCER.....	55
APPENDIKS 1 Brugervejledning til Excel-programmet til beregning af kondensforhold for vinduer	57
APPENDIKS 2 Opstilling af varmebalance og anvendte formeludtryk til beregning af kondensforhold for vinduer	61
APPENDIKS 3 Ligninger til beregning af energiforbruget til fjernelse af kondens på ruder ved kortvarig elopvarmning af yderste lag glas	68
APPENDIKS 4 Regressionsudtryk til bestemmelse af opvarmningsbehov og vurdering af overtemperaturer	71

1. INDLEDNING

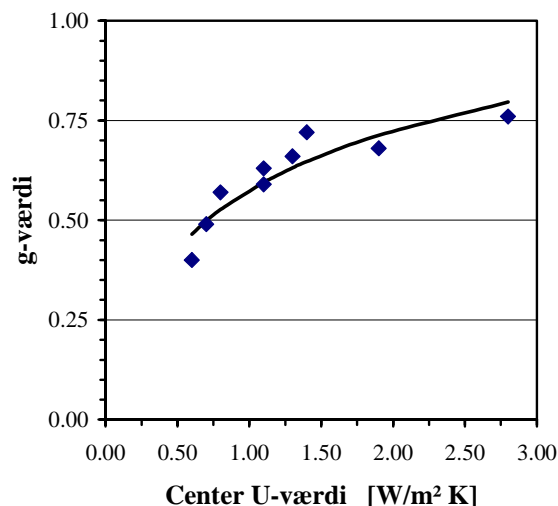
Projektet ”Helhedsvurdering af vinduer – mulige produktforbedringer inden for en tidshorizont på 5 år” blev formuleret med henblik på at få klarlagt betydningen af de forskellige faktorer omkring vinduer, der har betydning for energiforbrug og indeklime og ikke mindst samspillet mellem vinduerne og bygningen samt hvilke forhold, der kan vise sig at være begrænsende for udvikling af energimæssigt bedre vinduer.

I kontorbyggeri vil det interne varmetilskud ofte være så stort, at det kan dække langt den største del af opvarmningsbehovet, hvorved vinduernes U-værdi bliver af mindre betydning og, at der i praksis næsten altid vil være tale om solafskærmende rudeløsninger. Vinduets vigtigste funktion bliver i dette tilfælde at tilføre dagslys og eventuelt indgå som et led i bygningens ventilation. Der er derfor i dette projekt udelukkende fokuseret på vinduer til boliger, hvor vinduets isoleringsevne og solenergitransmittans har en betydelig indflydelse på boligens opvarmningsbehov.

Vinduernes indflydelse på boligens energiforbrug og indeklime afhænger selvfølgelig af vinduets U-værdi og resulterende solenergitransmittans, men også af en lang række faktorer, som ikke umiddelbart har noget med selve vindueskomponenten at gøre. Det drejer sig f.eks. om vinduesarealets fordeling mod de forskellige verdenshjørner, skyggeforhold, vinduets indbygningsforhold samt husets isoleringsniveau og effektive varmekapacitet.

Rudeopbygning

Generelt har der hidtil fra rudebranchen været fokuseret på opnåelse af lavere U-værdi ved anvendelse af lavemissionsbelægninger, isolerende gasarter mellem rudens glaslag samt anvendelse af 3-lagsruder. Anvendelsen af flere glaslag og lavemissive belægninger medfører imidlertid en reduktion af rudens g-værdi (total solenergitransmittans), hvorved en del af gevinsten ved den lavere U-værdi modsvarer af et lavere solenergitilskud gennem ruden (figur 1).



Figur 1. Sammenhæng mellem center U-værdi og g-værdi for typiske rudeløsninger.

Det er imidlertid vanskeligt at vurdere, hvor stor betydning U-værdien har i forhold til g-værdien, idet udnyttelsesmulighederne for solenergitilskuddet afhænger af den aktuelle

bygning. Eksempelvis vil næsten al solenergien, der falder ind gennem vinduerne i et dårligt isoleret hus i fyringssæsonen, kunne udnyttes til rumopvarmningen, mens det for et lavenergihus måske kun er 30 % af solenergien, der kan udnyttes. Udnyttelsesgraden afhænger endvidere af husets varmeakkumuleringssevne

Der er derfor i dette projekt udført en lang række simuleringer af forskellige bygningstyper med forskellige vinduesløsninger, ud fra hvilke det er forsøgt at udlede nogle generelle retningslinjer til brug for helhedsvurderingen. Der er specielt fokuseret på det resulterende termiske indeklima, idet det er forholdsvis nemt, at opnå et reduceret opvarmningsbehov ved anvendelse af store sydvendte vinduesarealer, hvilket imidlertid vil kunne gøre boligen uudholdelig at opholde sig i på solrige dage – både sommer og vinter. Dette forhold har medført en diskussion om, hvorvidt den generelt formulerede målsætning om ”så lav U-værdi og så høj g-værdi som muligt” også gælder, hvis der ud over de energimæssige forhold også tages hensyn til det termiske indeklima. Det er blandt andet et af de spørgsmål, der søges besvaret med dette projekt.

Ramme/karmkonstruktionen

På rudesiden er der sket en stor udvikling frem mod energimæssigt bedre ruder, og 3-lagsruder med en center U-værdi under $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ kan købes på markedet. På ramme/karmsiden er der derimod ikke sket den store udvikling i Danmark frem mod bedre isolerende konstruktioner, der kan matche rudernes lave U-værdier. Det betyder, at selvom en superisolerende rude anvendes i en traditionel trækarm, opnås der ”kun” en total U-værdi lige omkring $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ grundet ramme/karmkonstruktionens høje U-værdi på ca. $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ samt kuldebroforholdene omkring rudens afstandsprofil. Ramme/karmkonstruktionens betydning bliver så markant, fordi rudedelen kun udgør mellem 60 og 70% af vinduets samlede areal. Ydermere betyder det store ramme/karmareal, at en væsentlig del af den solenergi, der rammer vinduesarealet, ikke bliver transmitteret videre ind i bygningen. Alt andet lige vil en reduktion af ramme/karmarealet medføre en reduktion af vinduets samlede U-værdi (større glasareal med den lave U-værdi) samt en forøgelse af den transmitterede solenergi for det samme vinduesareal. I dette projekt undersøges mulighederne for udvikling af bedre isolerende smalle ramme/karmkonstruktioner med et forbedret samspil mellem rude og ramme samt mellem karm og vægkonstruktion.

Andre forhold

Udvendig kondens på vinduernes transparente areal vil være et stigende problem ved anvendelse af ruder med lavere U-værdier. Problemet kendes allerede for 2-lagsruder med en center U-værdi på $1,1 - 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, men ved ruder med lavere U-værdier vil problemet blive yderligere forstærket, og for nordvendte ruder vil der være risiko for, at kondensdannelsen forbliver på ruden hele dagen. Derved blokeres for udsyn, hvilket kan være en væsentlig anvendelsesmæssig forhindring for udbredelse af bedre isolerende rudetyper. Det anses derfor som en absolut nødvendighed at finde en løsning på kondensproblemet, der opstår på klare stille nætter (især mellem midnat og klokken 6), hvor udstrålingen fra rudens overflade til himlen bliver større end varmetilførslen gennem ruden indefra. Herved bliver rudens udvendige overfladetemperatur lavere end luftens dugpunkt, og der dannes kondens.

2. UDVENDIG KONDENS PÅ HØJISOLERENDE VINDUER

I de seneste år er der udviklet ruder med U-værdier under $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ - de såkaldte energiruder. Den lave U-værdi betyder, at der ved visse forhold, dvs. ved stor luftfugtighed i udeluften kombineret med stor varmeudstråling til rummet, opstår kondens på den udvendige side af ruderne. Kondensen opstår, fordi rudens udvendige glas kommer under luftens dugpunktstemperatur. Fænomenet opstår typisk sent på natten, hvor det yderste glas på ruden er tilpas nedkølet samtidig med, at den relative luftfugtighed i udeluften ligger tæt på 100 %, således at vanddamp i luften vil kondensere på glasset.

Kondens hindrer udsynet sent på natten og i det første morgentimer og har bevirket, at brugerne med disse rudetyper er blevet generet af det ringere udsyn. Kondensen kan, hvis der ikke eller kun i ringe grad kommer sol på ruden, blive siddende i flere dage - især ved nordlige og vestlige rudeorienteringer, hvor solstrålingen ved efterår og vintertid er lille. Kommer det yderste glas ved ovenstående forhold under $0 \text{ }^\circ\text{C}$, vil der komme rim på ruden, som i endnu højere grad vil hindre udsynet. Ved lavere U-værdier end $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ vil kondensperioderne blive hyppigere og længere, og dette kan måske bevirke, at forbrugerne ikke vil købe vinduer med så lave U-værdier. Det er i dag muligt at lave trelags ruder med en U-værdi ned til $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Kondens/rimfænomenet opstår også på ydervægge - endda mere hyppigt, hvor U-værdien typisk på nyere byggeri ligger på $0,2$ til $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, men her er man ikke i samme grad generet af kondensen.

Kondensfænomenet er nok mest kendt som kondens/rim på biler. Kondens opstår hyppigere på biler end på ruder i bygninger. Dette skyldes to forhold: 1) biler er normalt ikke opvarmede, når de ikke er i brug, hvorfor der ikke sker nogen opvarmning af ruden, og 2) udstrålingsforholdet til rummet er større for store dele af bilens skrå overflade og vil give en lavere temperatur på overfladen af bilen end for lodrette ruder i boliger.

Ovenlysvinduer i boliger har i forhold til lodrette vinduer en større varmeudstråling til rummet, hvilket giver en længere periode med kondensrisiko. Problemet er måske knap så generende, da ovenlysvinduer hovedsageligt er til for at få lys ind i boligen og ikke som ved de lodrette til at se ud af. I taglejligheder, hvor alle vinduer er ovenlysvinduer med lavenergiruder, vil problemet dog være anseligt.

Kondensdannelse har givetvis også en anden negativ effekt nemlig, at den giver anledning til at rengøringsfrekvensen af ruden må sættes op, da snavs i luften sætter sig på kondensdråberne, og når disse fordamper er det kun snavset, som sidder tilbage på ruden.

Med baggrund i ovenstående er der opbygget et beregningsprogram i regnearksprogrammet Excel til vurdering af kondensrisikoen på vinduesruder. Med programmet er det muligt at undersøge hvilke faktorer, som har indflydelse på kondensdannelsen, samt hvad der evt. kan gøres for at mindske eller måske helt undgå udvendig kondens på ruder.

2.1 Beskrivelse af program

Beregningsprogrammet "Kondens på rude v2.04" er opbygget i regnearksprogrammet Excel og består af en fil med et antal regneark, der henholdsvis indeholder beregningsdelen, udvalgte data fra det danske Design Reference Year (DRY) [1] som anvendes i beregningsdelen, udvalgte diagrammer for kondensterimer, kondensperioder, kondensstykkelser samt udvalgte beregnede temperaturkurver.

Beregningerne er opbygget i to step. Først er der opstillet en varmebalance for det øverste 0,10 m lag af jorden. Herved findes temperaturen af den øverste del af jorden, som senere anvendes ved beregning af overfladetemperaturen af det yderste glas i ruden. Herefter er der opstillet en varmebalance for ruden, hvorved den udvendige overfladetemperatur af ruden findes.

Nedenstående figurer viser udsnit af programmets beregningsdel.

BEREGNING AF KONDENS PÅ RUDE																				
Parametre			Konstanter			Beregnete størrelser			Resultat		Fordeling									
Rudens center U-værdi	1.10	W/m ² K	Emitans af jordoverflade	0.900	-	Jordoverfl. reflektans	0.25	-	Kondens på rude	Klokken	Timer	Måned	Timer							
Rudens retning	0	*	Jordoverfladens absorbtans	0.75	-	Jord spec. varmekap.	135000	J/K	I alt om året	0-2	95	Jan	23							
Rudens hældning med vandret	90	*	Dybtliggende jordtemperatur	8.0	°C	Vink.forh. rude-omgiv.	0.50	-	528 timer	2-4	119	Feb	8							
Rudens udvendige emitans:			Isolans af jordlag	2.0	m ² K/W	Isol. inde-udv.glas	0.87	m ² K/W		4-6	122	Mar	7							
tør:	0.850	-	Densitet af jord	1500	kg/m ³	Tabstf. inde-udv. glas	1.15	W/m ² K	Kondensmængde	6-8	60	Apr	86							
våd:	0.927	-	Jordens varmekapacitet	900.0	J/kgK				1605 gram	8-10	10	Maj	16							
rim:	0.984	-	Tykkelse af jordoverflade	0.1	m					10-12	5	Jun	32							
Rudens udvendige absorbtans:			Vinkelstr.forh. jord -> himmel	1.00	-				Energi til opvarmning af yderste lag glas	12-14	3	Jul	100							
tør:	0.100	-	Udeluftens varmekapacitet	1.006	kJ/kgK				19.82 MJ	14-16	3	Aug	52							
våd:	0.500	-	Vands fordampningsvarme	2501.0	kJ/kg				5.5 kWh	16-18	7	Sep	135							
rim:	0.300	-	Udv. overgangsisolans	0.04	m ² K/W					18-20	19	Okt	0							
Rudens vinkelstr. til himlen	0.50	-	Stefan-Boltzmanns konstant	5.7E-08	W/m ² K ⁴					20-22	33	Nov	67							
Indetemperatur	20.0	°C	Himmels emitans	1.000	-					22-24	52	Dec	2							
			Tidsskridt i beregningen	3600	sek					I alt	528	I alt	528							
			Rudens areal	1.0	m ²															
JORDVOLUMEN 0 = - Q ledning + Q konvektion - Q stråling + Q sol abs. af jord RUDE 0 = Q gennem rude + Q sol absorberet af rude - Q stråling til himmel - Q stråling til jord + Q konvektion																				
Q ledning	Konvektiv	Q konvek.	Q stråling	Q sol	Varmebalance	Temperaturstigning	T jord	Q rude	Indfaldsvinkel på rude	Solstråling på rude	Jordstråling	Q stråling	Q sol	Q stråling	Q stråling	Vanddamps partialtryk				
til jord i 6 m dybde	varmeovergang	til jord	til himmel	absorb. af jord	jord	Δ T	jord	gennem rude	cos β	Direkte	Diffus	reflekt.	på rude	af rude	til himmel	til jord	iluft	iluft	v. rude	
α _k	J	W / m ² K	J	J	J	J	K	°C	J	W/m ²	W/m ²	W/m ²	W/m ²	W/m ²	J	J	J	P _{an}	P _a	P _a
								2.8												
-9360	70.0	0	178355	0	-168995	-1.3	1.5	71317	-0.530	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	84099	-32842	739	592	738
-11613	64.4	243784	162429	0	92968	0.7	2.2	71633	-0.466	0.0	0.0	0.0	0.0	0	85075	-36207	729	583	734	
-10374	55.7	72766	172940	0	-89801	-0.7	1.6	71660	-0.355	0.0	0.0	0.0	0.0	0	85028	-33459	729	583	734	
-11571	50.5	223348	159546	0	75373	0.6	2.1	70753	-0.205	0.0	0.0	0.0	0.0	0	85092	-36040	739	592	746	
-10566	49.6	137444	164824	0	-16814	-0.1	2.0	70353	-0.026	0.0	0.0	0.0	0.0	0	84266	-34590	745	648	751	
-10790	49.0	210550	159679	0	61662	0.5	2.5	69118	0.169	0.0	0.0	0.0	0.0	0	84914	-35869	761	647	767	
-9968	47.4	74704	150477	0	-65805	-0.5	2.0	70117	0.368	0.0	0.0	0.0	0.0	0	75502	-34871	745	596	754	

Figur 2. Udsnit af kondensberegningens program i regnearksprogrammet Excel.

Inddata til programmet indtastes dels under overskriften "Parametre", der indeholder de parametre der kan varieres under valg af rudetype og indbygningsforhold, og dels under overskriften "Konstanter", der indeholder fysiske konstanter og beregningsmæssige parametre. Resultatet af beregningen fremgår af de grønne felter, hvor mængden og tidsfordelingen af kondensforholdene samt den nødvendige energimængde til netop at holde ruden kondensfri bliver vist. Tidsfordelingen af kondensdannelsen vises endvidere grafisk i fanerne "Døgnfordeling", "Månedsfordeling" og "Kondensstykkelse".

	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN
1																			
2																			
3																			
4																			
5																			
6																			
7																			
8																			
9																			
10																			
11																			
12																			
13																			
14																			
15																			
16																			
17								1605 gram											
18																			
19																			
20																			
21																			
22																			
23																			
24																			
25																			
26																			
27																			
28																			
29																			
30																			
31																			
32																			
33																			

Figur 3. Udsnit af kondensberegningsprogram i regnearksprogrammet Excel.

I søjlen AM er angivet de energimængder på timebasis, der skal til for at fordampe den opstået kondens ved opvarmning af det yderste lag glas med el. Desuden ses i søjle AN den beregnede udvendige overfladetemperatur (T rude) af det yderste lag glas i ruden. I celle AM19 er den samlede årlige energimængde der skal til for at fordampe kondens og opvarme det yderste lag glas til 1 K over udetemperaturen angivet.

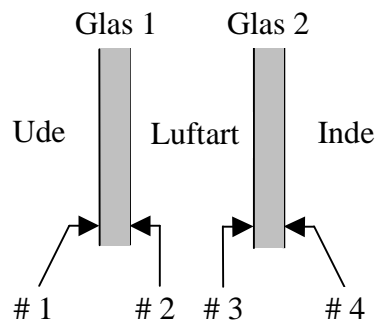
I appendiks 1 er angivet proceduren, hvis der skal foretages en beregning. Desuden er der vist eksempler på udskrift af andre ark fra programfilen. En detaljeret beskrivelse af varmebalancen og de anvendte beregningsudtryk findes i appendiks 2.

2.2 Mulige løsninger til undgåelse/fjernelse af kondens

Hvilke muligheder har man for at mindske eller måske helt undgå kondens på vinduesruder? Kondensproblemer opstår typisk på ruder med en U-værdi på ca. $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ eller derunder. I nedenstående afsnit er angivet nogle forskellige muligheder, som de ses på nuværende tidspunkt for at hindre kondens-/rim, men der sker stadig en udvikling inden for rudeområdet, der måske senere kan give nye muligheder.

For at forhindre kondens på den udvendige side af ruder skal varmeudstrålingen til himmelhvelvingen reduceres. Det er den kolde udvendige glasflade af ruden i kombination med den fugtige udeluft, som giver kondens.

Inden for rudeområdet opererer man med en terminologi, hvor glasoverfladerne nummereres startende fra den udvendige side (her den kolde side) af det udvendige glas, der betegnes som # 1 (flade 1), den indvendige side af det udvendige glas betegnes som # 2 (flade 2) osv. Såvel flade som glas nummereres udefra. Se nedenstående figur 4.



Figur 4. Glasoverfladernes nummerering efter rudebranchens terminologi.

Drejer det sig om en trelagsrude, benævnes den udvendige side af det indvendige glas som flade 5 og den indvendige side benævnes som flade 6 og så fremdeles, hvis der er endnu flere glaslag.

Udstrålingen kan f.eks. reduceres ved at belægge den udvendige side på det udvendige glas (flade 1) af ruden med en hård lavemissionsbelægning (tinoxid i ca. 400 nm tykkelse) således, at emissionen (varmeudstrålingen) falder fra ca. 0,9 til ca. 0,16. Problemerne med de hårde belægninger er, at de skal lægges på glasoverfladen inden glasset er helt afkølet, hvilket giver nogle mikroskopiske ujævnheder, som gør ruden "ru" og giver en lille forvrængning af lyset (svagt farvede reflekser som er blågrønne) i forhold til et glas uden belægning. Det er dog kun det trænede øje, som umiddelbart kan se forvrængningen. Denne hårde belægning har desuden den ulempe, at den reducerer lystransmittansen og solenergitransmittansen en anelse. Desuden er den hårde belægning mere "ru" end en normal glasoverflade, hvilket giver anledning til, at skidt og snavs har nemmere ved at sætte sig i de mikroskopiske sprækker, hvilket bevirker, at rengøringsfrekvensen må sættes op - ellers forøges emittansen af glasset. Det er spørgsmålet, hvor ofte rengøringen skal foretages for at opretholde den lave emittans, og det kan være en hindrende faktor ved udbredelsen af denne belægningstype. Ved laboratorieforsøg har det dog været muligt at polere belægningsoverfladen, således at forvrængningen og ruheden er blevet betydeligt mindre. Udvikles denne teknik, vil den hårde belægning være endnu mere interessant i kondensøjemed.

En blød lavemissionsbelægning reducerer også lystransmittansen og solenergitransmittansen en anelse, men giver ikke denne forvrængning og har en lavere emission på ca. 0,04. Denne belægning kan imidlertid ikke tåle indholdet af fugten i almindelig luft og benyttes kun på glasoverflader, som vender ind mod hulrummet i forseglede ruder.

I beregningsafsnittet er det undersøgt, hvilken indflydelse forskellige emissionsfaktorer på flade 1 har på antallet af timer med kondens på en lodret rude.

Inden for de seneste år er der udviklet en belægning til glas, som er delvis selvrensende (Aquaclean, [2]) ved, at belægningen er hydrofil, dvs., der dannes en vandfilm på hele ruden, således at vandet med snavs nemmere løber af ruden, når det regner. På normale ruder dannes der vanddråber på ruden når det regner eller ved anden vandpåvirkning, men på det "hydrofile" glas dannes der en vandfilm, som er spredt ud over hele glasset. Idéen i kondensmæssig henseende ved at have en forholdsvis tyk vandfilm på ruden skulle være, at der ikke kan sætte sig vand fra luften i form af dråber (kondens) på glasset, men dråberne vil flyde ud på vandfilmen. Hermed skulle forvrængningen af lyset blive mindre end ved dråbedannelse. Det er dog et spørgsmål, om ikke selve vandfilmen vil blive til rim, når glastemperaturen kommer under 0°C.

En anden type delvis selvrensende glas (Activ, [3]) er udviklet, hvor glasset er belagt med en speciel dobbeltvirkende belægning. Når glasset udsættes for sollysets ultraviolette stråler, reagerer belægningen med luftens ilt ved en "fotokatalytisk" proces og nedbryder organisk snavs, som har sat sig på glasset. Specialbelægningen er desuden "hydrofil", hvilket vil sige, at regnvand spredes jævnt ud over glasfladen, således at snavs lettere vaskes væk. Sammenlignet med almindeligt glas tørrer vandet på det specialbelagte glas hurtigere ind og efterlader færre indtørringspletter.

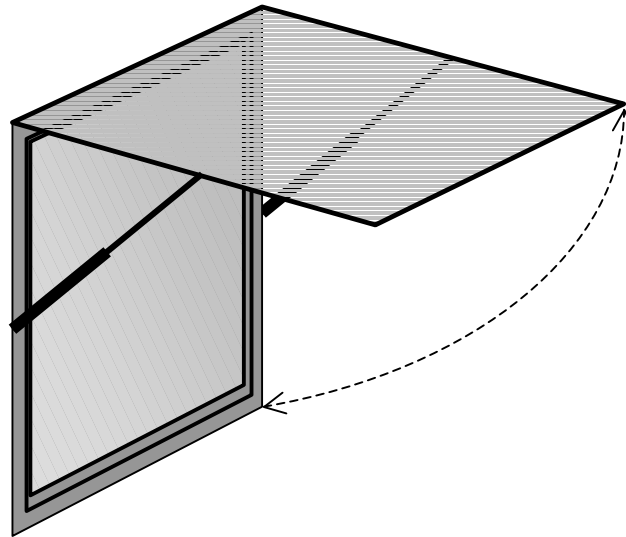
En behandling, hvis funktion ligner ovenstående lidt, er det såkaldte ClearShield System (Ritec, [4]), som er en overfladebehandling af glasset med en form for polymer harpiks, som binder sig til glasset ved en permanent krydsbinding. Overfladen bliver derved ikke-klæbende (non-stick) og derved lettere at rengøre og forbliver renere i længere tid samt modstår pletter og misfarvning. Måske har denne belægning også en kondenshindrende effekt.

En antidugbehandling som hindrer/mindsker dugdannelse, hvilket kendes fra brilleglas og skibriller, kan måske anvendes i forbindelse med mindskelse af kondens på ruder. Her er det en væske som påføres overfladen, hvis funktion ikke er varig, men væsken fordamper efter en vis tid. Derfor skal denne procedure foretages med jævne mellemrum, hvilket nok ikke er acceptabelt, når det gælder ruder.

En mulighed inden for mekanisk afskærmning vil være at have et udvendigt rullegardin, som f.eks. rulles ned/op foran vinduet, når der var risiko for kondens eller, når det blev mørkt. Gardinet kunne styres automatisk med mulighed for manuel styring således, at gardinet kunne anvendes i stedet for et indvendigt gardin eller et indvendigt rullegardin. Desuden kan det udvendige rullegardin selvfølgelig også anvendes som solafskærmning. Ulemper vil være komponent og monteringspris samt vedligeholdelsesomkostninger.

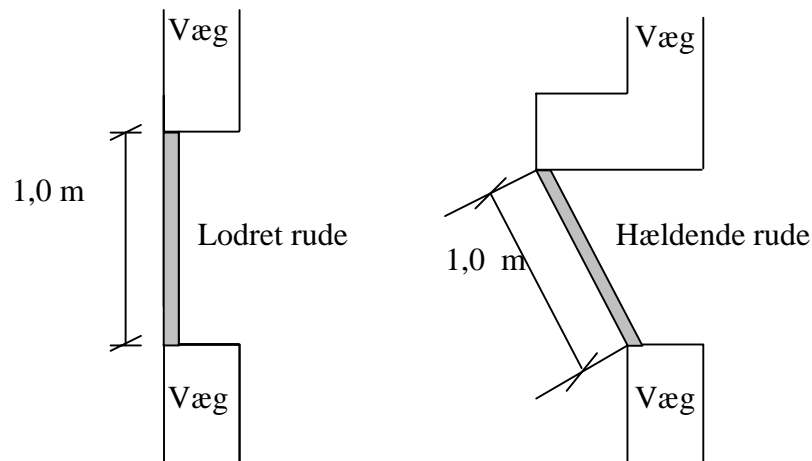
En delvis løsning vil være at afskærme ruden således, at udstrålingen til himmelrummet bliver mindre. Dette kunne gøres ved at have et udhæng lige over ruden. På etplanshuse kunne det være udhænget fra f.eks. taget. Desuden vil denne form for afskærmning også virke som en

form for solafskærmning. Afskærmningen kunne evt. udføres som en glasskodde med solafskærmende glas således, at den kunne virke som solafskærmning i dagtimerne og som kondenshindrende i nattetimerne. En principskitse af et sådant system er angivet nedenfor i figur 5. Hvor stort et evt. fast udhæng skal være for at undgå/mindske kondensdannelsen undersøges i beregningsafsnittet.



Figur 5. Principskitse af mobil kondens- og solafskærmning.

I stedet for at have en lodret rude kunne man hælde ruden ned mod jorden, således at varmeudstrålingen bliver større til jorden og mindre til himmelhvælvingen, hvilket vil betyde, at ruden blev mindre afkølet og risikoen for kondens mindske. En tegning af princippet er vist nedenfor i figur 6.



Figur 6. Principskitse af lodret og hældende rude.

Betydningen af at hælde ruden er undersøgt i beregningsafsnittet.

En hældning af ruder, som beskrevet ovenfor, ses på kommandobroen på større skibe (færger, containerskibe) samt i kontrollårne på flyvepladser. Her er det ikke kondens, som er hovedproblemet, men lysrefleksioner inde fra kommando- og kontrolrummet.

Endnu en mulighed vil være at fjerne kondens/rim mekanisk om morgenen enten ved at gå ud med en skraber eller en klud eller ved at montere et system således, at det kunne gøres indefra (hvilket vil være praktisk nødvendigt ved etagebyggeri) måske vha. en magnetforbindelse til en udvendig skraber/visker eller lignende. Dette vil næppe være en løsning, som vil vinde indpas, da dette kræver, at beboerne får en ekstra huslig opgave, hvilket normalt ikke er populært.

Et udvendigt sprinklersystem kunne også fjerne kondens f.eks. ved at påføre ruden vand ved en temperatur, som ligger over luftens dugpunktstemperatur, når man vil fjerne kondensdannelsen. Desuden kunne sprinklersystemet måske også have en dobbeltfunktion, dvs. bruges til at vaske vinduer i stedet for at gøre det på traditionel vis. Systemet er en ekstrainvestering, som derfor vil være et fordyrende led. Det skal nævnes, at sådan et system skal frostsikres på en eller anden måde.

I Finland og Danmark findes tolags ruder, hvor det indvendige glas er monteret med en elopvarmet belægning (floatglas med hård lavemissiv tinoxid belægning), som skal forbedre komforten ved ruden ved at forhindre kuldenedfald og kondens på den indvendige side (flade 4) af ruden. Den elopvarmede belægning opvarmer ruden og varmetabet forøges hermed således, at det udvendige glas også bliver varmere. Hermed mindskes risikoen for udvendig kondens, eller det undgås måske helt. Principielt kunne ruden også være den eneste rumopvarmningsmetode i en bolig. Hermed kunne f.eks. et radiatorsystem undværes, og den ledige plads til systemet kunne anvendes til andre formål. Der er dog følgende energimæssige betæneligheder ved denne konstruktion: Varmetabet gennem ruden er større end, hvis varmetilførslen foregik inde i rummet f.eks. med traditionelle radiatorer eller el-radiatorer på grund af overgangsisolansen mellem luften og det indvendige glas. Ved rudekonstruktionen tilfører man energi til rummet på det dårligst isolerede sted i klimaskærmen. En lignende konstruktion som ovenstående benyttes også i glasdøre i frostmontre i supermarkeder. Disse døre med en center U-værdi på ca. $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ og en total U-værdi på ca. $2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ vil have kondensproblemer, som vil opstå på det varmeste glas (flade 4).

Ved at ændre konstruktionen af ruden således at den elopvarmede belægning flyttes ud i det yderste glas, kan man forhindre kondens/rim på ruder med lave U-værdier ved at opvarme det yderste glas til f.eks. udetemperatur. Problemet med denne konstruktion er dels, at det gør ruden lidt dyrere at producere, men det er sikkert meromkostningerne ved isætning af vinduet i boligen samt montering af diverse strømtilslutninger, som vil være afgørende for merprisen. Desuden er der udgiften til strømforbruget til fordampningen af kondensen. Den årlige energimængde, som skal til for at forhindre kondens fra ruder med forskellige U-værdier, er beregnet ved hjælp af det udviklede program og angivet i nedenstående tabel 1. Nærmere detaljer om beregningsmetoden findes i appendiks 3 og i beregningskapitlet 2.3 side 16-18.

Tabel 1. Den årlige energimængde der skal til for at holde det yderste glas kondensfrit afhængig af rudens U-værdi.

U-værdi for rude	$\text{W/m}^2\text{K}$	0,1	0,4	0,5	0,7	1,0	1,1	1,4	1,5	1,7	2,0
Energi til at forhindre kondens	$\text{kWh/m}^2/\text{år}$	35,0	23,3	20,0	14,2	7,3	5,5	2,9	2,5	1,9	1,2

Af tabel 1 ses, at det er en forholdsvis begrænset energimængde ($5,5 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$), der skal til for at holde en typisk rude med en U-værdi på $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ kondensfri.

2.3 Analyser udført med programmet

Kondens/rim på ruder er et problem, da det hindrer udsynet. En af en rudes primære opgaver er at skaffe udsyn til de udvendige omgivelser. I nedenstående beregninger er det undersøgt i hvor mange timer, der opstår kondens/rim på ruder som funktion af U-værdi, udvendigt emissionstal for glasset, udhæng over ruden samt for ruder, som hælder ned mod jorden. Desuden er der beregnet i hvilke tidsrum, der opstår kondens, hvor store mængder kondens det drejer sig om, samt energimængderne der skal til for at fordampe kondensen/rimen fra ruden.

Alle beregningerne er foretaget for et sydvendt rude på $1 \times 1 \text{ m}^2$ med en fri horisont. Rudens yderside regnes at flugte med væggen yderside, og der er ingen udhæng eller andet, der "skygger" for udstrålingen til himlen. Dermed bliver det resulterende vinkelstrålingsforhold til himlen lig med 0,5. Vejrdata er fra det danske Design Reference Year (DRY) [1].

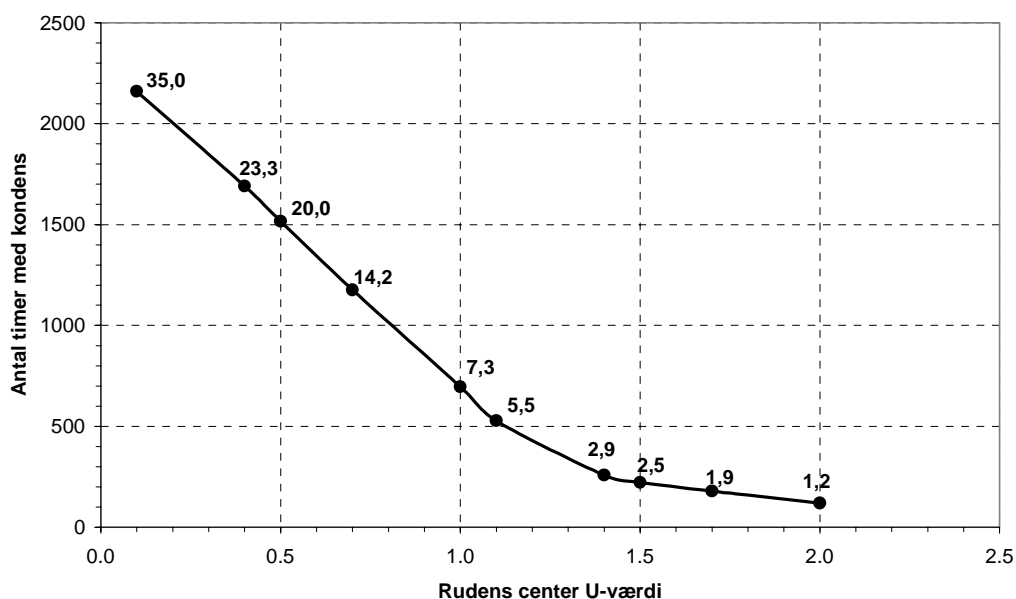
Følgende beregninger er foretaget for at kunne angive kurverne i nedenstående figurer:

- 1) Kondensperioder afhængig af U-værdi
- 2) Kondensperioder afhængig af udvendigt emissionstal for rude
- 3) Kondensperioder afhængig af udhæng (strålingsforhold til himmel)
- 4) Kondensperioder afhængig af hældning af rude ned mod jorden
- 5) Energi til fordampning af kondens
- 6) Kondensens fordeling på døgnbasis
- 7) Kondensens fordeling på månedsbasis
- 8) Tykkelse af kondenslag
- 9) Kondensetidspunkter hen gennem året

Nedenstående figur viser antal timer med kondens om året på ruder med forskellig U-værdier. Desuden er der ved hvert beregningspunkt angivet, hvor meget energi i kWh/m^2 rude pr. år der skal til for at forhindre/fjerne den udvendige kondens på ruden.

Ikke overraskende ses det af figur 7, at ved høje U-værdier er risikoen for kondens mindre. For en rude med en U-værdi på $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ vil det ifølge simuleringer kræve $5,5 \text{ kWh/m}^2$ rude pr. år at forhindre kondens på ruden. Det vil givetvis være produktionen af "varmebelægningen" på det yderste lag glas samt monteringen og tilslutningen til elinstallation, som vil være det omkostningskrævende i denne løsning.

**Antal timer med kondens og
nødvendigt energiforbrug til undgåelse af kondens [kWh/m²/år]**



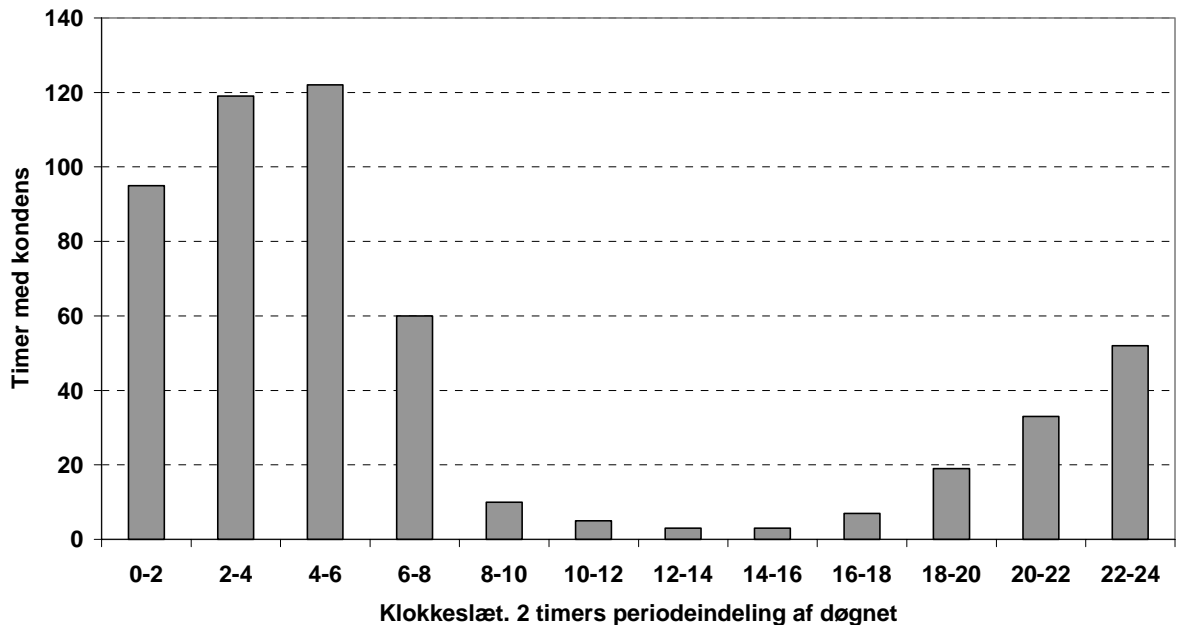
Figur 7. Timer om året med kondens på ruder med forskellige U-værdier. Ingen udhæng. Tallene angiver det maksimale energiforbrug der kræves til at fjerne kondensen ved opvarmning af det yderste lag glas.

På ruder med en U-værdi på 1,5 W/m²K og derover konstateres der normalt ikke kondens i praksis. Afvigelsen skyldes dels, at der som regel i praksis er en form for udhæng eller træer og andet, som skygger for himmelen og dels, at der er usikkerhed på f.eks. beregningen af himmelstrålingen samt beregning af solstrålingen på ruden.

Med udgangspunkt i den mest solgte tolags energirude med en center U-værdi på 1,1 W/m²K er der gennemført en række analyser af, hvorledes timerne med kondens er fordelt over døgnet og over året samt hvor tykt et lag kondens, der er beregnet at sidde på ruden fordelt over året.

Nedenstående figur 8 viser døgnfordelingen af de 528 timer med kondens, der er beregnet for tolagsruden.

Døgnfordelingen af kondenster over et år



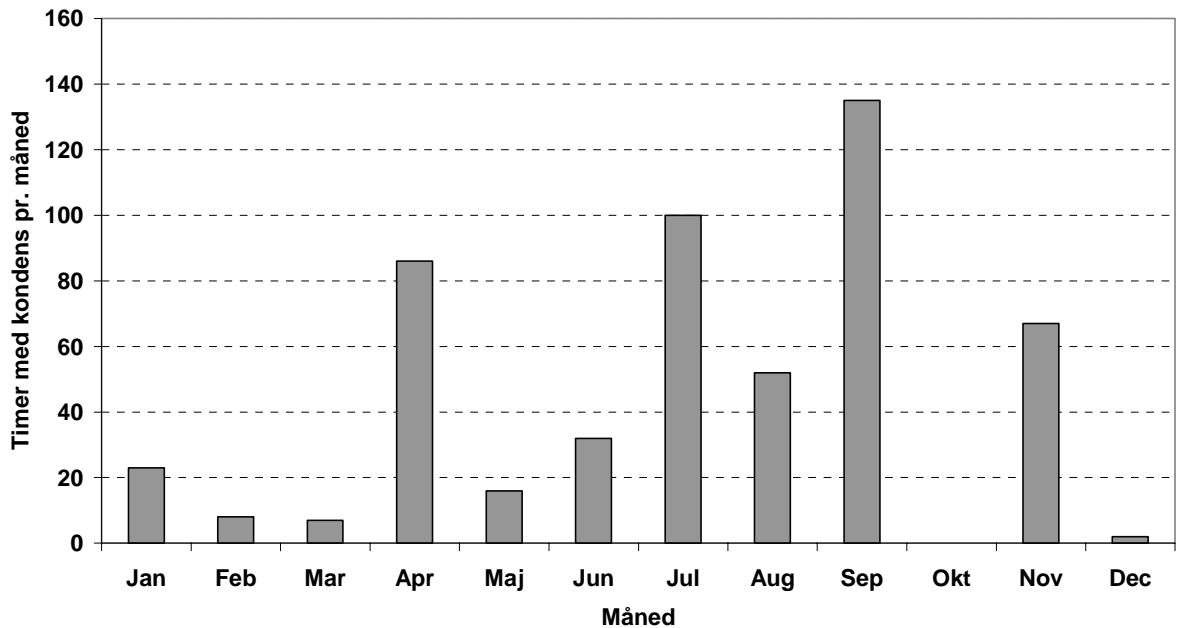
Figur 8. Fordeling af kondenster gennem døgnet for en rude med en U-værdi på 1,1 W/m²K og en udvendig emittans på 0,85.

Af figuren ses det, at de fleste kondenster er om natten fra klokken 0 til klokken 4 (ca. 214 timer) og i de tidlige morgentimer fra klokken 4 til 8 (ca. 182 timer). I alt er der 528 timer med kondens om året for denne rude, hvoraf ca. 1/3 af kondensterne ligger mellem klokken 4 og 8. Det skal bemærkes, at tallene gælder for en sydvendt rude. For andre ruderetninger vil fordelingen og det samlede antal kondenster se lidt anderledes ud. For vestvendte ruder vil kondensen blive siddende i lidt længere tid, da solstrålingen først rammer ruden senere på dagen. Det er især formiddagstimerne, hvor der ønskes udsyn gennem vinduerne, der gør den udvendige kondens problematisk. I ovenstående tilfælde mellem kl. 6 og kl. 10 er der ca. 70 timer om året med udvendig kondens ud af samlet 528 kondenster.

I figur 8 ses det, at der ifølge beregningerne er kondens på ruden midt på dagen i ca. 4 – 5 timer om året, hvilket ikke ses i praksis for sydvendte ruder. Uoverensstemmelsen mellem praksis og beregningerne skyldes dels at formlerne til beregning af himmelstrålingen og beregning af solstrålingen på ruden er behæftet med en del usikkerhed, og dels at de færreste lodrette ruder sidder i en så udsat position. Normalt vil vinkelstrålingsforholdet til himlen være reduceret af omkringliggende bevoksning og bebyggelse, og ruden vil typisk være trukket lidt ind i facaden. Med en 10° horisontafskæring reduceres kondensterne med 50%.

Nedenstående figur 9 viser fordelingen af kondenster på månedsbasis.

Månedsfordelingen af kondens timer over et år



Figur 9. Fordeling af kondens timer på månedsbasis for en rude med en U-værdi på 1,1 W/m²K og en udvendig emittans på 0,85.

Af figuren ses det, at det er i september, at de fleste kondens timer optræder. I alt optræder der kondens i 528 timer om året, hvilket vil sige, at ca. 1/4 ligger i september, hvor luftfugtigheden er høj samtidig med, at temperaturdifferensen mellem inde og ude er minimal, hvorved varmemstrømmen bliver lav. Måske lidt overraskende ligger der en del kondens timer (ca. 234 timer) i perioden fra april til og med juli. Dette skyldes, at varmemstrømmen gennem ruden er begrænset da udetemperaturen ligger nær indetemperaturen.

Månedsfordelingen kan virke lidt pudsigt, men tilsvarende uregelmæssige fordelinger fremgår også af norske og svenske undersøgelser på området. I følge norske beregninger af udvendig kondens [5, (Vedlegg 6)] findes også enkelte måneder (marts og juni, Bergen 1995), hvor en rude med en U-værdi på 1,1 W/m²K er kondensfri.

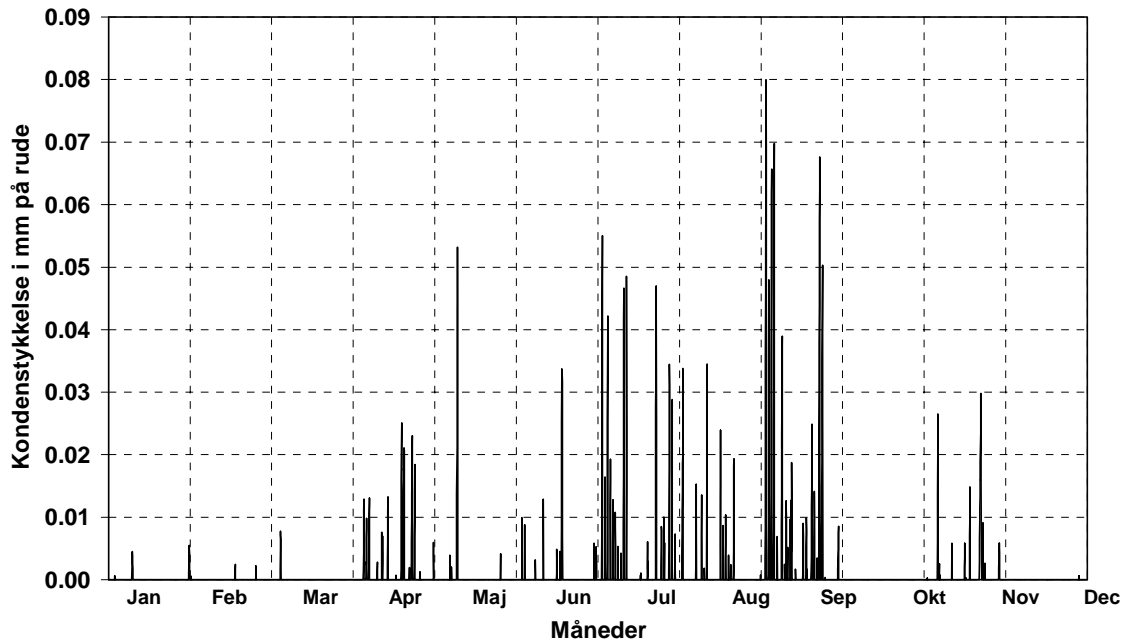
Udfra svenske beregninger [6, (side 9, figur 3)] varierer antallet af kondens timer på månedsbasis også en del. For en rude med U-værdi på 1,0 W/m²K er der kun få kondens timer i februar, mens der opstår flest timer i september. Der opstår ifølge disse beregninger kondens i alle måneder.

Fra et svensk måleprojekt [7, (tabel side 35)] er der for en rude med en U-værdi på 0,92 W/m²K ikke konstateret kondens på ruden i de 4 første måneder af året, mens der for resten af månederne er konstateret kondens med et maksimum af kondens timer i september måned.

Ved sammenligning kan det konstateres, at der er store variationer i kondens timerne, når man anvender forskellige metrologiske data indenfor de nordiske lande. Derfor er der en stor usikkerhed, når man sammenligner data fra de 3 ovenstående rapporter [5] [6] [7] med data fra nærværende rapport. Desuden skal man være varsom med at sammenligne forskellige beregningsprogrammer, som anvender forskellige beregningsforudsætninger og klimadata, men det ser ud som om, at der er en vis overensstemmelse mellem de undersøgte beregninger.

Nedenstående figur viser igen fordelingen af den udvendige kondens hen over året – denne gang ved angivelse af kondenslagets tykkelse på en tolags energirude med en center U-værdi på $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Perioder med kondens samt kondensstykkelsen på rude



Figur 10. Perioder om året med kondens samt kondensstykkelser på 1 m^2 rude med en U-værdi på $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ og en udvendig emittans på $0,85$.

Det ses, at det er i september måned, der er opstår mest kondens på ruden. I denne periode er luftfugtigheden stor og varmetabet gennem ruden lille. Ydersiden af ruden bliver ikke varmet tilstrækkelig op, og den fugtige luft sætter sig som kondens typisk mellem klokken 3 og klokken 6. Kondensstykkelsen bliver ikke på noget tidspunkt af året over $0,08 \text{ mm}$ på ruden, hvilket vil sige, at der er under $80 \text{ gram H}_2\text{O}$ på ruden ad gangen.

En af mulighederne for at imødegå generne ved den udvendige kondensdannelse er at opvarme det yderste lag glas efter en af følgende strategier:

1. Tilførsel af en konstant effekt så det yderste glas altid er varmere end dugpunktstemperaturen i udeluften.
2. Opvarmning af det yderste lag glas til lige over luftens dugpunktstemperatur, hvis risiko for kondens.
3. Opvarmning af det yderste lag glas om morgenen når/hvis udsyn ønskes indtil den natlige kondensdannelse er fordampet.

Ad 1.

Der kræves ingen styring, men svarer i realiteten til at anvende en dårligere isolerende rude, hvilket i givet fald vil være en energimæssigt og økonomisk bedre løsning.

Ad 2.

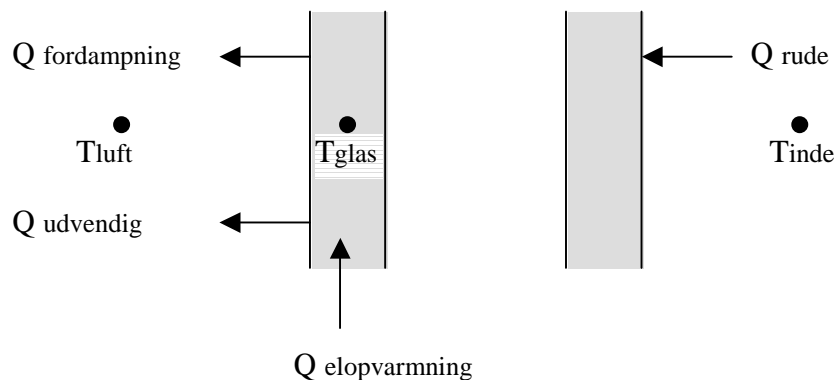
Strategien med at opvarme ruden, hvis der er risiko for kondens kræver en avanceret styring med måling af rudens overfladetemperatur og luftens dugpunktstemperatur, men vil betyde, at der aldrig vil optræde kondens på ruden og, at energiforbruget til opvarmning af ruden vil

blive reduceret, idet der kun tilføres varme til at holde ruden over dugpunktet i korte perioder om året.

Ad 3.

Den sidste mulighed kræver ikke nødvendigvis nogen styring, men kan være brugeraktiveret, dvs., at brugeren selv bestemmer, om kondensen skal fjernes ved at tænde for varmen i en kort periode indtil kondensdannelsen er fjernet. Denne strategi medfører et større effektbehov end for 2., idet der på relativt kort tid både skal ske en opvarmning af ruden og kondenslaget plus den nødvendige fordampningsvarme. Til gengæld vil strømmen kun være sluttet til i kort tid ad gangen.

Nedenstående er der opstillet beregningsudtryk til evaluering af energiforbruget i ovenstående tilfælde 2. og 3. baseret på en varmebalance med bidragene vist i figur 11.



Figur 11. Varmebalance for det yderste lag glas til brug for overslagsberegning af nødvendig energi til opvarmning af glasset.

Tilfælde 2:

Da det yderste lag glas opvarmes straks, der er risiko for kondens, vil der aldrig optræde kondens, hvorfor bidraget til fordampning af kondensatet udgår. Dermed bliver det nødvendige energiforbrug:

Energi total = Energi til opvarmning af yderste lag glas til lige over dugpunktstemperaturen i de timer, hvor der er risiko for kondensdannelse.

Ud fra de detaljerede beregninger er der for en tolags sydvendt rude med en center U-værdi på $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ fundet, at det udvendige glas maksimalt bliver ca. 1 K koldere end udeluften under perioder med udvendig kondens. Den årlige fordeling af kondenshyppigheden viser, at det er i efterårsmånederne, problemet er størst, hvorfor der til en overslagsberegning af energiforbruget til elopvarmning af rudens yderste glaslag kan regnes med en gennemsnitlig udetemperatur på ca. $5 \text{ }^\circ\text{C}$ og dermed en minimumsglastemperatur på $4 \text{ }^\circ\text{C}$. De detaljerede beregninger viser også et samlet antal timer med udvendig kondens på 528 timer. En del af disse timer skyldes, at det tager lidt tid at få kondensdannelsen ”brændt af”, men ses der bort fra dette, kan energiforbruget beregnes ud fra en simpel energibalace for ruden med og uden elopvarmning. Uden opvarmning regnes rudens udvendige overflade at have temperaturen $4 \text{ }^\circ\text{C}$, mens der ved opvarmning regnes med en udvendig overfladetemperatur på $5 \text{ }^\circ\text{C}$, idet

glasset regnes opvarmet til udeluftens temperatur. Under kondensforhold vil udetemperaturen ligge tæt på udeluftens dugpunktstemperatur.

$$\text{Energibalancen for ruden: } Q_{\text{rude}} + Q_{\text{el}} - Q_{\text{konvektion, udv.}} - Q_{\text{stråling, udv.}} = 0$$

Uden opvarmning:

$$\begin{aligned} Q_{\text{rude}} &= (1/1,1 - 1/25)^{-1} \text{ W/m}^2\text{K} \cdot (20 - 4)\text{K} = 18,4 \text{ W/m}^2 \\ Q_{\text{el}} &= 0 \\ Q_{\text{konvektion, udv.}} &= 7,8 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot (4 - 5)\text{K} = -7,8 \text{ W/m}^2 \quad (\text{formel side 62, vindhast.} = 0,5 \text{ m/s}) \\ \Rightarrow Q_{\text{stråling, udv.}} &= (18,4 - (-7,8))\text{W/m}^2 = 26,2 \text{ W/m}^2 \\ \Rightarrow T_{\text{himmel, stråling}} &= -17,1 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{formler side 65, } T_{\text{jord}} = 5 \text{ }^\circ\text{C, } \epsilon_{\text{rude}} = 0,85, \epsilon_{\text{jord}} = 0,9, F_{r,h} = 0,5) \end{aligned}$$

Med opvarmning:

$$\begin{aligned} Q_{\text{rude}} &= (1/1,1 - 1/25)^{-1} \text{ W/m}^2\text{K} \cdot (20 - 5)\text{K} = 17,3 \text{ W/m}^2 \\ Q_{\text{konvektion, udv.}} &= 7,8 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot (5 - 5)\text{K} = 0 \text{ W/m}^2 \\ Q_{\text{stråling, himmel}} &= 0,5 \cdot 0,85 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot ((273+5)^4 - (273-17,1)^4)\text{W/m}^2 = 40,6 \text{ W/m}^2 \\ Q_{\text{stråling, jord}} &= 0,5 \cdot 0,85 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot ((273+5)^4 - (273+5)^4) \\ &\quad - 0,5 \cdot 0,85 \cdot (1 - 0,9) \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (273-17,1)^4 \text{ W/m}^2 = -10,3 \text{ W/m}^2 \\ \Rightarrow Q_{\text{el}} &= (40,6 - 10,3 - 17,3) \text{ W/m}^2 = 13 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

Den nødvendige effekt for at undgå kondensdannelsen er altså 13 W/m^2 . En del af den afsatte effekt medvirker imidlertid til mindskelse af varmetabet gennem ruden svarende til forskellen i Q_{rude} uden og med elopvarmning, det vil sige $18,4 - 17,3 = 1,1 \text{ W/m}^2$. Energimæssigt koster elopvarmningen af ruden dermed ca. 12 W/m^2 i de timer, der er risiko for kondens, hvilket for den nævnte rudetype tidligere er beregnet til ca. 528 timer om året. Det årlige energiforbrug til at holde ruden kondensfri er derfor ca. $6,3 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$.

Tilfælde 3:

I dette tilfælde vil der sidde et kondenslag på rudens yderside, og glastemperaturen vil være under luftens dugpunktstemperatur. Det samlede energibehov til fjernelse af kondensen ved opvarmning vil derfor bestå af følgende led, idet der regnes med opvarmning af såvel kondensat og glas med ca. 1 K (se ovenstående tilfælde):

$$\begin{aligned} \text{Energi total} &= \text{Energi til opvarmning af vandlaget med 1 K} \\ &+ \text{Energi til opvarmning af yderste lag glas med 1 K} \\ &+ \text{Energi til fordampning af vandlaget} \\ &+ \text{Øget varmetab fra rudens yderside} \\ &- \text{Reduceret varmetab gennem ruden} \end{aligned}$$

Opstilling af ligningerne og deres løsning er vist i appendiks 3. Det maksimalt tænkelige energiforbrug kan findes som funktion af den ønskede opvarmningstid, når der i øvrigt forudsættes følgende:

1. Indetemperaturen er $20 \text{ }^\circ\text{C}$
2. Udetemperaturen er $5 \text{ }^\circ\text{C}$
3. Den udvendige varmeoverføringskoefficient er $25 \text{ W/m}^2\text{K}$
4. Det yderste lag glas skal opvarmes med ca. 1 K
5. Der regnes med 1 m^2 rude med en U-værdi på $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ inkl. overgangsisolanser

6. Glasset er et almindeligt 4 mm floatglas med densiteten 2500 kg/m^3 og en varmekapacitet på 800 J/kg K
7. Kondenslagets tykkelse er $0,01 \text{ mm}$ og der er maksimalt 528 dage om året, hvor kondensen skal fjernes (svarende til at de 528 timer med kondens netop er fordelt med 1 time hver dag)

Tabel 2. Maksimalt energiforbrug til fjernelse af kondens ved opvarmning af det yderste lag glas i en tolags energirude med en center U-værdi på $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Ønsket tidsforbrug til fjernelse af kondens s	Nødvendig effekt W	Årligt energiforbrug $\text{kWh/m}^2/\text{år}$
60	620	5,4
300	110	4,8
600	50	4,3
900	30	4,0
1800	15	3,7
3600	7	3,7

Ovenstående beregningsmetode er implementeret i Excel-programmet til bestemmelse af det maksimale energiforbrug til undgåelse af kondens ved opvarmning af det yderste lag glas. I programmet regnes kun på timeværdier, hvilket dermed også er den anvendte opvarmningsperiode. Det maksimale energiforbrug som funktion af ruden U-værdi fremgår af figur 7. For en rude med en U-værdi på $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ viser Excel-beregningerne et årligt energiforbrug på $5,5 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$. Forskellen skyldes bl.a., at ovenstående beregning er baseret på skønnede middelværdier, mens programmet anvender de aktuelle referenceårsværdier og detaljeret beregning af den udvendige varmeoverføringskoefficient.

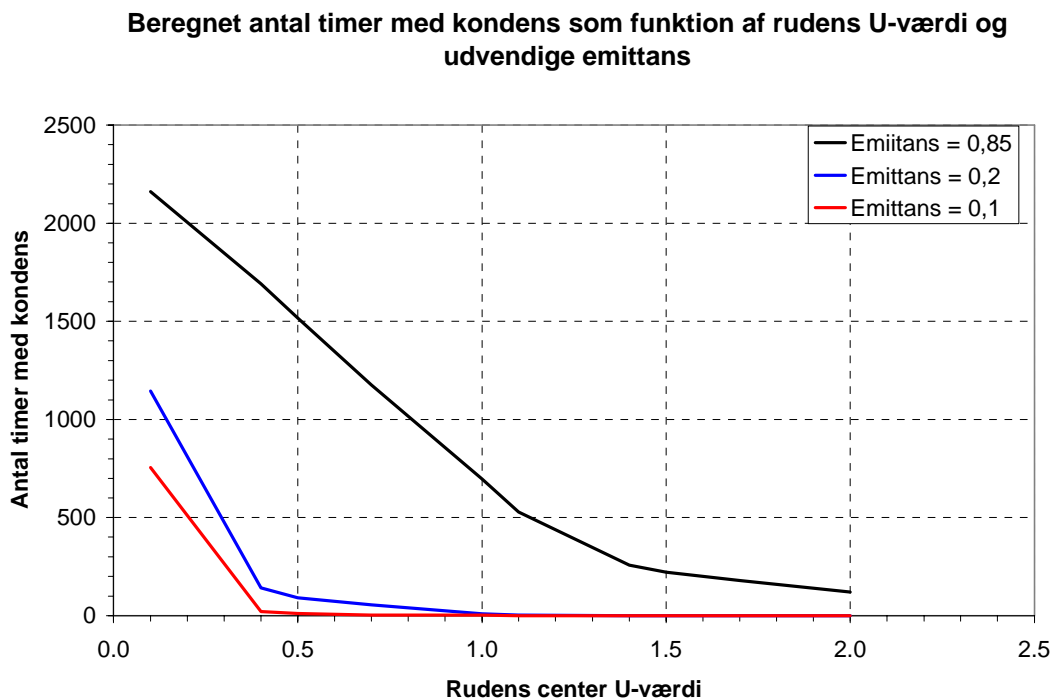
Imidlertid bør en mere realistisk vurdering tage udgangspunkt i antallet af morgener med kondens, hvor der for den beskrevne tolagsrude er fundet 20 dage om året, hvor der er kondens på ruden kl. 08.00. Dermed bliver de beregnede energiforbrug som vist i nedenstående tabel 3.

Tabel 3. Realistisk energiforbrug til fjernelse af kondens ved opvarmning af det yderste lag glas i en tolags energirude med en center U-værdi på $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Ønsket tidsforbrug til fjernelse af kondens s	Nødvendig effekt W	Årligt energiforbrug $\text{kWh/m}^2/\text{år}$
60	625	0,20
300	110	0,18
600	50	0,16
900	30	0,15
1800	15	0,14
3600	7	0,14

Sammenlignes de forskellige muligheder for fjernelse/undgåelse af kondens ved opvarmning af det yderste glaslag ses det, at en styret opvarmning af det yderste glaslag så kondens netop undgås energimæssigt er noget "dyrere" end den "manuelle" løsning, hvis brugeren ønsker at fjerne kondensen hver morgen. Energiforbruget er imidlertid i begge løsninger yderst beskedent, og det vil mere være installationsomkostningerne samt ekstraprisen for den varmeproducerende belægning, som vil være begrænsende for denne løsningsmetode.

En passiv mulighed for at mindske risikoen for kondens er at lægge en hård lavemissionsbelægning på ydersiden af det udvendige glas. Hermed mindskes varmeudstrålingen til himmelrummet og dermed afkølingen af glasset. Nedenstående figur viser effekten af forskellige emissionstal for glasoverfladen ved forskellige U-værdier af ruden.



Figur 12. Timer om året med kondens på ruder med forskellige udvendige emissionstal og U-værdier. Ingen udhæng.

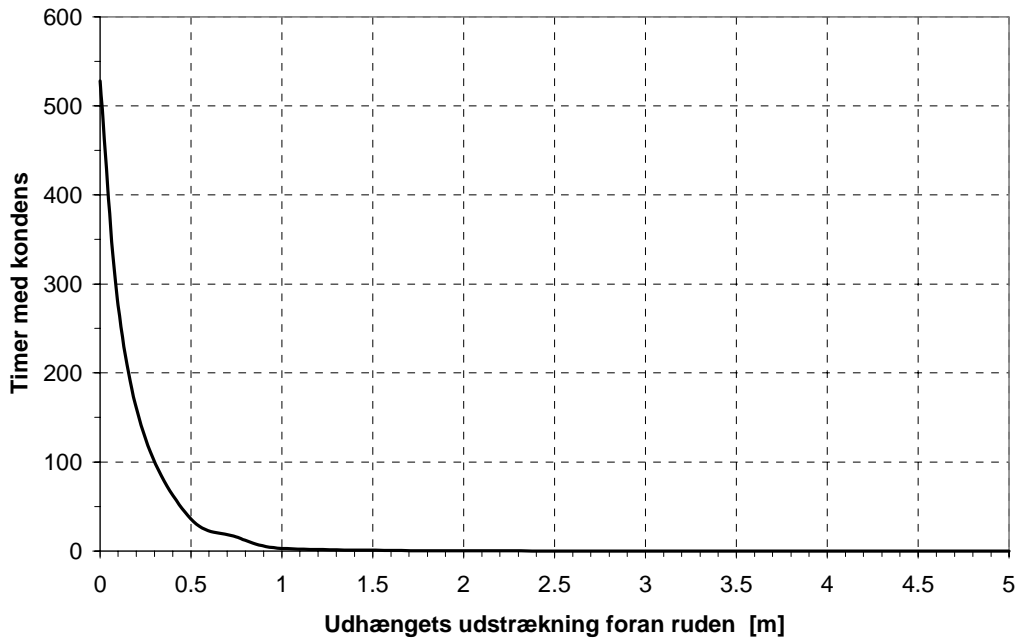
Af figur 12 ses det, at kondensperioderne bliver betydeligt mindre ved at anvende hårde lavemissionsbelægninger på det udvendige glas. Ved en U-værdi på $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ og et emissionstal på 0,2 vil kondensperioden falde fra 528 timer til 0 timer. Selv med U-værdier på $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, hvor der uden belægning er over 1500 timer med kondens, er faldet markant til ca. 90 timer med en 0,2 belægning. Emissionsbelægningen kan således i praksis løse kondensproblemet.

Anvendelse af udhæng vil også kunne reducere kondensproblemet på grund af mindre vinkelstrålingsforhold til himmelrummet. Nedenstående figur 13 viser, hvad forskellige størrelser af udhæng, dvs. udstrålingsforhold til himmelrummet, har af betydning for kondensforholdene. Det er forudsat, at et 1 m^2 vindue er placeret midt på en sydvendt facade i et étplanshus med en facadelængde på 12 m. Udhænget er placeret umiddelbart oven over vinduet, dvs. 2 m over terræn.

Det er i beregningerne forudsat, at udhænget har samme temperatur som jorden, hvilket ikke er helt korrekt. Om det giver flere eller færre kondentimer er vanskeligt at bedømme, da udhænget varmer til himmelrummet om natten, men om dagen får tilført solstråling.

Desuden er der ikke i beregningerne taget hensyn til, at udhænget skærmer for sollyset, hvilket bevirker, at de beregnede antal kondentimer er lidt mindre end i praksis.

Timer med kondens på rude ved forskellig størrelse udhæng

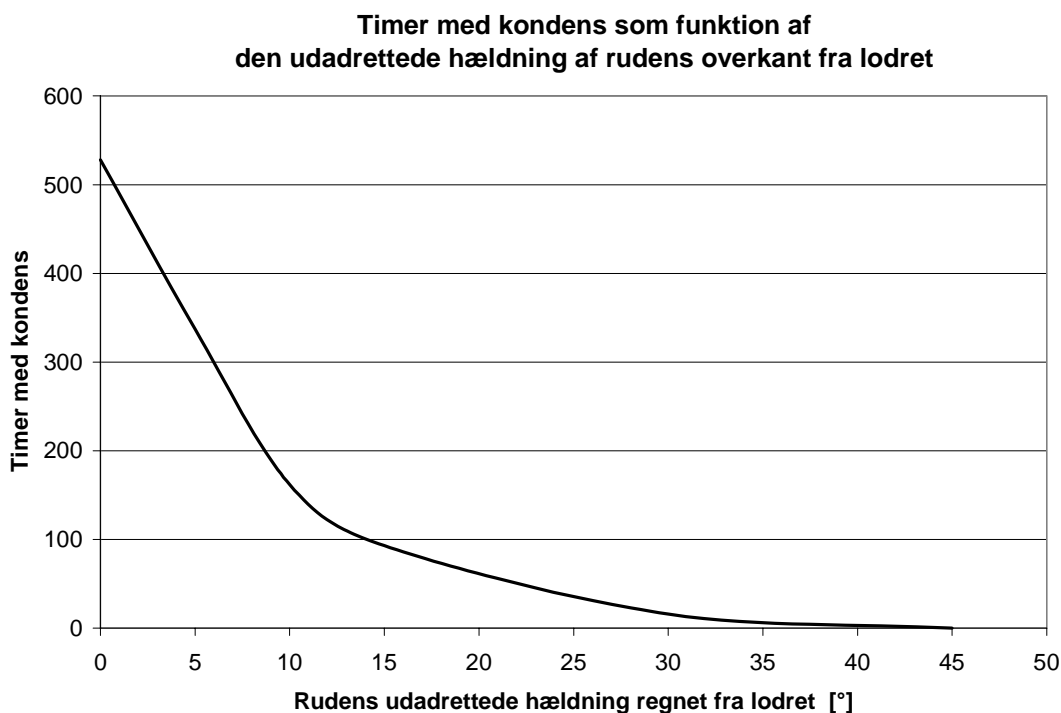


Figur 13. Timer om året med kondens på rude afhængig af udhængets størrelse. Rudens U-værdi er $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ og den udvendige emittans er $0,85$.

Det ses af figur 13, at et udhæng på $0,3 \text{ m}$ reducerer kondentimerne med ca. 80% til ca. 100 timer/år. En forøgelse af udhæng til $0,5 \text{ m}$ reducerer kondentimerne til under 50 timer/år for den viste rudetype. Ved et udhæng på ca. 1 meter og derover opstår der ikke kondens på vinduet. Kondentimerne i praksis nok ligge lidt højere, da der ikke i beregningerne er taget hensyn til, at udhænget også skærmer for sollyset, og i praksis vil forhindre sollyset i at "brænde" kondensen af.

Mange tagudhæng på énfamiliehuse er typisk på ca. $0,3$ til $0,5 \text{ m}$, hvilket ifølge ovenstående beregninger betyder en vis risiko for kondensdannelse. Et normalt udhæng vil således ikke kunne måle sig med effekten af en udvendig lavemissionsbelægning på ruden, der vil eliminere kondensdannelsen 100% (se figur 12).

En hældning af ruden vil have samme effekt som etablering af udhæng – nemlig at reducere vinkelstrålingsforholdet til himlen. Nedenstående figur 14 viser antal timer om året med kondens på ruder med forskellige rudehældninger, hvor ruden hælder ned mod jorden. Det er den øverste vandrette kant af ruden, som er forskudt udad således, at ruden får en større andel af varmestrålingen til jordoverfladen end til rummet. Se f.eks. figur 6.



Figur 14. Kondensperioder som funktion af rudens hældning mod jordoverfladen. U-værdien er $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ og emittans af yderside af yderste lag glas på $0,85$.

Trækkes rudens øverste kant $0,10 \text{ m}$ ud fra lodret svarende til ca. 6° , falder antallet af kondens timer fra 528 til 276 - altså ca. en halvering. Hældes ruden så den øverste kant er $0,30 \text{ m}$ længere ude end den nederste (hældning = $17,5^\circ$) reduceres antallet af kondens timer til ca. 85 mod de oprindelige 528 timer, men denne hældningsvinkel er nok usandsynlig i praksis. Ved en hældning på 45° er kondensrisikoen elimineret.

2.4 Sammenfatning fra mulige løsninger og af beregninger

Den perfekte løsning i energimæssig henseende for vinduer vil være at have en så lav U-værdi, dvs. et så lavt energitab gennem ruden som muligt. Hermed vil der som før nævnt være en stor risiko for udvendig kondens på ruden. Hvilke mulige løsninger sammenholdt med de ovenstående beregninger, som vurderes at være brugbare, afhænger en del af prisen.

En mulig løsning vil være at montere ruder med en elopvarmet belægning på det yderste glaslag. Energien til at forhindre kondens på en rude med en U-værdi på $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ er $5 - 6 \text{ kWh/m}^2$ rude pr. år. Dette må siges at være en beskedent energimængde for at forhindre kondens, som ellers ville optræde i 528 timer om året. Det vil givetvis være monteringsprisen samt ekstra eludstyr, som vil være det overvejende fordyrende led ved dette system. Den elopvarmede belægning vil desuden give en lidt reduceret lys- og soltransmittans.

En anden løsning vil være at anvende vinduer, hvor den yderste side af det yderste lag glas er belagt med en hård lavemissionsbelægning. Ovenstående beregninger viser, at med ruder med en U-værdi ned til $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ vil der praktisk taget ingen kondensproblemer være, når der benyttes en lavemissionsbelægning. Et problem er måske, at lys- og soltransmittansen

reduceres en anelse, og at der sker en svag forvrængning af lyset, samt at rengøringsfrekvensen forøges lidt. Det vurderes dog, at problemerne ved disse fire faktorer er små i forhold til den forbedring, man får af kondensforholdene. Løses tillige tilsmudsning-problemet ved f.eks. polering, så er den hårde belægning en meget oplagt løsning på kondensproblemerne.

En tredje mulighed er at have et udhæng over vinduet. Beregningerne viser, at med et udhæng på 0,1 m reduceres kondensterne til ca. det halve. Ved en yderligere forøgelse at udhænget til 0,5 meter vil der kun være få årlige timer med kondens. Udhænget kan dog ikke måle sig med lavemissionsbelægningen. Desuden vil problemet også blive en del større ved lavere U-værdier.

Endelig er der den mulighed, at rudens overkant trækkes ud, så ruden hælder ned mod jorden, hvorved varmeudstrålingen til himmelhvælvingen reduceres. Ved at trække overkanten af ruden 0,1 m ud fra lodret vil kondensterne reduceres til det halve, og ved en hældning på 45° , dvs. ruden trækkes 0,7 m ud for oven, vil kondensrisikoen være elimineret. Så store hældninger vil være urealistiske ved de fleste byggerier samt ved renoveringer.

Den løsning som for nærværende virker mest oplagt i kondensmæssig henseende, er den hårde lavemissionsbelægning. Der er dog også de hydrofile glastyper (Aquaclean [2], Activ [3]), som virker lovende, hvis de også er kondenshindrende. Hermed vil man opnå to fordele ved at anvende disse glastyper.

3. BESKRIVELSE AF VURDERINGSMETODE

Vinduernes energimæssige betydning for en aktuell bolig afhænger af en lang række faktorer, og ideelt set burde alle tænkelige tilfælde simuleres for at kunne give en sikker vurdering af betydningen. Da dette ikke er praktisk muligt, er der foretaget en serie parametervariationer for forskellige bygningstyper med programmet tsbi3 [8]. Baseret på disse analyser er der efterfølgende forsøgt opstillet nogle regressionsudtryk, der ved indtastning af nogle simple nøgletal beregner boligens opvarmningsbehov, udnyttelsesgraden med hensyn til den transmitterede solenergi samt et mål for eventuelle problemer med overtemperaturer.

Parameteranalysen tager udgangspunkt i et superisoleret enfamiliehus (tabel 4), hvor gulve, vægge og tag har en U-værdi på ca. 0,09 W/m²K. Derudover er huset udstyret med et ventilationsanlæg med 85 % varmegenvinding i fyringssæsonen. Uden for fyringssæsonen ventileres naturligt. Huset er i et plan med et bruttoareal på 150 m² (netto 135 m²). Huset er simuleret i 3 forskellige udformninger med hensyn til materialevalg således, at der regnes på henholdsvis et termisk meget let, et termisk middeltungt og et termisk tungt hus. Konstruktionerne fremgår af nedenstående tabel 5.

Vinduerne er fordelt med 7,5 m² mod nord, 4,5 m² mod øst, 12 m² mod syd og 6 m² mod vest. Vinduerne tænkes placeret, så der over de syd- og nordvendte vinduer er et fremspring på 0,5 m fra tagudhænget placeret 0,3 m over den øverste glaskant. For hver bygningstype er der udført beregninger med 9 forskellige vinduestyper, der alle kan findes på markedet. Vinduerne adskiller sig ved deres U- og g-værdi, som det fremgår af tabel 6. Beregningerne er yderligere udført for 4 forskellige orienteringer af huset henholdsvis ved en drejning på 0°, 90°, 180° og 270°.

Det interne varmetilskud er modelleret med 4 W/m² netto svarende til 540 W i samtlige årets timer. Der regnes med en indetemperatur på 22 °C, hvilket nok reelt set er komforttemperaturen i boliger. I modellen er der derudover af beregningsmæssige årsager etableret køling med en effekt på 20 kW, der holder indetemperaturen på maksimum 24 °C hele året. Herved kvantificerer den beregnede køleeffekt overtemperaturproblematikken. Grænsen er bevidst valgt som et meget kritisk krav, selvom der i normmæssig sammenhæng DS 474 [9] opereres med væsentlige højere tilladelige indetemperaturer om sommeren.

Tabel 4. Det superisoleret enfamiliehus's nøgletal til brug i beregningerne med tsbi3.

Husareal	150 m ² brutto, 135 m ² netto				
U-værdi gulve, vægge og tag	ca. 0,09 W/m ² K				
Varmetilskud	4 W/m ² eller 540 W				
Ventilation i fyrings sæson	0,85 varmegenvinding				
Ventilation udenfor fyringssæson	Naturlig ventilation				
Indetemperatur (setpunkt)	22°C				
Max. indetemperatur	24°C				
Vinduesorientering	Nord	Øst	Syd	Vest	
Vinduesareal	7,5	4,5	12	6	m ²
Beregninger					
Huskonstruktion som er termisk	Let, middeltung, tung				
Husorientering	Nord, Øst, Syd, Vest				
Rudetyper	9 forskellige fra tabel 3				

Tabel 5. Oversigt over de anvendte bygningsmodeller i parameteranalysen.

Termisk masse	Konstruktion	Opbygning		
		Materialer	λ -værdi	U-værdi
Let	Ydervæg	0,026 m gips 0,375 m isolering kl. 39 0,105 m tegl 1400	0,170 0,039 0,580	0,09882
	Gulv	0,020 m træ 600 0,050 m isolering kl. 39 0,100 m beton 2300 0,300 m isolering kl. 45 0,150 m leca	0,150 0,039 1,600 0,045 0,100	0,08869
	Tag	0,020 m træ 450 0,500 m isolering kl. 45 Ekstra isolans	0,120 0,045 0,200 m ² K/W	0,08585
	Indv. vægge	0,013 m gips	0,170	-
	Ventilation	Infiltration Ventilation fyringsss. VVG = 0.85 Udluftning u. 20-38 inkl., tset=21°C	0,05 h ⁻¹ 0,045 m ³ /s 0,5 h ⁻¹	-
Middel	Ydervæg	0,100 m letbeton 800 0,365 m isolering kl. 39 0,105 m tegl 1400	0,280 0,039 0,580	0,09933
	Gulv	0,020 m træ 600 luftisolans 0,050 m isolering kl. 39 0,100 m beton 2300 0,280 m isolering kl. 45 0,150 m leca 600	0,150 0,13 m ² K/W 0,039 1,600 0,045 0,100	0,09123
	Tag	0,020 m træ 450 0,495 m isolering kl. 45 Ekstra isolans	0,120 0,045 0,200 m ² K/W	0,08668
	Indv. vægge	0,055 m tegl 1400	0,580	-
	Ventilation	Infiltration Ventilation fyringsss. VVG = 0.85 Udluftning u. 20-38 inkl., tset=21°C	0,05 h ⁻¹ 0,045 m ³ /s 0,5 h ⁻¹	-
Tung	Ydervæg	0,100 m beton 2300 0,378 m isolering kl. 39 0,105 m tegl 1400	1,600 0,039 0,580	0,09895
	Gulv	0,010 m klinker 0,010 m klinker 0,100 m beton 2300 0,363 m isolering kl. 45 0,150 m leca 600	1,200 1,200 1,600 0,045 0,100	0,08868
	Tag	0,020 m træ 450 0,500 m isolering kl. 45 Ekstra isolans	0,120 0,045 0,200 m ² K/W	0,08585
	Indv. vægge	0,055 m tegl 1400	0,580	-
	Ventilation	Infiltration Ventilation fyringsss. VVG = 0.85 Udluftning u. 20-38 inkl., tset=21°C	0,05 h ⁻¹ 0,045 m ³ /s 0,5 h ⁻¹	-

Tabel 6. Oversigt over de anvendte vinduestyper i simuleringerne. Den resulterende U-værdi og g-værdi for det totale vinduesareal er middelværdien for de vinduesstørrelser der er anvendt i det aktuelle modelhus. Alle vinduerne er trævinduer med en ramme/karmbredde på 115 mm inkl. kalfatringsfuge.

Rudetype	Center U-værdi	Center g-værdi	Total U-værdi	Total g-værdi
	W/m ² K	-	W/m ² K	-
2-lag luftfyldt	2,9	0,76	2,59	0,49
2-lag argon med en hård belægning	1,5	0,72	1,69	0,46
2-lag argon med en blød belægning	1,3	0,66	1,56	0,42
2-lag argon med en blød superbelægning *	1,1	0,59	1,43	0,38
3-lag argon med 2 hårde belægninger	0,8	0,56	1,24	0,36
3-lag krypton med 2 hårde belægninger	0,7	0,57	1,18	0,36
3-lag argon med 2 bløde belægninger	0,7	0,49	1,18	0,31
3-lag argon med 2 bløde superbelægninger	0,6	0,40	1,11	0,26
3-lag krypton med 2 bløde superbelægninger	0,5	0,40	1,05	0,26

* Findes nu med g-værdi = 0,63

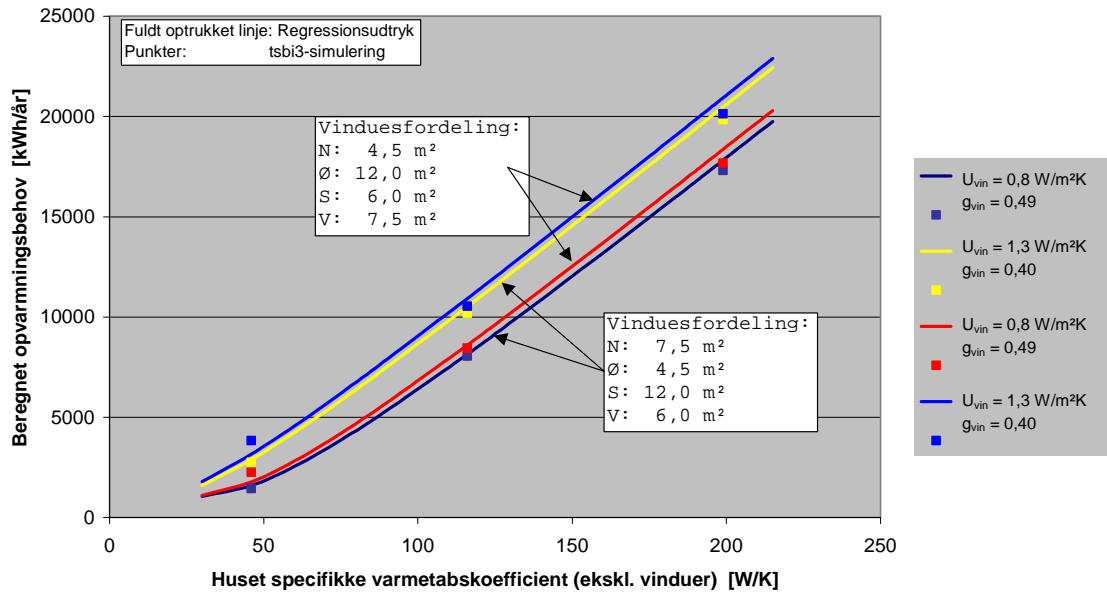
Resultaterne for hver bygningstype (tyngde) er efterfølgende brugt til opstilling af et regressionsudtryk, der på baggrund af nogle få inddata med en rimelig nøjagtighed kan beregne det årlige opvarmningsbehov samt den nødvendige køleeffekt for at holde inde-temperaturen under 24 °C. Proceduren for udvikling af regressionsudtrykkene er beskrevet i detaljer i appendiks 4.

Regressionsudtrykkene er efterfølgende lagt ind i et regneark, hvorved man forholdsvis hurtigt kan lave en række parameteranalyser over forskellige vinduers betydning i forskellige bygningsløsninger – både hvad angår termisk masse og isoleringsniveau.

Til kontrol af de opstillede udtryk, er der lavet en række punktvis beregninger med tsbi3 for forskellige hustyper med forskellige vinduesløsninger. Afvigelsen mellem regressionsudtrykkene og tsbi3-beregningerne ligger inden for ca. 200 kWh på det årlige opvarmningsbehov.

Figur 15 viser et uddrag af denne sammenligning, hvor opvarmningsbehovet er afbilledet som funktion af bygningens isoleringsniveau for to forskellige vinduesløsninger og to forskellige fordelinger af det samlede vinduesareal. De fuldt optrukne kurver er resultatet opnået med det udviklede regressionsudtryk, mens punkterne angiver de tilsvarende resultater opnået med en detaljeret tsbi3-simulering. Kurver og punkter med samme farve er samhörørende.

Sammenligning mellem opvarmningsbehov fundet ved hjælp af det udviklede regressionsudtryk og tilsvarende tsbi3 beregning



Figur 15. Sammenligning mellem resultatet af tsbi3 simuleringer og resultat af regressionsudtryk. Kurver og punkter med samme farve er samhörrende.

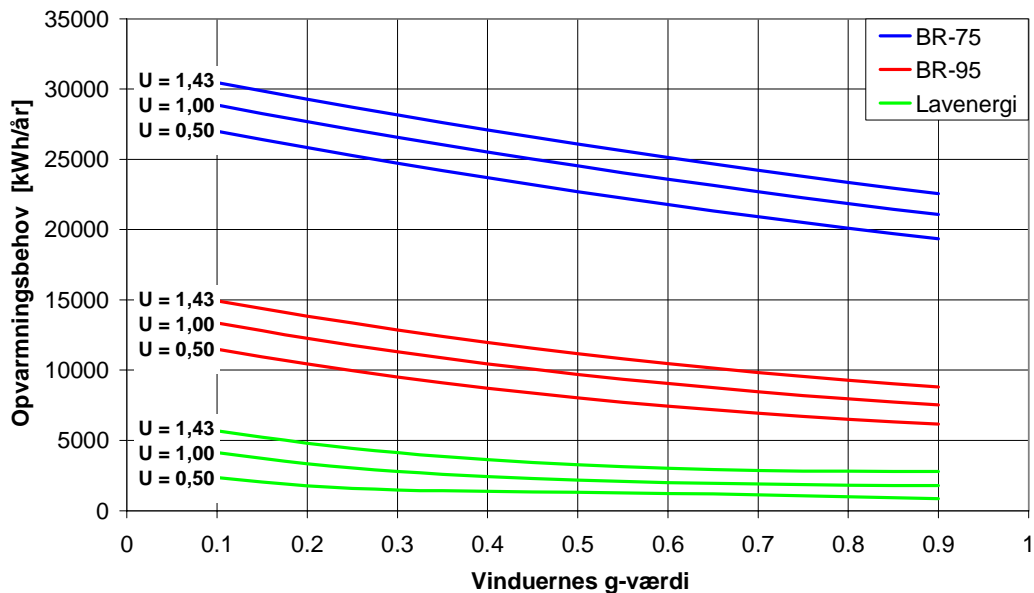
Figur 15 viser, at der er nogen afvigelse mellem de detaljerede tsbi3 beregninger og det opstillede regressionsudtryk især ved ændringer af vinduernes orientering. Afvigelseens betydning er selvfølgelig størst for huse med et lille opvarmningsbehov. Imidlertid vurderes det, at regressionsudtrykket er præcist nok til en overslagsberegning og til at vurdere den overordnede indflydelse af forskellige vinduesløsninger på energiforbrug og indeklime.

4. U- OG g-VÆRDIENS BETYDNING FOR ENERGIFORBRUG OG OVERTEMPERATURER

Baseret på de udledte regressionsudtryk er der gennemført en parameteranalyse af U- og g-værdiens betydning for det resulterende opvarmningsbehov og for det termiske indeklima med fokus på overtemperaturer. Analysen er udført for 3 forskellige isoleringsniveauer for boligen: 1) svarende til BR-75 niveau, 2) svarende til BR-95 niveau og 3) svarende til lavenergihusniveau, defineret som et hus med en energiramme på 25 % af BR-95 niveauet. Der regnes på et enfamiliehus svarende til beskrivelsen i kapitel 3 (tabel 4) blot med forskellige isoleringstykkelser.

Resultatet af analyserne fremgår af nedenstående figurer. For en overskueligheds skyld er der afbilledet middelværdien beregnet for de 3 forskellige bygningstyper (let, middel og tung) beskrevet i tabel 5.

Årligt opvarmningsbehov som funktion af vinduernes g-værdi og U-værdi

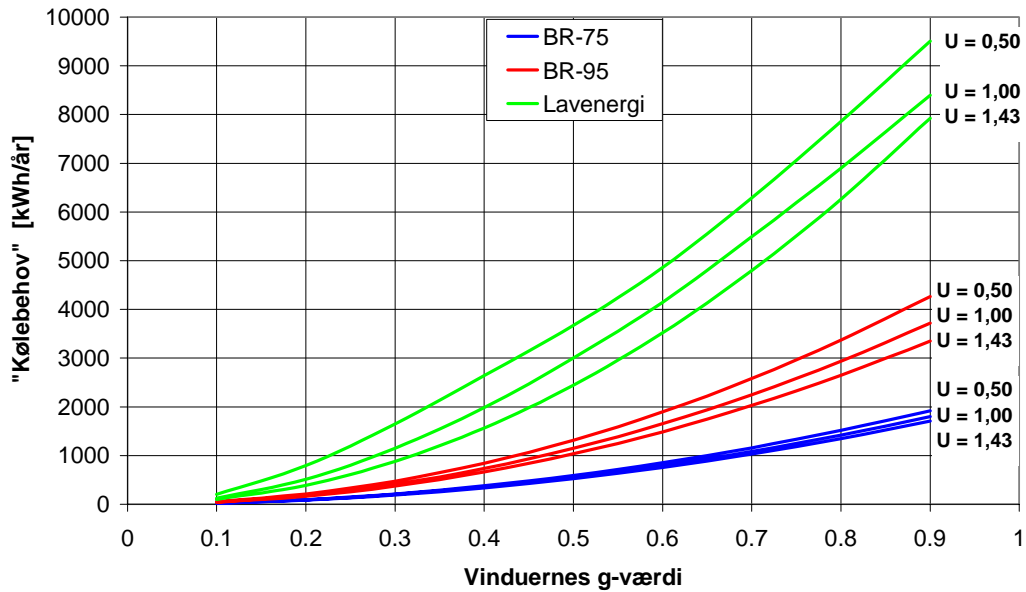


Figur 16. Årligt opvarmningsbehov som funktion af vinduernes U- og g-værdi for 3 forskellige bygninger isoleret henholdsvis til BR-75, BR-95 og lavenergihusniveau.

Betragtes figur 16, fremgår det, at lavere U-værdi for alle bygningstyper vil medføre et lavere energiforbrug, og energiforbruget reduceres yderligere med stigende g-værdi dog med undtagelse af lavenergihuset, hvor der ved en lav U-værdi på vinduet ikke er nogen nævneværdig effekt af at øge g-værdien. Dette er et udtryk for, at det ekstra energitilskud fra solindfaldet ved den højere g-værdi kun fører til øgede overtemperaturproblemer.

En øget g-værdi vil under alle omstændigheder øge problemet med overtemperaturer i alle bygningstyperne, som det fremgår af figur 17. Problemet øges med stigende isoleringsgrad af boligen, hvor også effekten af vinduernes U-værdi bliver størst.

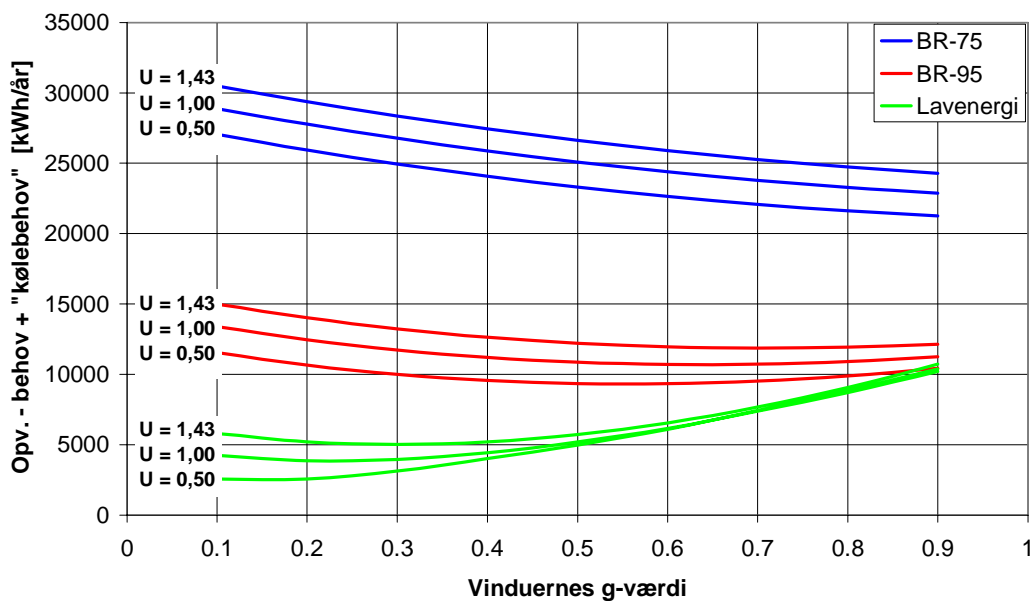
Årligt "kølebehov" for opretholdelse af maks. 24 °C indendørs som funktion af vinduernes g- og U-værdi



Figur 17. Nødvendigt "kølebehov" hvis indetemperaturen maksimalt må blive 24 °C som funktion af vinduernes U- og g-værdi i 3 forskellige bygningstyper.

Adderes opvarmningsbehovet og kølebehovet (figur 16 + figur 17) får man et mål for den kombinerede effekt af ændringer i vinduets U- og g-værdi. Det skal dog understreges, at det er en ren regneteknisk øvelse, idet der ikke er taget stilling til, hvorledes overtemperaturproblemet reelt skal løses.

Sum af årligt opvarmnings- og "køle"-behov som funktion af vinduernes g- og U-værdi



Figur 18. Kombineret virkning af vinduernes U- og g-værdi for 3 forskellige bygningstyper.

Betragtes figur 18, fremgår det, at for en dårligt isoleret bygning er det selv ved indregning af køleenergien en fordel med så lav en U-værdi og så høj en g-værdi som muligt. For en bygning isoleret i henhold til gældende krav for nybyggeriet er det stadig en god idé at anvende vinduer med så lav en U-værdi som muligt, mens en forøgelse af vinduets g-værdi til over ca. 0,5 medfører en så væsentlig stigning i ”kølebehovet”, at det opvejer energibesparelsen. For lavenergihuset ligger den tilsvarende grænse for g-værdien omkring 0,3 for hele vinduet. En øget g-værdi vil føre til en væsentlig stigning i overtemperaturer, der, hvis der anvendes mekanisk køling, vil medføre et øget samlet energiforbrug.

Analyserne illustrerer, at målet om at reducere vinduernes U-værdi og øge deres g-værdi generelt set vil føre til et lavere opvarmningsbehov uanset bygningens isoleringsniveau, men at der samtidig må fokuseres på effekten på indeklimaet. Store overtemperaturproblemer kan medføre, at de energimæssigt bedre vinduer fravælges af komforthensyn eller, at beboerne tvunget af omstændighederne installerer et klimaanlæg, der i værste fald medfører et samlet energiforbrug, som bliver større end, hvis der var valgt en vinduesløsning med en lavere solenergitransmittans.

Dilemmaet mellem øget energibesparelser og øget problem med overtemperaturer medfører en principiel diskussion om, hvorvidt det element, der medfører de øgede overtemperaturproblemer (de energimæssigt bedre vinduer), også skal være det element, der skal sørge for, at overtemperaturproblemerne reduceres. I tilfældet med vinduerne betyder det, at der i selve vindueskonstruktionen skal indarbejdes løsninger til reduktion af solindfaldet eller øget naturlig ventilation når påkrævet. Fordelen ved den tankegang er, at vinduerne i den eksisterende boligmasse kan udskiftes med energimæssigt bedre vinduer uden, at det influerer negativt på bygningens indeklima. Alternativt må man fremover i øget grad anvende helhedsbetragtninger i boligbyggeriet – ikke kun på den energimæssige side men i lige så høj grad med hensyn til det resulterende termiske indeklima, hvor metoder til undgåelse af de høje overtemperaturer skal indarbejdes i byggeprojektet f.eks. i form af tunge konstruktioner kombineret med automatisk naturlig udluftning og mulighed for natkøling med kold udeluft.

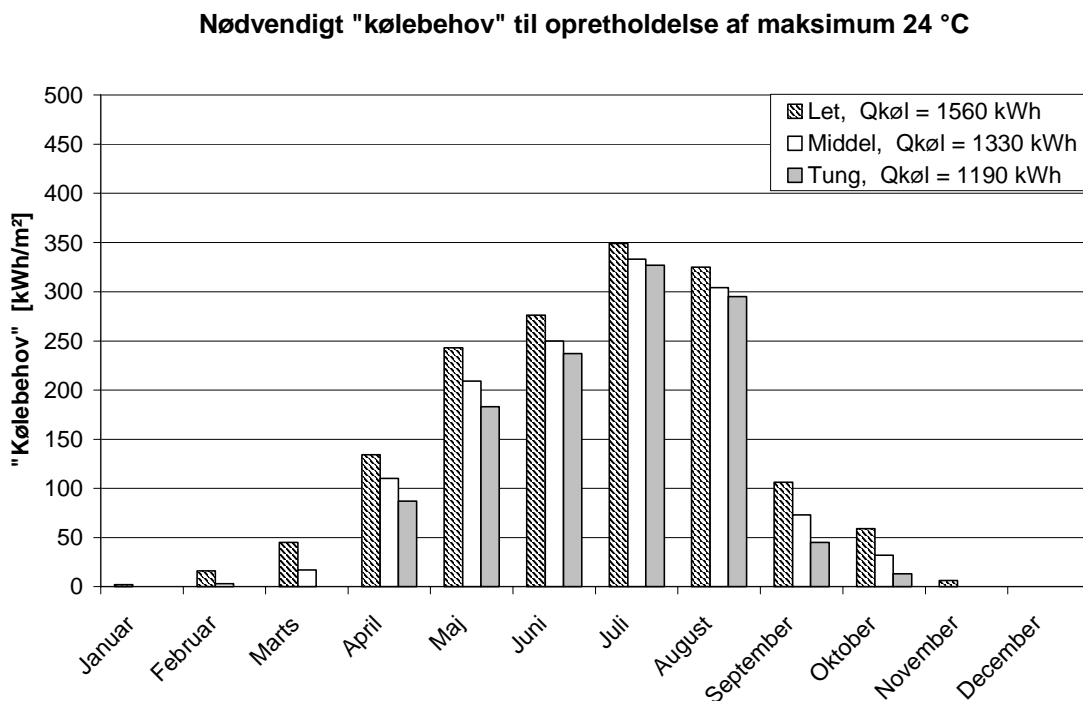
I næste kapitel analyseres problemet med overtemperaturer i detaljer, og der beskrives metoder til at reducere overtemperaturerne med en vurdering af deres indflydelse på opvarmningsbehovet.

5. ANALYSE AF OVERTEMPERATURPROBLEMATIKKEN

Overtemperaturer i boliger er i det danske klima knyttet til tilstedeværelsen af vinduer, der tillader direkte transmission af solenergi til bygningens indre. Simulering af temperaturforholdene i en bygning som beskrevet i tabel 2 isoleret til lavenergihusniveau, men uden vinduer, medfører nul timer med temperaturer over 24 °C.

Til vurdering af overtemperaturernes fordeling over året betragtes lavenergihusmodellen hvor vinduerne er fordelt med 7,5 m² mod nord, 4,5 m² mod øst, 12 m² mod syd og 6 m² mod vest. Vinduerne tænkes placeret, så der over de syd- og nordvendte vinduer er et fremspring på 0,5 m fra tagudhænget placeret 0,3 m over den øverste glaskant. Vinduerne har en total U-værdi på 1,43 W/m²K og en total g-værdi på 0,38 (tabel 6, side 25).

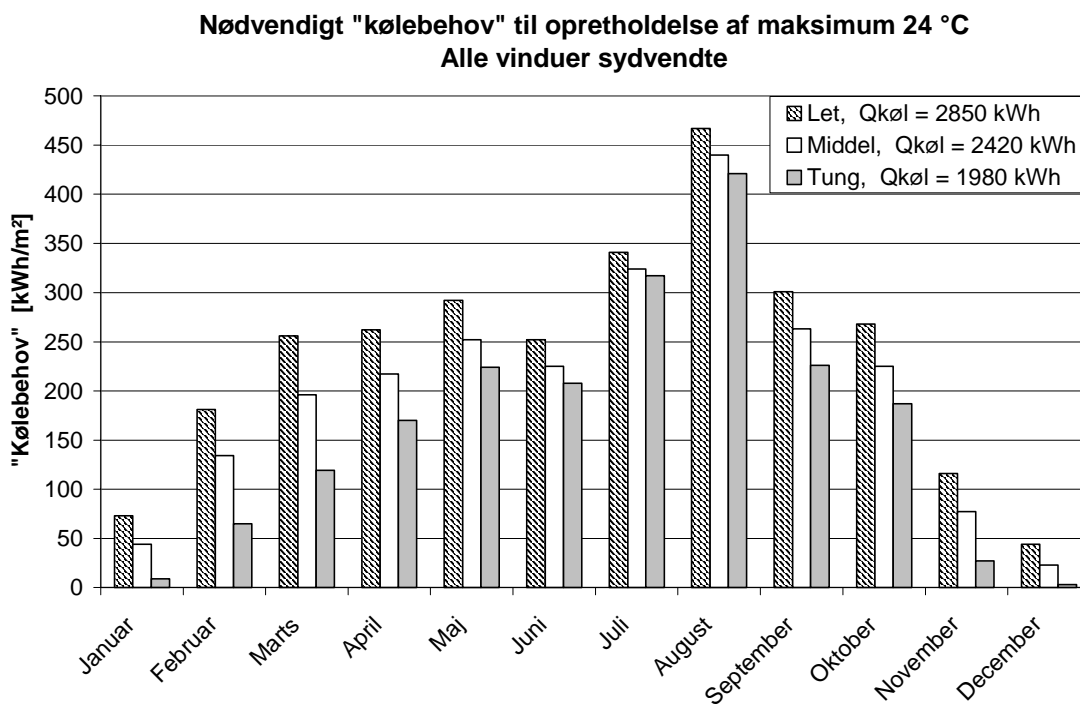
Nedenstående figur 19 viser den beregnede fordeling af "kølebehov" til opretholdelse af en maksimal indetemperatur på 24 °C.



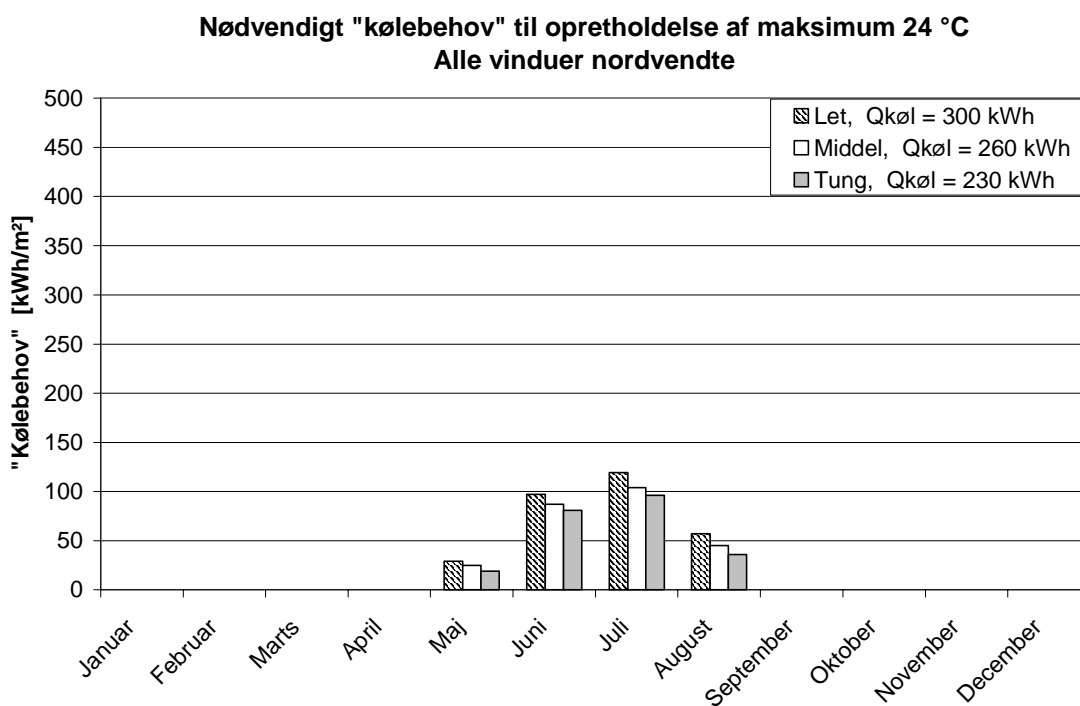
Figur 19. Fordeling af nødvendigt "kølebehov" til opretholdelse af en maksimal indetemperatur på 24 °C. Beregning foretaget på et lavenergihus som beskrevet i teksten.

Figur 19 viser, at overtemperaturerne er koncentreret omkring sommermånedene, men at der for det lette byggeri også opnås ubehagelige indetemperaturer både i januar og november måned. Betydningen af bygningens termiske masse fremgår også af figur 19, hvor den termisk tunge konstruktion viser sin fordel ved helt at fjerne overtemperaturproblemet i vinterhalvåret.

Figur 19 viser fordelingen af "kølebehovet" for en bestemt fordeling af vinduerne på de 4 verdenshjørner. Til vurdering af vinduesorienteringens betydning er der udført endnu to simuleringer – en hvor alle vinduerne vender mod syd og en, hvor alle vinduerne er nordvendte. Resultatet af simuleringerne er vist i figur 20 og figur 21 nedenstående.



Figur 20. Fordeling af nødvendigt "kølebehov" til opretholdelse af en maksimal indetemperatur på 24 °C når alle vinduer er sydvendte.



Figur 21. Fordeling af nødvendigt "kølebehov" til opretholdelse af en maksimal indetemperatur på 24 °C når alle vinduer er nordvendte.

Ved ensidig placering af vinduesarealet mod syd vil der i et lavenergihus optræde overtemperaturer hele året rundt, mens en koncentration af vinduesarealet mod nord kun vil give anledning til beskedne overtemperaturer koncentreret omkring sommermånederne.

Figurerne 19 - 21 viser, at overtemperaturproblemet er stærkt knyttet til vinduesorienteringen og, at der ved et fornuftigt valg af vinduernes placering kan gøres meget for at reducere problemet. Tages det ekstreme tilfælde, hvor alle vinduer er nordvendte, er der praktisk taget ingen problemer med overtemperaturer. Vinduernes orientering har selvfølgelig også indflydelse på opvarmningsbehovet, som vist i tabel 7 for de tre tilfælde.

Tabel 7. Beregnet opvarmningsbehov i et 150 m² lavenergihus med 30 m² vinduer, der henholdsvis alle vender mod syd, mod nord eller er fordelt med 7,5 m² mod nord, 4,5 m² mod øst, 12 m² mod syd og 6 m² mod vest. Vinduernes totale U-værdi er 1,4 W/m²K og den totale g-værdi for vinduerne er 0,4.

Vinduesorientering	Termisk let	Termisk middel	Termisk tung
	kWh/år	kWh/år	kWh/år
Alle sydvendte	3410	3150	2750
Alle nordvendte	5200	5230	5140
7,5 m ² mod nord, 4,5 m ² mod øst, 12 m ² mod syd og 6 m ² mod vest	3800	3720	3570

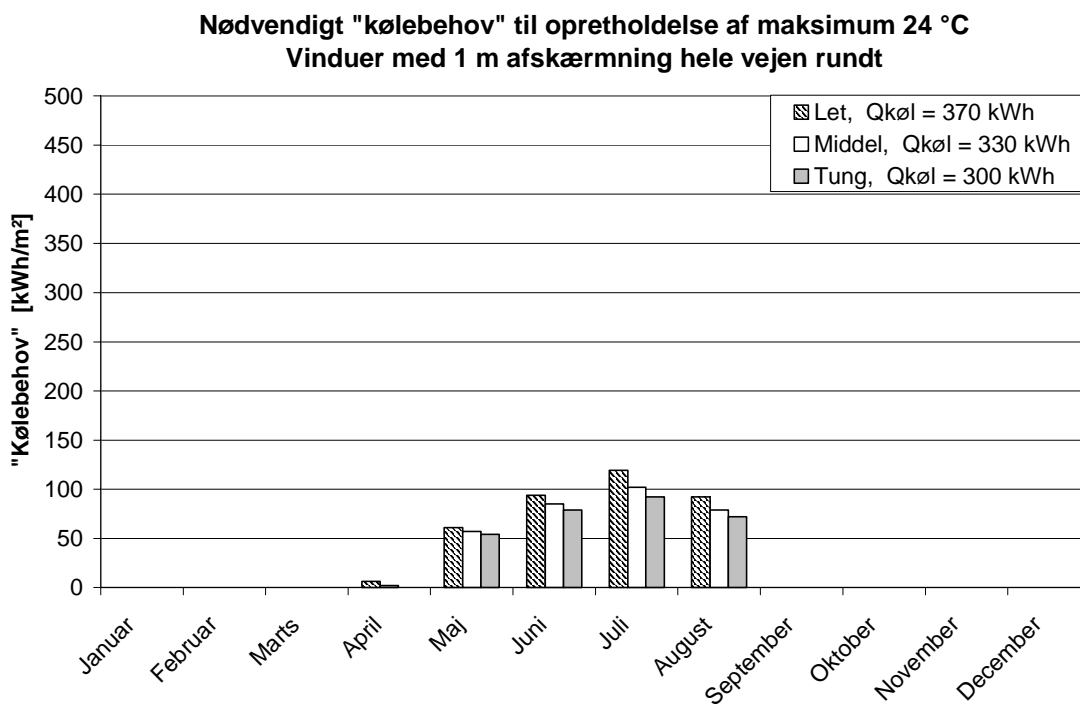
En flytning af alle vinduerne fra en sydvendt til en nordvendt placering medfører i dette tilfælde mellem 50 og 90% forøgelse af opvarmningsbehovet. Fra et energimæssigt synspunkt bør vinduesarealerne koncentreres mod syd, men fra et indeklimamæssigt synspunkt er nordvendte vinduer at foretrække.

Betragtes figur 20 fremgår det, at overtemperaturproblemet er spredt ud over hele året, hvilket vil sige, at det forekommer både ved lave og høje solhøjder midt på dagen. Ved anvendelse af faste afskærmninger er der derfor brug for såvel udhæng som lodrette afskærmninger langs vinduets sider. Til belysning af effekten af sådanne foranstaltninger er der gennemført simuleringer med en afskærmning langs vinduets sider og overkant. Afskærmningen stikker 1,0 meter ud fra vinduet, hvilket er et ekstremt tilfælde – i hvert fald for sideafskærmningens vedkommende.

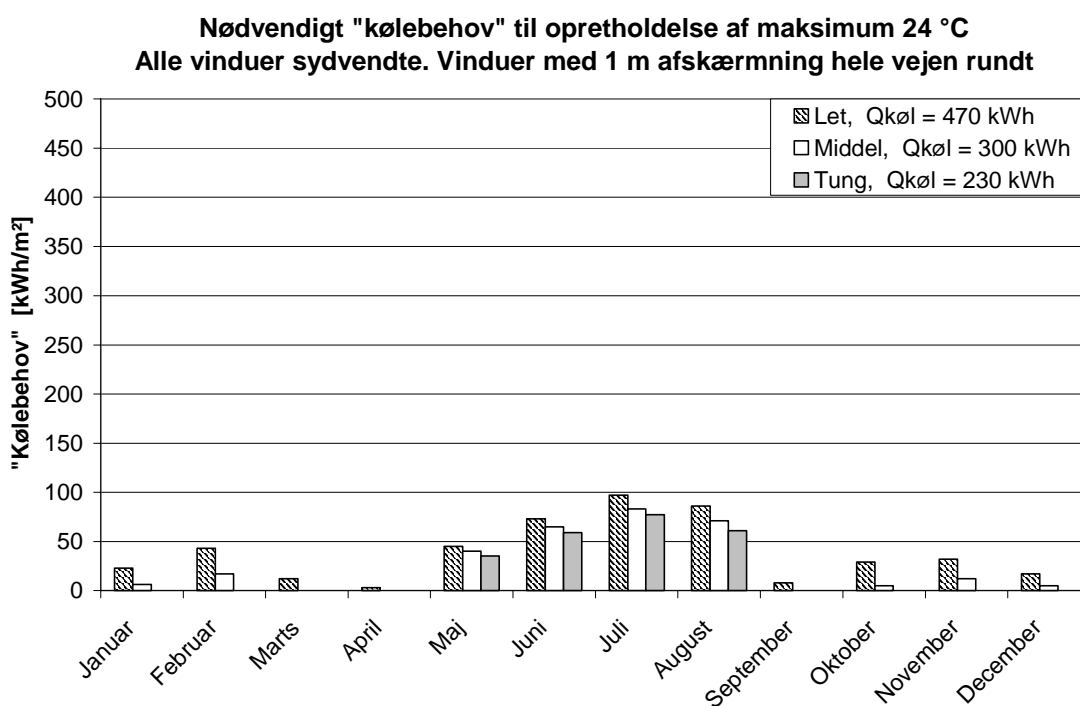
Simuleringerne er foretaget for tilfældet med alle vinduer vendende mod syd og for tilfældet med vinduerne fordelt på de 4 verdenshjørner. Resultatet af simuleringerne er afbilledet i figur 22 og figur 23 samt tabel 8.

Tabel 8. Beregnet opvarmningsbehov i et 150 m² lavenergihus med 30 m² vinduer, der henholdsvis alle vender mod syd, eller er fordelt med 7,5 m² mod nord, 4,5 m² mod øst, 12 m² mod syd og 6 m² mod vest. Vinduernes totale U-værdi er 1,4 W/m²K og den totale g-værdi for vinduerne er 0,4. Alle vinduerne er forsynet med en 1 m bred afskærmning på siden og over vinduerne.

Vinduesorientering	Termisk let	Termisk middel	Termisk tung
	kWh/år	kWh/år	kWh/år
Alle sydvendte	4110	4025	3880
7,5 m ² mod nord, 4,5 m ² mod øst, 12 m ² mod syd og 6 m ² mod vest	4580	4590	4500



Figur 22. Fordeling af nødvendigt "kølebehov" til opretholdelse af en maksimal indetemperatur på 24 °C når vinduerne er fordelt på alle 4 verdenshjørner (se tabel 7). Vinduerne er forsynet med en 1 m bred afskærmning langs vinduets sider og top.



Figur 23. Fordeling af nødvendigt "kølebehov" til opretholdelse af en maksimal indetemperatur på 24 °C når alle vinduer er sydvendte. Vinduerne er forsynet med en 1 m bred afskærmning langs vinduets sider og top.

Anvendelsen af en fast afskærmning langs med vinduets sider og over vinduet med et fremspring på 1 meter medfører en markant reduktion af overtemperaturproblemet, selv når hele vinduesarealet vender mod syd. Reduktionen i overtemperaturer svarer til tilfældet i foregående eksempel, hvor alle vinduerne vender mod nord. Energiforbruget bliver imidlertid ikke forøget i samme grad, idet der i vinterhalvåret stadig tillades en væsentlig del af den lavtstående solstråling at ramme de sydvendte vinduer, hvilket også fremgår af figur 23, hvor der kan konstateres en smule overtemperaturer i vintermånederne.

En anden passiv foranstaltning er anvendelse af solafskærmende rudeløsninger, der har den fordel, at de er uafhængige af solhøjden og derfor er lige effektive for nord-, øst-, syd- og vestvendte vinduer. En klar solafskærmende lavenergirude med en center U-værdi på 1,1 kan fås med en g-værdi for ruden på ca. 0,35. Dermed bliver værdierne for det totale vinduesareal en U-værdi på 1,4 W/m²K og en g-værdi på 0,23. Virkningen af solafskærmende vinduesløsninger fremgår af figur 24 og figur 25 samt tabel 9.

Tabel 9. Beregnet opvarmningsbehov i et 150 m² lavenergihus med 30 m² vinduer, der henholdsvis alle vender mod syd, eller er fordelt med 7,5 m² mod nord, 4,5 m² mod øst, 12 m² mod syd og 6 m² mod vest. Vinduernes totale U-værdi er 1,4 W/m²K og den totale g-værdi for vinduerne er 0,23 (solafskærmende ruder).

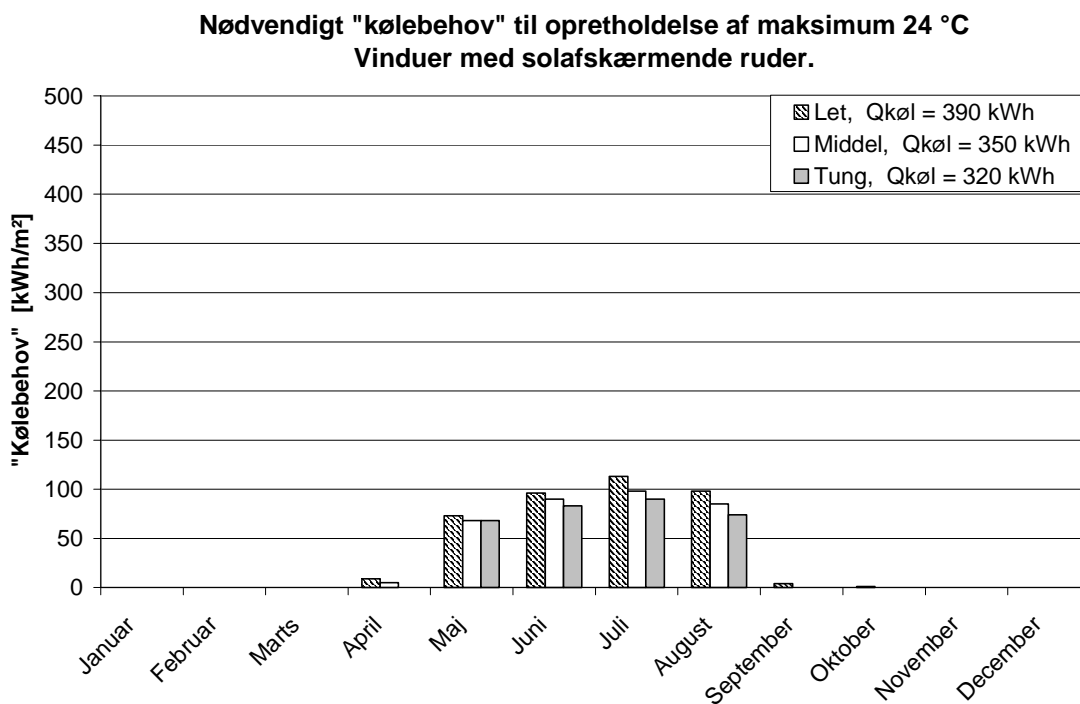
Vinduesorientering	Termisk let	Termisk middel	Termisk tung
	kWh/år	kWh/år	kWh/år
Alle sydvendte	4025	3920	3750
7,5 m ² mod nord, 4,5 m ² mod øst, 12 m ² mod syd og 6 m ² mod vest	4600	4620	4520

Anvendelse af solafskærmende rudeløsninger medfører en væsentlig reduktion af overtemperaturer (se figur 24 og figur 25), men ikke helt i samme grad som den foregående løsning med en fast afskærmning rundt om vinduet. Sammenlignes energiforbrugene i de to tilfælde (tabel 8 og tabel 9) ses det, at hvis alle vinduerne vender mod syd, giver den solafskærmende rudeløsning anledning til et lidt lavere opvarmningsbehov, hvilket stemmer godt overens med, at der er et lidt større overtemperaturproblem. Det tilsvarende forhold finder man ikke, når vinduerne bliver mere jævnt fordelt på de 4 verdenshjørner. Generelt set kan den faste afskærmning langs vinduets sider og overkant sidestilles med anvendelse af solafskærmende ruder, der vil være at foretrække på grund af de arkitektoniske og vedligeholdelsesmæssige fordele.

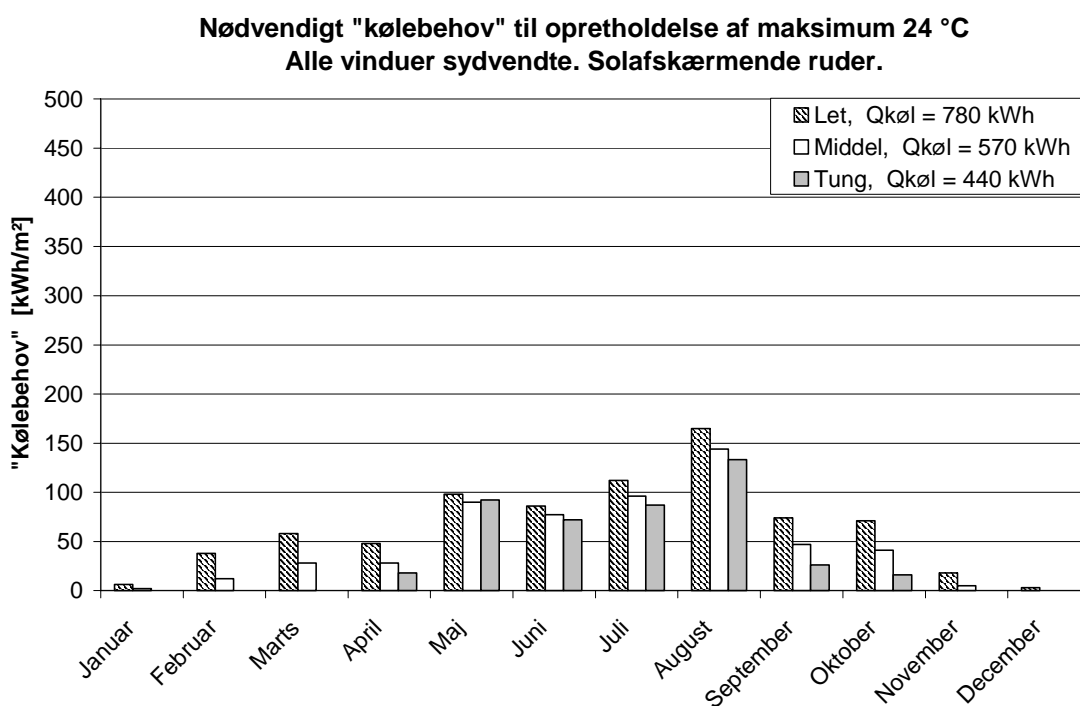
Solafskærmende ruder vil imidlertid sammenlignet med almindelige energiruder medføre en væsentlig stigning i opvarmningsbehovet (tabel 10), hvorfor andre alternativer til undgåelse af ubehagelige overtemperaturer bør undersøges.

Tabel 10. Stigning i opvarmningsbehovet for ruder med U-værdi 1,4 W/m²K og en g-værdi på 0,23 sammenlignet med almindelige energiruder (tabel 9 minus tabel 7).

Vinduesorientering	Termisk let		Termisk middel		Termisk tung	
	kWh/år	%	kWh/år	%	kWh/år	%
Alle sydvendte	615	15	770	20	1000	27
7,5 m ² mod nord, 4,5 m ² mod øst, 12 m ² mod syd og 6 m ² mod vest	800	17	900	20	950	21



Figur 24. Fordeling af nødvendigt "kølebehov" til opretholdelse af en maksimal indetemperatur på 24 °C når vinduerne er fordelt på alle 4 verdenshjørner (se tabel 7). Vinduerne er forsynet med en solafskærmende rude med en g-værdi for selve ruden på 0,35.



Figur 25. Fordeling af nødvendigt "kølebehov" til opretholdelse af en maksimal indetemperatur på 24 °C når alle vinduer er sydvendte. Vinduerne er forsynet med en solafskærmende rude med en g-værdi for ruden på 0,35.

De passive metoder til undgåelse af for høje indetemperaturer har den fordel, at de altid er virksomme, hvilket er en nødvendig forudsætning i mange boliger, hvor man ikke kan regne med, at der er nogen hjemme i dagtimerne, og som manuelt kan påvirke indetemperaturen ved åbning af vinduer, nedrulle persiener, trække gardinerne for etc. En aktiv indgriben allerede i første fase af temperaturstigningen i boligen er nødvendig for at holde temperaturen nede. Hvis først temperaturen i boligen måske har været 28 - 30 °C i mange timer, vil inventaret og bygningsmassen være blevet gennemvarmet, hvorved en sænkning af rumtemperaturen til et acceptabelt niveau, vil tage mange timer og måske umuligt at opnå, inden boligen forlades næste dag. Når andre metoder til reduktion af overtemperaturer undersøges, er det derfor vigtigt, at det er muligt at opnå en automatisk regulering styret af indetemperaturen i boligen. Nedenstående er kort gennemgået de forskellige muligheder, der eksisterer med hensyn til vinduer med dynamiske egenskaber samt øvrige bygningstekniske løsninger.

Ruder med varierende solenergitransmittans

Elektrokrome ruder giver mulighed for at skifte (trinvist eller trinløst) mellem 2 niveauer for solenergitransmittansen, men selv i den klare form medfører princippet en væsentlig reduktion af g-værdien for ruden og dermed en forøgelse af opvarmningsbehovet. Desuden vil de elektrokrome ruder reducere lystransmittansen selv i den klare form. En aktivering af rudens solafskærmende virkning betyder endvidere, at udsynet gennem ruden forsvinder. Elektrokrome ruder findes på markedet, men de er dyre og kræver eltilslutning til hvert enkelt vindue.

Ruder med indbygget solafskærmning i form af f.eks. motorstyrede persiener er en anden mulighed, hvor fordelene er, at rudens g-værdi ikke påvirkes, når persienerne ikke er aktiveret. Det vil sige, at der kan opnås den maksimale energimæssige fordel af vinduet. Ulemperne er ud over prisen, at der skal laves eltilslutning til hvert enkelt vindue samt øgede vedligeholdelsesudgifter til motorer og persiener. Derudover påvirkes udsynet gennem vinduerne når persienerne lukkes til.

Udvendige ”skodder” af et farvet solafskærmende glas kunne også være en mulighed. Skodden kunne eventuelt monteres i et skinesystem, hvor skodden parkeres ved siden af, over eller under vinduet, når der ikke er behov for solafskærmningen. Fordelen er, at der opnås en maksimal udnyttelse af vinduets energimæssige kvaliteter, når skodden er åben og, at der med lukkede ”skodder” stadig er udsynsmulighed gennem vinduet – om end med en vis farvning af lyset. Set i relation til udvendig kondens på velisolerende ruder vil en sådan skoddeløsning også kunne afhjælpe det problem, idet en lukning af skodderne om natten vil betyde, at kondensdannelsen sker på skodden og dermed ”fjernes” fra selve vinduet, når skodden åbnes om morgenen. Ulemperne er udover prisen til motorer og styring den udsatte position uden på klimaskærmen, der kan betyde funktionssvigt og store vedligeholdelsesudgifter.

Skoddeløsningen kunne i øvrigt udføres som en solcelleløsning, hvorved der samtidig med den solafskærmende virkning også kunne udvindes elektrisk energi, f.eks. til drift af et køleanlæg eller forceret ventilation. Solceller er i dag stadig forholdsvis dyre og vil kræve en del installationsarbejde.

Bygningstekniske løsninger

Ved bygningstekniske løsninger tænkes der på løsninger, der ikke direkte er knyttet til det enkelte vindue, men til boligen som helhed – f.eks. forskellige former for ventilationsløsninger eller andre metoder til køling af boligen. Nedenstående er anført de mest gængse

løsningsforslag, men mange andre forslag tilpasset den aktuelle situation vil sikkert være mulig.

Det første, der bør sikres, er, at der kan ske en udveksling af varme mellem boligens forskellige rum, så overskudsvarme fra f.eks. sydvendte rum kan udnyttes i boligens nordvendte rum. Det kræver mulighed for en stor luftudveksling rummene imellem, hvilket kan komme i karambolage med ønsket om en vis lyddæmpning mellem rummene. Alternativt kan den varme luft flyttes ved hjælp af små ventilatorer, hvilket imidlertid medfører et større elforbrug.

En energimæssig fordelagtig løsning til reduktion af de ”resterende” overtemperaturproblemer, når først der er foretaget en intern udligning i mellem boligens rum, vil være et system til øget udluftning ved hjælp af naturlig ventilation. Systemet udformes, så der ved stigende indetemperaturer åbnes for indbrudssikre åbninger, der tillader en gennemluftning af boligen. I varme perioder kan udluftningen fortsættes natten over til nedkøling af bygningens konstruktioner. Fordelen ved et sådant system er, at vinduernes energimæssige kvaliteter udnyttes fuldt ud, at der sikres en øget frisklufttilførsel uden energimæssige konsekvenser, og det kan etableres ved en relativ simpel anlægsudformning. Ulemperne er især risikoen for træk, når udeluften er væsentlig koldere end indetemperaturen og at systemet kræver indarbejdelse i bygningsdesignet, hvilket kun gør det egnet til nybyggeri.

Indenfor kontorbyggeri arbejdes der med begrebet dobbeltfacader, hvor en udvendig glasinddækning af facaden skaber en bufferzone mellem udeklimaet og facaden. Afhængig af behovet kan denne løsning både anvendes til forvarmning af ventilationsluften eller til forøget naturlig ventilation samt solafskærmning. Imidlertid medfører løsningen en permanent reduktion af solindfaldet på grund af det ekstra lag glas.

I bygninger med mekanisk udsugning kræves ”blot” en styring af ventilationsmængden afhængig af indetemperaturen, men samtidig må det sikres, at den tilstrækkelige luftmængde kan trækkes gennem huset uden for store tryktab, så elforbruget til ventilatoren begrænses. Fordele og ulemper er i øvrigt som beskrevet for den naturlige ventilationsløsning.

Anvendes et balanceret ventilationssystem med varmegenvinding, ligger der en mulighed i at kontrollere temperaturen af den tilførte ventilationsluft, så der kan opnås den køleeffekt, der er påkrævet med minimering af risikoen for trækgener. Anlægget skal dimensioneres efter de nødvendige luftmængder til opnåelse af den nødvendige køleeffekt. I sommerperioden køres uden om varmegenvinderen, og systemet kan anvendes til natkøling af boligens konstruktioner. Ulemperne er pladskravene til kanaler, elforbruget til ventilatorerne, øgede vedligeholdelsesudgifter samt begrænsningen til nybyggeriet.

6. KONKLUSION AF DE GENNEMFØRTE TEORETISKE ANALYSER

De teoretiske analyser er gennemført i et forsøg på at uddrage nogle konkrete retningslinjer for udvikling af energimæssigt bedre vinduer ud fra en meget kompleks problemstilling. Nedenstående konklusioner vil derfor være meget bredt formuleret, og der vil sandsynligvis være tilfælde, hvor konklusionerne ikke holder.

På baggrund af analyserne kan der udledes følgende konklusioner:

- Generelt set vil en sænkning af vinduernes U-værdi og en forøgelse af vinduernes g-værdi medføre et lavere energiforbrug til opvarmning uanset bygningens isoleringsniveau og varmekapacitet. Effekten af at sænke U-værdien vil være lige stor i alle bygningstyper, mens en forøgelse af g-værdien giver størst udbytte i dårligt isolerede bygninger.
- Inddrages virkningen af vinduernes U- og g-værdi på risikoen for overtemperaturer, og det forudsættes, at overtemperaturproblemerne løses ved mekanisk køling, vil der kunne findes et optimum af U- og g-værdi. U-værdien bør altid være så lav som muligt, mens den optimale g-værdi afhænger af bygningen og vinduernes orientering. For en bygning isoleret til BR-75 niveau skal g-værdien være så høj som muligt, mens der for en BR-95 bygning ikke vindes noget ved at øge den totale g-værdi for vinduet udover ca. 0,5. I et superisoleret lavenergihus, vil en total g-værdi på 0,2 – 0,3 være det optimale under forudsætning af, at overtemperaturerne undgås ved hjælp af aktiv køling.
- Anvendelse af passive solafskærmende foranstaltninger som udhæng/sideskygger eller solafskærmende ruder kan fjerne behovet for køling, men på bekostning af et større opvarmningsbehov. Ved en ren energimæssig sammenligning (tilført varmeenergi + tilført kuldeenergi til rumluften) vil løsningen med solafskærmende ruder og løsningen med aktiv køling være ligeværdige.
- Vinduer med dynamiske egenskaber vil kunne løse overtemperaturproblemet uden nævneværdig indflydelse på opvarmningsbehovet. Effektive dynamiske elementer er f.eks. persiener (udvendige eller indbyggede) eller andre mobile solafskærmninger. I boliger, hvor det ikke kan påregnes, at beboerne er hjemme om dagen, skal mobile solafskærmninger være styret af indetemperaturen, da det er vanskeligt at få kølet bygningskonstruktionerne ned, hvis først de er blevet gennemvarme. Mobile solafskærmninger kræver derfor, at hvert enkelt vindue er tilsluttet en central styring. Styringen og indførsel af bevægelige dele i vinduet øger omkostningerne både til etablering og vedligehold.
- Hvor der er mulighed for at helhedsoptimere bygningen med hensyn til energiforbrug og indeklima, kan vinduerne optimeres med hensyn til minimering af U-værdien og maksimering af g-værdien for opnåelse af det lavest mulige energiforbrug. Overtemperaturproblemerne løses ved andre byggetekniske løsninger - primært ved en kontrolleret udluftning/forceret ventilation, når indetemperaturen overstiger en fastsat grænse. Der vil være gode muligheder for at udnytte naturlig ventilation til etablering af udluftningen, hvorved løsningen bliver energimæssig neutral. Kombineret med termisk tunge bygningskonstruktioner vil natkøling med udeluft kunne holde indetemperaturen nede på et acceptabelt niveau selv om sommeren. Ulempen er en øget risiko for træk samt ekstra energiforbrug til ventilatorer, hvorfor der kræves en detaljeret projektering af systemet.

Ud fra ovenstående må det konkluderes, at der til boliger fremover stadig skal sættes på udvikling af vinduer med så lille U-værdi og så høj g-værdi som muligt, idet der findes metoder til at imødegå de overtemperaturmæssige gener, som de energimæssigt bedre vinduer

måtte medføre. Det er imidlertid særdeles vigtigt, at der i et hvert byggeprojekt tages hensyn til det resulterende termiske indeklima, idet for mange eksempler på boliger, der ikke er til at holde ud at være i, vil være særdeles hæmmende for udbredelsen af mere energirigtigt byggeri. Det kræver, at der udføres simuleringer, der tager hensyn til bygningens dynamiske egenskaber, så man som resultat både får oplyst det årlige opvarmningsbehov og kritiske indetemperaturer. Der er eventuelt behov for at udvikle et simpelt beregningsprogram til den indledende projekteringsfase, som kun kræver få inddata, men som kan give et nogenlunde godt billede af det resulterende termiske indeklima.

Men man skal også være opmærksom på, at de forudsætninger, der gøres i forbindelse med simuleringerne, reelt vil være tilstede, når huset er bygget. Eksempelvis er det meget brugt at regne med et øget luftskifte ved åbning af vinduerne, hvis indetemperaturen stiger op over et givet niveau. Men i en bolig, hvor beboerne måske er på arbejde om dagen, er der ikke nogen hjemme til at åbne vinduerne, hvorfor boligen inkl. den termiske masse når at blive meget varm, inden der kommer nogen hjem, og det vil derfor tage meget lang tid at køle boligen ned igen. Det er blandt andet sådanne forhold, der skal tages hensyn til i byggeprojektet f.eks. ved at foreskrive metoder til automatisk udluftning eller solafskærmning.

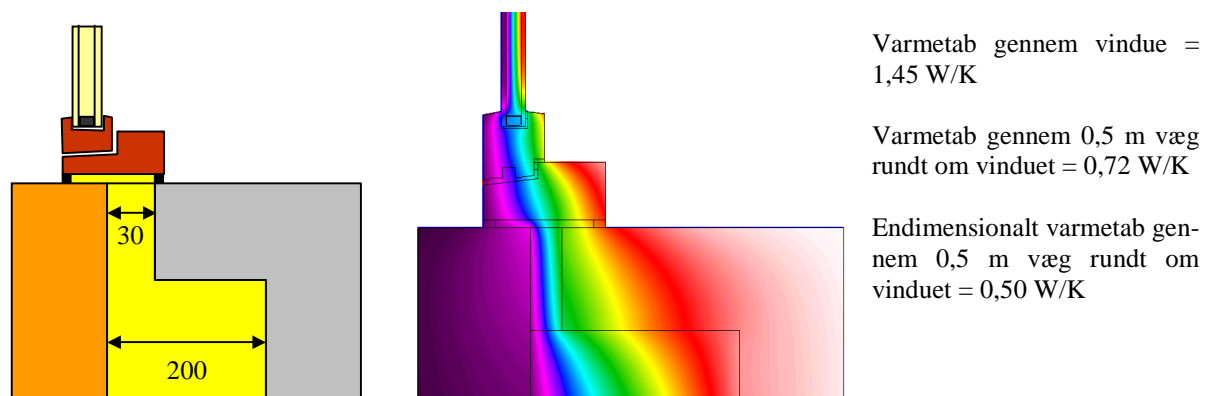
7. TEKNISKE MULIGHEDER FOR OPNÅELSE AF LAVERE VARMETAB OG HØJERE SOLENERGITRANSMITTANS

Det samlede varmetab gennem en vinduesløsning fremkommer som summen af rudens U-værdi, ramme/karmkonstruktionens U-værdi samt randeffekter omkring samlingen mellem rude og ramme/karm og mellem ramme/karm og den omgivende vægkonstruktion. Rudens U-værdi og ramme/karmkonstruktionens U-værdi kan bestemmes entydigt, mens randeffekterne fremkommer som en kombineret virkning af de to konstruktioner, der sammenføjes. Det er derfor vigtigt, at der ikke kun fokuseres på løsning af et problem i den ene konstruktionstype uden, at det sikres, at forbedringen ikke drukner i en energimæssig dårlig løsning i den tilstødende konstruktion.

Eksempelvis kan kantforseglingen i en forsegleet rude udføres på den traditionelle måde med et 0,4 mm stålprofil, der giver anledning til en væsentlig kuldebro langs rudens kant. Men der findes også andre løsninger f.eks. med plastafstandsprofiler, der resulterer i en langt mindre kuldebro langs rudens kant. Hermed burde der være opnået en væsentlig energimæssig gevinst, men den afhænger i høj grad af, hvilken ramme/karmkonstruktion ruden monteres i. Sidder ruden således i en metalramme, er betydningen af afstandsprofilets varmeledningsevne forsvindende, hvorimod der kan opnås en væsentlig besparelse, hvis ruden monteres i en traditionel træramme.

Samlingsdetaljen mellem vindue og væg

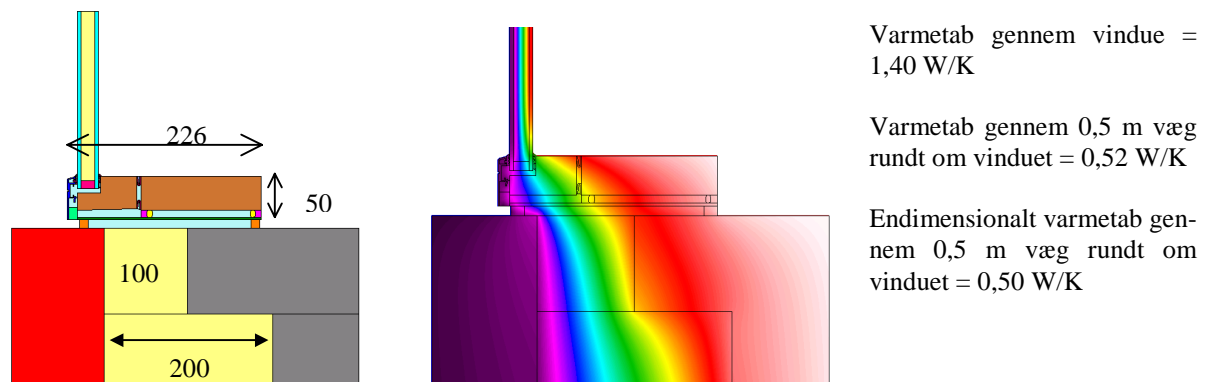
Udformningen af ramme/karmkonstruktionen og monteringsprincipperne har indflydelse på, hvorledes afslutningen af murhullet omkring vinduet kan udføres og dermed, hvor stor en kuldebroafbrydelse der kan etableres mellem formur og bagmur. Ideelt set bør der ikke ske nogen reduktion af isoleringstykkelsen i væggen, men den traditionelle karntykkelse på 100 – 120 mm har medført, at der ved vindueshullet sker en indsnævring af væggen isoleringslag til omkring 20 – 30 mm, så karmen kan dække over isoleringen, og der er mulighed for at fastgøre karmen til enten for- eller bagmur (figur 26).



Figur 26. Eksempel på traditionel vinduesløsning, hvor væggen isoleringslag reduceres til 30 mm ud for vinduet. Tegning og isotermbillede viser kun et udsnit omkring samlingen mellem vindue og væg af den konstruktion, der er regnet på.

Kuldebroforholdene i væggen afslutning mod vindueshullet betyder en forøgelse af varmetabet gennem 0,5 meter af den omkringliggende væg med ca. 40 %.

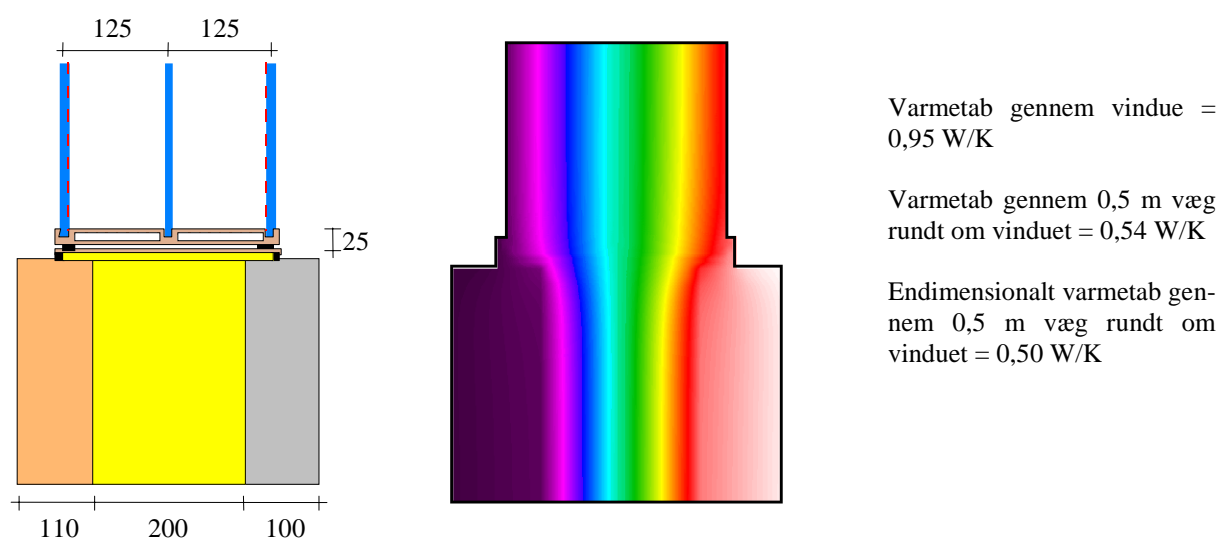
I forbindelse med Projekt Vindue [10] er der ved BYG•DTU lavet en prototype på et trævindue, der giver en energimæssig bedre samling mellem vindue og væg opnået gennem en udvidelse af karmtykkelsen (figur 27).



Figur 27. Projekt Vindue løsning, hvor der dels opnås en smallere ramme/karmløsning og dels bedre indbygningsforhold. Tegning og isoterbillede viser kun et udsnit omkring samlingen mellem vindue og væg af den konstruktion, der er regnet på.

Ovenstående figur viser, at det relativt nemt kan lade sig gøre at reducere varmetabet gennem den omkringliggende vægkonstruktion. I dette tilfælde øges varmetabet gennem 0,5 m af den omkringliggende væg kun med 4 %. Forklaringen er selvfølgelig den større kuldeafbrydelse i væggen samt, at noget af varmetabet, der før foregik gennem vindueshullets sider, nu sker gennem karmkonstruktionen og derfor henregnes til varmestrømmen gennem vinduet.

I forbindelse med projektet ”Vinduer med smal ramme/karmkonstruktion og stort lys- og solindfald” finansieret af Energistyrelsens Energiforskningsprogram EFP-98 er der designet et tykt vindue, der resulterer i et næsten lineært temperaturforløb gennem væg og vindue med deraf reduceret varmetab til følge. Karmen og den integrerede ramme er lavet af glasfiberarmeret polyester med en 3-lags trykudlignende rude (figur 28).



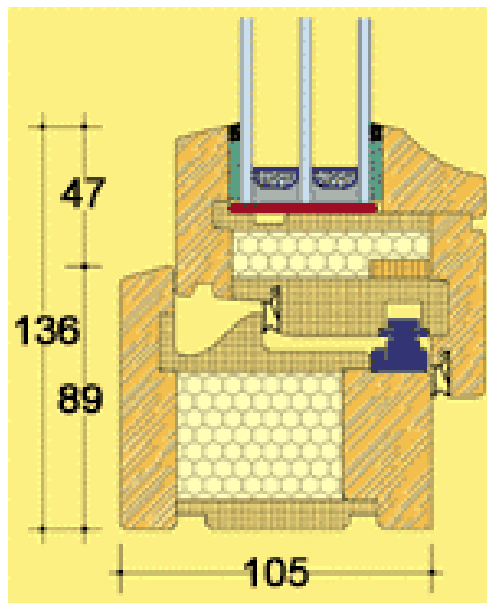
Figur 28. Eksempel på vindue tilpasset væggen's isoleringstykkelse. Resultat fra projektet ”Vinduer med smal ramme/karmkonstruktion og stort lys- og solindfald” [11].

Ramme/karmløsninger

Udviklingen af bedre isolerende ramme/karmkonstruktioner er praktisk taget et uberørt område i den danske vinduesbranche, hvor hovedkræfterne groft sagt er lagt i udvikling af vinduer med mindre vedligeholdelsesbehov. Der er gennemført en række forskningsprojekter på området, hvor der er peget på forskellige løsningsmuligheder, men resultaterne har ikke fundet vej til færdigudvikling hos vinduesproducenterne. Det er således stadig det traditionelle trævindue, der resulterer i den laveste U-værdi.

Derimod er der i Tyskland sket en kraftig udvikling af højisolerede ramme/karmkonstruktioner tilskyndet af "Passiv Haus" ideen om boliger med så lavt energiforbrug, at det traditionelle varmeanlæg kan undværes. På nuværende tidspunkt er der over 30 tyske vinduesfirmaer, der kan levere ramme/karmkonstruktioner med en U-værdi under $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ [12], hvilket er ca. halvdelen af U-værdien for de bedste vindueskonstruktioner på det danske marked.

Nedenstående figur 29 viser et enkelt eksempel på en velisoleret ramme/karmløsning, men princippet går igen i mange af de forskellige fabrikater.



Figur 29 "Serie 0.5" fra firmaet Eurotec. Ramme/karm U-værdi = $0,79 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Princippet i løsningen vist i figur 29 er en sandwich konstruktion af træ, polyuretan og polyuretanskum, hvor isoleringslaget er placeret i forlængelse af ruden, så der opnås mindst muligt spring i temperaturforløbet. Et princip der i øvrigt allerede er beskrevet som en løsningsmulighed i et UVE projekt under Energistyrelsen fra 1989 [13]. Placeringen af isoleringen i umiddelbart forlængelse af ruden giver yderligere de optimale betingelser for udnyttelse af fordelene ved anvendelse af en isolerende kantløsning i ruden. Den viste løsning i figur 29 har i øvrigt omtrent de samme mål som en traditionel dansk vinduesløsning. U-værdien for et $1 \times 1 \text{ m}^2$ vindue med en trelagsrude med isolerende kantløsning og center U-værdi på $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ bliver med den viste løsning ca. $0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$. Princippet kan

formodentlig videreudvikles til en løsning, hvor ramme/karmbredden reduceres og tykkelsen øges for bedre tilpasning til isoleringstykkelsen i vægkonstruktionen.

Det må konkluderes, at der i udlandet allerede findes ramme/karmkonstruktioner med væsentlig bedre isoleringsevne, end det er tilfældet på det danske marked – vel at mærke produkter, der anvendes i reelt byggeri.

Rudeløsninger

Rudens center U-værdi fremkommer som resultatet af den kombinerede effekt af varme-transporten ved stråling og ledning/konvektion i hulrummet mellem rudens glaslag. Ledning/konvektion i hulrummet kan påvirkes ved valg af forskellige gasarter (se tabel 11), mens strålingsudvekslingen er knyttet til glasoverfladernes emissivitet.

Tabel 11. Varmeledningsevne, densitet, optimal glasafstand og priser for forskellige fyldgasser til vinduer. Materialeleværdier fra EN 673 [14], glasafstand for tolags energirude beregnet med "Glas 98" [15], pris oplyst af projektdeltagere.

Gastype	Varmeledningsevne (10 °C)	Densitet (10 °C)	Optimal glasafstand	Pris*
	W/mK	kg/m ³	mm	kr/m ³
Luft	0,025	1,25	16	0
Argon	0,017	1,72	15	80
Krypton	0,0090	3,61	10	10000

*Prisen er kostprisen inkl. ca. 50% svind ved påfyldning.

Emissiviteten for glasoverfladerne kan ændres ved påføring af et få atomer tykt metallag, der ændrer emissiviteten for langbølget stråling, men stadig tillader dagslys at passere næsten uforstyrret. Belægningerne kan være hårde (mekanisk robuste) eller bløde, der kræver en tør og beskyttet placering. Typiske værdier for emittansen af forskellige belægninger fremgår af tabel 12.

Tabel 12. Emittans af forskellige typer lavemissionsbelægninger anvendt i energiruder.

Lavemissionsbelægning	emittans	g-værdi for tolagsrude med en belægning
Ingen belægning	0,84	0,76
Hård belægning	0,16	0,72
Blød belægning	0,10	0,66
Blød "super" belægning	0,04	0,63
I Tyskland dobbelt super	0,02	0,52

Som det fremgår af ovenstående tabel, er emissiviteten af de bløde lavemissionsbelægninger meget tæt på 0, hvorfor udviklingspotentialer på dette område er udtømt. Det betyder, at for en tolags rude er en center U-værdi på ca. 1,0 W/m²K den laveste U-værdi, der kan opnås for gasfyldte ruder.

En yderligere forbedring af rudens center U-værdi kræver derfor en forøgelse af antal glaslag i ruden. Ved anvendelse af trelagsruder med to lavemissionsbelægninger er det således muligt at opnå en center U-værdi på ca. 0,5 W/m²K. Sådanne ruder er umiddelbart tilgængelige på markedet og finder udbredt anvendelse i byggeri med fokus på energiforbruget, som f.eks. lavenergihuse. Anvendelse af tre lag glas betyder en 50% tungere rudekonstruktion, der stiller forøgede krav til ramme/karmkonstruktionens styrke. Derudover reduceres rudens g-værdi og

lystransmittans markant ved tilføjelse af et ekstra glaslag og en ekstra lavemissionsbelægning. Det midterste glaslag kan erstattes af en udspændt plastfolie, hvorved vægtforøgelsen holdes på et minimum, men der er nogen usikkerhed omkring sådanne løsninger.

Muligheden for forbedring af vinduets U-værdi ved anvendelse af yderligere et glaslag er yderst begrænset, idet der af holdbarhedsmæssige årsager ikke kan anvendes mere end to lavemissionsbelægninger i ruden. Årsagen er, at en lavemissionsbelægning absorberer en del af solenergien, hvorved glaslaget varmes op. I en trelagsrude er de to belægninger derfor placeret på det yderste henholdsvis det inderste lag glas, hvor den absorberede varme nemt afgives til henholdsvis udeluften og rumluften. I en firelagsrude kan placering af endnu en lavemissionsbelægning kun ske på et glaslag midt i ruden, hvor der er et godt isolerende lag på begge sider. Glaslaget kan derfor dårligt komme af med den absorberede varme, og der vil være stor risiko for termisk brud i ruden, eller der må anvendes hærdet glas, hvilket betyder en væsentlig fordyrelse.

Det må på baggrund af ovenstående konkluderes, at med kendt og gennemprøvet teknologi er den nedre grænse p.t. for rudens U-værdi ca. $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Der er dog forsket i udvikling af andre rudetyper såsom vakuumruder og aerogelruder, der måske kan give mulighed for yderligere forbedringer.

Vakuumbuder har teoretisk en mulighed for at opnå en center U-værdi omkring $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ved anvendelse af kun 2 lag glas, hvorved vægtproblemet ved trelagsruden er løst. Princippet er, at varmestrålingen i ruden reduceres ved hjælp af lavemissionsbelægninger og at varmeledningen i hulrummet fjernes ved at fjerne luften mellem glassene. Prototyper på vakuumruder er blevet produceret, og teknikken er delvis udviklet til en serieproduktion [16], men uden at det er sat i gang. Et af problemerne er, at bløde lavemissionsbelægninger vil fordampe under samlingsprocessen af ruden, hvorved strålingstabet ikke mindskes. I Japan er der vakuumruder på markedet, men med en relativ høj U-værdi, der gør dem uinteressante i forhold til almindelige tolags energiruder.

Aerogelruder har principielt muligheden for vilkårligt lave U-værdier, idet ruden opbygges af 2 lag glas, hvorimellem der placeres et højisolerende transparent materiale kaldet silica aerogel. Ruden evakueres til et groft vakuum, hvorved varmeledningsevnen for silica aerogelen når ned under $0,01 \text{ W/mK}$. Materialet i sig selv bremser for varmestrålingen, hvorved U-værdien er ligefrem proportional med tykkelsen af silica aerogelen. Yderligere har silica aerogel en høj solenergitransmittans, hvilket betyder, at der med 20 mm glasafstand kan opnås en center U-værdi på ca. $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ samtidig med en solenergitransmittans på ca. 0,7, hvilket er alle andre rudeløsninger overlegent. Imidlertid kan aerogelruden ikke på nuværende tidspunkt konkurrere med traditionelle ruder med hensyn til udsynskvaliteten, hvilket sammen med den nuværende høje pris for materialet og manglende dokumentation for levetiden gør anvendelsen i almindelige vinduer urealistisk på kort sigt.

Kantforseglinger

Kantforseglingen, som traditionelt består af et afstandsprofil af stål samt en fugemasse, er det termiske svage punkt i forseglede ruder. Traditionelt anvendes et 0,4 mm stålprofil, hvis formål er at sikre den ønskede glasafstand samt give plads til tørstof i det hule stålprofil. Stålprofil og fugemasse skal desuden forhindre fugt i at diffundere ind i ruden og forhindre gasfyldningen i ruden i at diffunderer ud. Fugemassen er det svage led med hensyn til diffusion, hvorfor tværsnitsarealet af fugemassen er minimeret.

Metalprofilet giver anledning til en væsentlig kuldebro, der til dels ødelægger den gode isoleringsevne opnået ved rudens midte. Der findes imidlertid termisk set bedre løsninger på markedet som f.eks. 0,15 mm rustfri stålprofiler, plastprofiler med indlagt ”dampspærre”, profiler med brutt kuldebro, profiler af siliconeskum og termoplastiske profiler (TPS-profiler). Betydningen for rudens samlede U-værdi er vist i tabel 13 for forskellige rudestørrelser.

Tabel 13. Kantløsningens betydning for den samlede U-værdi af en tolags energirude med en center U-værdi på 1,1 W/m²K som funktion af rudens størrelse. Der er regnet på ruden alene, det vil sige uden, at den er monteret i en ramme/karmkonstruktion.

Kantløsning	Rudens totale U-værdi afhængig af størrelsen [W/m ² K]			
	0,5 × 0,5 m ²	1,0 × 1,0 m ²	1,5 × 1,5 m ²	2,0 × 2,0 m ²
0,4 mm alu-profil	1,99	1,55	1,40	1,32
0,4 mm stål-profil	1,95	1,53	1,38	1,31
0,15 mm rustfri stålprofil	1,69	1,40	1,30	1,25
Swiss spacer	1,51	1,30	1,24	1,20

Resultaterne i tabel 13 viser, at der kan opnås en væsentlig forbedring af rudens samlede U-værdi ved anvendelse af bedre isolerende kantløsninger. Det forudsætter dog, at ruden monteres i en egnet ramme, der er i stand til at udnytte den forbedrede kantløsning. De nævnte kantløsninger findes på markedet inkl. udstyr til montering og samling af ruderne.

Resultaterne i tabel 13 viser også, at selv om der anvendes bedre isolerende kantløsninger, optræder der stadig en kuldebro i kantløsningen. Det skyldes, at den ækvivalente varmeledningsevne i rudens gasfyldte hulrum i ovenstående tilfælde er ca. 0,02 W/m²K, hvilket er mindre end varmeledningsevnen for gængse isoleringsmaterialer og også mindre end for stillestående atmosfærisk luft.

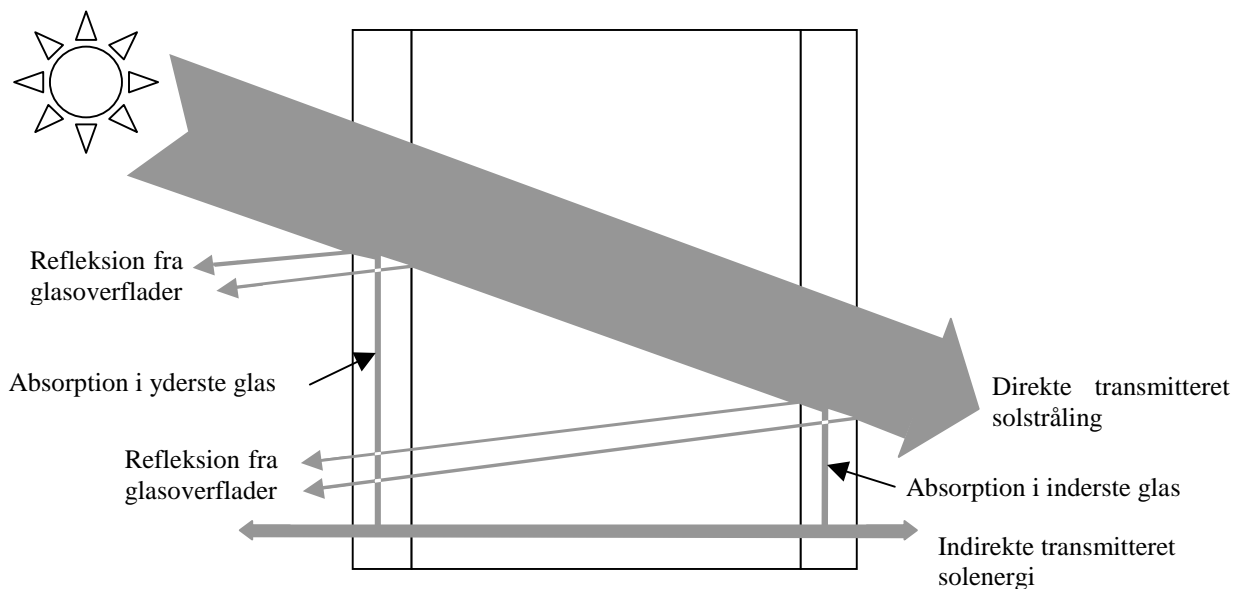
Alternativt kan glasafstanden i ruden øges, indtil der opnås den samme ækvivalente varmeledningsevne i rudens hulrum som i kantløsningen. Det kan lade sig gøre, fordi den isolerende virkning af gasfyldningen praktisk taget ikke ændrer sig, når glasafstanden øges ud over den optimale afstand. Imidlertid kræver det anvendelse af et større volumen fyldgas samtidig med, at kantløsningen udsættes for en større belastning forårsaget af større interne trykvariationer i ruden ved opvarmning/afkøling. Rudens levetid vil derfor blive reduceret. Det har i EFP-98 projektet ”Vinduer med smal ramme/karmkonstruktion og stort lys- og solindfald” ført til design af en luftfyldt trykudlignende vinduesløsning med rammen integreret i ruden. Rammen afløser den traditionelle kantløsning og udført i glasfiberarmeret polyester opnås, at ramme/karmkonstruktionen får samme U-værdi rudens center værdi, og vinduet indeholder dermed ingen kuldebroer (se figur 28).

Forøgelse af vinduets g-værdi

Vinduets g-værdi afhænger af g-værdien for ruden samt hvor stor en del af vinduesarealet, der udfyldes af ramme/karmkonstruktionen.

Når solstrålingen rammer en rude, vil noget af solstrålingen blive reflekteret fra glasoverfladerne, noget vil blive absorberet i glaslagene, og resten vil blive transmitteret som kortbølget stråling til rummet bag ruden. En del af den solstråling, der absorberes, omdannes til varme, hvoraf en del vil tilføres det bagvedliggende rum som langbølget stråling og ved

overførsel til luften via ledning/konvektion langs den indvendige rudeoverflade. Processen er skematisk fremstillet i nedenstående figur 30.



Figur 30. Solstrålingens passage gennem en tolagsrude. g -værdien for ruden er summen af direkte og indirekte transmitteret solenergi.

Betragtes figur 30 fremgår det, at der er to parametre, der har indflydelse på den resulterende g -værdi. Det drejer sig om refleksionen fra glasoverfladerne og absorptionen i rudens glaslag og eventuelle belægninger.

Refleksionen fra glasoverfladerne skyldes dels glassets overflade og dels eventuelle belægninger. For ubelagte glasoverflader reflekteres ca. 4 % af den stråling, der rammer vinkelret ind på overfladen. Dette gælder også, når strålingen skal ud af glassets "bagside", hvorved den samlede refleksion fra et lag glas bliver ca. 7 - 8 % afhængig af, hvor meget af strålingen der absorberes i glasset. Ved anvendelse af flere lag glas i en rude øges den resulterende reflektans, men dog ikke lineært med antallet af glaslag på grund af gentagne refleksioner mellem de enkelte overflader. For en tolags rude uden belægninger bliver den samlede reflektans for ruden mellem 12 og 15 % igen afhængig af absorptionen i rudens glaslag. Påføres glasoverfladerne en lavemissiv belægning øges reflektansen fra disse overflader afhængig af belægningens natur. Således bliver den resulterende reflektans for en tolags energirude med en blød "super" lavemissionsbelægning ca. 24 % eller ca. det dobbelte af værdien for en tolagsrude uden belægninger. Vælges derimod en hård belægning, bliver den resulterende reflektans for en tolagsrude kun 15%, hvilket er årsagen til den højere g -værdi for ruder med en hård lavemissionsbelægning.

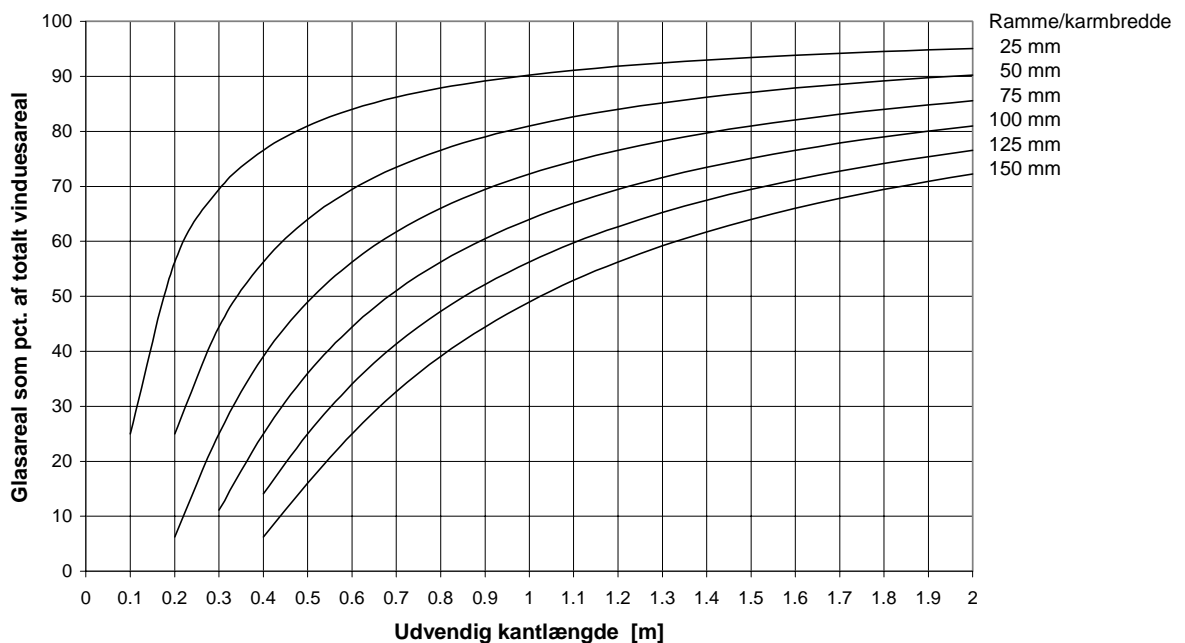
Reflektansen fra ubelagte glasoverflader kan reduceres væsentligt ved en overfladebehandling af glasset med en antirefleksionsbelægning, der reducerer refleksionen fra glasoverfladen til ca. 1 %. Der kan således opnås en forbedring af g -værdien for en tolagsrude uden belægninger med 5-6 procentpoint. Processen er udviklet og anvendes kommercielt af firmaet SUNARC [17] - især i forbindelse med dæklag til solfangere.

Absorptionen sker dels i selve glasset forårsaget af et naturligt jernindhold og dels i eventuelle lavemissionsbelægninger. I et almindeligt 4 mm floatglas absorberes der ca. 10 % af solenergien ved passage gennem glasset, hvoraf en lille del vil blive tilført det bagved liggende rum som den indirekte transmitterede solenergi. Med en reflektans på 7 % og en absorberet energimængde på 10 % er den direkte solenergitransmittans = 0,83, men på grund af det indirekte bidrag er g-værdien for et 4 mm floatglas lidt højere = 0,86. For en tolagsrude uden lavemissionsbelægninger er den direkte solenergitransmittans = 0,69 mens g-værdien er 0,76. Med hensyn til absorptionen i glasset kan denne næsten fjernes ved at anvende råstoffer uden jern – enten naturligt forekommende eller ved en rensning inden dannelse af glasmassen. Jernfattigt glas produceres allerede til specielle formål, hvor en farvning af lyset er uønsket, og er således et kommercielt tilgængeligt produkt. Virkningen på g-værdien ved at anvende jernfattigt glas er betydelig – for et 4 mm glas øges g-værdien fra 0,86 til 0,91, og for en dobbeltrude uden belægninger øges g-værdien fra 0,76 til 0,84.

Samtidig med at g-værdien øges, øges også lystransmittansen, og der opnås en mindre farvning af det transmitterede lys – en effekt, der får større betydning jo flere glaslag, der anvendes i rudeløsningen

Ramme/karmarealets andel af det samlede vinduesareal har stor betydning for vinduets samlede g-værdi. Det er således muligt at øge vinduets g-værdi betragteligt ved at anvende smallere ramme/karmkonstruktioner. Figur 31 viser sammenhængen mellem ramme/karmbredden og det resulterende glasareal i et kvadratisk vindue.

Glasareal som funktion af udvendig kantlængde og ramme/karmbredde

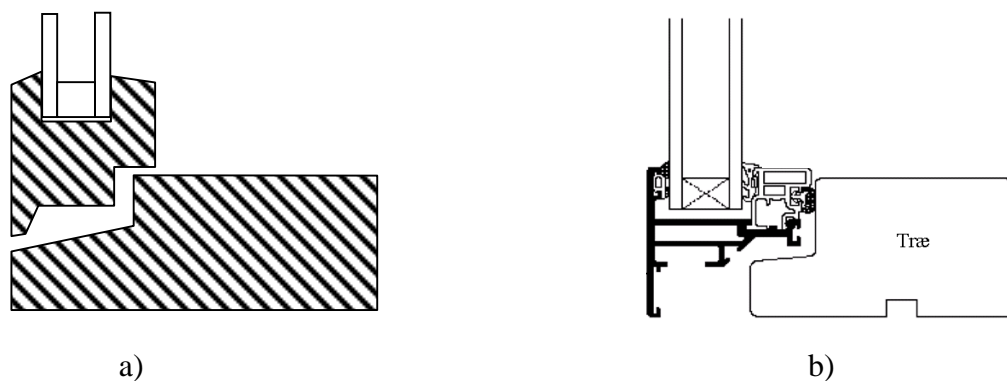


Figur 31 Glasareal i procent af totalt vinduesareal som funktion af ramme/karmbredden for kvadratiske vinduer.

Betragtes et vindue med ydermålene $1 \times 1 \text{ m}^2$ med en traditionel ramme/karmbredde på 125 mm, udgør glasarealet 60 % af det totale vinduesareal. Vinduet er forsynet med en rude med en g-værdi på 0,6, hvorved vinduets totale g-værdi bliver $= 0,6 \times 0,6 = 0,36$. Benyttes den samme rude i en ramme/karmkonstruktion med bredden 50 mm, opnås der en glasandel på 82 % og dermed en total g-værdi for vinduet på $0,82 \times 0,6 = 0,49$.

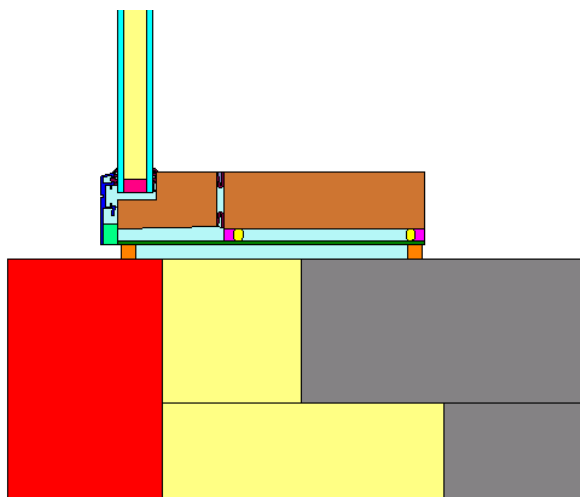
En reduktion af ramme/karmbredden giver altså umiddelbart en stor forøgelse af vinduets g-værdi og en større dagslystransmittans uden, at der skal gås på kompromis med rudens isoleringsevne. Tværtimod betyder et større glasareal, at kuldebrovirkningen på grund af kantløsningen i ruden får relativt mindre betydning. Reduktion af ramme/karmbredden kan dog have en negativ indflydelse på ramme/karm U-værdien, idet den nødvendige styrke og stivhed skal opnås i et mindre profil, og derfor kan kræve anvendelse af materialer med større styrke og ofte også med større varmeledningsevne.

De fleste oplukkelige vinduesfabrikater på det danske marked udføres principielt som vist på nedenstående figur 32.a. Ramme/karmbredden for denne type konstruktioner varierer typisk mellem 100 og 120 mm, og U-værdien for ramme/karmkonstruktionen ligger i intervallet 1,5 – 2,0 $\text{W/m}^2\text{K}$. Der findes dog smallere løsninger på det danske marked, hvor rammen er trukket ned foran karmen, så den samlede ramme/karmbredde bliver ca. 50 mm (figur 32.b). I disse tilfælde er rammen udført helt eller delvis i metal, hvilket medfører en forøgelse af ramme/karmens U-værdi til værdier omkring 2,8 – 3,0 $\text{W/m}^2\text{K}$. Til gengæld udgør ramme/karmarealet en mindre del af det totale areal for vinduet, hvorved den samlede U-værdi for et $1 \times 1 \text{ m}^2$ vindue bliver omtrent den samme, om der anvendes den brede eller den smalle ramme/karmkonstruktion.



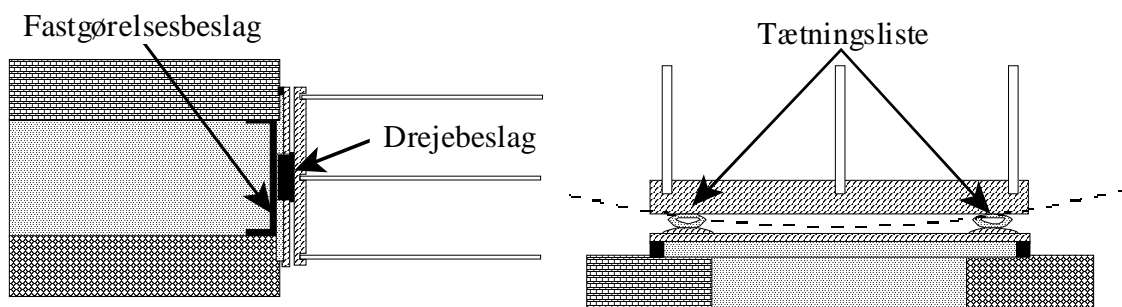
Figur 32. a) Princip for traditionelle danske vinduesløsninger
b) Konstruktion med rammen trukket ned foran karmen (VELFAC [18])

I forbindelse med Projekt Vindue [10] er der fremstillet et funktionsdueligt trævindue, hvor rammen netop er trukket ned foran karmen (figur 33). Ramme/karmbredden er ca. 50 mm, og U-værdien for ramme/karmkonstruktionen er 1,3 $\text{W/m}^2\text{K}$.



Figur 33. Forsøgsvindue fremstillet under Projekt Vindue [10]

Figur 34 viser et bud på fremtidens vinduesløsning udviklet som en del af projektet "Vinduer med smal ramme/karmkonstruktion og stort lys- og solindfald" finansieret gennem Energi- styrelsen Energiforskningsprogram EFP-98. I denne løsning er rammen integreret i ruden og erstatter således den traditionelle kantforsegling samtidig med, at der opnås en meget smal konstruktion. Ramme og karm er opbygget i glasfiberarmeret polyester, der udmærker sig ved en relativ lav varmeledningsevne kombineret med stor styrke. Ramme/karmbredden er kun 25 mm. U-værdien for ramme/karmarealet er ca. $1 \text{ W/m}^2\text{K}$, hvilket er lig med rudens totale U-værdi, hvorved vinduets U-værdi bliver uafhængig af vinduets størrelse. Vinduet er nærmere beskrevet i [11].



Figur 34. Nyt vindueskoncept med rammen integreret i ruden for opnåelse af så lille ramme/karmbredde som muligt.

8. MULIGE PRODUKTFORBEDRINGER PÅ KORT SIGT

I de foregående kapitler er der gennemført en detaljeret analyse af, hvilken vej udviklingen bør gå med hensyn til en energimæssig forbedring af vinduer til boligbyggeri under hensyntagen til påvirkning af opvarmningsbehov og ikke mindst indeklimaet. Hovedresultatet af analyserne er, at en reduktion af U-værdien og en forøgelse af g-værdien vil medføre et væsentligt fald i opvarmningsbehovet uanset bygningens isoleringsniveau, dog med størst effekt for dårligt isolerede boliger.

I foregående kapitel er beskrevet en række muligheder for forbedring af både U- og g-værdi – muligheder der allerede findes færdigudviklet til kommercielt brug, men som alligevel ikke finder anvendelse i den danske vinduesbranche andet end i særlige tilfælde.

For rudedelens vedkommende drejer det sig om anvendelse af jernfattigt glas, anvendelse af isolerende kantløsninger og antirefleksions behandling af glasoverfladerne. Dernæst vil anvendelse af 3-lagsruder kunne sænke rudens U-værdi fra ca. 1,1 til ca. 0,5 W/m²K. Spørgsmålet er, hvorfor løsninger ikke bliver brugt til standard rundefremstilling.

En af årsagerne er selvfølgelig, at prisen på ruden vil blive højere.

Jernfattigt glas koster dobbelt så meget som normalt floatglas, isolerende kantløsninger koster 3 – 6 gange mere pr. meter end den traditionelle stålløsning etc.

Anvendelse af isolerende kantløsninger fravælges også på grund af, at effekten først bliver udnyttet fuldt ud, hvis ramme/karmkonstruktionen også udføres med en lav U-værdi.

Trelagsruder er teknisk set ikke et problem, men medfører øgede krav til ramme/karmkonstruktionens styrke, og der vil, hvis der ikke tages særlige forholdsregler, opstå problemer med ofte forekommende udvendig kondens på ruden, hvilket er utilfredsstillende – især når man har investeret i et dyrt produkt. Desuden kommer der mindre lys gennem ruden, og tykkelsen er væsentlig større end for en tolags rude.

En forøgelse af prisen kan i sig selv være en hindring, især hvis det er vanskeligt at forklare aftagerne fordelene ved det dyrere produkt. Nedenstående er det forsøgt at give en oversigt over de økonomiske forhold for valg af forskellige vinduestyper. Ved beregning af den energimæssige gevinst er der regnet på huset beskrevet i kapitel 3 isoleret til BR-95 standard. De økonomiske beregninger er udført på den måde, at energibesparelsen er udregnet for de forskellige tiltag, hvorefter der er udregnet en maksimal tilladelig merpris for vinduet baseret på en simpel tilbagebetalingstid på 10 år og en energipris på 0,6 kr pr. kilowatttime. Hvor det har været muligt, er denne merpris sammenlignet med tilgængelige prisoplysninger fra fabrikanterne. Det har ikke været muligt at fremskaffe pålidelige priser på bedre isolerende ramme/karmkonstruktioner som f.eks. de tyske vinduer udviklet til de såkaldte "Passiv Haus" bygninger.

Tabel 14. Økonomiske forhold omkring anvendelse af energimæssigt bedre rudeløsninger.

Vinduesbeskrivelse	Energiforbrug	Besparelse	Maksimal merpris	Nuværende merpris
	kWh/år	kWh/m ²	kr/m ²	kr/m ²
Trævindue + 2-lags argonfyldt energirude $U_r = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Psi_g = 0,10$ $U_c = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_c = 0,63$ $U_{tot} = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_{tot} = 0,43$	14740			
Trævindue + energirude med 1 lag jernfattigt glas $U_r = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Psi_g = 0,10$ $U_c = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_c = 0,68$ $U_{tot} = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_{tot} = 0,46$	14370	12	72	350
Trævindue + energirude med 2 lag jernfattigt glas $U_r = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Psi_g = 0,10$ $U_c = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_c = 0,69$ $U_{tot} = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_{tot} = 0,47$	14300	15	90	700
Trævindue + energirude med 1 antirefleksionsbehdl. $U_r = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Psi_g = 0,10$ $U_c = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_c = 0,66$ $U_{tot} = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_{tot} = 0,45$	14520	7	42	50
Trævindue + energirude med 2 antirefleksionsbehdl. $U_r = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Psi_g = 0,10$ $U_c = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_c = 0,69$ $U_{tot} = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_{tot} = 0,47$	14300	15	90	100
Trævindue + energirude med varm kant løsning $U_r = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Psi_g = 0,05$ $U_c = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_c = 0,63$ $U_{tot} = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_{tot} = 0,43$	14250	16	96	50
Trævindue + 3-lags argonfyldt rude $U_r = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Psi_g = 0,1$ $U_c = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_c = 0,46$ $U_{tot} = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_{tot} = 0,31$	14790	-2		600

Betragtes ovenstående tabel 14 ses det, at den energimæssigt og økonomisk mest fordelagtige foranstaltning på rudeområdet er anvendelse af et isolerende afstandsprofil, men også anvendelse af antirefleksionsbehandlet glas kan give en væsentlig forbedring af vinduets energimæssige forhold inden for en økonomisk fordelagtig ramme. Derimod er jernfattigt glas i øjeblikket alt for dyrt til at retfærdiggøre anvendelse i energiruder, men et lille prisfald må forudses, hvis efterspørgslen kan oppebære en fuld produktionslinie til dette formål.

Anvendelse af en superisolerende 3-lagsrude giver i ovenstående beregninger anledning til et øget energiforbrug på trods af, at vinduets U-værdi bliver væsentlig reduceret. Årsagen er en væsentlig reduktion i vinduets g-værdi på grund af det ekstra lag glas og den ekstra lavemissionsbelægning. Hvis 3-lagsruden skal blive en energimæssig fordelagtig løsning, skal den kombineres med et isolerende afstandsprofil samt anvendelse af jernfattigt glas og/eller antirefleksionsbehandlet glas. Rudeløsningen vil derved blive uforholdsmæssig dyr, med mindre jernfattigt glas kommer langt ned i pris.

Tabel 15. Økonomiske forhold omkring anvendelse af energimæssigt bedre ramme/karm-løsninger.

Vinduesbeskrivelse	Energiforbrug	Besparelse	Maksimal merpris	Nuværende markedspris
	kWh/år	kr/m ²	kr/m ²	kr/m ²
Trævindue + 2-lags argonfyldt energirude $U_r = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Psi_g = 0,10$ $U_c = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_c = 0,63$ $U_{tot} = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_{tot} = 0,43$	14740			
Smal ramme/karm-løsning (figur 33) + 2-lags argonfyldt energirude $U_r = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Psi_g = 0,10$ $U_c = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_c = 0,63$ $U_{tot} = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_{tot} = 0,53$	13020	57	342	?
”Passiv Haus”-løsning (figur 29) + 2-lags argonfyldt energirude $U_r = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Psi_g = 0,10$ $U_c = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_c = 0,63$ $U_{tot} = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_{tot} = 0,43$	13460	42	252	?
Trykdulignende rude med integreret ramme (figur 34) $U_r = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Psi_g = 0,0$ $U_c = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_c = 0,57$ $U_{tot} = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_{tot} = 0,52$	11800	98	588	?

Minimering af ramme/karmkonstruktionens bredde uden at påvirke konstruktionens U-værdi har en væsentlig større energibesparende effekt end mulighederne for at ændre rudens g-værdi, som beskrevet i foregående tabel 14. Ligeledes betyder en halvering af ramme/karmkonstruktionens U-værdi også betydelige energibesparelser, men den fulde effekt opnås først hvis bredden samtidig kan reduceres.

På baggrund af ovenstående må det konkluderes, at produktudviklingen på kort sigt bør koncentrerer om udvikling af smalle ramme/karmkonstruktioner som f.eks. ”Projekt vindue” vinduet og 2-lags rudeløsninger med isolerende afstandsprøfer samt antirefleksionsbehandlet glas. 2-lags energiruden har yderligere den fordel, at der kun i begrænset og acceptabelt omfang forekommer kondens udvendigt på ruden.

9. KONKLUSION

Vinduernes betydning for energiforbrug og termisk indeklima i boliger er blevet analyseret ved hjælp af et omfattende simuleringsarbejde med varierende vinduestyper og orienteringer i huse med forskellige isoleringsniveauer.

Vinduerne tilbyder store muligheder for at sænke energiforbruget til rumopvarmning i alle bygningstyper dog med størst effekt i dårligere isolerede huse, hvor en større del af solindfaldet kan udnyttes. Det må derfor konkluderes, at en fortsat udvikling af vinduer med lavere U-værdi og maksimal solenergitransmittans er en effektiv måde at reducere energiforbruget til boligopvarmning.

Men anvendelsen af de bedre vinduer kræver, at problemerne med overtemperaturer tages alvorligt, og der tages de fornødne forholdsregler til at undgå ubehagelige overtemperaturer. Passive foranstaltninger som udhæng eller solafskærmende ruder er effektive løsninger, der imidlertid også reducerer solindfaldet i perioder med opvarmningsbehov, og dermed øger energiforbruget i forhold til det uafskærmede vindue. Der bør derfor anvendes andre løsninger som f.eks. en dynamisk solafskærmning i forbindelse med vinduet eller mulighed for en effektiv trækfri udluftning. Hvis sådanne virkemidler skal være effektive i boliger, hvor man ikke kan regne med en manuel betjening i dagtimerne, skal de udføres med en automatisk styring efter indetemperaturen.

Der findes allerede udviklet en lang række løsninger til forbedring af vinduers energimæssige forhold, men de finder kun anvendelse i nogle få tilfælde. På rudesiden drejer det sig om anvendelse af bedre isolerende afstandsprofiler og 3-lags energiruder – tiltag der begge forbedrer vinduets U-værdi, samt anvendelse af glas med lille jernindhold og antirefleksionsbehandling af glasoverfladerne, der vil hæve lys- og solenergitransmittansen betydeligt. Ramme/karmkonstruktioner, med den halve U-værdi af hvad der i dag er på det danske marked, kan allerede købes i Tyskland, men også udvikling af smallere ramme/karmkonstruktioner er en effektiv måde at reducere vinduets U-værdi, hvis ramme/karmdimensionen kan ændres uden at påvirke ramme/karm U-værdien. Ved reduktion af ramme/karmkonstruktionens dimensioner opnås udover arealformindskelsen også en større lys- og solenergitransmittans for det samlede vinduesareal. I forbindelse med Projekt Vindue [10] er der på BYG•DTU fremstillet en prototype på et sådant vindue.

Nogle af de eksisterende løsninger er allerede økonomisk rentable og kan på kort sigt indføres som standard i nye vinduer. Det drejer sig om anvendelse af bedre isolerende afstandsprofiler som f.eks. plast eller TPS-profiler samt antirefleksionsbehandling [17] af glasoverfladerne. Derudover er det vist, at det er muligt at fremstille vinduer med en halvering af den traditionelle ramme/karmhøjde uden, at det går ud over ramme/karm U-værdien. Disse tiltag anses for at kunne gennemføres på kort sigt, og vil kunne medføre en væsentlig energibesparelse i såvel eksisterende som nyt byggeri. Anvendelse af jernfattigt glas bør være målet for den fremtidige rudeproduktion, men er i øjeblikket ikke økonomisk rentabel. Den høje pris skyldes produktionsmæssige forhold, og hvis ikke mindre energikrævende produktionsmetoder bliver udviklet, forventes der ikke et afgørende prisfald, selvom efterspørgslen øges markant.

Et skift fra 2-lagsruder til 3-lagsruder anses ikke for umiddelbart muligt og rentabelt, idet en effektiv udnyttelse af 3-lagsrudens lave U-værdi kræver, at ramme/karmkonstruktionen gøres tilsvarende bedre. Dette vil nok ikke kunne gennemføres på kort sigt på trods af erfaringerne

fra Tyskland, men det bør indgå som et mere langsigtet mål for udviklingen på vinduesområdet. Derudover skal 3-lagsrudens lys- og solenergitransmittans forbedres gennem anvendelse af jernfattigt glas. Desuden betyder anvendelsen af 2-lagsruder, at der kun i mindre omfang optræder problemer med udvendig kondensdannelse på ruden.

Ved anvendelse af 3-lagsruder vil kondensproblemet blive markant og kræve en løsning. Denne kunne være en el-opvarmning af det yderste lag glas en kort periode om morgenen til fjernelse af kondensen. Energiforbruget hertil er forholdsvist lille sammenlignet med den opnåelige energibesparelse på rumopvarmningen, hvorfor det kan retfærdiggøre en sådan løsning. Problemet ligger mere i produktions og installationsomkostningerne. Alternativt kan det yderste lag glas forsynes med en poleret hård lavemissionsbelægning, der praktisk taget eliminerer problemet, men til gengæld også reducerer solindfaldet gennem ruden. Andre overfladebehandlinger, som f.eks. gør ruden hydrofil, vil sandsynligvis også kunne modvirke generne ved udvendig kondens, men der mangler erfaringer på området.

Generelt set må det konkluderes, at der allerede findes en lang række tiltag, der i kombination kan medvirke til fremstilling af vinduer, der vil kunne give boligen et væsentligt energitilskud frem for det (lille) tab, som er realiteten i dag. Årsagen til at de ikke udnyttes, er økonomiske forhold, begrænset produktionskapacitet for nogle af tiltagene, samt en generel træghed i dele af den danske vinduesbranche til udvikling af energimæssigt bedre konstruktioner.

10. REFERENCER

- [1] Jerry Møller Jensen, Hans Lund *Design Reference Year, DRY – et nyt dansk referenceår*. Meddelelse nr. 281. Oktober 1995. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Universitet.
- [2] *Aquaclean*. Saint-Gobain Glass. 2002. Web adresse: <http://www.saint-gobain-glass.dk/>
- [3] *Activ*. Pilkington. 2002. Web adresse: <http://www.activglass.com/>
- [4] *Ritech*. 2002. Web adresse: <http://www.ritec.co.uk/>
- [5] *Utvendig kondens på vindusruter*. Hovedprojekt Oktober 1998. Byggeforsk Norges byggeforskningsinstitut. SINTEF Bygg og miljøteknikk. STF22 A98512
- [6] Bertil Jonsson. *Beräkning av förekomst av utvändig kondens på energieffektiva fönster*. SP AR 1999:40 Byggnadsfysik Borås 1999
- [7] Bertil Jonsson. *Utvändig kondens på fönster. Mätningar I Borås 1994*. SP Sveriges Provnings- og Forskningsinstitut Energiteknik, Byggnadsfysik. SP RAPPORT 1995:01
- [8] *tsbi3 brugermanual*. Statens Byggeforskningsinstitut, 1993
- [9] *Dansk Standard 474*. Norm for specifikation af termisk indeklima.
- [10] *Projekt vindue – den produktrettede indsats på vinduesområdet*. Energistyrelsen.
- [11] Jørgen M. Schultz. *Vinduer med smal ramme/karmkonstruktion og stort lys- og solindfald*. BYG•DTU rapport R-028. BYG•DTU, Danmarks Tekniske Universitet. ISBN 87-7877-087-4. 2002.
- [12] *Neue zertifizierte Fenster für das Passivhaus*. EnergieEffizientes Bauen, 1/2002.
- [13] Jørgen M. Schultz. *Ramme-/karmkonstruktioner til højisolerede vinduer*. LfV meddelelse 237. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. 1992.
- [14] *Glass in building – Determination of thermal transmittance (U value) – Calculation method*. EN 673.
- [15] *Glas 98*. Pilkington Danmark A/S.
- [16] Mikael Bredsdorff, Ivar Molkte, Erik Bezzel. *The Vacuum Window – a minimal concept wit maximum effect*. Teknologisk Institut, Taastrup, 1997.
- [17] SUNARC A/S. Grøndlandsvej 14, Herfølge.
- [18] Velfac Facadevinduer A/S

Øvrige referencer

Bygningsreglementet BR 95

Diverse Excel manualer

Internetside www.eksperten.dk

Tommy Bak Christensen

Appendiks 1

**Brugervejledning til Excel-programmet til beregning af
kondensforhold for vinduer**

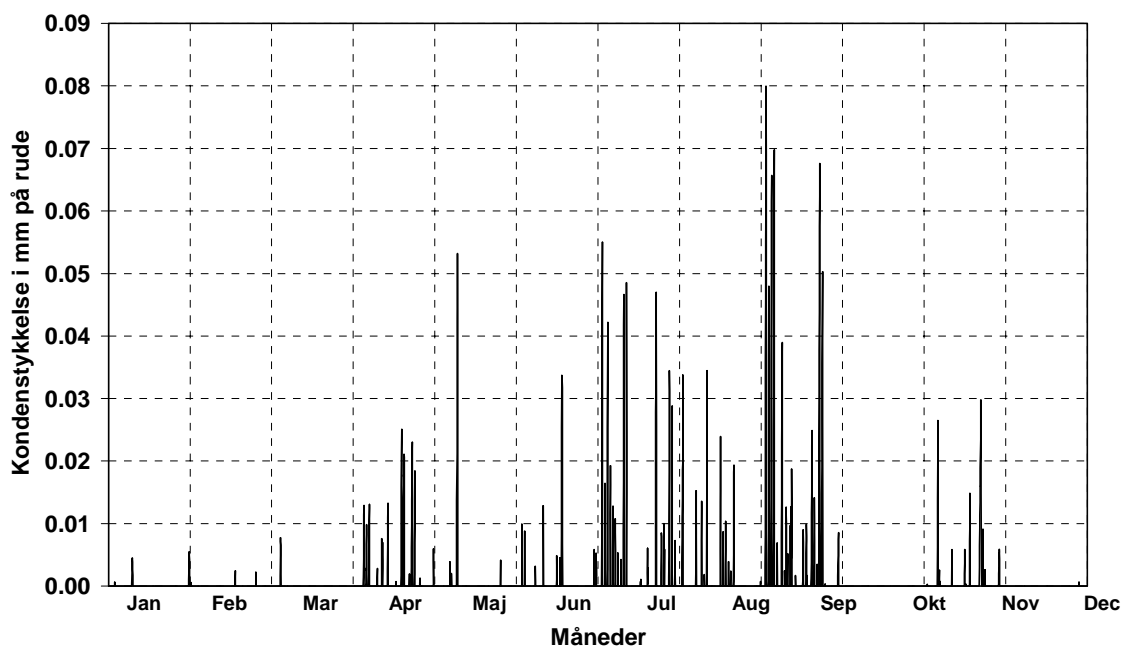
Brugervejledning til Excel-programmet til beregning af kondensforhold for vinduer

Proceduren er følgende, hvis der skal foretages en beregning:

- 1) Åben Excelfilen "Kondens på rude v2.04"
- 2) Svar ja ved spørgsmål om makroer
- 3) Indtast de aktuelle parametre og eventuelt andre konstanter i regnearkets øverste venstre hjørne.
- 4) Klik på knappen "Start beregning". Nu regner programmet, hvilket tager ca. 2-3 minutter på en PC med Pentium III processor. Nederst i venstre hjørne ses en tæller, der viser hvor langt beregningerne er nået. Beregningen er slut når tælleren når 8760 = med antallet af timer på et år.
- 5) Herefter aflæses resultaterne øverste i det grønne hjørne til højre og kurver kan ses under de andre ark i den nederste bjælke. Det er selvfølgelig muligt selv at oprette andre diagrammer over ønskede beregningsresultater.
- 6) Gem evt. regnearket under et nyt navn, hvis resultaterne skal gemmes som Excel fil
- 7) Ved ny beregning startes ved punkt 3

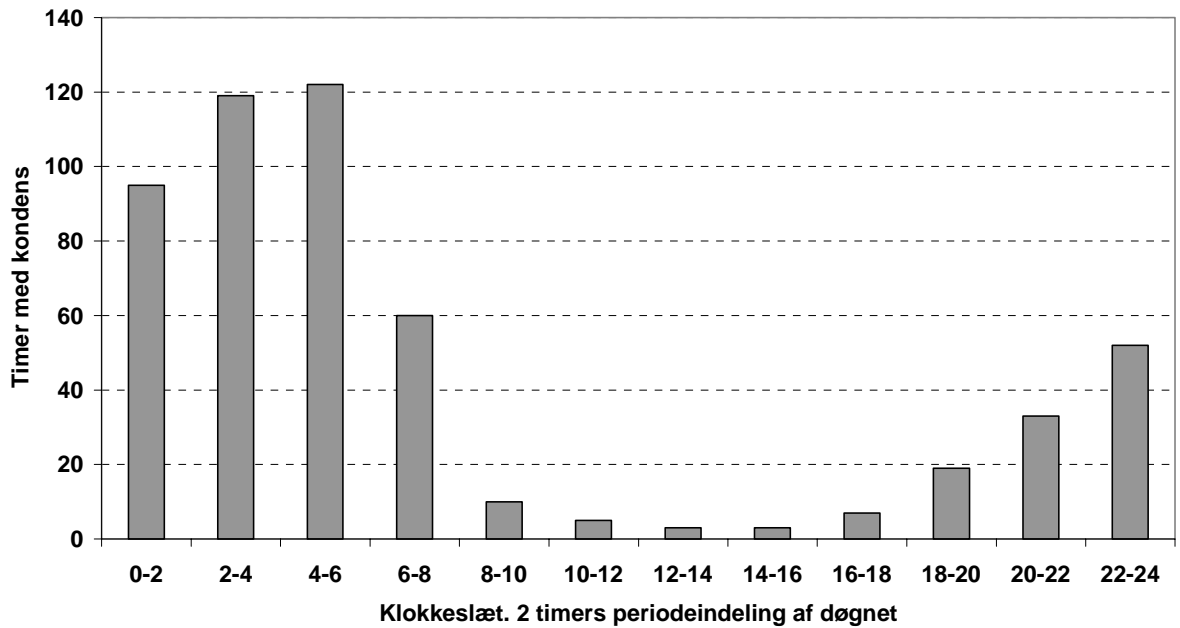
Eksempel på diagram fra arket "Kondenstykkelse" i programfilen.

Perioder med kondens samt kondensstykkelsen på rude



Eksempel på diagram fra arket "Døgnfordeling" i programfilen.

Døgnfordelingen af kondens timer over et år



Eksempler på de første linier i DRY-dataarket i Excel-programmet.

Microsoft Excel - Kondens på rude v2.04																						
Filer Rediger Vis Indsæt Formater Funktioner Data Vindue Hjælp																						
Prompt																						
A26																						
A	B	C	D	E	Sæet ind		G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
Tid	Tid	Temperatur		himmel beregnet		ε 0		ε σ		Stråling			Illuminans			Skydække		Tid	Vindret			
		T udeluft	udeluft	dugpunkt	Danvak	Frank+Püntener	Frank+Püntener	Frank+Püntener	global diffus	direkte	langbølget	global diffus	direkte	total	"Equivalent"	observeret	opaque"	solskind				
25	Timer	Klokken	°C	°C	°C	°C	°C	-	W/m2	W/m2	W/m2	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	0.80	0.80	min	deka gr	
26																						
27	1	0	3	28	-2	1.0	1.2	-9.6	0.74	0.85	0	0	0	273	0	0	0	50	50	0		
28	2	1	2.6	26	-4	1.0	2.8	-9.8	0.74	0.83	0	0	0	272	0	0	0	40	40	0		
29	3	2	2.6	26	-4	0.2	2.8	-9.8	0.74	0.83	0	0	0	272	0	0	0	40	40	0		
30	4	3	2.8	28	-2	-0.2	4.8	-9.6	0.74	0.81	0	0	0	273	0	0	0	30	30	0		
31	5	4	2.9	29	9	0.0	4.7	-9.3	0.75	0.81	0	0	0	274	0	0	0	30	30	0		
32	6	5	3.2	32	9	-0.3	6.7	-9.1	0.75	0.79	0	0	0	275	0	0	0	20	20	0		
33	7	6	2.9	29	-1	-0.6	8.4	-7.9	0.74	0.79	0	0	0	280	0	0	0	20	20	0		
34	8	7	2.3	23	-9	-0.7	6.3	-8.4	0.74	0.81	0	0	0	278	0	0	0	30	30	0		
35	9	8	2.2	22	-10	-0.2	4.2	-8.6	0.74	0.83	2	2	0	277	251	251	0	40	40	0		
36	10	9	3.2	32	2	1.4	3.4	-7.4	0.75	0.85	43	29	190	282	4441	3898	7363	50	50	45		
37	11	10	3.5	35	7	2.3	1.8	-7.2	0.75	0.88	57	50	48	283	6269	5826	3017	60	60	5		
38	12	11	4.0	40	11	2.9	2.4	-6.5	0.75	0.88	21	20	5	286	2346	2276	371	60	60	0		
39	13	12	4.9	49	19	4.5	-1.5	-8.6	0.76	0.90	34	34	0	277	3995	3995	0	70	73	0		
40	14	13	6.0	60	27	4.9	1.1	-7.4	0.76	0.88	22	21	6	282	2455	2383	427	60	60	0		
41	15	14	6.4	64	27	5.3	1.6	-7.0	0.76	0.88	22	19	28	284	2524	2362	1492	60	60	0		
42	16	15	7.1	71	31	5.5	5.2	-4.9	0.76	0.86	8	7	27	293	905	889	421	50	50	0		
43	17	16	7.5	75	33	5.9	5.4	-4.7	0.76	0.86	0	0	0	294	0	0	0	50	50	0		
44	18	17	6.9	69	28	5.3	5.1	-5.1	0.76	0.86	0	0	0	292	0	0	0	50	50	0		
45	19	18	7.3	73	33	5.7	5.2	-4.9	0.76	0.86	0	0	0	293	0	0	0	50	50	0		
46	20	19	7.3	73	35	5.7	5.1	-4.9	0.76	0.86	0	0	0	293	0	0	0	50	50	0		
47	21	20	7.7	77	40	6.1	5.5	-4.4	0.77	0.87	0	0	0	295	0	0	0	50	50	0		
48	22	21	6.7	67	27	5.1	6.1	-4.2	0.76	0.86	0	0	0	296	0	0	0	50	50	0		
49	23	22	6.2	62	15	4.6	5.7	-4.9	0.75	0.86	0	0	0	293	0	0	0	50	50	0		
50	24	23	5.9	59	4	3.7	7.5	-5.1	0.75	0.83	0	0	0	292	0	0	0	40	40	0		
51	25	0	4.6	46	-14	2.3	6.3	-6.7	0.74	0.83	0	0	0	285	0	0	0	40	40	0		
52	26	1	4.4	44	-15	2.1	6.1	-7.0	0.74	0.83	0	0	0	284	0	0	0	40	40	0		
53	27	2	4.4	44	-10	2.1	6.0	-7.0	0.74	0.83	0	0	0	284	0	0	0	40	40	0		
54	28	3	4.8	48	-2	2.5	2.5	-10.1	0.74	0.83	0	0	0	271	0	0	0	40	40	0		
55	29	4	5.6	56	6	3.4	3.2	-9.1	0.75	0.83	0	0	0	275	0	0	0	40	40	0		
56	30	5	5.4	54	3	2.6	4.9	-9.3	0.75	0.81	0	0	0	274	0	0	0	30	30	0		
57	31	6	5.0	50	0	2.2	4.5	-9.8	0.75	0.81	0	0	0	272	0	0	0	30	30	0		
58	32	7	4.4	44	-2	1.3	2.3	-11.0	0.74	0.84	0	0	0	267	0	0	0	20	20	0		

V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	
Vindretning	Hastighed	Indikator for specielle data	Max. Temp. kl. 7 & 19	Min. temp. kl. 7 & 19	Lufttryk (hver 3. Time)	Lufttryk	Nedbør kl. 1, 7, 13 & 19	Vejret ved obser. tidspunktet	siden sidste	siden sidste	Ledig "(0)"	Relativ fugtighed	Solhøjde	Solhøjde	Azimuth	Azimuth		
deka grader	x 0.1 m/s		x 0.1 °C	x 0.1 °C	hPa	Pa	x 0.1 mm	0.99	0.9	1	%	x 0.1 grader	Radianer	Radianer	Radianer	grader	cos (beta)	
22	28	190	0	0	0	991	99100	20	83	8	0	0	80	-572	-0.98	-2.81	-161.24	-0.5129
23	28	170	0	0	0	0	99100	0	0	0	0	0	80	-543	-0.90	-2.42	-138.81	-0.4392
24	28	140	0	0	0	0	99100	0	0	0	0	0	80	-487	-0.79	-2.10	-120.31	-0.3331
25	28	123	0	0	0	990	99000	0	26	8	0	0	80	-414	-0.66	-1.83	-105.00	-0.1941
26	28	120	0	0	0	0	99000	0	0	0	0	0	87	-332	-0.51	-1.60	-91.73	-0.0253
27	27	118	0	0	0	0	99000	0	0	0	0	0	85	-248	-0.37	-1.39	-79.57	0.1643
28	27	113	0	32	26	990	99000	2	1	0	0	0	80	-165	-0.23	-1.18	-67.83	0.3618
29	27	120	0	0	0	0	99000	0	0	0	0	0	78	-87	-0.10	-0.98	-56.01	0.5526
30	27	133	0	0	0	0	99000	0	0	0	0	0	78	8	0.02	-0.76	-43.78	0.7220
31	27	139	0	0	0	990	99000	0	1	1	0	0	81	42	0.10	-0.54	-30.92	0.8556
32	27	139	0	0	0	0	99000	0	0	0	0	0	82	84	0.16	-0.30	-17.43	0.9439
33	28	140	0	0	0	0	99000	0	0	0	0	0	81	109	0.19	-0.06	-3.49	0.9801
34	28	144	0	0	0	988	98800	10	87	8	0	0	81	113	0.18	0.18	10.54	0.9641
35	29	150	0	0	0	0	98800	0	0	0	0	0	79	97	0.14	0.42	24.29	0.8985
36	29	154	0	0	0	0	98800	0	0	0	0	0	77	62	0.06	0.65	37.47	0.7890
37	30	164	0	0	0	990	99000	0	87	8	0	0	76	21	-0.04	0.87	50.00	0.6423
38	30	149	0	0	0	0	99000	0	0	0	0	0	75	-56	-0.16	1.08	62.00	0.4673
39	31	138	0	0	0	0	99000	0	0	0	0	0	75	-131	-0.29	1.29	73.72	0.2730
40	31	130	0	75	23	994	99400	20	1	1	0	0	76	-212	-0.44	1.49	85.60	0.0715
41	31	130	0	0	0	0	99400	0	0	0	0	0	77	-296	-0.58	1.71	98.22	-0.1243
42	31	129	0	0	0	0	99400	0	0	0	0	0	77	-379	-0.73	1.96	112.37	-0.3004
43	31	130	0	0	0	994	99400	0	3	0	0	0	76	-457	-0.85	2.25	129.15	-0.4409
44	31	129	0	0	0	0	99400	0	0	0	0	0	72	-522	-0.95	2.61	149.62	-0.5288
45	31	128	0	0	0	0	99400	0	0	0	0	0	68	-563	-0.99	3.03	173.54	-0.5513
46	31	128	0	0	0	1002	100200	0	3	0	0	0	63	-571	-0.98	-2.82	-161.44	-0.5149
47	31	120	0	0	0	0	100200	0	0	0	0	0	64	-543	-0.90	-2.43	-139.02	-0.4405
48	31	120	0	0	0	0	100200	0	0	0	0	0	67	-487	-0.79	-2.10	-120.49	-0.3349
49	31	113	0	0	0	1002	100200	0	2	0	0	0	70	-414	-0.66	-1.84	-105.16	-0.1962
50	31	110	0	0	0	0	100200	0	0	0	0	0	70	-332	-0.51	-1.60	-91.88	-0.0275
51	31	108	0	0	0	0	100200	0	0	0	0	0	70	-248	-0.37	-1.39	-79.71	0.1621
52	31	102	0	77	35	1003	100300	0	1	1	0	0	70	-165	-0.23	-1.19	-67.96	0.3597
53	30	0	0	0	0	0	100300	0	0	0	0	0	72	87	0.10	0.08	58.14	0.5507

Beregning / DRY-data / Døgnfordeling / Månedfordeling / Kondenstykkelse

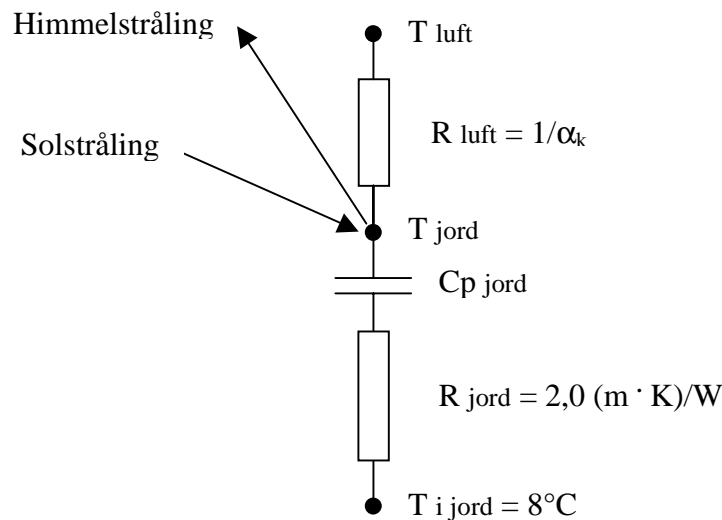
Appendiks 2

**Opstilling af varmebalance og anvendte formeludtryk til
beregning af kondensforhold for vinduer**

Opstilling af varmebalance og anvendte formeludtryk til beregning af kondensforhold for vinduer

Varmebalance for jord

Det øverste 0,10 m lag af jorden er valgt som værende repræsentativ for temperaturen af den øverste del af jorden. Temperaturen af det øverste 0,10 m lag af jorden findes. Fra dette jordvolumen er der varmeledning til den underliggende jord i 6 m dybde, som forudsættes at have en konstant temperatur på 8°C. Fra den ovenliggende luft er der konvektion til jordvolumenet, afhængig af lufttemperatur og vindhastighed. Desuden er der udstråling til rummet samt solstråling, som tilføres jordvolumenet. Ved at løse denne varmebalance findes jordvolumenets temperatur.



Figur A1. Skematisk fremstilling af varmebalance for det øverste jordlag.

Ledning fra det øverste jordlag til jord i 6 m dybde:

$$Q_{\text{ledning til jord}} = 1/R_{\text{jord}} \cdot (T_{\text{jord}} - T_{\text{i jord}}) \cdot A \cdot \text{Tid} \quad [\text{J}]$$

hvor A	er arealet af jordvolumenet som varmestrømmen sker gennem	[m ²]
R _{jord}	er isolansen af jorden	[m ² K/W]
T _{jord}	er temperaturen i det øverste jordlag	[°C]
T _{i jord}	er temperaturen i jorden i 6 m dybde	[°C]
Tid	er den tidsperiode varmestrømmen foregår i	[sek]

Konvektiv varmeovergang ved tør tilstand beregnes af nedenstående udtryk [2]:

$$\alpha_k = 5,8 + 4,0 \cdot v \quad , v \leq 5 \text{ m/s} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

$$7,69 \cdot v^{0,75} \quad , v > 5 \text{ m/s}$$

hvor α _k	er varmeoverføringen ved konvektion ved tør tilstand	[W/m ² K]
v	er vindhastigheden	[m/s]

Konvektion fra udeluft til jord:

$$Q_{\text{konvektion}} = \alpha_k \cdot (T_{\text{luft}} - T_{\text{jord}}) \cdot A \cdot \text{Tid} \quad [\text{J}]$$

Varmestråling til himmel:

$$Q_{\text{himmel}} = \epsilon_{\text{jord}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{jord}}^4 - T_{\text{himmel}}^4) \cdot A \cdot \text{Tid} \quad [\text{J}]$$

hvor ϵ_{jord} er emittansen for jorden [-]
 σ er Stefan-Boltzmann's konstant [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$]
 T_{himmel} er temperaturen af himmelen beregnet ud fra data fra DRY [1] [K]

Himmelhvælvingens strålingstemperatur afhænger af en række faktorer som f.eks. skydække samt luftens vanddampindhold. DRY indeholder imidlertid en beregnet værdi for den stråling en vandret flade modtager fra himlen. Betragtes himlen som en sort flade (emittans = 1) kan der beregnes en fiktiv himmelstrålingstemperatur, der kan anvendes i beregningerne:

$$\phi_{\text{himmel}} = \sigma \cdot (T_{\text{himmel}})^4 \Rightarrow T_{\text{himmel}} = (\phi_{\text{himmel}}/\sigma)^{0,25}$$

hvor ϕ_{himmel} er den langbølgede stråling fra himlen [W/m^2]

Solstråling på jord:

$$Q_{\text{sol}} = a_{\text{jord}} \cdot q_{\text{global}} \cdot A \cdot \text{Tid} \quad [\text{J}]$$

hvor a_{jord} er jords absorptionskoefficient mht. solstråling [-]
 q_{global} er den globale solstråling fra referenceåret DRY [W/m^2]

Ændringen af energiindhold i det øverste jordlag:

$$Q_{\text{jord}} = \Delta T_{\text{jord}} \cdot C_{p_{\text{jord}}} \cdot \rho_{\text{jord}} \cdot h_{\text{jord}} \cdot A = \Delta T_{\text{jord}} \cdot q_{\text{jord}} \quad [\text{J}]$$

hvor ΔT_{jord} er temperaturændringen af jordvolumenet i hvert tidskridt [K]
 $C_{p_{\text{jord}}}$ er varmekapaciteten af jord [J/kgK]
 ρ_{jord} er densiteten af jord [kg/m^3]
 h_{jord} er tykkelsen af det øverste jordlag [m]
 q_{jord} er ændringen i energiindholdet pr. grad Kelvin [J/K]

$$Q_{\text{jord}} / \Delta T_{\text{jord}} = C_{p_{\text{jord}}} \cdot \rho_{\text{jord}} \cdot h_{\text{jord}} \cdot A = q_{\text{jord}}$$

Varmebalancen for jordvolumenet ser ud som følger:

$$Q_{\text{jord}} = Q_{\text{konvektion}} - Q_{\text{ledning til jord}} - Q_{\text{himmel}} + Q_{\text{sol}} \quad [\text{J}]$$

Parametrene i beregning af q_{jord} forudsættes at være konstante og kan findes vha. tabelværker.

Temperaturstigningen af jordvolumenet findes til:

$$\Delta T_{\text{jord}} = (Q_{\text{konvektion}} - Q_{\text{ledning til jord}} - Q_{\text{himmel}} + Q_{\text{sol}}) / q_{\text{jord}} \quad [\text{K}]$$

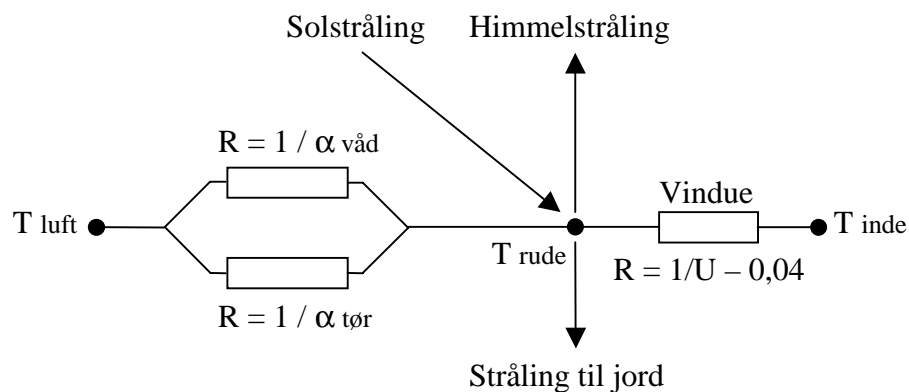
Herefter kan temperaturen af jordvolumenet findes som temperaturen af jorden før tidsskridtet plus temperaturstigningen:

$$T_{\text{jord}} = T_{\text{før}} + \Delta T_{\text{jord}}$$

hvor $T_{\text{før}}$ er temperaturen af jordvolumenet fra det foregående tidsskridt [K]

Varmebalance for rude

Der opstilles en varmebalance for ruden, da jordtemperaturen nu kendes. Rude er det udvendige glas' udvendige overfladetemperatur og den temperatur, som søges for at kunne beregne, om der dannes kondens.



Figur A2. Skematisk fremstilling af varmebalancen for den midterste del af en rude.

Varmestrømmen gennem rude:

$$Q_{\text{rude}} = 1/(1/U_{\text{rude}} - 0,04) \cdot (T_{\text{inde}} - T_{\text{rude}}) \cdot A \cdot \text{Tid} \quad [\text{J}]$$

hvor U_{rude} er U-værdien for ruden [W/m²K]
 0,04 er den udvendige overgangsisolans [m²K/W]
 T_{inde} er indetemperaturen [°C]
 T_{rude} er rudens udvendige overfladetemperatur [°C]

Nettostråling til himmelrummet:

$$Q_{\text{himmel}} = F_{\text{r,h}} \cdot \epsilon_{\text{rude}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{rude}}^4 - T_{\text{himmel}}^4) \cdot A \cdot \text{Tid} \quad [\text{J}]$$

hvor $F_{\text{r,h}}$ er andelen af strålingen fra rude som udstråles til himmel [-]
 ϵ_{rude} er emittansen for ruden [-]
 σ er Stefan-Boltzmann's konstant [W/m²K⁴]

Nettostråling til jord:

$$Q_{\text{jord}} = [F_{r,j} \cdot \epsilon_{\text{rude}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{rude}}^4 - T_{\text{jord}}^4) - F_{r,j} \cdot \epsilon_{\text{rude}} (1 - \epsilon_{\text{jord}}) \cdot \sigma \cdot T_{\text{himmel}}^4] \cdot A \cdot \text{Tid} \quad [\text{J}]$$

hvor $F_{r,j}$ er vinkelstrålingsforholdet mellem ruden og jorden [-]

ϵ_{rude} er emittansen for ruden [-]

ϵ_{jord} er emittansen for jorden [-]

Det sidste led i den firkantede parentes beskriver den del af den langbølgede himmelstråling, som reflekteres fra jordoverfladen.

Solstråling på rude. Beregningsudtryk fra [3] og [4].

Direkte:

$$Q_{\text{sol, dir}} = \cos \beta \cdot q_{\text{sol}} \cdot A \cdot \text{Tid} \quad [\text{J}]$$

hvor β er solens indfaldsvinkel på ruden [3] [-]

q_{sol} er den direkte (normal) stråling fra referenceåret DRY [W / m²]

Diffus på lodret:

$$q_{\text{sol, dif, lodret}} = q_{\text{sol, dif}} \cdot (0,55 + 0,437 \cdot \cos \beta + 0,313 \cdot (\cos \beta)^2) \quad [\text{W/ m}^2]$$

for $\cos \beta > -0,2$

$$q_{\text{sol, dif, lodret}} = q_{\text{sol, dif}} \cdot 0,45 \quad [\text{W/ m}^2]$$

for $\cos \beta < -0,2$

hvor β er solens indfaldsvinkel på ruden [-]

$q_{\text{sol, dif}}$ er den diffuse stråling fra referenceåret DRY [W/m²]

Diffus på skrå flade:

$$Q_{\text{sol, dif, skrå}} = (q_{\text{sol, dif, lodret}} \cdot (1 - \cos \beta_{\text{rudehældning}}) + q_{\text{sol, dif}} \cdot \cos \beta_{\text{rudehældning}}) \cdot A \cdot \text{Tid} \quad [\text{J}]$$

hvor $\beta_{\text{rudehældning}}$ er rudens hældning (lodret = 90°, vandret = 0) [°]

$q_{\text{sol, dif}}$ er den diffuse stråling fra referenceåret DRY [W/m²]

Reflekteret fra jord til rude:

$$Q_{\text{sol, ref}} = q_{\text{global}} \cdot \rho \cdot (1 - \cos \beta_{\text{rudehældning}}) \cdot 0,5 \cdot A \cdot \text{Tid} \quad [\text{J}]$$

hvor ρ er refleksionskoefficienten for jorden mht. solstråling [-]

q_{global} er den globale stråling fra referenceåret DRY [W/m²]

Total solstråling på rude:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{sol, dir}} + Q_{\text{sol, dif}} + Q_{\text{sol, ref}}$$

Solstråling absorberet af rude:

$$Q_{\text{sol, abs}} = (\alpha_{\text{tør}}, \alpha_{\text{våd}}, \alpha_{\text{rim}}) \cdot (Q_{\text{sol, dir}} + Q_{\text{sol, dif}} + Q_{\text{sol, ref}}) \quad [\text{J}]$$

hvor α_{xxx} er rudens absorptionskoefficient mht. solstråling afhængig af om ruden er tør, med kondens eller med rim [-]

Konvektion fra luft til tør rude:

$$Q_{\text{konvektion, tør}} = \alpha_k \cdot (T_{\text{luft}} - T_{\text{rude}}) \cdot A \cdot \text{Tid} \quad [\text{J}]$$

Konvektion fra luft til våd/rim rude beregnes vha. følgende udtryk fra Glent ventilation [5]:

$$Q_{\text{konvektion, våd}} = (\alpha_k / C_{p\text{luft}}) \cdot (i_v - i) \cdot A \cdot \text{Tid} \quad [\text{J}]$$

hvor α_k er varmeoverføringen ved konvektion ved tør tilstand [W/m²K]
 $C_{p\text{luft}}$ er luftens varmekapacitet [J/kg K]
 i_v er mættet lufts entalpi ved rudeoverfladens temperatur [kJ/kg]
 i er luftens entalpi ved udeluftens temperatur [kJ/kg]

Luftens entalpi beregnes af følgende udtryk:

$$i = 1,006 \cdot T_{\text{luft}} + x \cdot (2501 + 1,8 \cdot T_{\text{luft}}) \quad [\text{kJ/kg}]$$

hvor i er luftens entalpi [kJ/kg]
 T_{luft} er luftens temperatur [°C]
 x er luftens vandindhold [kg/kg]

Varmebalance for det yderste glas på ruden:

$$0 = Q_{\text{rude}} - Q_{\text{himmel}} - Q_{\text{jord}} + Q_{\text{sol, abs}} + Q_{\text{konvektion, tør}} \text{ eller } Q_{\text{konvektion, våd}}$$

Ved iteration findes den udvendige overfladetemperatur, T_{rude} af ruden.

Den kondenserede eller fordampede vandmængde, g , beregnes vha. følgende ligning:

$$g = (Q_{\text{konvektion, våd}} - Q_{\text{konvektion, tør}}) / (r_0 + 1,8 \cdot T_{\text{luft}}) \quad [\text{kg}]$$

$$g = ((\alpha_k / C_{p\text{luft}}) \cdot (i_v - i) \cdot A \cdot \text{Tid}) - [\alpha_k \cdot (T_{\text{luft}} - T_{\text{rude}}) \cdot A \cdot \text{Tid}] / (r_0 + 1,8 \cdot T_{\text{luft}})$$

hvor r_0 er vands fordampningsvarme ved 0°C (2501 kJ/kg)

Referencer

- [1] Jerry Møller Jensen, Hans Lund *Design Reference Year, DRY – et nyt dansk referenceår*. Meddelelse nr. 281. Oktober 1995. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Universitet.
- [2] Jørgen Erik Christensen. *Varmeisolering I, Bind II*. Noter til kursus 6401, revideret udgave. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole, 1991.
- [3] *Danvak Varme- og klimateknik, grundbog*. ISBN: 87-982652-1-0 og *Danvak Varme- og klimateknik, grundbog 2. udgave*. ISBN: 87-982652-8-8
- [4] Erwin Petersen . *Solstråling og dagslys – målt og beregnet*. Rapport nr. 24.
- [5] Glent Ventilation, side 31. Glent & Co A/S, 1982.

Appendiks 3

**Ligninger til beregning af energiforbruget til fjernelse af kondens
på ruder ved kortvarig elopvarmning af yderste lag glas**

Ligninger til beregning af energiforbruget til fjernelse af kondens på ruder ved kortvarig elopvarmning af yderste lag glas

Varmebalancen for ruden kan skrives som:

$$Q_{\text{rude}} + Q_{\text{elopvarmning}} - Q_{\text{udvendig}} - Q_{\text{fordampning}} = Q_{\text{glasopvarmning}}$$

$$Q_{\text{rude}} + Q_{\text{elopvarmning}} - Q_{\text{udvendig}} - Q_{\text{fordampning}} = A \cdot d_{\text{glas}} \cdot \rho_{\text{glas}} \cdot C_{p\text{glas}} \cdot (T_{\text{glas}} - T_{\text{glas}}^{\text{gl}})$$

hvor	Q_{rude}	$= A \cdot (1/U_{\text{rude}} - 1/\alpha_u)^{-1} \cdot (T_{\text{inde}} - T_{\text{glas}}) \cdot \text{tid}$	[J]
	$Q_{\text{elopvarmning}}$	er den samlede energimængde tilført glasset	[J]
	Q_{udvendig}	$= \alpha_u \cdot A \cdot (T_{\text{glas}} - T_{\text{luft}}) \cdot \text{tid}$	[J]
	$Q_{\text{fordampning}}$	$= d_{\text{kondens}} \cdot A \cdot \rho_{\text{kondens}} \cdot r_0$	[J]
	A	er rudens areal	[m ²]
	d_{glas}	er glastykkelsen af det yderste lag glas	[m]
	ρ_{glas}	er densiteten af glas	[kg/m ³]
	$C_{p\text{glas}}$	er varmekapaciteten for glas	[J/kg K]
	T_{glas}	er den resulterende temperatur af det yderste glas	[°C]
	$T_{\text{glas}}^{\text{gl}}$	er den oprindelige temperatur af det yderste glas før opvarmning	[°C]
	U_{rude}	er rudens U-værdi inkl. overgangsisolanser	[W/m ² K]
	α_u	er den udvendige varmeoverføringskoefficient inkl. strålingstab	[W/m ² K]
	tid	er tiden forbrugt til fordampning af kondensen	[s]
	d_{kondens}	er tykkelsen af kondenslaget	[m]
	ρ_{kondens}	er densiteten af kondensvandet	[kg/m ³]
	r_0	er fordampningsvarmen for kondensvandet	[J/kg K]

Sammenhørende værdier af tid og energiforbrug til fordampning kan findes ved løsning af følgende ligningssystem, idet den elektriske effekt og det nødvendige effektbehov til fordampning beregnes ud fra den ønskede maksimaltid, τ , til fjernelse af kondensen:

$$U = (1/U_{\text{rude}} - 1/\alpha_u)^{-1}$$

$$q_{\text{el}} = Q_{\text{elopvarmning}}/\tau$$

$$q_{\text{fordampning}} = Q_{\text{fordampning}}/\tau$$

$$U \cdot A \cdot (T_{\text{inde}} - T_{\text{glas}}) \cdot \text{tid} + q_{\text{elopvarmning}} \cdot \text{tid} - \alpha_u \cdot A \cdot (T_{\text{glas}} - T_{\text{luft}}) \cdot \text{tid} - q_{\text{fordampning}} \cdot \text{tid} \\ = A \cdot d_{\text{glas}} \cdot \rho_{\text{glas}} \cdot C_{p\text{glas}} \cdot (T_{\text{glas}} - T_{\text{glas}}^{\text{gl}})$$

$$[U \cdot A \cdot T_{\text{inde}} - U \cdot A \cdot T_{\text{glas}} + q_{\text{elopvarmning}} - \alpha_u \cdot A \cdot T_{\text{glas}} + \alpha_u \cdot A \cdot T_{\text{luft}} - q_{\text{fordampning}}] \cdot \text{tid} \\ = A \cdot d_{\text{glas}} \cdot \rho_{\text{glas}} \cdot C_{p\text{glas}} \cdot (T_{\text{glas}} - T_{\text{glas}}^{\text{gl}})$$

Ovenstående ligning omskrives til en differentiallyingning:

$$[U \cdot A \cdot T_{\text{inde}} - U \cdot A \cdot T_{\text{glas}} + q_{\text{elopvarmning}} - \alpha_u \cdot A \cdot T_{\text{glas}} + \alpha_u \cdot A \cdot T_{\text{luft}} - q_{\text{fordampning}}] \cdot dt \\ = A \cdot d_{\text{glas}} \cdot \rho_{\text{glas}} \cdot C_{p\text{glas}} \cdot dT_{\text{glas}}$$

$$dt = \frac{A \cdot d_{\text{glas}} \cdot \rho_{\text{glas}} \cdot C_{p\text{glas}}}{-(U \cdot A + \alpha_u \cdot A) \cdot T_{\text{glas}} + (U \cdot A \cdot T_{\text{inde}} + q_{\text{elopvarmning}} - q_{\text{fordampning}} + \alpha_u \cdot A \cdot T_{\text{luft}})} dT_{\text{glas}}$$

Integreres ovenstående differentialligning fra tiden = 0 til den tid, der er valgt før kondensen skal være fordampet, τ , fås følgende ligningsudtryk:

$$e^{\frac{-(U \cdot A + \alpha_u \cdot A)}{A \cdot d_{\text{glas}} \cdot \rho_{\text{glas}} \cdot C_{p_{\text{glas}}}} \tau} = \frac{-(U \cdot A + \alpha_u \cdot A) \cdot T_{\text{glas}}^1 + (U \cdot A \cdot T_{\text{inde}} + q_{\text{elop var mning}} - q_{\text{fordampning}} + \alpha_u \cdot A \cdot T_{\text{luft}})}{-(U \cdot A + \alpha_u \cdot A) \cdot T_{\text{glas}}^0 + (U \cdot A \cdot T_{\text{inde}} + q_{\text{elop var mning}} - q_{\text{fordampning}} + \alpha_u \cdot A \cdot T_{\text{luft}})}$$

Under forudsætning af at kondenslagets tykkelse og den udvendige varmeoverføringskoefficient er kendte kan den nødvendige elektriske effekt beregnes og dermed den forbrugte energi over tidsrummet τ .

Appendiks 4

**Regressionsudtryk til bestemmelse af opvarmningsbehov og
vurdering af overtemperaturer**

Regressionsudtryk til bestemmelse af opvarmningsbehov og vurdering af overtemperaturer

Proceduren er som følger:

1. På basis af en fiktiv beregning med de 9 vinduestyper, men hvor g-værdien sættes lig med 0, findes husets varmetab som en funktion af det samlede vinduesareal \times U-værdien:

$$Q_{\text{tab}} = k_1 \times (UA)_{\text{vindue}} + k_2 \times (UA)_{\text{vindue}}^2 + k_3 \quad [\text{kWh}/\text{år}]$$

k_3 beskriver varmetabet fra huset, hvis vinduerne havde en U-værdi på 0. En tilnærmet værdi kan i øvrigt udregnes direkte, når man har kendskab til konstruktionernes U-værdi samt ventilationsgraden for huset. Idet der er 365 dage i året og middeludetemperaturen er 7,8 °C finder man:

$$k_3 = [\Sigma(UA)_{\text{konstruktion}} + 0,34 \times n \times V \times (1-\eta)] \times (t_{\text{inde}} - 7,8) \times 365 \times 24 / 1000 \quad [\text{kWh}/\text{år}]$$

hvor n er luftskiftet (h^{-1}), η er genvindingsgraden på ventilationsluften og V er husets volumen (m^3).

2. Den transmitterede solstråling gennem vinduerne kan beregnes af flg. udtryk fremkommet ved regressionsanalyse på de beregnede solindfald fundet med tsbi3. (gA) er produktet af vinduets g-værdi og vinduets areal:

$$Q_{\text{sol,trans}} = 148,71 \times (gA)_{\text{nord}} + 462,73 \times (gA)_{\text{øst}} + 728,01 \times (gA)_{\text{syd}} + 494,28 \times (gA)_{\text{vest}} \quad [\text{kWh}/\text{år}]$$

3. Herefter beregnes den udnyttede del af solenergien der kommer ind i huset baseret på ovenstående udtryk og det beregnede opvarmningsbehov fra tsbi3-beregningerne:

$$Q_{\text{sol,udnyttet}} = Q_{\text{tab}} - Q_{\text{opvarmning, tsbi3}} \quad [\text{kWh}/\text{år}]$$

4. Herefter kan der findes et regressionsudtryk for den naturlige logaritme til udnyttelsesgraden af solindfaldet:

$$\ln\left(\frac{Q_{\text{sol,udnyttet}}}{Q_{\text{sol,trans}}}\right) = k_4 \frac{Q_{\text{sol,trans}}}{Q_{\text{tab}}} + k_5 \frac{A_{\text{vindue,nord}}}{A_{\text{vindue,total}}} + k_6 \frac{A_{\text{vindue,nord}}}{A_{\text{vindue,total}}} + k_7 \frac{A_{\text{vindue,nord}}}{A_{\text{vindue,total}}} + k_8 \frac{A_{\text{vindue,nord}}}{A_{\text{vindue,total}}} + k_9$$

5. Udnyttelsesgraden af solindfaldet i det generelle tilfælde kan nu beregnes af:

$$\left(\frac{Q_{\text{sol,udnyttet}}}{Q_{\text{sol,trans}}}\right) = \left(e^{k_4} \frac{Q_{\text{sol,trans}}}{Q_{\text{tab}}}\right) \times \left(e^{k_5} \frac{A_{\text{vindue,nord}}}{A_{\text{vindue,total}}}\right) \times \left(e^{k_6} \frac{A_{\text{vindue,nord}}}{A_{\text{vindue,total}}}\right) \times \left(e^{k_7} \frac{A_{\text{vindue,nord}}}{A_{\text{vindue,total}}}\right) \times \left(e^{k_8} \frac{A_{\text{vindue,nord}}}{A_{\text{vindue,total}}}\right) \times e^{k_9}$$

Ud fra regressionsanalyserne på resultaterne fra tsbi3-beregningerne kan konstanterne k_1, k_2, \dots, k_9 bestemmes. Idet k_3 kan beregnes på baggrund af kendskab til husets opbygning, er det nu muligt at beregne energiforbruget til rumopvarmning samt udnyttelsesgraden for solvarmen ud fra kendskab til husets basisvarmetabskoefficient (k_3), den ønskede inde-temperatur samt vinduernes U-værdi, g-værdi og fordeling på verdenshjørnerne.

Tilsvarende kan det fiktive kølebehov også bestemmes ud fra en regressionsanalyse:

$$Q_{\text{køl}} = \frac{Q_{\text{sol,trans}}}{Q_{\text{tab}}} \times (a(gA)_{\text{nord}} + b(gA)_{\text{nord}} + c(gA)_{\text{nord}} + d(gA)_{\text{nord}}) + e \quad [\text{kWh/år}]$$

Den beskrevne procedure er anvendt på de 3 forskellige bygningstyper (let, middel tungt og tungt) beskrevet i tabel 5, side 24. Koefficienterne i regressionsudtrykkene for de 3 tilfælde er vist i nedenstående tabel A1.

Tabel A1. Koefficienter til regressionsudtryk for beregning af opvarmningsbehov, udnyttelsesgrad af solindfaldet samt nødvendigt kølebehov, hvis indetemperaturen ikke må overstige 24 °C.

	Koefficient	Termisk let	Termisk middel tungt	Termisk tungt
Varmetab	k ₁	121	120	118
	k ₂	0,031	0,038	0,0427
Udnyttelse af solindfaldet	k ₄	-0,529	-0,515	-0,548
	k ₅	-0,195	-0,214	-0,146
	k ₆	-0,331	-0,330	-0,239
	k ₇	-0,103	-0,017	0,100
	k ₈	-0,383	-0,349	-0,259
	*k ₉	0	0	0
"Kølebehov"	a	-2,42	1,15	7,33
	b	162,56	155,79	165,92
	c	246,63	196,40	160,14
	d	246,17	221,13	197,11
	*e	0	0	0

* Værdien er i regressionsanalysen tvunget til at være 0.