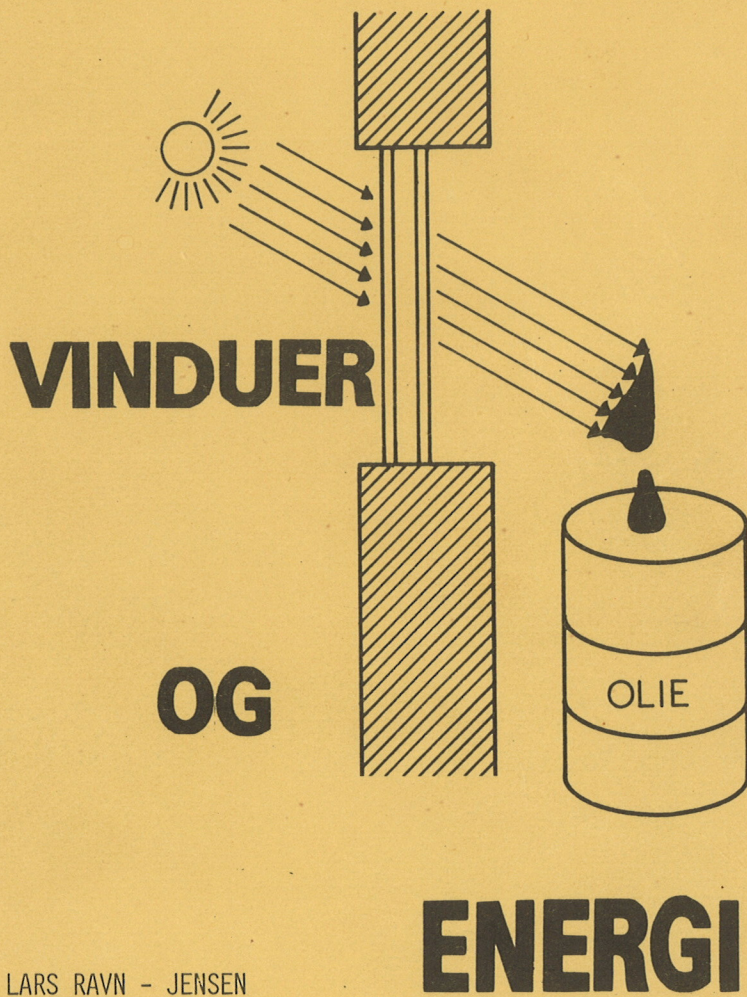


må ikke fjernes

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE
LABORATORIET FOR VARMEISOLERING

MEDDELELSE NR. 55



LARS RAVN - JENSEN

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD

INDLEDNING

Afsnit 0 VINDUER OG ENERGI

0.1	<u>Vinduers varmetekniske egenskaber</u>s	3- 9
0.2	<u>Solstrålingen</u>s	9- 16
0.2.1	Den direkte stråling.....s	11- 13
0.2.2	Den diffuse stråling (himmelstrålingen)....s	13- 16
0.2.3	Den diffust reflekterede stråling.....s	16
0.3	<u>Transmitteret solstråling gennem glasrude med ét glas</u>s	16- 19
0.4	<u>Dobbeltrudens transmissionsforhold</u>s	20- 22
0.5	<u>Årsvarmebalance for en dobbeltrude</u>s	23- 29
0.5.1	Varmetabet.....s	23- 24
0.5.2	Solindfaldet.....s	24- 25
0.5.3	Varmebalancen.....s	26- 29

Afsnit 1 BEREGNINGSUDTRYK OG -MODEL TIL LØSNING AF VAR- METRANSPORTPROBLEMER

1.1	<u>Fourier's varmeledningsligning</u>s	30- 32
1.2	<u>Specielle tilfælde</u>s	32- 33
1.3	<u>Analytisk løsning af Fourier's varme- ledningsligning</u>s	33- 37
1.4	<u>Numerisk løsning af Fourier's varme- ledningsligning</u>s	37
1.5	<u>Rumm modellen</u>s	38- 42

1.5.1	Varmeafgivelse i rummet	s 38-40
1.5.2	Tilskud af solenergi	s 40
1.5.3	Transmissionstab til det fri	s 40-41
1.5.4	Varmeudveksling med naborum	s 41
1.5.5	Varmetransport ved ventilation	s 41-42
1.6	<u>Grundlaget for rummets varmebalanceligninger</u> ..s	42-45
1.7	<u>Rumluftens varmebalance</u>	s 45-46
1.8	<u>Overfladernes varmebalance</u>	s 46-48
1.9	<u>Det akkumulerende lags varmebalance</u>	s 49
1.10	<u>Beregningsudtryk</u>	s 49-53
1.11	<u>Beregningsforudsætninger</u>	s 53-54
Afsnit 2	<u>EDB-PROGRAMMET BA4</u>	
2.1	<u>Referenceåret</u>	s 55
2.2	<u>Indgangsdata</u>	s 55-57
2.3	<u>Beregninger</u>	s 57-58
Afsnit 3	<u>BEREGNINGER MED BA4-PROGRAMMET</u>	
3.1	<u>Rummodeltyper</u>	s 60-66
3.2	<u>Materialeparametre</u>	s 67-68
3.3	<u>Beregningsforudsætninger</u>	s 69-79
3.3.1	Temperaturer	s 69
3.3.2	Vinduer	s 70-71
3.3.3	Gratisvarme til rummet	s 71-72
3.3.4	Varmeanlægget	s 72-73
3.3.5	Det naturlige luftskifte	s 73-75
3.3.6	Horisontafskæring	s 75-76
3.3.7	"Arbejdstid"	s 76
3.3.8	Køling	s 76-77

3.3.9	Overgangsmodstande.....s	77
3.3.10	Fordeling af solindfald gennem vindues	77- 79
3.4	Placering af det varmeakk. lag generelt...s	79
3.5	Beregning af rumdata, generelt.....s	79- 81
3.6	Rummodel 1,2 og 3.....s	81- 88
3.6.1	Placering af det varmeakkumulerende lag...s	81- 82
3.6.2	Rumdata TU, TO, TA og S.....s	82- 86
3.6.3	Beregningsresultater.....s	86- 88
3.7	Rummodel 4.....s	88-103
3.7.1	Placering af det varmeakkumulerende lag...s	88- 91
3.7.2	Rumdata TU, TO, TA og S.....s	91
3.7.3	Beregningsresultater.....s	91-103
3.7.4	Beregninger med tung variant af model 4...s	103
3.8	Rummodel 5.....s	103-111
3.8.1	Placering af det varmeakkumulerende lag...s	103
3.8.2	Rumdata TU, TO, TA og S.....s	103-107
3.8.3	Beregningsresultater.....s	107
3.8.4	Tung variant af rummodel 5.....s	107-111
3.9	Konklusioner.....s	111-113

Afsnit 4 FORSØGSHUSET OPBYGNING OG INDRETNING

4.1	Baggrund for gennemførelsen af forsøg.....s	114
4.2	Forsøgshusets opbygning.....s	114-121
4.3	Forsøgshusets varmesystem.....s	121-125
4.3.1	Princip.....s	121-122
4.3.2	Opbygning.....s	122-125

Afsnit 5	<u>FORSØGSHUSETS MÅLESYSTEM OG REGISTRERINGSUDSTYR</u>	
5.1	<u>Temperaturmålinger</u>s	126-127
5.2	<u>Temperaturreferencen</u>s	127-128
5.3	<u>Målepunkter</u>s	128-136
5.4	<u>Registreringsudstyr</u>s	137-138
5.5	<u>Registrering af energiforbrug</u>s	138-139
Afsnit 6	<u>DATABEHANDLING AF MÅLERESULTATER FRA FORSØGSHUS</u>	
6.1	<u>EDB-programmet BA4-HUS-DATAIND</u>s	141-143
6.2	<u>EDB-programmet BA4-HUS-PLOT</u>s	144-145
6.3	<u>EDB-programmet BA4-HUS-ELFORBRUG</u>s	145-146
Afsnit 7	<u>MÅLERESULTATER FRA FORSØGSHUS</u>	
7.1	<u>Forsøgsperioder</u>s	147-148
7.2	<u>Det tilstræbte rumklima</u>s	148-155
7.3	<u>Det målte energiforbrug</u>s	155-157
7.4	<u>De målte temperaturer</u>s	158
7.5	<u>Måling af luftskifte i forsøgsrum</u>s	158-163
Afsnit 8	<u>KALIBRERING AF FORSØGSHUS</u>s	164-169
Afsnit 9	<u>USIKKERHEDSBEREGNING</u>	
9.1	<u>Måling og beregning af temperaturer</u>s	170-172
9.2	<u>Måling af luftskifte</u>s	172-176
9.3	<u>Måling af el-forbrug</u>s	176
9.4	<u>Bestemmelse af længder og arealer</u>s	176-177
9.5	<u>Bestemmelse af rumvægt og varmekapacitet</u>s	177-178
9.6	<u>Beregning af varmekapaciteten S</u>s	178-179
9.7	<u>Tykkelse af de indgående materialelag</u>s	179

Afsnit 10	<u>BEREGNINGER MED FORSØGSHUS SOM RUMMODEL OG</u> <u>SAMMENLIGNING MED MÅLINGER</u>	
10.1	<u>Forsøgshuset som beregningsmodel</u>s	180-192
10.1.1	Kommentarer til rumdataberegning.....s	180-189
10.1.2	Øvrige indgangsdata for forsøgshus.....s	190-192
10.2	<u>Egne vejrdata</u>s	192-194
10.3	<u>Sammenligning mellem beregnede og målte</u> <u>energiforbrug</u>s	194-205
10.3.1	Indflydelsen af variationer i TU.....s	196-199
10.3.2	Indflydelsen af variationer i TO.....s	199-201
10.3.3	Både TU og TO ændres.....s	201
10.3.4	Indflydelsen af ændringer i S.....s	201-203
10.3.5	Indflydelsen af ændringer i VENT.....s	203-204
10.3.6	Konklusioner.....s	205
	Resume.....s	206-213
	Liste over benyttede symboler.....s	214-216
	Referenceliste.....s	217-218

FORORD

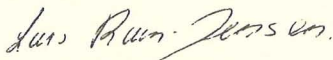
Denne afhandling er resultatet af det licentiatarbejde, som undertegnede påbegyndte i sommeren 1974 ved Laboratoriet for Varmeisolering på Danmarks tekniske Højskole, med professor Vagn Korsgård som faglærer.

Gennemførelsen af de praktiske forsøg har kun været mulig takket være økonomisk støtte fra Statens teknisk-videnskabelige Fond, der har finansieret såvel forsøgshuset, som måleudstyret.

Ved afhandlingens udformning har jeg lagt vægt på, at ikke kun den interesserede med kendskab til den grundlæggende teori, men også andre, der ønsker oplysninger om vinduers indflydelse på energiforbruget til rumopvarmning, kan få fagligt udbytte af rapporten.

Til de af laboratoriets medarbejdere, der med interesse har bistået mig med råd og vejledning, vil jeg gerne sige tak, ligesom en stor tak skal rettes til Karin Krause, der har udført et stort og tålmodigt arbejde med renskrivning af manuskriptet og korrekturlæsning.

Kokkedal, april 1977



Lars Ravn-Jensen

INDLEDNING

Vinduer, som vi kender dem idag, har historisk set kun haft en kort "levetid" herhjemme. I det 15. århundrede var alle bøndergårde uden egentlige vinduer og kun et lille glughul i gavlen fandtes hist og her. Glasvinduer i væggen var kostbare, og i det 16. århundrede bredte anvendelsen af glas i vinduer sig kun langsomt. Det var kun de mere velhavende i samfundet, der kunne til-lade sig denne luksus.

Først langt senere (i det 19. århundrede), da fremstil-ling af vinduesglas ved trækning blev en kendt teknik, der muliggjorde produktion af større mængder glas, blev benyttelsen af glas i vinduer mere almindelig, og-så for menigmand.

I dag er glas blevet en uundværlig del af vore boliger. Det oprindelige krav til vinduer, nemlig det at kunne få tilført lys til et rum, så de daglige sysler kunne udføres, er nu blevet suppleret med krav om, at man gennem vinduer skal kunne komme i visuel kontakt med omgivelserne udenfor rummet, at man udefra skal kunne se ind og at vinduer i lighed med de øvrige dele af ydervæg-gene, taget og gulvet skal yde beskyttelse mod støj fra omgivelserne. Sidst men ikke mindst er kravet til vinduernes varmetekniske egenskaber kommet i søgely-set.

Gennem lang tid havde vinduerne ført en upåagtet til-værelse som en del af klimaskærmen. Bygningslovene stillede krav til et mindste glasareal og til varme-transmissionstallet, men kravene var ikke særlig stren-ge. I 1960'erne medførte det, sammen med den alminde-lige konjunkturopgang, at glasarealet i boliger, kon-

torer m.v. voksede og voksede. Energien var billig, så det kostede ikke meget ekstra at få monteret panoramavinduer i sit hus. De varmegener, de store glasarealer skabte om sommeren, klaredes mange steder ved at installere køle- og ventilationsanlæg, der yderligere kostede penge at holde i drift. Men også elpriserne var lave, så det gik endda.

Naturligvis kunne det ikke blive ved, og i efteråret 1973 og foråret 1974 steg energipriserne med flere hundrede procent. Nu blev det pludselig dyrt med de store glasarealer, så der måtte gøres noget. Forskningen på varmeisoleringsområdet blev intensiveret, og bl.a. i Sverige udførte professor Bo Adamson ved Lunds tekniske Højskole et stort arbejde også med henblik på reduktion af energiforbruget i forbindelse med vinduer. Bl.a. blev der foretaget beregninger, der viste, at for visse bygningstyper ville der (set over en hel fyringssæson) være en energigevinst ved at øge vinduesarealet op til en vis grænse.

Allerede i varmesæsonen 1960/61 var der ved Laboratoriet for Varmeisolering blevet udført målinger af solindfaldet gennem en sydvendt dobbeltrude, der pegede i samme retning. Den i varmesæsonen indstrålede solvarme overstiger transmissionstabet gennem ruden i samme periode, således at vinduet bidrager positivt til rummenes opvarmning. Det fremhæves dog, at dette ikke er ensbetydende med, at man i praksis kan udnytte al den indstrålede solvarme, idet effekten, når solen skinner, er større end varmebehovet. For at undgå overophedning af rummene må man derfor enten bortventilere en del af overskudsvarmen, eller afskærme for den indfaldende solstråling.

På grundlag af disse interessante perspektiver startede dette forskningsprojekt, der har haft to formål. Det har været hensigten ved hjælp af et af Hans Lund ved Laboratoriet for Varmeisolering udviklet EDB-program, at foretage en teoretisk analyse af vinduers indflydelse på energiforbruget til rumopvarmning.

Da beregningerne, som følge af forenklinger og benyttelse af tilnærmede metoder, er behæftet med en vis usikkerhed, har det andet formål været, udfra sammenligning af beregnede energiforbrug og energiforbrug målt ved praktiske forsøg at få et overblik over EDB-programmets beregningsnøjagtighed.

0. VINDUER OG ENERGI

0.1 Vinduers varmetekniske egenskaber

Vinduer har, sammenlignet med de øvrige dele af klimaskærmen, et højt varmetransmissionstal, hvilket betyder, at en betydelig del af den varme vore opholdsrum har brug for, "forsvinder" ud gennem vinduerne. Da de arealer, som vinduerne optager af ydervæggene er vokset støt og roligt i de sidste 10 - 15 år, og samtidig prisen på opvarmingskalorierne er gået samme vej (specielt efter 1973), har det resulteret i en betydelig merudgift ikke blot for den enkelte, men for hele samfundet.

I et almindeligt vindue med dobbeltrude hydrører langt den overvejende del af vinduets varmemodstand fra det indesluttede luftlag samt fra overgangsmodstandene ved glassenes indvendige og udvendige overflader.

Luftlagets varmemodstand afhænger af lagets tykkelse. Således vokser varmemodstanden, når luftlaget øges fra 0 mm og op til ca. 25 mm. Derefter er tykkelsens indflydelse kun ringe (se fig. 0.1.1).

Da overgangsmodstandstallene indeholder dels en konvektiv del og dels en strålingsdel bestemt ved formlen

$$\frac{1}{m_o} = \frac{1}{m_k} + \frac{1}{m_s} = \alpha_k + \alpha_s \quad \text{W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (0.1.1)$$

m_o er overgangsmodstandstal i $\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C/W}$

m_k er det konvektive overgangsmodstandstal i $\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C/W}$

m_s er strålingsmodstandstallet i $\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C/W}$

α_k er det konvektive varmeovergangstal i $\text{W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$

α_s er strålingsovergangstallet i $\text{W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$

vil både variationer i temperatur og luft/vind-hastighed ændre overgangstallene.

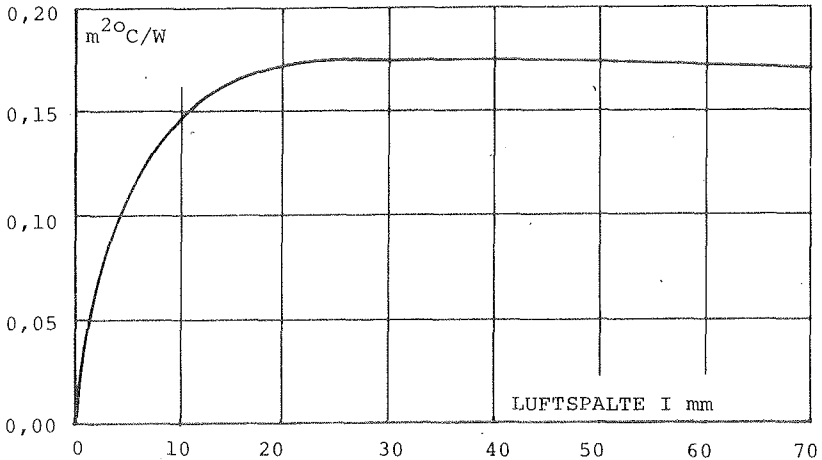


Fig 0.1.1 Varmemodstand af luftspalte mellem to lag glas.
Temperaturdifferens 20°C . Middeltemperatur 0°C .

Strålingsdelen varierer kun lidt indenfor det temperaturområde, der normalt er tale om (-20°C - $+30^{\circ}\text{C}$). Det gælder både udvendig og indvendig, hvor α_s ligger i intervallet $3 - 6 \text{ W/m}^2\text{°C}$ (se fig. 0.1.2 og 0.1.3).

Samme beskedne variation gælder det indvendige konvektionstal $\alpha_{k,i}$. Lufthastigheden vil sædvanligvis være ringe, idet den termiske konvektion er dominerende. $\alpha_{k,i}$ vil sædvanligvis ligge mellem 0 og $3 \text{ W/m}^2\text{°C}$ (fig. 0.1.4).

Derimod er der udvendig tale om en ganske betydelig variation i $\alpha_{k,u}$, idet den tvungne konvektion, hidrørende fra vindens bevægelse af luftmolekylerne, her er den dominerende. Fig. 0.1.5 viser, hvorledes forskellige kilder [1], [3], [5] og [6] angiver variationen af $\alpha_{k,u}$.

VARIATIONEN AF DET UDVENDIGE OVERGANGSTAL FOR STRÅLING

Følgende tilnærmede formeludtryk er benyttet
(se N.F.Bisgård [1]).

$$\alpha_s = 5,41 \cdot 10^{-4} \left[\left(\frac{t_g + 273}{100} \right)^2 + \left(\frac{t_h + 273}{100} \right)^2 \right] [t_g + t_h + 546] \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

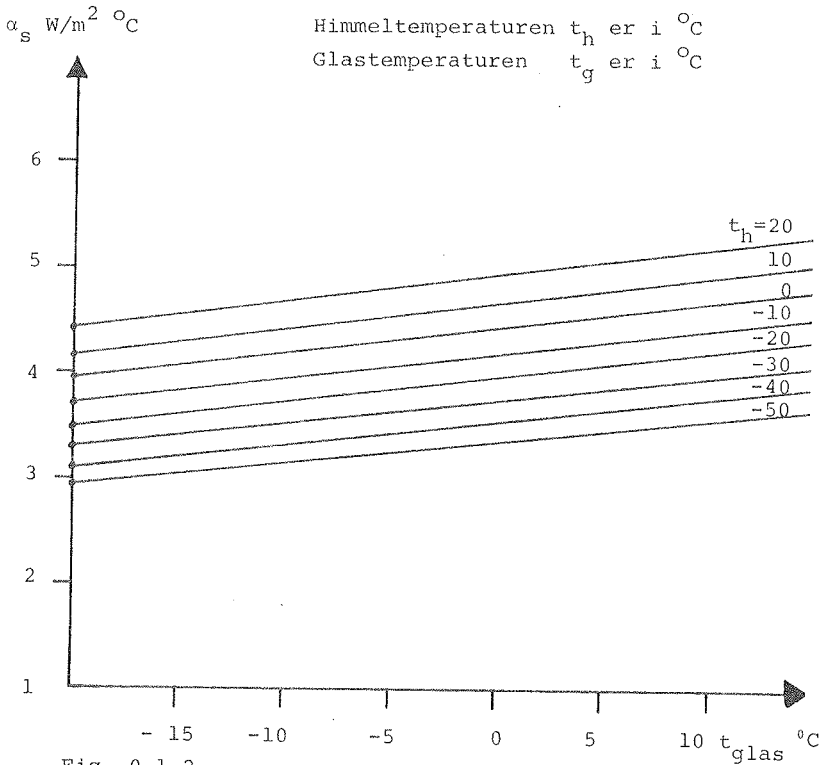


Fig. 0.1.2.

VARIATIONEN AF DET INDVENDIGE OVERGANGSTAL FOR STRÅLING

Der er benyttet samme formeludtryk, som ved
beregningen af kurverne på fig 0.1.2.

Overfladetemperaturen t_o er angivet i $^{\circ}\text{C}$

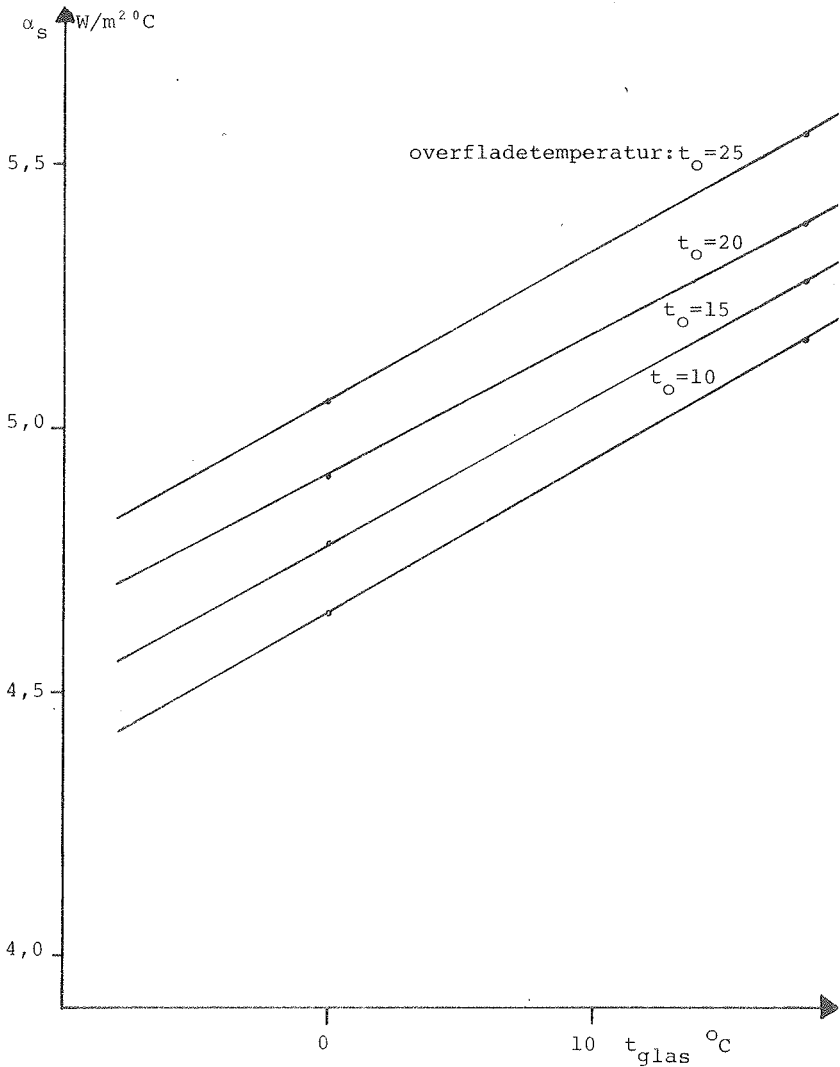


Fig. 0.1.3

VARIATION I DET INDVENDIGE OVERGANGSTAL
FOR KONVEKTION (TERMISK KONVEKTION).

Følgende tilnærmede udtryk er benyttet:

N.F. Bisgård [1] :

$$\alpha_k \approx 1,66 \Delta\theta^{0,25} \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

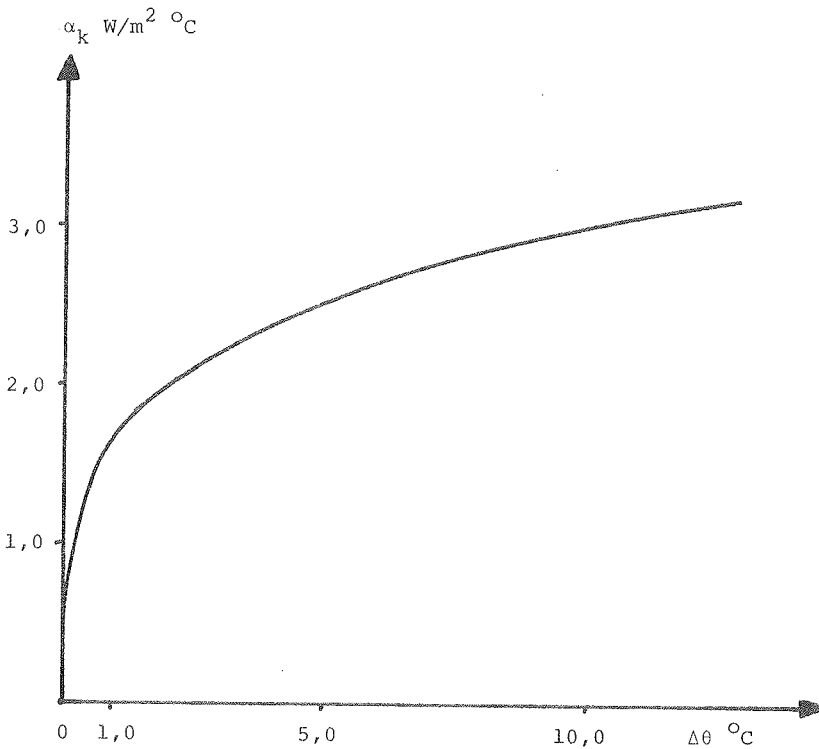


Fig. 0.1.4.

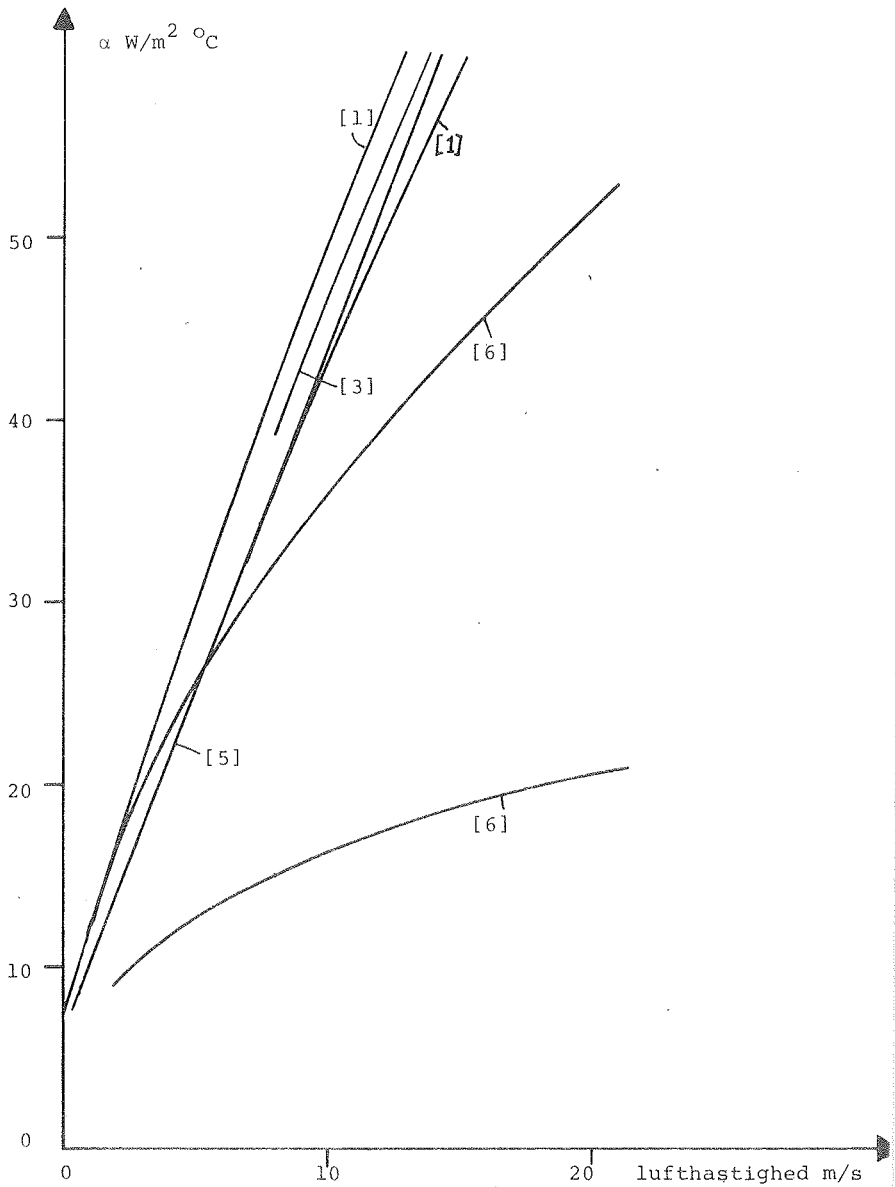


Fig. 0.1.5. Variationen af det udvendige overgangstal for konvektion, som angivet af forskellige kilder.

Sædvanligvis regnes med [6] at overgangsmodstandstallene er

$$m_u = 0,04 \text{ m}^2\text{C/W}$$

$$m_i = 0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$$

således at overgangsmodstandenes bidrag er $0,17 \text{ m}^2\text{C/W}$ til vinduets samlede varmemodstand. I henhold til Ingeniørforeningens varmetabsregler [6] bidrager luftmellemrummet, mellem de to lag glas, med en lignende størrelse. Selve glassenes varmemodstand er i denne sammenhæng betydningsløs (m for 4 mm glas er $0,005 \text{ m}^2\text{C/W}$), og vinduets samlede varmemodstand bliver således ca. $0,35 \text{ m}^2\text{C/W}$ svarende til et transmissionstal på 2,9 $\text{W/m}^2\text{C}$, hvilket også er almindelig benyttet. Forskelle i vinduets konstruktion (f.eks. mængden af træ i kar-men) og udformning kan dog ændre lidt op eller ned på transmissionstallets sidste ciffer.

0.2 Solstrålingen

Glassets evne til at transmittere sollys, og dermed tilføje rum dels dagslys og dels varme, er baggrunden for den udstrakte, ja næsten ensidige brug af glas som materiale i vinduer. En vurdering af hvor megen solstråling, der transmitteres gennem et vindue, tager naturligt sit udgangspunkt i solarkonstanten, der angiver solens strålingsintensitet umiddelbart udenfor jordens atmosfære, når denne befinder sig i middelfastanden fra solen. Solarkonstantens værdi er ca. 1400 W/m^2 [4]. Ved sin passage gennem jordens atmosfære sker der en svækkelse af strålingsintensiteten, som er proportional med indholdet af vanddamp. Svækkelsen sker hovedsagelig i atmosfærens nederste lag d.v.s. fra 0 - 4 km over jordens overflade.

Hele spektret svækkes ved brydning, spredning og reflektion, mens der kun sker svækkelse af en del af spektret ved absorption (selektiv absorption).

Fig. 0.2.1 viser, hvorledes solstrålingen fordeles i gennemsnit.

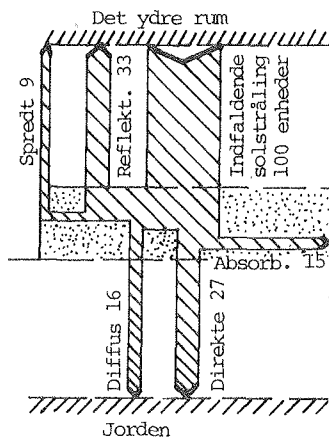


Fig. 0.2.1 Middelfordeling af den indfaldende solstråling

Når solstrålingen når jordens overflade, har den en maximal intensitet på ca. 900 W/m^2 , gældende for den direkte stråling på en plan vinkelret på strålingsretningen på klare dage. For den del af solstrålingen, der som diffus stråling eller himmelstråling når jorden, er den tilsvarende maksimalværdi ca. 200 W/m^2 på en vandret flade.

Den solstråling, der rammer en flade, kan deles i tre bidrag:

1. Den direkte stråling
2. Den diffuse stråling

Indfladsvinklen bestemmes af solhøjden h , væg-sol azimutvinklen β samt af hældningsvinklen γ (for en lodret flade er $\gamma = 0$), idet

$$\cos i = \cosh \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma + \sinh \cdot \sin \gamma \quad (0.2.2)$$

For den lodrette flade fås

$$\cos i = \cosh \cdot \cos \beta \quad (0.2.3)$$

og dermed

$$I_{D,1} = I_{D,N} \cosh \cdot \cos \beta \text{ W/m}^2 \quad (0.2.4)$$

Størrelsen af $I_{D,N}$ er dels blevet målt og dels beregnet. Fig. 0.2.3 [5] angiver således Perry Moons beregnede standardkurve for strålingsintensiteten ved jordoverfladen vinkelret på strålingsretningen på klare dage. Beregningerne forudsætter en atmosfære ved 760 mm Hg, 20 mm vanddamp, 300 støvpartikler pr. cm^3 og 2,8 mm ozon. Samme figur viser også finnen Lunelunds målinger af årsmiddelværdien af den direkte solstråling vinkelret på strålingsretningen som funktion af solhøjden.

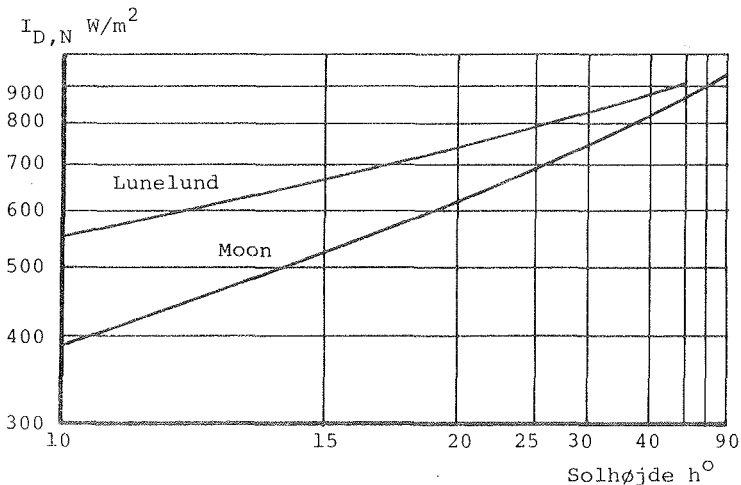


Fig. 0.2.3 Intensiteten af den direkte solstråling mod en flade vinkelret på strålingsretningen, på klare dage, som funktion af solhøjden.

Målinger udført i Danmark af E. Petersen [9] ved Danmarks Tekniske Højskole har givet værdier, der er i god overensstemmelse med Perry Moon's kurve. Om sommeren var værdierne dog noget lavere.

0.2.2 Den diffuse stråling (himmelstråling)

Forskellige opgivelser af den diffuse strålings intensitet ved jordoverfladen varierer meget. Grunden hertil er de mange faktorer, der influerer på den diffuse stråling, og at disse faktorer varierer fra sted til sted. Som nogle af de vigtigste kan nævnes: Solens stilling, atmosfærens indhold af vanddamp og luftforureningen.

Imidlertid er der en sammenhæng mellem den direkte strålingsintensitet udenfor atmosfæren og den diffuse stråling. Sædvanligvis antager man, at der er ligefrem proportionalitet, således at den diffuse stråling på en vandret flade bestemmes af ligningen

$$I_{d,v} = \kappa(I_o - I_{D,N}) \sinh \quad W/m^2 \quad (0.2.5)$$

hvor

$I_{d,v}$ er den diffuse stråling på vandret i W/m^2

I_o er solarkonstanten i W/m^2

$I_{D,N}$ er den direkte stråling vinkelret på strålingsretningen ved jordoverfladen i W/m^2

h er solhøjden i grader

κ er en faktor, der er næsten konstant

Forskellige målinger i udlandet har vist, at κ ligger mellem 0,30 og 0,35. Herhjemme har E. Petersen [9] målt κ til mellem 0,30 og 0,32. Dog er der her kun tale om målinger fra én dag, men de er i god overensstemmelse med andre målinger.

Fig. 0.2.4 viser den diffuse strålings variation med

solhøjden, som angivet af forskellige kilder. [10], [11], [12], [13] og [14].

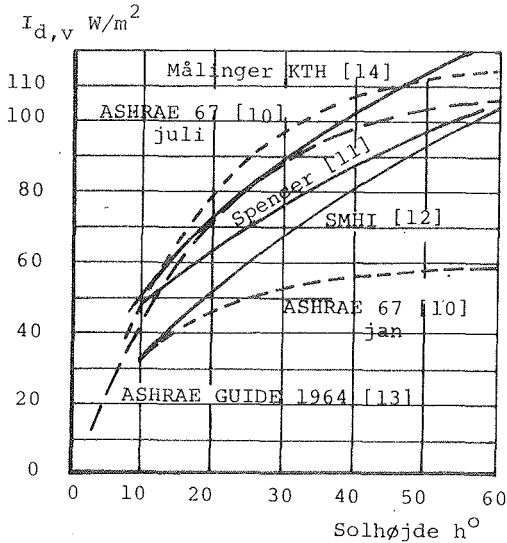


Fig. 0.2.4 Den diffuse himmelstrålings intensitet på en vandret flade.

Himmelstrålingen i klart vejr er ikke jævnt fordelt over hele himmelhvelvingen, men er størst omkring det sted på himmelen, hvor solen står. Et andet, men mindre maximum har strålingen i horisonten. Tilsammen giver de to bidrag en strålingsfordeling, der har maximum ved solen, og minimum på den modsatte del af himmelhvelvingen.

For en overskyet himmel har himmelstrålingen maximum i zenit og minimum i horisonten.

Størrelsen af himmelstrålingen, der i klart vejr rammer en lodret flade, kan på grundlag af målinger ud-

ført af Threkeld [15] bestemmes af ligningen

$$\frac{I_{d,l}}{I_{d,v}} = 0,55 + 0,437 \cos i + 0,313 \cos^2 i \quad (0.2.6)$$

som er afbildet på fig. 0.2.5.

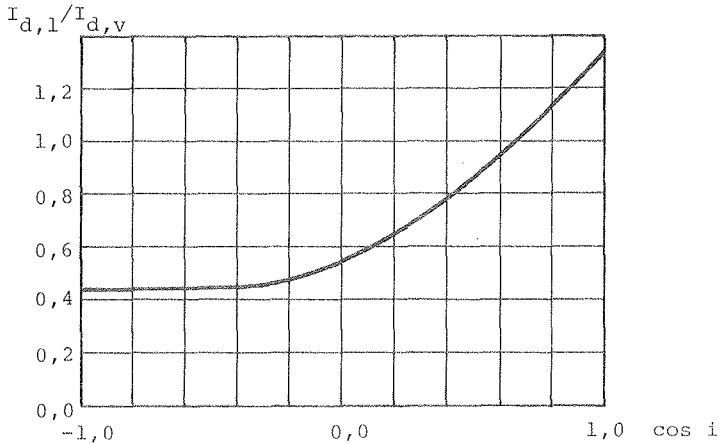


Fig. 0.2.5. Forholdet mellem $I_{d,l}$ og $I_{d,v}$ i klart vejr, som funktion af indfaldsvinklen 'i'.

hvor

$I_{d,l}$ er himmelstrålingen på lodret i W/m^2

$I_{d,v}$ er himmelstrålingen på vandret i W/m^2

i er indfaldsvinklen, d.v.s. vinklen mellem retningen til solen og fladens normal i grader

Ligningen er gyldig for $\cos i > -0,2$. For $\cos i < -0,2$ er forholdet 0,45. (På fig. 0.2.5 er hele kurven optegnet).

0.2.3 Den diffust reflekterede stråling

Både den direkte solstråling og himmelstrålingen, der rammer jordoverfladen og genstande på denne, vil delvis blive reflekteret. Reflektionen kan som regel regnes for at være diffus (d.v.s. uafhængig af indfaldsvinklen), og den varierer med overfladens og genstandenes farve (d.v.s. med reflektionskoefficienten).

En del af den således reflekterede stråling vil ramme en lodret flade, og størrelsen af denne stråling kan beregnes af

$$I_{d,r} = \phi \cdot \rho (I_{D,N} \cdot \sin h + I_{d,v}) \quad \text{W/m}^2 \quad (0.2.7)$$

hvor

$I_{d,r}$ er den diffust reflekterede stråling i W/m^2

$I_{D,N}$ er den direkte stråling vinkelret på strålerne i W/m^2

$I_{d,v}$ er himmelstrålingen på vandret i W/m^2

h er solhøjden i grader

ϕ er vinkelforholdet mellem den lodrette flade og den reflekterende flade ($\phi = 0,5$ hvis fladen er stor)

ρ er den reflekterende flades reflektionskoefficient.

0.3 Transmitteret solstråling gennem en glastrude med ét glas

Den stråling, der rammer en lodretstående glastrude er

$$I_{\text{total}} = I_{D,l} + I_{d,l} + I_{d,r} \quad \text{W/m}^2 \quad (0.3.1)$$

hvor

$I_{D,l}$ bestemmes af ligning (0.2.4)

$I_{d,l}$ bestemmes af ligning (0.2.6)

$I_{d,r}$ bestemmes af ligning (0.2.7)

En del af denne stråling vil blive reflekteret, en del absorberet og en del transmitteret. Kaldes de tre brøkdelen for henholdsvis R, A og T må der gælde

$$I_{\text{total}} \cdot R + I_{\text{total}} \cdot A + I_{\text{total}} \cdot T = I_{\text{total}} \quad \text{W/m}^2 \quad (0.3.2)$$

og dermed

$$R + A + T = 1 \quad (0.3.3)$$

På pilediagrammet fig. 0.3.1 er vist opdelingen i reflekteret, absorberet og transmitteret stråling ved et enkelt lag glas.

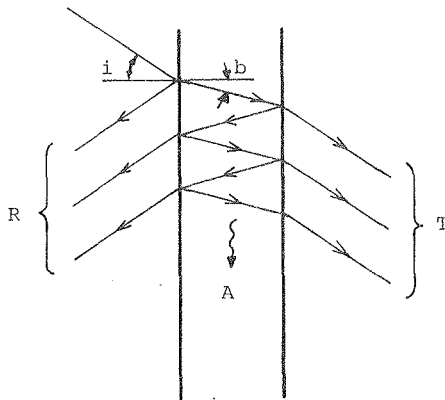


Fig. 0.3.1. Strålegangen i en rude med ét lag glas.

Intensiteten af den stråling, der reflekteres i glas-overfladerne kan bestemmes ved hjælp af Fresnels formler, der gælder for planpolariseret lys, der svinger dels vinkelret på og dels i indfaldsplanen.

$$I_{//} = \frac{I}{2} \cdot \frac{\operatorname{tg}^2(i - b)}{\operatorname{tg}^2(i + b)} \quad \text{W/m}^2 \quad (0.3.4)$$

$$I_{\perp} = \frac{I}{2} \cdot \frac{\sin^2(i - b)}{\sin^2(i + b)} \quad \text{W/m}^2 \quad (0.3.5)$$

hvor

I er intensiteten af den indfaldende stråling i W/m^2

$I_{//}$ er intensiteten af strålingen i indfaldsplanen i W/m^2

$I_{\perp}$ er intensiteten af strålingen vinkelret på indfaldsplanen i W/m^2

i er indfaldsvinklen i grader
 b er brydningsvinklen i grader } se fig. 0.3.1

Intensiteten af den reflekterede stråling er så

$$I_R = I_{//} + I_{\perp} = \frac{I}{2} \left(\frac{\operatorname{tg}^2(i - b)}{\operatorname{tg}^2(i + b)} + \frac{\sin^2(i - b)}{\sin^2(i + b)} \right) \text{W/m}^2 \quad (0.3.6)$$

Reflektionsfaktoren R bestemmes af

$$R = \frac{I_R}{I} \quad (0.3.7)$$

Ved lysets passage gennem glasset svækkes det, idet en del af det absorberes. Absorptionen er afhængig af den vejlængde, som strålingen skal tilbagelægge gennem glasset. For monokromatisk stråling gælder for svækkelsen dI_{λ} ved passage af glastykkelsen ds

$$dI_{\lambda} = -K_{\lambda} \cdot I_{\lambda} \cdot ds \quad \text{eller} \quad (0.3.8)$$

$$I_{\lambda} = I_{\lambda,0} \cdot e^{-K_{\lambda}s} = I_{\lambda,0} \delta_{\lambda}^s \quad (0.3.9)$$

idet δ_λ er en konstant for glasset kaldet nettotransmissionskoefficienten for glastykkelsen 1 mm.

Dette er Beer's lov.

Når således den reflekterede og den absorberede del af den indfaldende stråling er kendt, bestemmes den transmitterede del T af

$$T = 1 - (R + A) \quad (0.3.10)$$

Denne formel kan benyttes, idet nettotransmissionskoefficienten δ_λ kan betragtes som konstant i hele solspektrret.

Fig. 0.3.2 viser, hvorledes R, A og T for almindeligt vinduesglas varierer med indfaldsvinklen i

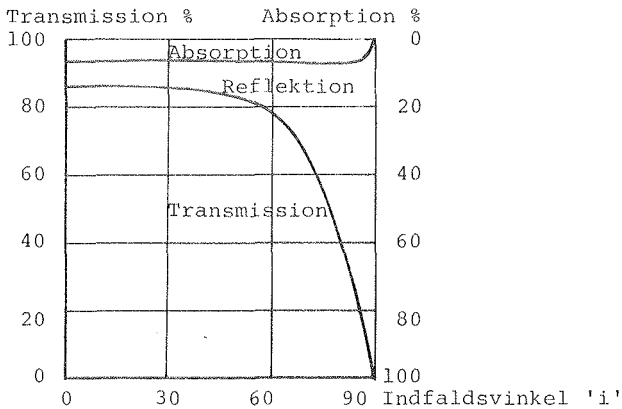


Fig. 0.3.2. T, R og A som funktion af indfaldsvinklen 'i', for alm. vinduesglas.

0.4 Dobbeltrudens transmissionsforhold

Hvis en glasrude består af to lag glas, vil de påvirke hinanden, idet der vil ske en gentagen refleksion i de to lag glas. Hvis glaslagene karakteriseres ved henholdsvis R_1 , A_1 , T_1 og R_2 , A_2 , T_2 kan den samlede refleksion R_{12} , absorption A_{12} og transmission T_{12} beregnes udfra pilediagrammet fig. 0.4.1.

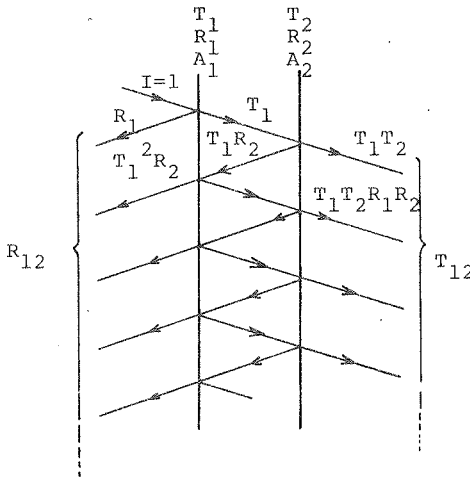


Fig. 0.4.1. Strålegangen i et tolagsvindue.

For transmissionen gælder

$$T_{12} = T_1 \cdot T_2 + T_1 \cdot T_2 \cdot R_1 \cdot R_2 + T_1 T_2 (R_1 \cdot R_2)^2 + \text{osv.} \quad (0.4.1)$$

Denne uendelige sum, der også kan skrives som

$$\Sigma (1 + q + q^2 + \dots + q^n) \quad n = \infty \quad (0.4.2)$$

har summen

$$\Sigma(1 + q + q^2 + \dots + q^n) = \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q} \quad n \rightarrow \infty \quad (0.4.3)$$

Da q her er $R_1 \cdot R_2 < 1$ vil $q^\infty = 0$ og dermed

$$T_{12} = \frac{T_1 T_2}{1 - R_1 R_2} \quad (0.4.4)$$

Et tilsvarende udtryk gælder for reflektionen, idet

$$R_{12} = R_1 + T_1^2 R_2 + T_1^2 R_1 R_2^2 + \dots + \text{osv.} \quad (0.4.5)$$

$$R_{12} = R_1 + \frac{T_1^2 R_2}{1 - R_1 R_2} \quad (0.4.6)$$

Absorptionen i det 1. glas bliver

$$A_{1,1} = A_1 + T_1 R_2 A_1 + T_1 R_1 R_2^2 A_1 + \dots + \text{osv}$$

$$A_{1,1} = A_1 \left[1 + \frac{T_1 R_2}{1 - R_1 R_2} \right] \quad (0.4.7)$$

I det 2. glas fås tilsvarende

$$A_{2,2} = T_1 A_2 + T_1 R_1 R_2 A_2 + T_1 R_1^2 R_2^2 A_2 + \dots + \text{osv.}$$

$$A_{2,2} = \frac{T_1 A_2}{1 - R_1 R_2} \quad (0.4.8)$$

Den absorberede stråling vil atter ved stråling og konvektion afgives ind mod rummet (den sekundære transmitterede stråling) og ud mod det fri. Denne fordeling afhænger dels af den indvendige og den udvendige varmeovergangsmodstand (m_i og m_u), og dels af luftlagets varmemodstand m_1 .

For det udvendige glas gælder, at der til det fri afgives

$$A_{1,1} \cdot \frac{m_j + m_l}{\Sigma m} \quad (0.4.9)$$

og til rummet

$$A_{1,1} \cdot \frac{m_u}{\Sigma m} \quad (0.4.10)$$

Tilsvarende gælder der for det indvendige glas, at der til det fri afgives

$$A_{2,2} \cdot \frac{m_i}{\Sigma m} \quad (0.4.11)$$

og til rummet

$$A_{2,2} \cdot \frac{m_u + m_l}{\Sigma m} \quad (0.4.12)$$

hvor

$$\Sigma m = m_i + m_u + m_l \quad (0.4.13)$$

På fig. 0.4.2 er vist, hvorledes den procentuelle fordeling af den indfaldende stråling på en dobbeltrude er.

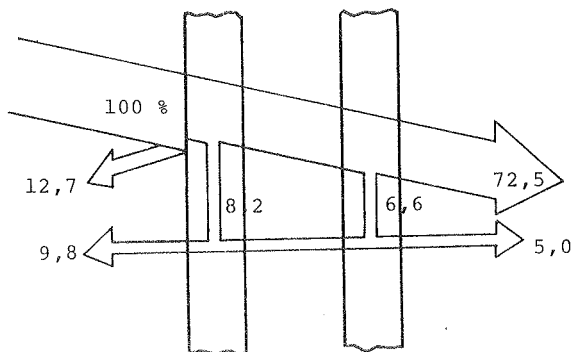


Fig 0.4.2. Den procentuelle fordeling af den indfaldende stråling på en dobbeltrude.

0.5 Årsvarmebalancen for en dobbeltrude

0.5.1 Varmetabet

Som følge af forskellen mellem lufttemperaturen ude og inde, vil der gennem en dobbeltrude transmitteres varme fra den varme mod den kolde side. Varmetransmissionen Q kan beregnes af formlen

$$Q = k \cdot A(t_i - t_u) W \quad (0.5.1)$$

hvor

k er vinduets varmetransmissionskoefficient i $W/m^2 \text{ } ^\circ C$

A er arealet i m^2

t_i er indetemperaturen i $^\circ C$

t_u er udetemperaturen i $^\circ C$

Betragtes $1 m^2$ dobbeltrude fås tilsvarende

$$q = k(t_i - t_u) W/m^2 \quad (0.5.2)$$

I afsnit 0.1 er angivet værdien af k til ca. $2,9 W/m^2 \text{ } ^\circ C$, som benyttes i det følgende.

Temperaturdifferensen $\Delta t = t_i - t_u$, vil time for time året igennem variere som følge af udeklimaets og indeklimaets vekslen, men for at få et overblik over størrelsen af q på årsbasis, benyttes her månedsmiddelværdierne af t_u , som angivet i Referenceåret [16] og den konstante værdi $20^\circ C$ for t_i .

Fig. 0.5.1 angiver t_u året igennem, samt Δt og antallet af graddøgn (d.v.s. produktet af temperaturforskel og antal døgn). Desuden er q i KWh/m^2 måned beregnet i kolonner yderst til højre

Fig. 0.5.1 angiver t_u året igennem, samt Δt og antallet af graddøgn. Desuden er q i kWh/m^2 måned beregnet i kolonnen yderst til højre.

Måned	t_u	t_i	Δt	$^{\circ}\text{Cd}\ddot{\text{a}}\text{gn}$	$q \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{måned}$
JAN	0,2	20	19,8	614	42,7
FEB	-0,4	20	20,4	571	39,7
MAR	2,0	20	18,0	558	38,8
APR	5,7	20	14,3	429	29,9
MAJ	11,4	20	8,6	267	18,6
JUN	16,0	20	4,0	120	8,4
JUL	16,4	20	3,6	112	7,8
AUG	16,1	20	3,9	121	8,4
SEP	13,7	20	6,3	189	13,2
OKT	9,2	20	10,8	335	23,3
NOV	5,0	20	15,0	450	31,3
DEC	-0,4	20	20,4	632	44,0
Året				4398	306,1

Fig. 0.5.1. Beregning af varmetab gennem 1 m^2 dobbeltrude måned for måned.

0.5.2 Solindfaldet

Der betragtes 1 m^2 dobbeltrude vendende dels mod nord og dels mod syd.

Med referenceårets strålingsdata er det månedlige solindfald gennem ruden beregnet. Der er benyttet en horisontafskæring på 5° (d.v.s., at solindfaldet for solhøjder ≤ 5 er sat til 0, som følge af, at bygninger, træer m.v. skygger for den lavtstående sol)

Måned	Solindfald kWh mod N.	Solindfald kWh mod S.
JAN	4,1	40,3
FEB	8,0	54,2
MAR	16,5	77,2
APR	25,9	74,7
MAJ	35,9	65,7
JUN	45,2	65,3
JUL	42,7	66,8
AUG	31,9	62,5
SEP	20,9	63,0
OKT	11,3	46,2
NOV	5,3	29,0
DEC	3,6	32,8
Året	251,3	677,7

Fig. 0.5.2 Månedligt solindfald gennem 1 m^2 dobbeltrude. (direkte + diffus)

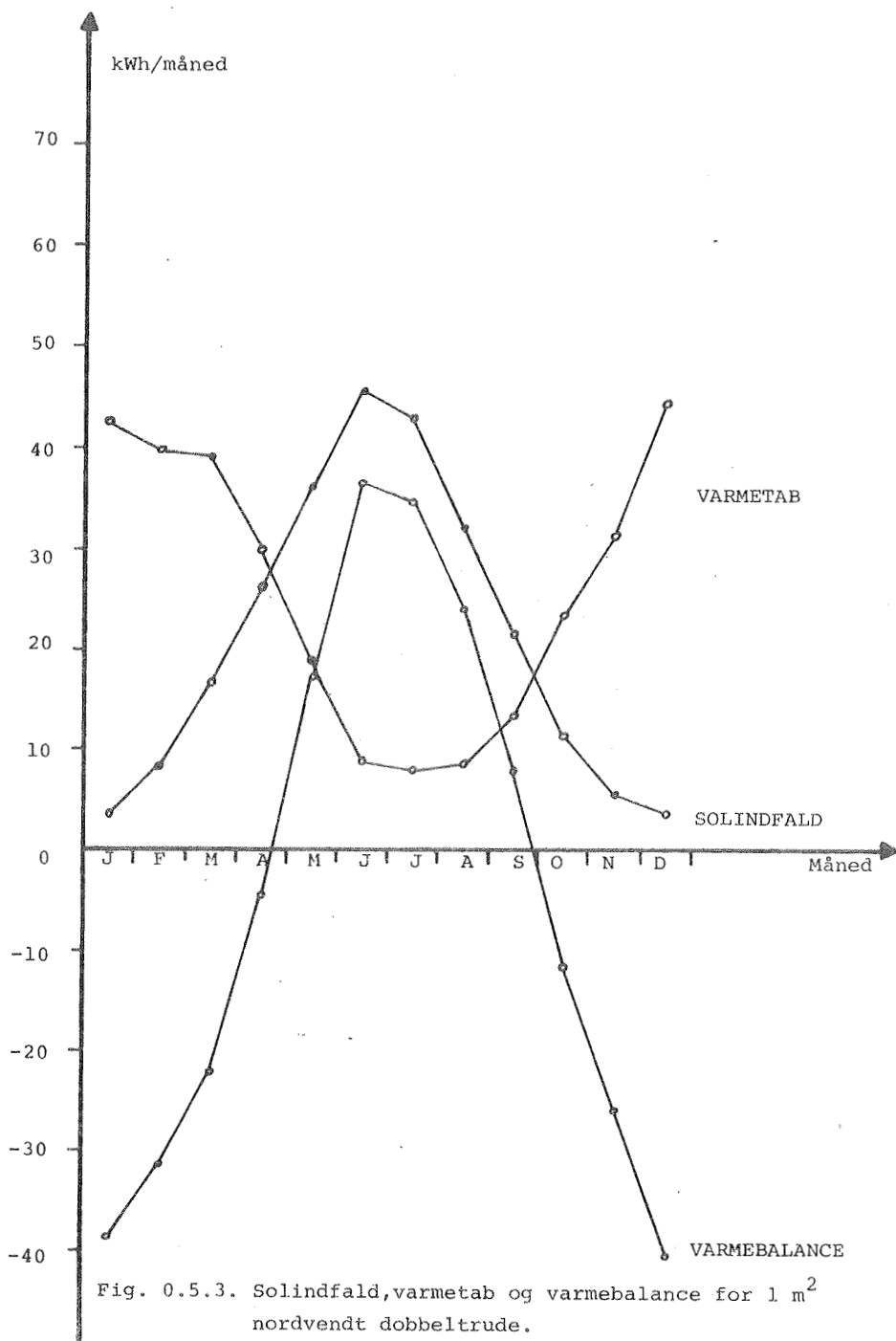
0.5.3 Varmebalancen

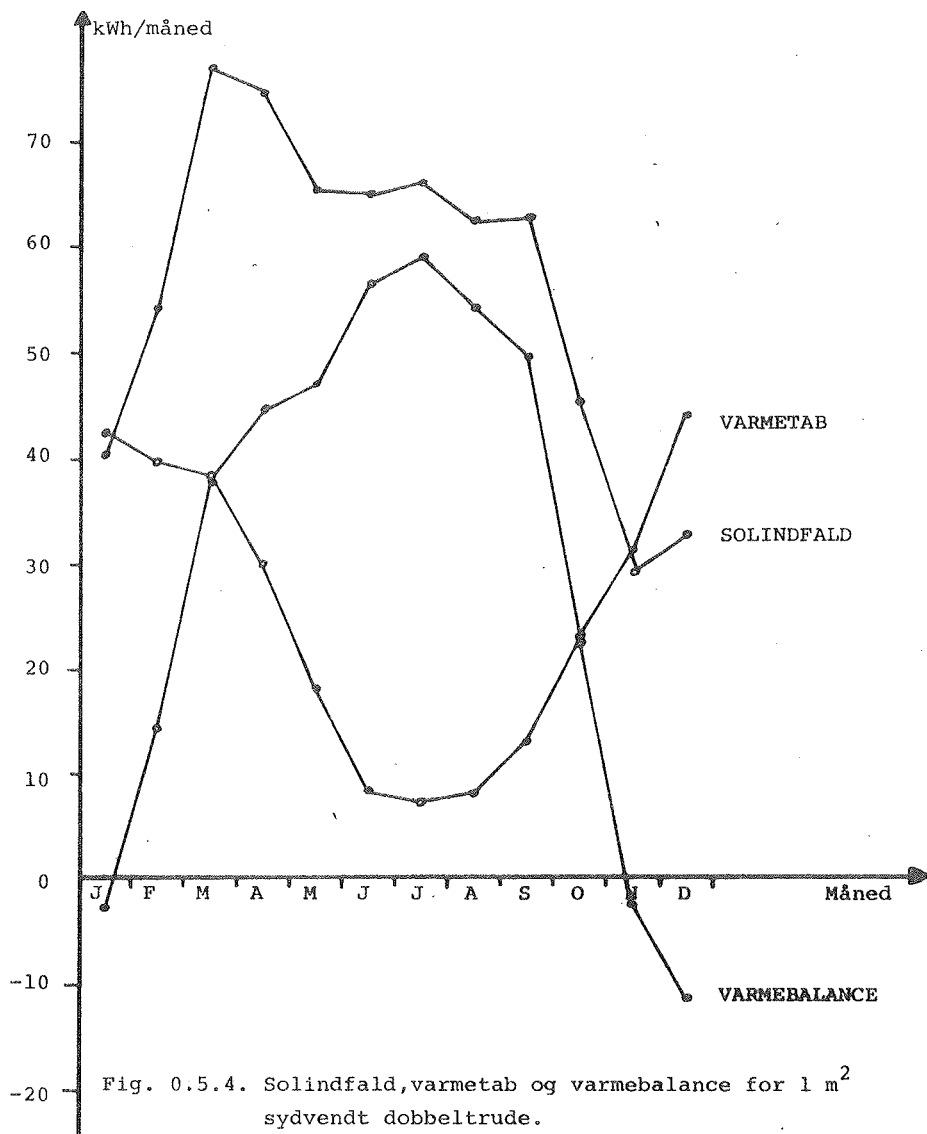
Differensen mellem de månedlige varmetab og solindfald, giver det, der kaldes varmebalancen for 1 m^2 dobbelt-rude, altså hvor megen energi, der netto transmitteres den ene eller den anden vej gennem ruden.

Fig. 0.5.3 og 0.5.4 viser varmetab, solindfald samt varmebalancer for henholdsvis den nordvendte og den sydvendte dobbeltrude.

For det nordvendte vindue viser fig. 0.5.3, at varmebalancen kun er positiv i månederne MAJ-SEP, altså i de måneder, der ligger udenfor fyringssæsonen. Ser man derimod på det sydvendte vindue (fig. 0.5.4) vil man lægge mærke til, at det her kun er i månederne JAN, NOV og DEC, at varmebalancen er negativ. I den resterende del af året, som også inkluderer cirka halvdelen af fyringssæsonen, er der et overskud af solvarme i forhold til varmetabet, hvilket betyder (når det ansues på denne enkle måde), at et sydvendt vindue er med til at reducere fyringsomkostningerne for et givet rum. Hvor megen energi, der bliver i overskud, når der betragtes en hel fyringssæson, er vist på fig. 0.5.5.

Denne måde at fremstille vinduets varmebalance på, giver imidlertid kun idé om, hvorledes vinduet influerer på energiforbruget i et rum. I denne simplificerede fremstilling er der ikke taget hensyn til, at en del af den indfaldende solenergi akkumuleres i selve bygningskonstruktionerne, en del akkumuleres i inventar, samt at en del solvarme evt. må fjernes for at holde den ønskede rumtemperatur. Alligevel giver fig. 0.5.5 et fingerpeg om, at den varmemængde, der via vinduerne tilføres et rum, er ganske betydelig, og må tages med i betragtning, når bygningers varme- og klimaanlæg skal dimensioneres.





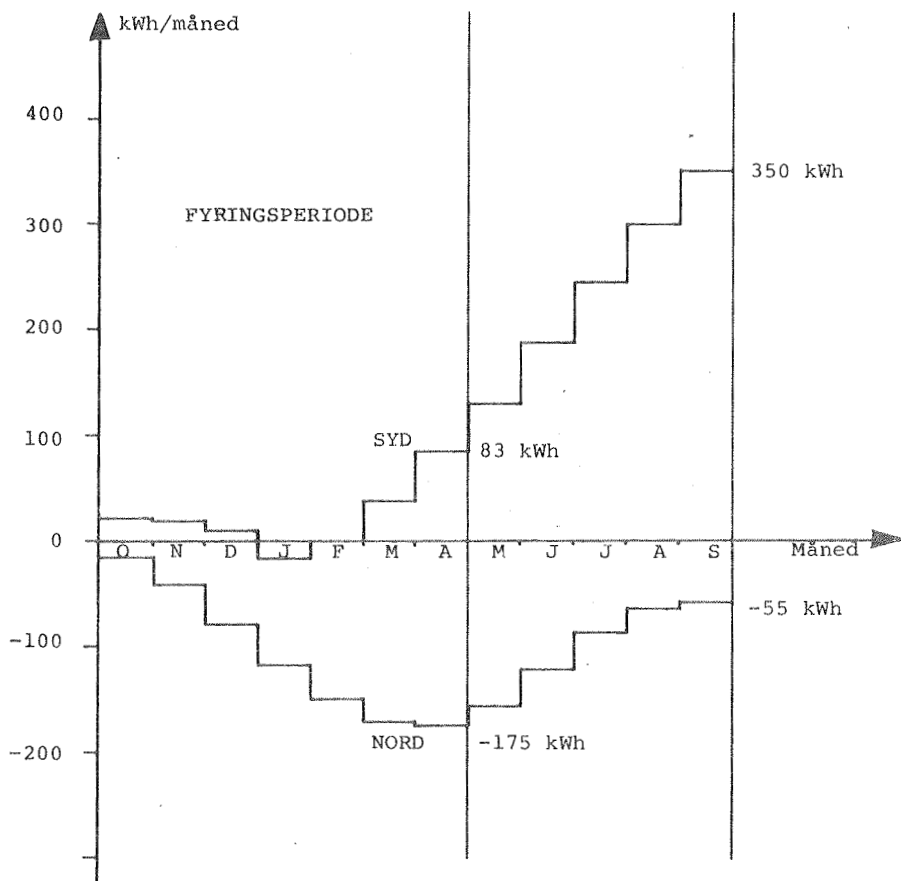


Fig. 0.5.5 Akkumulering af henholdsvis energioverskud og energifunderskud, måned for måned, for 1 m² vindue vendende mod syd henholdsvis nord.

1. BEREGNINGSUDTRYK OG -MODEL TIL LØSNING AF VARMETRANSPORTPROBLEMER

Som nævnt kan vinduets varmebalance, som den er opstillet i afsnit 1.5, ikke benyttes til en nøjere analyse af, hvorledes vinduer influerer på energiforbruget i et givet rum. I langt de fleste praktiske tilfælde vil der være tale om, at en varmemstrøm ikke blot afhænger af stedet, men også af tiden. Der er altså tale om en instationær varmemstrøm, og i så tilfælde bliver bestemmelse af temperaturer og varmemstrømme ganske indviklet og besværligt.

1.1 Fourier's varmeledningsligning

Grundlaget for løsning af ethvert instationært varmeteknisk problem er det udtryk, der er opstillet af Fourier. Ligningen bygger på den erfaring, at en varmemstrøm dq (som funktion af tid og sted) er proportional med temperaturgradienten $-\frac{d\theta}{dx}$ i varmemstrømmens retning og med gennemstrømningsarealet A .

$$dq = k \cdot \left(-\frac{d\theta}{dx}\right) \cdot A \quad (1.1.1)$$

Proportionalitetsfaktoren k er den, der kaldes varmeledningstallet for det materiale, hvori varmemstrømmen forløber.

Fourier's grundlæggende varmeledningsligning er så

$$dq = - \lambda \frac{d\theta}{dx} \cdot A \quad (1.1.2)$$

Et helt generelt udtryk fås ved at betragte et kasseformet legeme med sidelængderne dx , dy og dz i et retvinklet koordinatsystem, som vist på fig. 1.1.1.

Gennem sidefladen x_1 strømmer varmemængden

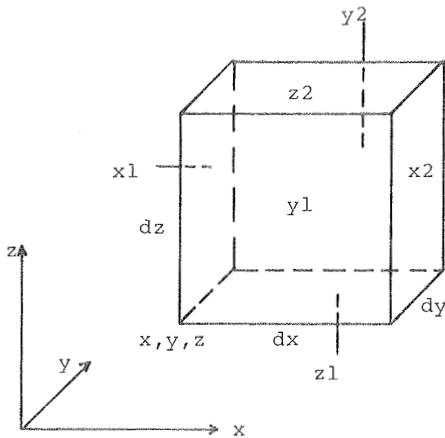


Fig. 1.1.1. Volumelement i retvinklede koordinater

$$dq_{x1} = -\lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} dydz \quad (1.1.3)$$

hvor λ_x er varmeledningstallet i x-retningen. Ved passagen af volumelementet ændres varmestrømmen, således at der gennem sidefladen $x2$ strømmer varmemængden

$$dq_{x2} = dq_{x1} + \frac{\partial}{\partial x} (dq_{x1}) dx = - \left[\lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x}) dx \right] dydz$$

I x-aksens retning er der så netto tilført varmemængden

$$dq_x = dq_{x1} - dq_{x2} = - \lambda_x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) dx dy dz = - \lambda_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dx dy dz \quad (1.1.4)$$

Tilsvarende udtryk kan opstilles for varmestrømmen i henholdsvis y- og z-retningen, og hvis der er tale om et homogent materiale med $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$ fås

$$dq_y = -\lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} dy dx dz \quad (1.1.5)$$

$$dq_z = -\lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} dz dx dy \quad (1.1.6)$$

Summen af dq_x , dq_y og dq_z er den nettovarme, der er blevet tilført volumenelementet, og som gør, at dets temperatur ændres med $\frac{\partial \theta}{\partial \tau}$ °C/h. Derved oplagres energien

$$\rho dx dy dz \cdot c \frac{\partial \theta}{\partial \tau} d\tau \quad (1.1.7)$$

hvor

ρ er materialets rumvægt

c er materialets specifikke varmekapacitet

Hvis der ikke på anden vis sker ændringer i systemet, må der gælde

$$\rho dx dy dz \cdot c \frac{\partial \theta}{\partial \tau} d\tau = \lambda \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right] dx dy dz$$

eller

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial \tau} d\tau = \lambda \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right] \quad (1.1.8)$$

Sker der desuden en varmeproduktion q i selve elementet fås det generelle udtryk

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial \tau} d\tau = \lambda \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right] + q \quad (1.1.9)$$

1.2. Specielle tilfælde

Såfremt der kun er tale om en todimensional varmestrøm bliver ligning (1.1.9) simplificeret til

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial \tau} dt = \lambda \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right] + q \quad (1.1.10)$$

som i det éndimensionale tilfælde yderligere reduceres til

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial \tau} dt = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + q \quad (1.1.11)$$

Ved desuden at sætte $q = 0$ og $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 0$ (det stationære tilfælde) fås

$$\lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \quad (1.1.12)$$

med løsningen

$$\theta = K_1 x + K_2$$

hvor K_1 og K_2 er konstanter som bestemmes af randbetingelserne.

En afbildning af θ som funktion af x giver en ret linie, hvilket netop er karakteristisk for det stationære tilfælde.

1.3 Analytisk løsning af Fourier's varmeledningsligning

Indenfor byggeteknikken vil et varmetransportproblem meget ofte, med god tilnærmelse, være af typen: Stationær éndimensional varmetransport uden varmeproduktion. Dette er f.eks. tilfældet ved varmetransporten gennem store plane flader, såsom bygningers vægge, gulve og tag. Dog vil der i nærheden af hjørner, vinduesåbninger, søjler og lignende være tale om flerdimensional varmemestrøm.

Er der kun tale om en éndimensional varmemestrøm, som angivet ovenfor, bliver den tilhørende 2. ordens differentialligning

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (1.3.1)$$

eller idet $\frac{\lambda}{\rho c} = a$ kaldes temperaturledningstallet

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (1.3.2)$$

Selve det fysiske system er vist på fig. 1.3.1

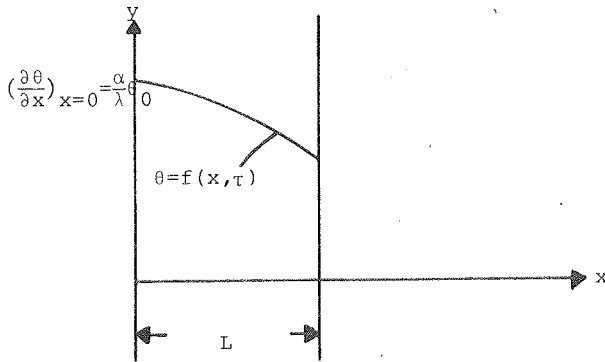


Fig. 1.3.1. Det fysiske system i forbindelse med éndimensional instationær varmetransportproblem.

De givne grænsebetingelser er dels 1) temperaturkurven til tiden $t = 0$ og dels temperaturgradienten for 2) $x = 0$ og 3) $x = L$.

$$1. \quad \theta_{\tau=0} = f(x) \quad (1.3.3)$$

$$2. \quad \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{\alpha}{\lambda} \theta_{x=0} = \frac{\alpha}{\lambda} \theta_0 \quad (1.3.4)$$

$$3. \quad \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=L} = \frac{\alpha}{\lambda} \theta_{x=L} = \frac{\alpha}{\lambda} \theta_L \quad (1.3.5)$$

Forholdet $\frac{\alpha}{\lambda}$ betegnes som det relative varmeovergangstal, og er forholdet mellem varmeovergangstallet til omgivelserne og materialets varmeledningstal.

At det er forholdet $\frac{\alpha}{\lambda}$ der indgår i ligning (1.3.4) og (1.3.5) ses af følgende:

Den varmestrøm, der går fra omgivelserne med temperaturen θ til fladen med temperaturen θ_0 kan udtrykkes som

$$dQ = \alpha(\theta_0 - \theta)Ad\tau \quad (1.3.6)$$

Den samme varmemængde må, da der ikke ophobes varme ved overfladen, strømme videre ind i materialet. Denne strøm kan udtrykkes ved

$$dQ = -\lambda(\text{grad } \theta)Ad\tau \quad (1.3.7)$$

Af (1.3.6) og (1.3.7) fås, at

$$\text{grad } \theta = \frac{\alpha}{\lambda} (\theta_0 - \theta) \quad (1.3.8)$$

som med $\theta = 0$ netop giver ligning (1.3.4) og (1.3.5)

Løsningen af differentiaalligningen (1.3.1) kan ske ved separationsmetoden. Den endelige løsning må være en funktion af de variable tiden (τ) og stedet (x) og kan skrives som

$$\theta = \Phi(\tau, x) \quad (1.3.9)$$

Først opsøges løsninger, hvortil der kun stilles den ene betingelse, at de skal tilfredsstille differentiaalligningen (1.3.1). En sådan løsning er produktfunktionen

$$\Phi(\tau, x) = \phi(\tau) \cdot \psi(x) \quad (1.3.10)$$

De partielle afledede af 1. orden med hensyn til t og af 2. orden med hensyn til x bliver

$$\phi'_t(\tau, x) = \phi'(\tau) \cdot \psi(x) \quad (1.3.11)$$

$$\phi''_x(\tau, x) = \phi(\tau) \psi''(x) \quad (1.3.12)$$

Indsættes i ligning (1.3.2) fås

$$\phi'(\tau) \psi'(x) = a\phi(\tau) \psi''(x) \quad (1.3.13)$$

De variable kan nu separeres, således at den oprindelige differentialligning erstattes af to, nemlig

$$\frac{1}{a} \frac{\phi'(\tau)}{\phi(\tau)} = \frac{\psi''(x)}{\psi(x)} = \pm 1^2 \quad (1.3.14)$$

hvor 1 er en konstant, der kaldes egenværdien

Ligning (1.3.14) kan også skrives som

$$\phi'(\tau) \pm a1^2\phi(\tau) = 0 \quad (1.3.15)$$

$$\psi''(x) \pm 1^2\psi(x) = 0 \quad (1.3.16)$$

Løsningen af de to lineære differentialligninger med konstante koefficienter giver henholdsvis

$$\phi(\tau) = C_1 e^{-a1^2\tau} \quad (1.3.17)$$

$$\psi(x) = C_2 \cos 1x + C_3 \sin 1x \quad (1.3.18)$$

Da det oprindeligt blev antaget at

$$\theta = \phi(\tau) \cdot \psi(x)$$

bliver den endelige løsning

$$\theta = e^{-a1^2\tau} [C_2 \cos 1x + C_3 \sin 1x] \quad (1.3.19)$$

hvor C_2 og C_3 er integrationskonstanter, som kan bestemmes udfra randbetingelserne givet i ligningerne (1.3.3) - (1.3.5).

Gröber, Erk og Grigull [17] angiver, at integrationskonstanterne C_2 og C_3 kan antage værdier fra $-\infty$ til $+\infty$, men l -værdierne er begrænset af ligningen

$$\operatorname{tg} lL = \frac{lL}{\frac{a}{lL}} = \frac{l^2}{a} \quad (1.3.20)$$

1.4 Numerisk løsning af Fourier's varmeledningsligning

Forudsætningerne for en eksakt matematisk løsning af varmeledningsligningen vil næsten aldrig være tilstede. I praksis vil man derfor være henvist til at benytte en numerisk metode, hvoraf der i litteraturen findes mange eksempler.

Til brug for beregninger af temperaturer, varme- og kølebehov i såvel rum som bygninger har Hans Lund [18] udarbejdet et fortran EDB-program, der som grundlag har den metode, der er opstillet af Bo Andersen [19], der igen er baseret på arbejde udført af Bo Adamson ved Lunds tekniske Højskole [20].

Grundprincipperne i de tre beregningsmetoder er stort set de samme, idet Smidt's grafiske metode, som er beskrevet af P. Becher [3], har fundet anvendelse ved bestemmelse af temperaturer og varmeoverførsel. At de tre nævnte beregningsmetoder alligevel er forskellige, beror på de forenklinger, der er foretaget, samt valgte konstanter (f.eks. varmeovergangsmodstande). Desuden er der forskel på den valgte regneteknik. Således er Bo Adamsons metode beregnet til både EDB-beregninger og almindelig håndregning, mens både Bo Andersens og Hans Lunds metode indeholder beregningsudtryk som differensligninger, der gør, at brug af EDB-beregning er mest bekvemt.

1.5 Rummodellen

Det termiske indeklima i et rum afhænger af mange parametre, hvoraf de væsentligste er

1. Varmetilførsel til rummet fra varmeanlæg
2. - - - - lys, personer, maskiner m.m.
3. Transmission af solenergi gennem vinduer, vægge og tag.
4. Varmetab fra rummet via ventilationsanlæg
5. - - - - klimaskærmen
6. - - - - skillevægge
7. Rummets varmeakkumuleringsevne

Samspillet mellem punkterne 1 - 7 giver rummets varmebalance, der skematisk er vist på fig. 1.5.1

1.5.1 Varmeafgivelse i rummet

Herunder hører varmeafgivelse fra varmeanlæg, der dels som konvektiv varme tilføres luften, og dels som stråling tilføres overfladerne. Fordelingen mellem konvektion og stråling afhænger meget af opvarmningsformen. Således vil konvektionsdelen være helt dominerende for luftvarmeanlæg, mens den anden ydergrænse (opvarmning med strålevarme) har strålingsdelen som den dominerende. Derimellem findes en lang række opvarmningsformer, der udgør størstedelen af de varmeanlæg, der eksisterer i dag.

I rummet afgives desuden varme fra personer, lys, maskiner, TV, komfurer m.v., som giver et ikke ubetydeligt gratis varmetilskud til rummet. Gratisvarmen fordeles ligeledes dels konvektivt til rumluften og dels som stråling til overfladerne. Fordelingen mellem de to bidrag afhænger af varmekildens art. Således angiver N.F. Bisgård [21], at for en normalperson med lavt eller mid-

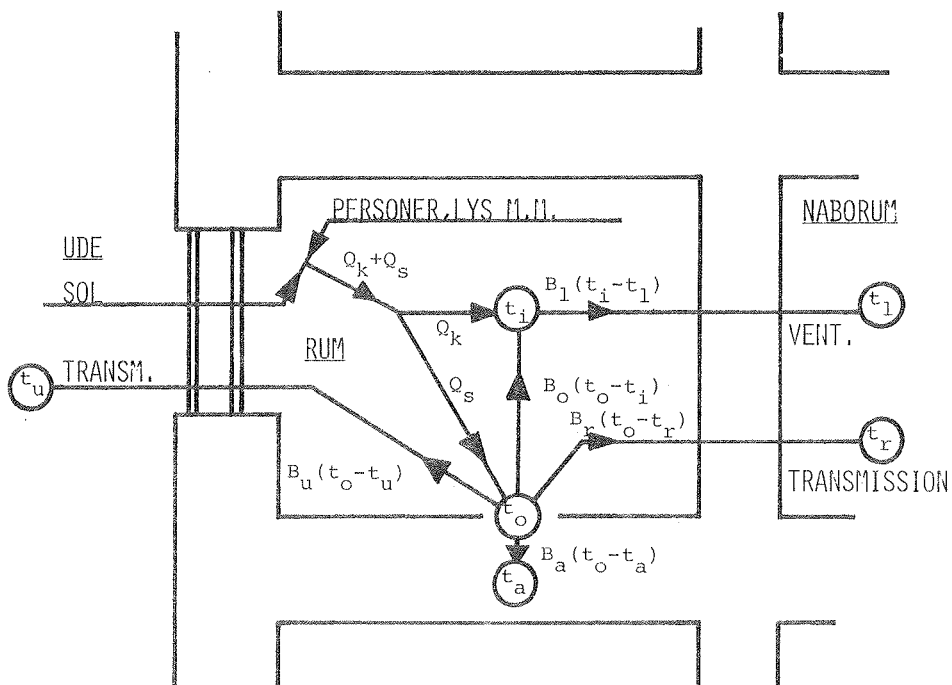


Fig. 1.5.1. RUMMODEL til beregning af varmebalance som angivet af Bo Andersen [18].

del aktivitetsniveau, vil varmeafgivelsen ved konvektion og stråling omtrent være ens under forudsætning af, at omgivelsernes lufthastighed er lav d.v.s. mindre end 0,1 m/s. Ved højt aktivitetsniveau eller ved større lufthastigheder vil konvektionsdelen blive den dominerende, som følge af en forøget lufthastighed ved kropsoverfladen.

1.5.2 Tilskud fra solenergi

Gennem vinduer, vægge og tag tilføres rummet energi fra det indfaldende sollys. Heraf udgør transmissionen gennem vinduer langt den største del, og også denne form for gratis varmetilskud giver et væsentligt bidrag til rummets varmebalance. Solstrålingen gennem vinduerne tilføres primært overfladerne ved direkte stråling. Hvor meget solstråling, der tilføres et rum, er der nærmere redegjort for i afsnit 0.5.

1.5.3 Transmissionstab til det fri

Som følge af temperaturdifferensen mellem rumluften og udeluften, vil der gennem rummets ydervægge og tag ske en varmetransport, som størstedelen af året vil være årsag til et varmetab fra rummet til omgivelserne. Varmestrømmen kan udtrykkes ved den almindelig kendte ligning:

$$Q = kA\Delta t \quad W \quad (1.5.1)$$

der udtrykker, at varmemestrømmen Q afhænger af konstruktionens varmeisoleringsevne - repræsenteret ved varmetransmissionskoefficienten k - af arealet A og af temperaturdifferensen Δt . For et givet rum, vil det medføre, at alene Δt er afgørende for størrelsen af Q , idet k og A er fastlagt på forhånd. Dog bør det nævnes, at det kun er beregningsmæssigt, at k er en konstant. k -værdien indeholder nemlig bl.a. varmeovergangsmodstandstallene udvendigt og indvendigt, og disse varie-

rer med temperatur og lufthastighed, som omtalt i afsnit 0.1. For en velisoleret bygningskonstruktion med f.eks. 10 cm mineraluld, vil variationen i overgangsmodstandene dog kun bevirke en ændring af størrelsesordenen under 10%. Da det desuden vil være forbundet med store vanskeligheder at opstille brugbare udtryk for overgangsmodstandenes variation, benyttes i praksis konstante værdier, som angivet i Ingeniørforeningens Varmetabsregler [6].

1.5.4 Varmeudveksling med naborum

Dette vil på samme måde som tabet til det fri kunne beregnes af ligning (1.5.1). Ofte er der tale om et tilskud i stedet for et tab. I de fleste tilfælde er det dog en varmetransport, der er beskeden i forhold til varmetransporten mellem rummet og det fri.

1.5.5 Varmetransport ved ventilation

Fra rumluften bortføres der varme via ventilationsluften. Tabet er proportionalt med temperaturdifferensen mellem rumluft og ventilationsluft, og er iøvrigt bestemt af luftmængden, luftens massefylde og dens varmekapacitet, udtrykt ved ligningen

$$Q_{\text{vent}} = \rho \cdot c_p \cdot V \cdot n \cdot \Delta t \quad (1.5.2)$$

hvor

ρ er luftens massefylde i kg/m^3

c_p er luftens varmekapacitet i $\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$

V er rummets volumen m^3

n er luftskiftet i h^{-1}

Δt er temperaturdifferensen mellem rumluft og ventilationsluft i $^\circ\text{C}$.

ρ og c_p , der er temperaturafhængige, skal indsættes med værdierne ved ventilationsluftens temperatur. Det vil

som regel betyde, at både ρ og c_p skal varieres, men i praksis fastsættes konstante værdier svarende til en middeltemperatur af ventilationsluften.

1.6 Grundlaget for rummets varmebalanceligninger

Til bestemmelse af temperaturerne i rummet kan der opstilles et antal varmebalanceligninger, nemlig

1. for rumluften
2. for overfladerne
3. for hvert snit der lægges i vægge, tag og gulv parallelt med overfladerne.

For rumluften benyttes én varmebalanceligning, idet det antages, at rumtemperaturen er ens overalt, og at den varme den tilføres, henholdsvis afgives fra luften, fordeles ligeligt. I de fleste praktiske tilfælde vil disse antagelser stemme godt overens med de faktiske forhold.

Overfladernes varmebalance beskrives ligeledes ved én ligning, idet de ovennævnte antagelser vedrørende temperatur og varmefordeling også ligger til grund for denne forenkling. Hertil skal knyttes en kommentar vedrørende solindfaldet gennem vinduerne. Det direkte sollys vil kun ramme en begrænset del af de indvendige overflader. For almindeligt forekommende flader i rum, vil 20 - 80% af solvarmen absorberes, mens den resterende del reflekteres diffust til de øvrige flader. Imellem fladerne vil der være en strålingsudveksling af langbølget varmestråling, for hvilken de fleste almindelige rumoverflader kan anses for strålingsmæssigt sorte. Den samlede strålingsudveksling fladerne imellem (delvis refleksion af kortbølget lys og langbølget varmestråling) udjævner de temperaturforskelle, der er mellem fladerne, og samtidig vil det direkte sollys fordeles næsten ligeligt til alle overflader.

Vedrørende punkt 3 opnås de bedste resultater, hvis hver bygningskonstruktion deles ved at indlægge uendelig mange snit. Beregningerne vil derved blive et spørgsmål om at løse Fourier's varmeledningsligning. Som nævnt i afsnit 1.4 vil dette som regel ikke kunne lade sig gøre i praksis, idet forudsætningerne (såsom grænsebetingelserne) ikke vil kunne udtrykkes så simpelt, at varmeledningsligningen kan løses.

I stedet for kan konstruktionerne deles ved færre snit, og i Bo Andersens beregningsmetode er der valgt den simpleste løsning, nemlig at hver konstruktion udgør ét lag, med ét fiktivt varmeakkumulerende lag, der principielt placeres i midten af konstruktionen. Som forklaring på, at denne forenkling ikke fører til urealistiske beregningsresultater, skal nævnes, at det for de almindelige uorganiske tørre bygningsmaterialer gælder, at varmekapaciteten c_p vil ligge omkring $0,88 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$. Tilsvarende for byggematerialer med organisk indhold vil c_p ligge omkring $1,7 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$, og varmeledningstallet λ vil være stort for tunge materialer og lille for lette materialer. For en tung væg f.eks. bestående af beton, vil varmekapaciteten $c_p \cdot \rho$ således være stor. Det samme vil varmetransmissionstallet fra overfladen til det akkumulerende lag, hvorfor temperaturforskellen er lille. Det er derfor uden større betydning, hvor det fiktive lag placeres. Er der derimod tale om en let væg, vil såvel varmekapaciteten som varmetransmissionstallet være lille. Temperaturforskellen mellem overfladen og det fiktive lag bliver stor, hvilket indikerer, at det ikke kan placeres vilkårligt. Til gengæld er den varmemængde, der kan akkumuleres lille, så hvis laget skulle have en uheldig placering, vil den begåede fejl kun indvirke lidt på de beregnede temperaturer.

Bo Andersen angiver i [19], at der i nogle tilfælde kan blive tale om at flytte det akkumulerende lag væk fra

konstruktionens midte. Således bør laget placeres før lette isoleringsmaterialer, ikke dybere end 15 cm inde i faste dele af bygningskonstruktionen og ikke dybere end svarende til et varmetransmissionstal på ca. $2,3 \text{ W/m}^2\text{°C}$. En dybere placering end her nævnt vil dog være på den sikre side.

Endvidere kan der være tale om at flytte det fiktive lag for konstruktioner, hvor tidskonstanten (udtrykt ved varmekapaciteten af det akkumulerende lag divideret med transmissionskoefficienten til det akkumulerende lag) afviger meget fra de øvrige bygningsdeles. Eksempelvis kan nævnes, at placeringen af laget som vist på fig. 1.6.1 er uheldig, hvis rummets iøvrigt har tunge materialer med en tykkelse på ca. 15 cm.

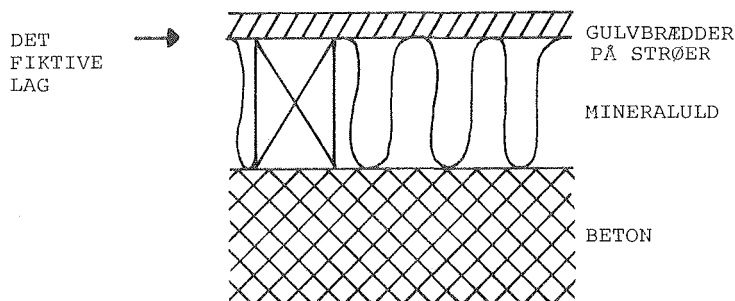


Fig. 1.6.1. Uheldig placering af det fiktive akkumuleringslag, hvis øvrige bygningsdele er tunge.

Her vil nemlig konstruktionens bidrag til rummets samlede varmetransmission fra overfladen til akkumuleringen lag være stort, mens dens bidrag til rummets samlede varmekapacitet er lille, det vil sige, at tidskonstanten bliver lille. Da samtidig de øvrige materialer er tunge og dermed har en stor tidskonstant, bliver der et skævt forhold mellem tidskonstanterne. Ved at flytte akkumuleringslaget lidt ned i mineralulden eller helt se bort fra varmestrømmen til dette, kan denne skævhed undgås.

1.7 Rumløftens varmebalance

Den samlede varmetilførsel til rumluften fra personer, maskiner, lys m.v. benævnes Q_k . Endvidere vil en del varme overføres fra overfladerne ved konvektion. Pr. $^{\circ}\text{C}$ er der tale om størrelsen B_o , og ialt vil der fra overfladerne overføres $B_o(t_o - t_i) = \Sigma \alpha A(t_o - t_i)$

$$(1.7.1)$$

hvor

t_o er overfladernes temperatur i $^{\circ}\text{C}$

t_i er rumluftens temperatur i $^{\circ}\text{C}$

α er varmeovergangstallet fra overflade til luft i $\text{W/m}^2^{\circ}\text{C}$.

A er arealet i m^2

Endelig sker der et varmetab ved ventilation af størrelsen

$$c_p G(t_i - t_l) = B_l(t_i - t_l) \quad (1.7.2)$$

hvor

c_p er luftens varmekapacitet i $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$

G er luftmængden i kg/s

t_l er ventilationsluftens temperatur i $^{\circ}\text{C}$

Rumluftens varmebalance udtrykker nu, at den tilførte varme er lig den afgivne, eller

$$\underline{Q_k + B_o(t_o - t_i) = B_l(t_i - t_l)} \quad (1.7.3)$$

1.8 Overfladernes varmebalance

Den samlede tilførsel af varme til overfladerne fra sol, personer, lys m.m. betegnes med Q_s .

Fra overfladerne transmitteres der varme gennem væggene, loft og gulv enten til det fri eller til naborum. Denne varmetransport påvirkes af varmeakkumuleringen, men da størstedelen af transmissionstabet ofte sker gennem vinduerne, hvor akkumuleringen er ringe, ses der ved denne beregningsmetode bort fra dette forhold. I tilfælde, hvor denne antagelse er en for grov tilnærmelse (eksempelvis for tunge rum med store flader mod det fri) vil det beregnede varmetab til det fri blive for stort, idet akkumuleringen påvirker varmestrømmen.

Pr. $^{\circ}\text{C}$ vil der gennem vægge, loft og gulv transmitteres varmemængderne B_u til det fri og B_r til naborum. De samlede varmestrømme er så

$$B_u(t_o - t_u) = \Sigma k_u A_u(t_o - t_u) \quad (1.8.1)$$

$$B_r(t_o - t_r) = \Sigma k_r A_r(t_o - t_r) \quad (1.8.2)$$

hvor

t_o er overfladetemperaturen i $^{\circ}\text{C}$

t_u er udetemperaturen i $^{\circ}\text{C}$

t_r er temperaturen i naborum i $^{\circ}\text{C}$

A_u er overfladearealer mod det fri i m^2

A_r er overfladearealer mod naborum i m^2

k_u er transmissionstallet mod det fri (excl. det indvendige overgangsmodstandstal m_i) i $W/m^2\ ^\circ C$

k_r er transmissionstallet mod naborum (excl. det ene indvendige overgangsmodstandstal m_i) i $W/m^2\ ^\circ C$

Yderligere vil der fra overfladen ske en varmeudveksling med rumluften, der pr. $^\circ C$ benævnes B_o .

Ialt bliver denne udveksling

$$B_o(t_o - t_i) = \Sigma \alpha A(t_o - t_i) \quad (1.8.3)$$

som omtalt i afsnit 1.7, side 45.

Endelig vil der fra overfladerne overføres varme til det fiktive akkumulerende lag af størrelsen B_a $W/^\circ C$, eller ialt

$$B_a(t_o - t_a) = \Sigma k' A(t_o - t_a) \quad (1.8.4)$$

hvor

t_o er overfladetemperaturen i $^\circ C$

t_a er det fiktive akkumulerende lags temperatur i $^\circ C$

A er overfladearealet i m^2

k' er transmissionstallet for den del af konstruktionen, der ligger mellem overfladen og det fiktive lag.

Da al akkumulering finder sted i ét varmeakkumulerende lag, indeholder overfladernes varmebalanceligning ikke noget "akkumuleringsled".

Den samlede varmebalanceligning for overfladerne under ét bliver herefter

$$\begin{aligned} Q_S = & B_u(t_o - t_u) + B_r(t_o - t_r) + B_o(t_o - t_i) + \\ & B_a(t_o - t_a) \end{aligned} \quad (1.8.5)$$

1.9 Det akkumulerende lags varmebalance

Til den samlede varmeakkumulerende masse S medregnes den del af konstruktionerne, der ligger mellem det fiktive lag og overfladen. Som nævnt i afsnit 1.6. samles S i ét fiktivt lag, der antages at have samme temperatur overalt.

Fra overfladen sker der en varmeoverføring af størrelsen $B_a(t_o - t_a)$ jfr. afsnit 1.8, hvorved det varmeakkumulerende lag opvarmes. Hvis lagets temperatur når op over overfladernes temperatur, vil det atter afgive en del af den akkumulerede varme.

Størrelsen af den varmemængde, der pr. tidsenhed op-lagres i laget er

$$S \frac{\partial t_a}{\partial \tau}$$

hvor

S er varmekapaciteten i Wh/ $^{\circ}$ C

τ er tiden

Det akkumulerende lags varmebalance bliver så

$$S \frac{\partial t_a}{\partial \tau} = B_a(t_o - t_a) \quad (1.9.1)$$

1.10 Beregningsudtryk

En opsummering af afsnit 1.7, 1.8 og 1.9 giver, at det termiske system, som er skitseret på fig. 1.3.1 kan beskrives ved de tre varmebalanceligninger

$$\underline{Q_k + B_o(t_o - t_i) = B_l(t_i - t_l)} \quad (1.10.1)$$

$$\underline{Q_s = B_u(t_o - t_u) + B_r(t_o - t_r) + B_o(t_o - t_i) + B_a(t_o - t_a)} \quad (1.10.2)$$

$$\underline{S \frac{\partial t_a}{\partial \tau} = B_a(t_o - t_a)} \quad (1.10.3)$$

For at kunne løse differentialligningen (1.10.3) dels manuelt og dels ved EDB-beregning, er det nødvendigt at omforme den til en differensligning, således at

$$\partial t_a \sim t_{a,n} - t_{a,n-1}$$

$$\partial \tau \sim \Delta \tau$$

hvor

$t_{a,n}$ er temperaturen t_a efter n tidsintervaller

$\Delta \tau$ er tidsintervalllængden.

Ligning (1.10.3) bliver så for det n 'te tidsinterval

$$S \frac{(t_{a,n} - t_{a,n-1})}{\Delta \tau} = B_a(t_{o,n-1} - t_{a,n-1}) \quad (1.10.4)$$

hvoraf findes

$$t_{a,n} = t_{a,n-1} \left(1 - \frac{B_a \Delta \tau}{S}\right) + t_{o,n-1} \frac{B_a \Delta \tau}{S} \quad (1.10.5)$$

Sættes

$$\frac{B_a \Delta \tau}{S} = A_2$$

og

$$A_1 = 1 - A_2$$

fås i stedet for ligning (1.10.5), ligningen

$$t_{a,n} = A_1 t_{a,n-1} + A_2 t_{o,n-1} \quad (1.10.6)$$

Tilsvarende løses ligning (1.10.1) med hensyn til t_i i det n 'te tidsinterval, hvilket giver

$$t_{i,n}(B_o + B_1) = Q_{k,n} + B_o t_{o,n} + B_1 t_{l,n} \quad \Leftrightarrow$$

$$t_{i,n} = t_{o,n} \frac{B_o}{B_o + B_1} + t_{l,n} \frac{B_1}{B_o + B_1} + Q_{k,n} / (B_o + B_1) \quad (1.10.7)$$

Her sættes

$$\frac{B_o}{B_o + B_1} = C_1$$

$$\frac{B_1}{B_o + B_1} = 1 - \frac{B_o}{B_o + B_1} = 1 - C_1 = C_2$$

$$\frac{1}{B_o + B_1} = \frac{1}{B_o} \cdot \frac{B_o}{B_o + B_1} = \frac{C_1}{B_o} = C_3$$

Indsat i ligning (1.10.7) giver

$$t_{i,n} = C_1 t_{o,n} + C_2 t_{l,n} + C_3 Q_{k,n} \quad (1.10.8)$$

Endelig kan ligning (1.10.2) løses med hensyn til t_o i det n 'te tidsinterval

$$Q_{s,n} = B_u(t_{o,n} - t_{u,n}) + B_r(t_{o,n} - t_{r,n}) + B_o(t_{o,n} - t_{i,n})$$

$$+ B_a(t_{o,n} - t_{a,n}) \quad \Leftrightarrow$$

$$t_{o,n}(B_u + B_r + B_o + B_a) = Q_{s,n} + B_u \cdot t_{u,n} + B_r \cdot t_{r,n} + B_o \cdot t_{i,n} + B_a \cdot t_{a,n}$$

Heri optræder $t_{i,n}$, som er fundet i ligning (1.10.8).

Indsættes dette udtryk fås

$$t_{o,n}(B_u + B_r + B_o + B_a) - B_o(C_1 t_{o,n} + C_2 t_{l,n} + C_3 Q_{k,n}) =$$

$$Q_{s,n} + B_u t_{u,n} + B_r t_{r,n} + B_a t_{a,n} \quad \Longleftrightarrow$$

$$t_{o,n}(B_u + B_r + B_o + B_a - B_o C_1) = Q_{s,n} + B_u t_{u,n} + B_r t_{r,n}$$

$$+ B_a t_{a,n} + B_o C_2 t_{l,n} + B_o C_3 Q_{k,n} \quad \Longleftrightarrow$$

$$t_{o,n} = (B_u + B_r + B_a + B_o[1 - C_1]) = Q_{s,n} + B_u t_{u,n} +$$

$$B_r t_{r,n} + B_a t_{a,n} + B_o C_2 t_{l,n} + B_o C_3 Q_{k,n} \quad \Longleftrightarrow$$

$$t_{o,n} = \frac{B_u t_{u,n} + B_r t_{r,n} + B_a t_{a,n} + B_o C_2 t_{l,n} + B_o C_3 Q_{k,n} + Q_{s,n}}{B_u + B_r + B_a + B_o(1 - C_1)}$$

(1.10.9)

For at gøre ligningen mere overskuelig kaldes koefficienten til $t_{a,n}$, B_1 , hvor

$$B_1 = \frac{B_a}{B_u + B_r + B_a + \frac{B_o B_1}{B_o + B_1}}$$

Koefficienterne til $t_{r,n}$ og $t_{u,n}$ kaldes tilsvarende B_2 og B_3 , hvor

$$B_2 = \frac{B_r B_1}{B_a}$$

$$B_3 = \frac{B_u B_1}{B_a}$$

For $t_{1,n}$ er koefficienten $B_0 C_2$ som sættes lig B_4

$$B_4 = \left[B_0 \frac{B_1}{B_0 + B_1} \right] / \left(B_u + B_r + B_a + \frac{B_0 B_1}{B_0 + B_1} \right) \quad \Leftrightarrow$$

$$B_4 = 1 - \left[B_r + B_a + B_u \right] / \left(B_u + B_r + B_a + \frac{B_0 B_1}{B_0 + B_1} \right) \quad \Leftrightarrow$$

$$B_4 = 1 - B_1 - B_2 - B_3$$

Koefficienterne til de sidste to led, der indeholder $Q_{k,n}$ og $Q_{s,n}$ sættes henholdsvis lig B_5 og B_6 .

Der gælder så

$$B_5 = B_0 C_3 / \left(B_u + B_r + B_a + \frac{B_0 B_1}{B_0 + B_1} \right) \quad \Leftrightarrow$$

$$B_5 = \frac{B_0}{B_0 + B_1} / \left(B_u + B_r + B_a + \frac{B_0 B_1}{B_0 + B_1} \right) \quad \Leftrightarrow$$

$$B_5 = \frac{B_4}{B_1}$$

og tilsvarende

$$B_6 = \frac{1}{B_u + B_r + B_a + \frac{B_0 B_1}{B_0 + B_1}} \quad \Leftrightarrow$$

$$B_6 = \frac{B_1}{B_a}$$

$t_{0,n}$ kan dermed udtrykkes som

$$\frac{t_{o,n} = B_1 t_{a,n} + B_2 t_{r,n} + B_3 t_{u,n} + B_4 t_{l,n} + B_5 Q_{k,n} + B_6 Q_{s,n}}{(1.10.10)}$$

Til bestemmelse af lufttemperaturen t_i , overfladetemperatur t_o og det akkumulerende lags temperatur t_a har man altså de tre ligninger

$$t_{a,n} = A_1 t_{o,n-1} + A_2 t_{o,n-1} \quad (1.10.6)$$

$$t_{i,n} = C_1 t_{o,n} + C_2 t_{l,n} + C_3 Q_{k,n} \quad (1.10.8)$$

$$t_{o,n} = B_1 t_{a,n} + B_2 t_{r,n} + B_3 t_{u,n} + B_4 t_{l,n} + B_5 Q_{k,n} + B_6 Q_{s,n} \quad (1.10.10)$$

1.11 Beregningsforudsætninger

Ved beregningernes start skal alle de konstanter, der indgår i ligningerne (1.10.6), (1.10.8) og (1.10.10), beregnes. Det betyder, at der skal foreligge kendskab til samtlige konstruktioners opbygning, til varmeovergangsmodstandstallene m_i og m_u og til ventilationsluftens mængde. Når således B_a , B_o , B_u , B_r , B_l og S er bestemt, må der vælges et tidsinterval. Eksempelvis kan nævnes, at der i Laboratoriet for Varmeisoleringens EDB-program BA4, opereres med et tidsinterval på en halv time.

Derudover vil det være nødvendigt at have kendskab til variationer i udeluftens temperatur, til temperaturen i naborum og til temperaturen af ventilationsluften. Hvis der ikke foreligger målinger, der kan benyttes, vil

man med tilstrækkelig nøjagtighed kunne benytte periodiske svingninger, således at temperaturen gentages med f.eks. et døgn mellemrum.

2. EDB-PROGRAMMET BA4

På baggrund af de beregningsudtryk, som Bo Andersen [19] har opstillet, har Hans Lund ved Laboratoriet for Varmeisolering udarbejdet et EDB-program, BA4, til bestemmelse af rumtemperaturer samt varme- og kølebehov [18].

Beregningerne, der foretages halvtimesvis, giver desuden mulighed for at få beregnet operative temperaturer. Endvidere kan indflydelsen af forskellige former for solafskærmning, ekstra vinduesisolering, varierende belastninger for ventilation, lys og andre varmekilder i rummet medtages. Sidst men ikke mindst bliver der i programmet taget hensyn til den indfaldende solstråling.

2.1 Referenceåret

Som følge af den udviklede EDB-teknik har man med BA4 mulighed for at benytte komplicerede forløb af de uden-dørs klimaparametre. De indgangsdata, der benyttes, er fra Referenceåret [16], der for et helt år giver oplysninger om en lang række klimaparametre, der måned for måned er udvalgt efter specielle kriterier (se [7]). Referenceårets data er lagret i Danmarks tekniske Højskoles EDB-anlæg, hvorfra BA4 programmet "henter" de nødvendige oplysninger.

2.2 Indgangsdata

De rumkonstanter, der benyttes, T_U , T_A , T_O , T_K og S , er identiske med konstanterne B_u , B_a , B_o , B_r og S , der benyttes i formeludtrykkene (1.10.6), (1.10.8) og (1.10.10) i afsnit 1.10 side 53. Beregninger af konstanterne sker ved hjælp af Ingeniørforeningens Var-

metabsregler [6], eller udfra et faktisk kendskab til materialeparametrene.

Af tidsafhængige variable, er der mulighed for at medtage:

AIRTEMP 1	:	Ønsket rumlufttemperatur
AIRTEMP 3	:	Temperatur af naborum
AIRTEMP 4	:	Temperatur af ventilationsluft
FLUX 1-10	:	Varme fra varmekilder i rummet (el-belysning, komfurer m.v.)
QMAX	:	Maksimal effekt, der kan afgives til rumret.
QMIN	:	Maksimal køleeffekt, med angivelse af den temperatur, der skal køles ned til
VENT	:	Varmeudveksling ved tvungen ventilation
INFILT	:	Varmeudveksling ved naturlig ventilation

For disse variable er der mulighed for frit at vælge en døgnkurve, blot med angivelse af konstante værdier i selvvalgte tidsintervaller. Der interpoleres lineært mellem de angivne tidspunkter.

De øvrige indgangsdata, der kan benyttes, er:

VINDUE	:	Op til ti vinduer kan specificeres med angivelse af glasareal og orientering
HORISONT	:	Fjerner den direkte solstråling, når solhøjden er mindre end den angivne værdi.
FORMAT	:	Vinduesdimensioner
UDHAENG	}	Reducerer solindfaldet, som følge af skyggedannelse
RIBBE		
BEV.AFSK	:	Bevægelig solafskærmning, der reducerer solindfaldet

FORDEL	:	Fordeling af solindfald på konvektion og stråling
VAEG	}	Beregner varmestrøm til rummet hydrøren-
TAG		de fra sol på vægge og tag
B.ISOL	:	Bevægelig vinduesisolering (f.eks. skodder). Reducerer TU
ELLYS	:	"Tænder" lyset, når solintensiteten bliver lavere end specificeret
MAX-VENT	:	Forøger luftskiftet (f.eks. ved åbning af vindue
OPERATIV	:	Giver udskrift af beregnet temperatur

2.3 Beregninger

Beregningerne styres fra hovedprogrammet MAIN, hvor også beregninger af temperaturer samt varme- og kølebehov finder sted. Fra MAIN kaldes underprogrammerne:

RUMDAT	:	Indlæser rumdata for den opstillede rummodel
EIND	:	Indlæser de tidsafhængige variable og udregner halvtimesværdier ved lineær interpolation
SFLUX	:	Udskriver de tidsafhængige variable
DISKL	:	Indlæser data fra Referenceåret
SUNR	:	Beregner solens stilling i forhold til rummodellen
SOLIN	:	Beregner solindfaldet
INPOL	:	Omsætter Referenceårets udetemperatur til 48 halvtimesværdier pr. døgn
ADM2	:	Beregner maksimalværdien af operativtemperatur og sorterer de enkelte temperaturer til brug for månedsfrekvenser

- UDSKR : Styrer udskriften af de forskellige temperaturer
- FRAKT : Beregner 10%, 50% og 90% fraktiler, d.v.s. de temperaturer, ved hvilken 10%, 50% henholdsvis 90% af halvtimesværdierne ligger under.

For en mere detaljeret beskrivelse af BA4 henvises til:
Program BA4, til beregning af rumtemperaturer, samt varme- og kølebehov [16].

3. BEREGNINGER MED BA4-PROGRAMMET

Det skal indledningsvis bemærkes, at alle beregninger, sammenligning af beregninger og konklusioner udelukkende omfatter de energimæssige aspekter. Forholdene omkring temperaturer og køling er stort set udeladt, idet der dog ved beregningerne er sat en maximalgrænse for rumlufttemperaturen på 24°C. Den energitilførsel, der evt. måtte forårsage en højere temperatur, fjernes fra rummet uden at det specificeres hvordan. Når der er foretaget disse indskrænkninger, er det, fordi de krav og ønsker, der stilles til temperaturniveauet, er vidt forskellige. Forhold som personers beklædning og aktivitetsniveau, samt rummenes anvendelsesområde spiller en stor rolle ved fastsættelsen af den optimale rumtemperatur. Det ville føre altfor vidt at medtage alle disse forskellige kravværdier, hvorfor der er valgt at lægge én fast maximaltemperatur, der vil opfylde kravene i en lang række forskellige typer opholdsrum.

Hovedformålet med i udstrakt grad at udføre beregninger med BA4 har været at søge gennemført en beregningsmæssig analyse af energiforbruget til rumopvarmning i forskellige rumtyper. Der er specielt blevet lagt vægt på at få klarlagt, hvorledes vinduesstørrelsen og vinduesorienteringen påvirker energiforbruget i et antal rummodeller, der er blevet "opbygget" til brug for BA4-beregningerne.

I modellerne er energiforbruget i fyringssæsonen søgt bragt så langt ned som muligt uden hensyn til de økonomiske aspekter. D.v.s., at der ikke er foretaget nogen afvejning af, om de energibesparende foranstaltninger er økonomisk fordelagtige eller ej.

De parametre, der er blevet varieret for modellerne er:

- a) Konstruktionernes varmeisoleringssevne
- b) Konstruktionernes varmeakkumulerende masse
- c) Gratisvarmens belastning
- d) Mobil vinduesisolering (f.eks. skodder)

3.1 Rummodeltyper

Hovedtyperne af rummodeller er følgende:

- 1. Ekstremt tungt rum med 50 cm beton overalt
- 2. Letbetonrum med 30 cm letbeton overalt
- 3. Let velisoleret rum
- 4. Rum der i opbygning svarer til mange moderne én-familiehuse.
- 5. Velisoleret rum med "indlagt" akkumuleringsmasse

Figurerne 3.1.1 - 3.1.5 viser opbygningen af de 5 hovedmodeller.

Modellerne 1,2 og 3 er specielle i deres opbygning og kan ikke med nogen rimelighed siges at være gængs byggeskik. Når de alligevel er taget med, er det for at få dækket hele spektret med hensyn til den akkumulerende masse. Model 1 er således "den tunge ydergrænse", model 2 omtrent midt i og model 3 "den lette ydergrænse". Beregningerne med disse tre rummodeller er derfor kun gennemført for varierende vinduesareal uden varmebelastning fra personer, lys m.v. og uden ekstra vinduesisolering. Rummodel 4 er valgt svarende til opbygningen af et almindeligt dansk parcelhus i dag, mens rummodel 5 repræsenterer fremtiden, forstået på den måde, at rummodel tre's velisolerede konstruktion ligger til grund for modellen, der derpå er søgt optimeret med hensyn til energiforbruget.

Alle 5 modeller er ens i konstruktionsmål, men der ligger ikke nogen dybere filosofi bag de valgte rummål.

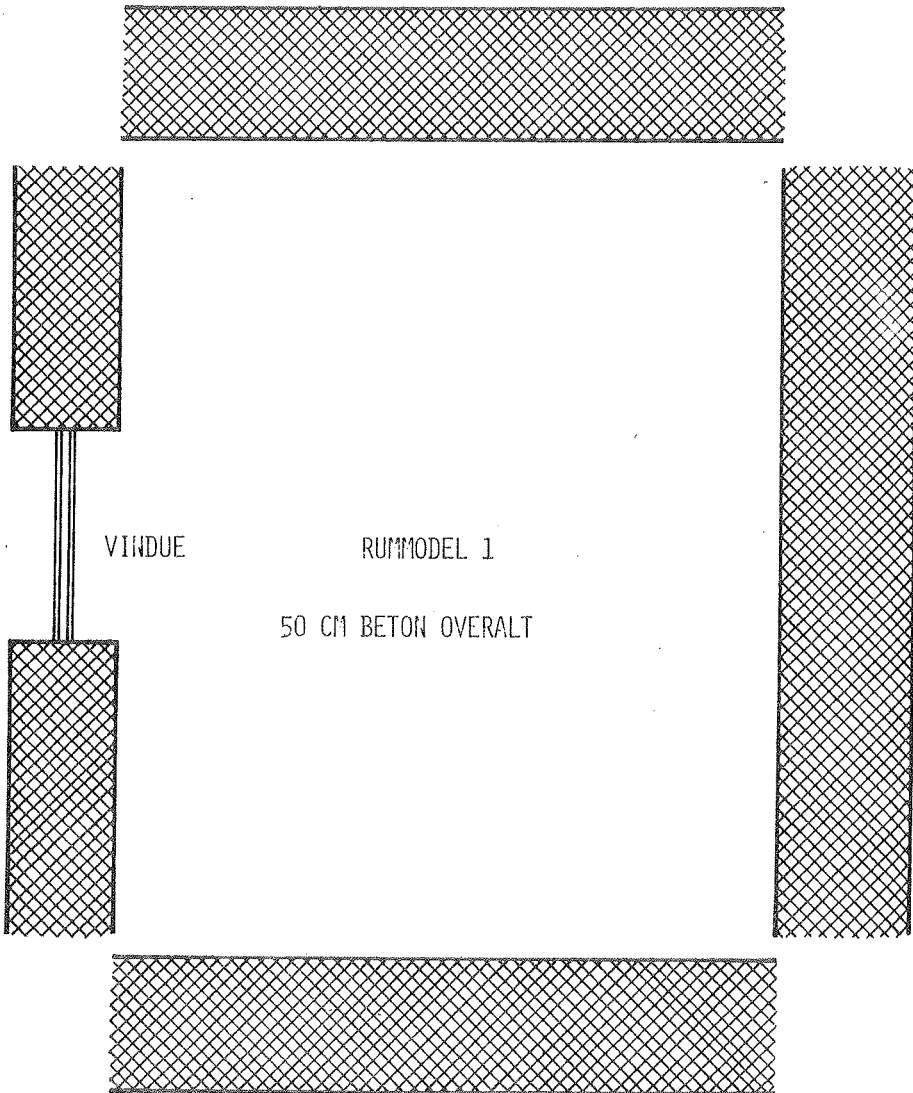


Fig. 3.1.1. Skitse af RUMMODEL 1

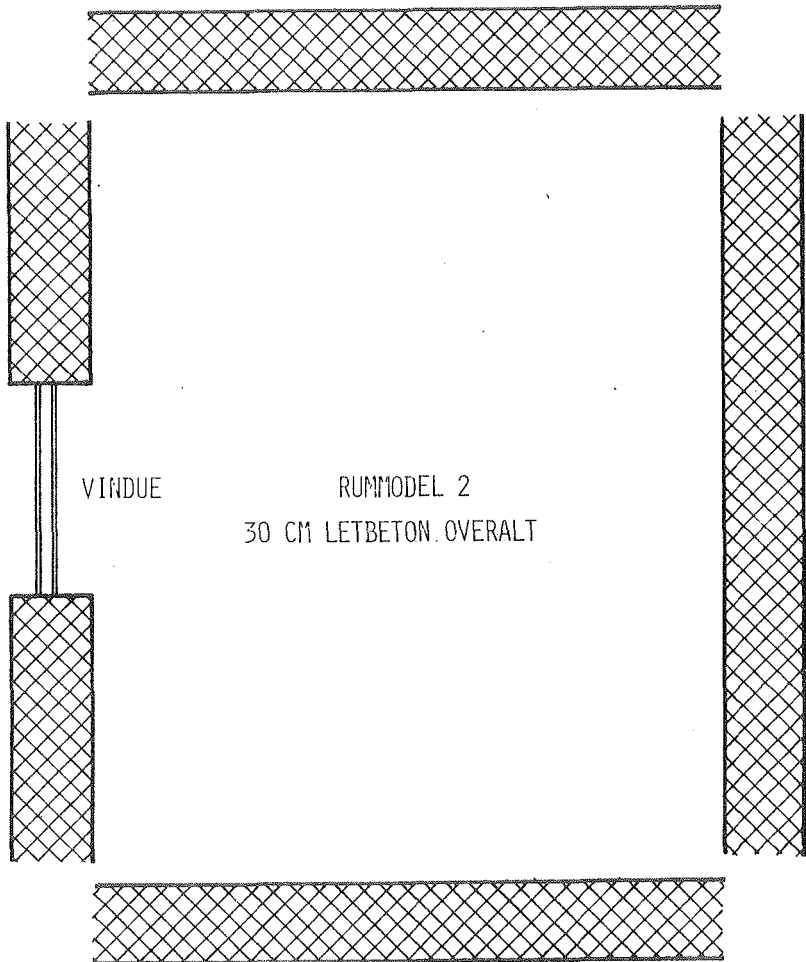


Fig. 3.1.2. Skitse af RUMMODEL 2

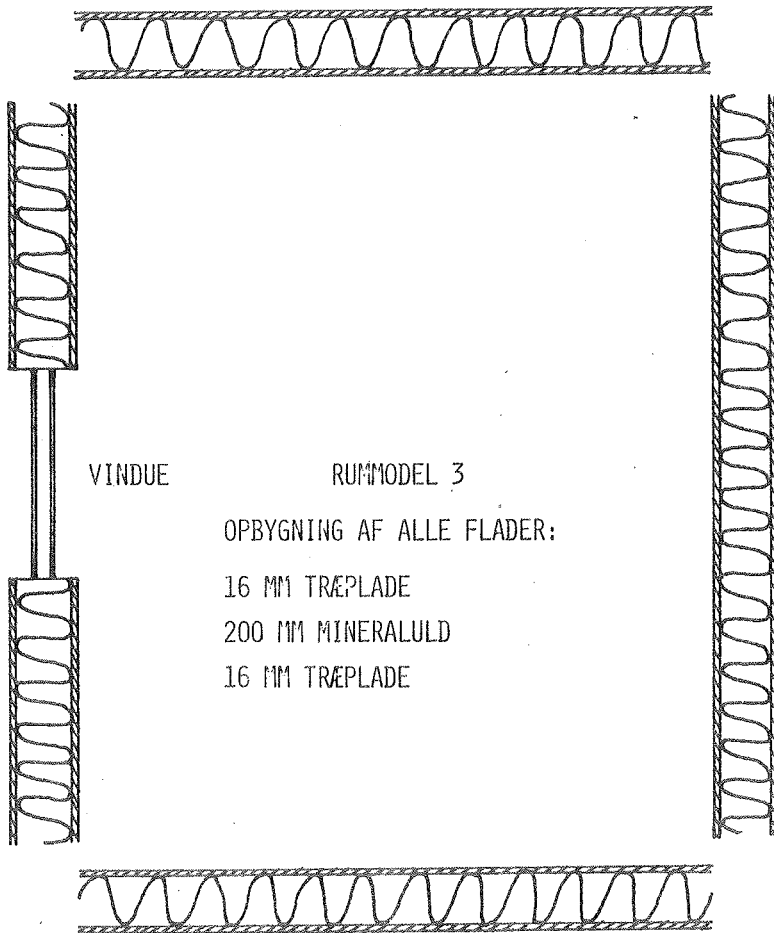


Fig. 3.1.3 Skitse af rummodel 3.

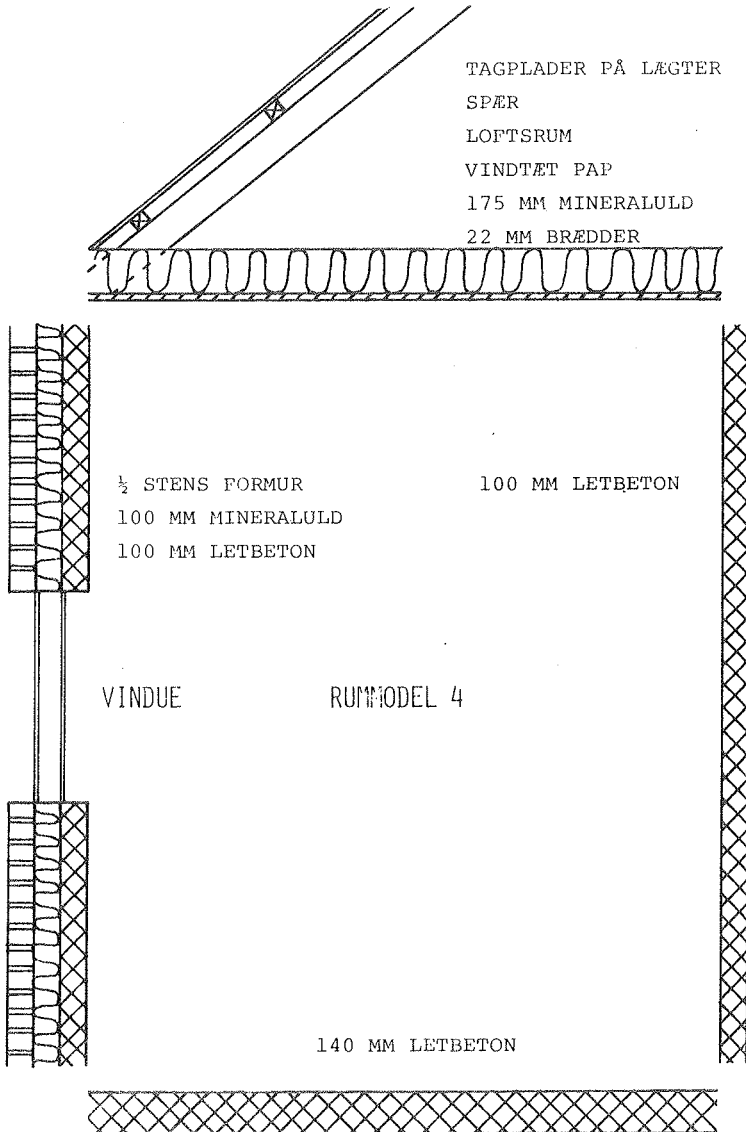


Fig. 3.1.4. Skitse af RUMMODEL 4

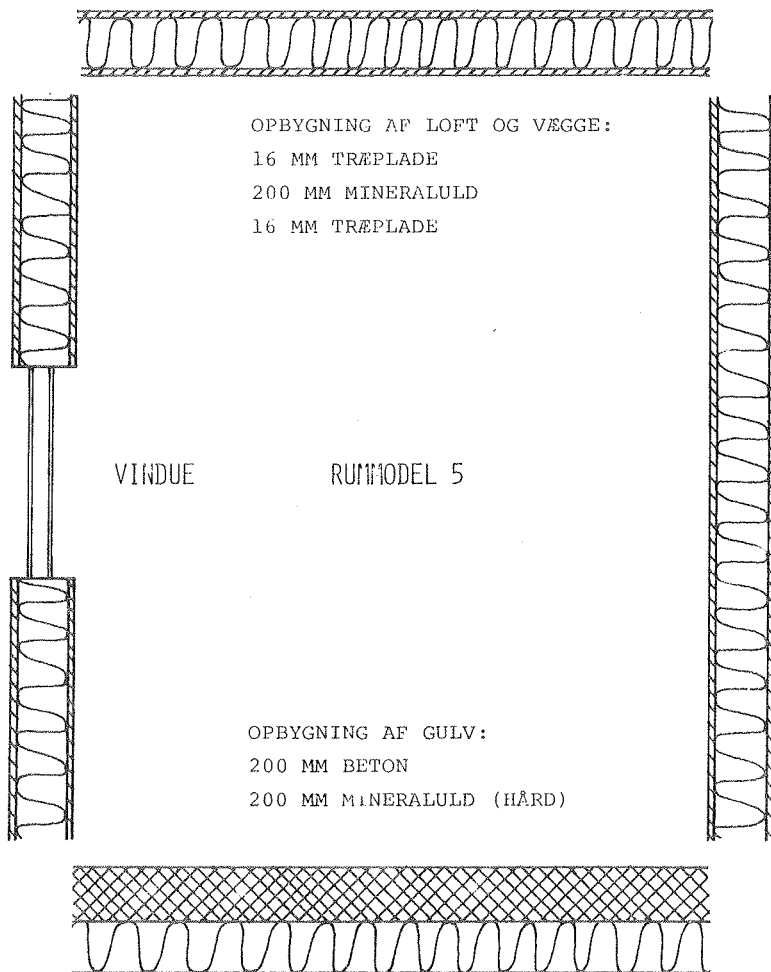


Fig. 3.1.5. Skitse af RUMMODEL 5

Dog er der søgt opnået et rimeligt forhold mellem rum bredde og rumdybde, ligesom rumhøjden overholder de krav, der er opstillet i Bygningsreglementet [22]. Fig. 3.1.6 viser rummodellernes dimensioner.

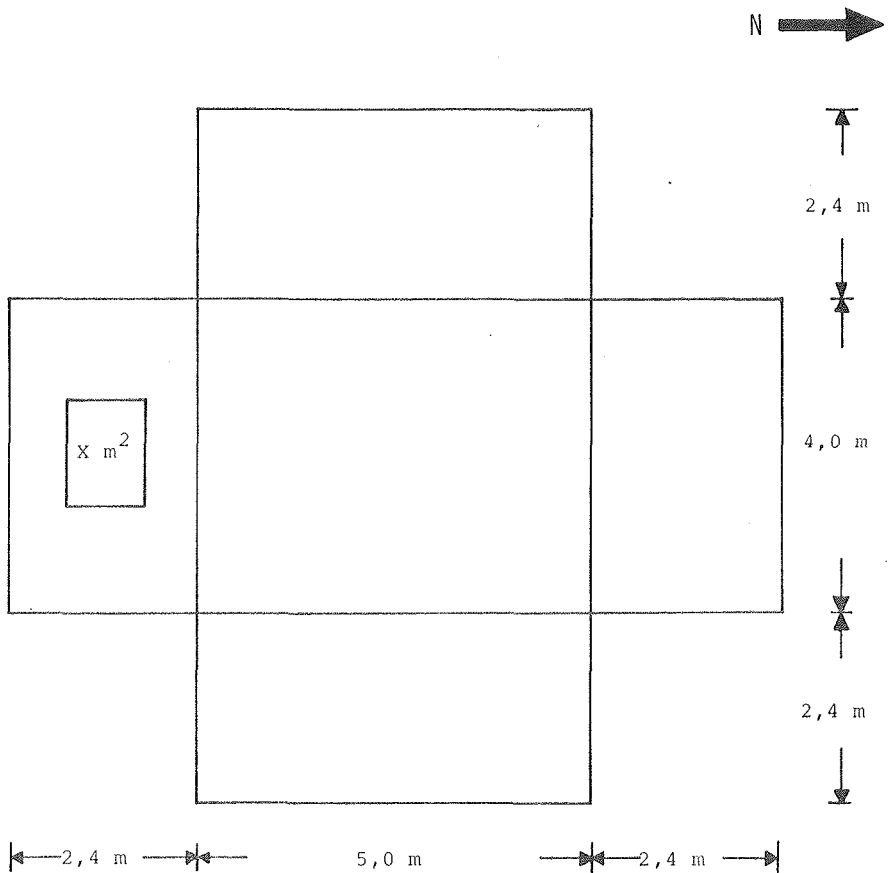


Fig. 3.1.6 Rumsmål for RUMMODEL 1-5

3.2 Materialeparametre

De forskellige byggematerialers parametre såsom rumvægt, varmfylde, varmeledningsevne m.v. varierer med temperaturen og fugtigheden. Det korrekte ville have været at indbygge disse variationer i BA4, hvilket imidlertid var en uoverkommelig opgave alene af den grund, at fugtvariationerne ikke er kendte. Desuden ville beregningerne blive uhyre komplicerede. Derfor er der valgt at benytte konstante værdier af de forskellige materialeparametre, vel at mærke ved en sådan temperatur eller i et sådant temperaturinterval, at det i forbindelse med beregningerne forekommer rimeligt.

De benyttede konstante materialeværdier er angivet i skemaet fig. 3.2.1, hvor der ligeledes er foretaget en beregning af varmemodstand og varmekapacitet for forskellige tykkelser af forskellige materialer. For mineralulden er desuden angivet modstandstallet ved forskellige indhold af træ i de pågældende lagopbygninger beregnet efter Ingeniørforeningens Varmetabsregler [6]. Varmekapaciteten for mineraluld er ikke angivet, da den er så ringe, at der kan ses bort fra den.

Materialekonstanterne er taget fra:

For λ 's vedkommende: Ingeniørforeningens Varmetabsregler [6].

For γ og c 's - : Håndbog fra Glent og Co.[23]

VARMEMODSTAND				VARMEKAPACITET		
	λ	e	m	γ	c	$\gamma \cdot c$
MATERIALE	$W/m^{\circ}C$	m	$m^2^{\circ}C/W$	Kg/m^3	$Wh/Kg^{\circ}C$	$Wh/m^3^{\circ}C$
Tegl $\frac{1}{2}$ sten	0,55	0,11	0,20	1600	0,23	368
	1 sten	0,55	0,22			
Beton	1,5	0,07	0,05	2300	0,24	552
	1,5	0,10	0,07			
	1,5	0,15	0,10			
	1,5	0,30	0,20			
	1,5	0,50	0,33			
Letbeton	0,20	1,10	0,50	700	0,46	322
	0,25	0,15	0,60	560	0,46	258
	0,25	0,30	1,20	560	0,46	258
Mineraluld	0% træ	0,038	0,10			
		0,038	0,20			
	5% træ	0,038	0,10			
		0,038	0,20			
	10% træ	0,038	0,10			
		0,038	0,20			
Træ $\perp$ på fibre	0,14	0,016	0,11	700	0,70	490
	0,14	0,022	0,16			

Fig. 3.2.1 Oversigt over de benyttede materialeparametre.

3.3 Beregningsforudsætninger

For en del af de rumdata og variable parametre, der benyttes som indputdata til BA4, har det været hensigtsmæssigt at benytte samme konstante værdier ved samtlige beregninger. Samtidig er der dog lagt vægt på, at disse forenklinger med rimelighed kan siges at svare til forholdene for et tilsvarende rum i praksis.

3.3.1 Temperaturer

Den ønskede rumlufttemperatur (AIRTEMP 1), som er den laveste tilladelige temperatur i rummet, er sat til 22°C. Rummets varmeanlæg skal opretholde denne minimumstemperatur, men tilskud af varme fra sol, lys, personer m.v. kan meget vel få temperaturen til at stige over de 22°C. Bliver temperaturstigningen for kraftig, vil man normalt ventilere på en eller anden måde. I BA4 kan det bl.a. gøres ved at specificere QMIN = en maximaltemperatur. Denne er her sat til 24°C, og programmet beregner den varmemængde, der skal fjernes for at holde rumlufttemperaturen nede under 24°C.

Lufttemperaturen i naborum (AIRTEMP 3) antages at følge temperaturen i selve beregningsrummet eksakt. Da denne forudsætning ikke kan specificeres direkte som indgangsdata, er der valgt at sætte TK = varmetransmissionen fra rummodel til naborum pr. °C temperaturdifferens til identisk 0. Dette kan naturligvis kun gælde for modelberegninger.

Temperaturen af infiltrationsluften (AIRTEMP 4) holdes ikke konstant, men der er regnet med, at den følger udeluftens temperatur året igennem. Dette må anses for at være en rimelig antagelse, da størstedelen af infiltrationsluften trænger ind ved utætte døre og vinduer, hvor der ikke vil ske nogen væsentlig opvarmning af luften, før den opblandes med rumluften.

3.3.2 Vinduer

I alle de benyttede rummodeller er der kun ét vindue (d.v.s. et varierende glasareal, men kun med én orientering), og det svarer til forholdene i en meget stor procentdel af de rum, der findes. Varmekapaciteten af glasset er sat til 0, idet de glasmængder, der indgår i modellerne er ubetydelige sammenlignet med materialemængden i de øvrige bygningskonstruktioner.

For den overvejende del af de foretagne beregninger har vinduesorienteringen været:

Nord (-180° fra syd)

Øst (- 90° fra syd)

Syd (0° fra syd)

Når der ikke er foretaget beregninger for vest, hænger det sammen med, at den beregningsmæssige forskel på øst og vest er så lille, at de opnåede resultater for øst uden videre også kan gælde for vest. Dette fremgår af fig. 3.3.1, der viser resultatet af beregninger med rummodel 3 (let rum) for vinduesorientering øst og vest. Energiforbruget er angivet for fyringssæsonen (OKT - APRIL).

3.3.3 Gratisvarmen til rummet

Vedrørende gratisvarmen (FLUX 1 -10) er der regnet med en belysningseffekt som angivet på fig. 3.3.2. Dog er der i programmet indbygget en automatik, så belysningen kun kobles ind, når solintensiteten gennem vinduet er under et vist niveau, som her er valgt til 50 W/m². Denne værdi er skønnet udfra egne iagttagelser og målinger af solintensiteten i et nordvendt rum. For personvarmen er der valgt den samme belastningskurve med en samlet varmetilførsel til rummet på 3,5 kWh pr. døgn. Der er regnet med, at der i dette tidsrum til stadighed opholder sig to personer i rummet (hver med et aktivitetsniveau

Vinduesareal	QTOT, øst	QTOT, vest	Afvigelse øst - vest
m ²	kWh	kWh	%
0	1978,3	1977,9	0,02
1	2082,0	2080,6	0,07
2	2209,8	2214,4	0,21
3	2363,9	2368,8	-0,21
4	2526,3	2531,5	-0,21
5	2694,2	2698,9	-0,17
6	2865,2	2668,6	-0,12
7	3038,3	3039,3	-0,03
8	3211,4	3210,1	0,04
9	3384,5	3380,5	0,12

Fig. 3.3.1 Rummodel 3. Forskel på energiforbruget ved
østvendt henholdsvis vestvendt vindue.

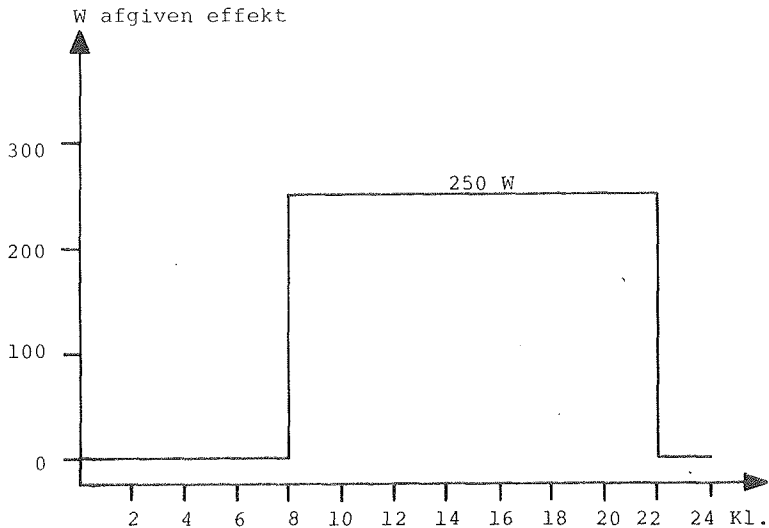


Fig 3.3.2. Belastningskurve for person- og elvarme

på 125 W). Der er her tænkt på, at rummet kan være en dagligstue, hvor en familie ganske vist færdes ud og ind af, men at der hele tiden er to familiemedlemmer til stede i stuen.

3.3.4 Varmeanlægget

Den maksimale effekt, der kan tilføres rummet er sat til den konstante værdi 3000 W. Til grund herfor ligger en overslagsberegning af det maksimale varmetab:

For det ekstremt tunge rum er $TU = 84,9 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$ for 10 m^2 glas, hvilken er den maksimale værdi af TU for alle rummodeller. Hertil skal lægges det naturlige luftskifte på $16 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$ (se s.73 i dette afsnit). Det samlede maksimale varmetab bliver så

$$Q_{\max} = 84,9 + 16 \sim 101,0 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

Da den lavest forekommende udetemperatur i Referenceåret [16] er $-15,9^{\circ}\text{C}$ (d. 27/12), vil det sige, at $Q_{\max}$ bliver 3824 W. Idet der tages hensyn til, at lave

udetemperaturer ofte er kombineret med klart vejr, er det skønnet, at $Q_{\max}$ ikke vil overstige 3000 W. (Beregningerne har senere vist, at $Q_{\max}$ ikke overstiger de 3000 W). Al varmen antages tilført rumluften (konvektiv varmeafgivelse), hvilket med god tilnærmelse er tilfældet for varmeanlæg med konvektorer. Beregningsmetoden beregner varmeforbruget svarende til, at varmeanlægget kun afgiver varme, når rumtemperaturen er under AIRTEMP 1. D.v.s. at anlægget skal virke hurtigt, således at traditionelle vandvarmeanlæg ikke kan benyttes. Et elvarmeanlæg derimod opfylder dette krav, og da det samtidig omtrent opfylder kravet om 100% konvektiv varmeafgivelse, vil det være rimeligt at antage, at det varmeanlæg, der er i forbindelse med rummodellerne, er et el-varmeanlæg med konvektorer.

3.3.5 Det naturlige luftskifte

Det naturlige luftskifte (INFILT) er sat til én gang i timen, hvilket ikke er nogen urealistisk værdi i almindelige huse i dag. Det varmetab, der derved bliver fra rummet kan beregnes af:

$$Q_{\text{INFILT}} = V \cdot \gamma \cdot c \cdot n \quad \text{W/}^{\circ}\text{C}$$

Stofværdierne γ og c for infiltrationsluften skal indsættes ved den temperatur luften har, når den kommer ind i rummet ($\text{AIRTEMP } 4 = t_{\text{ude}}$). For at forenkle beregningerne er der dog valgt at benytte stofværdierne ved 22°C (som er den ønskede rumtemperatur) og 1 atm. De indgående størrelser til beregning af Q_{INFILT} er så:

$$V = 4 \cdot 5 \cdot 2,4 = 48 \text{ m}^3 \quad (\text{se fig. 3.1.6})$$

$$\gamma = 1,197 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 1,005 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$$

$$n = 1 \text{ h}^{-1}$$

$$Q_{\text{INFILT}} = 48 \cdot 1,197 \cdot 1,005 \cdot 1000/3600 =$$

$$16,04 \text{ W/}^{\circ}\text{C} \sim 16 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

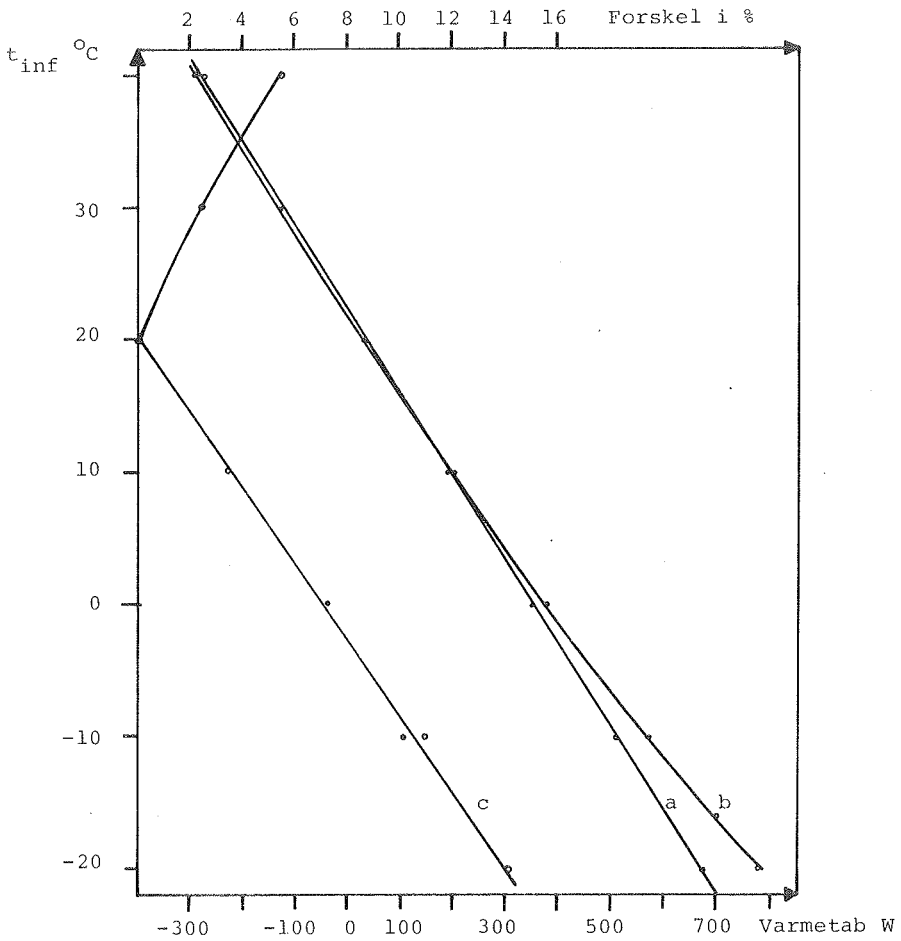


Fig. 3.3.3. Varmetab ved infiltration

Kurve a: $\gamma_{luft} = \text{konstant}$

Kurve b: γ_{luft} varierer

Kurve c: Afvigelse mellem kurve a og b i %

Den fejl der begås ved at benytte konstante stofværdier for luft ved 22°C er vist på fig. 3.3.3, hvor Q_{INFILT} er angivet som funktion af infiltrationsluftens temperatur. Der er dels angivet kurver, hvor γ varierer og dels hvor γ holdes konstant svarende til 22°C . Desuden er indtegnet kurven over den procentuelle forskel (den numeriske værdi) mellem de to kurver.

Indenfor det temperaturinterval, som udelufttemperaturen i Referenceåret spænder over ($-15,9^{\circ}\text{C}$ - $+27,4^{\circ}\text{C}$) ses det af kurverne, at den maximale fejl, der begås ved at holde γ for luft konstant (svarende til 22°C), er ca. 90 W eller ca. 13,0% (gælder for minimumstemperaturen $-15,9^{\circ}\text{C}$). Kun i mindre end 2% af referenceårets dage vil udeluftens døgnmiddeltemperatur ligge under -8°C ved hvilken den beregnede fejl er ca. 10%. Den forenkling, der gøres ved at holde γ konstant, bevirker altså en fejl på mindre end 10% af varmetabet ved naturligt luftskifte i langt den overvejende del af året.

3.3.6 Horisontafskæring

Der kan ikke opstilles nogle generelle udtryk til bestemmelse af, hvor stor en del af himmelhvelvingen, der dækkes af træer, buske, bygninger m.v.. Ved alle beregninger forudsættes det, at for solhøjder mindre end 5° er det direkte solindfald 0. Fig. 3.3.4 viser den sammenhæng mellem afstand fra rummodellen og skyggegivende genstandes højde, der giver en horisontafskæring på 5° .

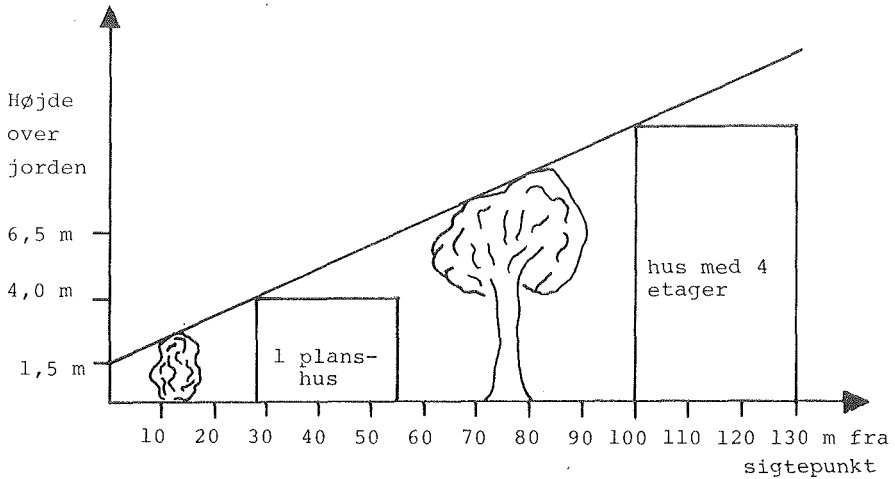


Fig. 3.3.4. Betydningen af en horisontafskæring på 5 grader.

3.3.7 "Arbejdstid"

I BA4-programmet er der indbygget en "arbejdstid" fra kl. 8.30 - 17.00. Indenfor denne periode udskrives frekvenser af rumlufttemperaturen og operativtemperaturerne. For at få overensstemmelse mellem perioden for elbelysning (FLUX 10), personvarme (FLUX 1) og udskrift af ovennævnte temperaturer, er "arbejdstiden" ændret til 08.00 - 22.00.

3.3.8 Køling

Der er ikke regnet med nogen køling i form af en ydelse fra et køleanlæg. Ved beregningerne er der specificeret en kølegrænse, der angiver, at hvis rumlufttemperaturen overskrider denne grænse, skal der fjernes varme fra rummet. Hvorledes det sker, er der ikke taget stilling til, men oplukning af vinduer er en almindelig metode. Specifikationen MAX VENT i BA4 svarer netop til oplukning af vindue og ekstra ventilation med

udeluft. Derfor kunne denne form for køling være benyttet ved beregningerne. Imidlertid giver udskriften fra BA4 ikke nogen oplysning om, hvor megen varme, der fjernes med MAX VENT. Dette kan være af interesse, hvorfor der som nævnt er valgt at benytte QMIN med angivelse af en maximalrumlufttemperatur.

3.3.9 Overgangsmodstande

Ved alle beregninger med rummodel 1.2 og 3 er der benyttet de varmeovergangsmodstande, som Ingeniørforeningens Varmetabsregler [6] angiver. D.v.s. $m_i = 0,13 \text{ m}^2\text{°C/W}$ og $m_u = 0,04 \text{ m}^2\text{°C/W}$.

Senere er det blevet oplyst, at det ville være rigtigere at benytte $m_i = 0,33 \text{ m}^2\text{°C/W}$ udfra antagelsen om, at alle overflader (undtagen vinduesflader) har samme temperatur. Der er derfor ingen stråling fladerne imellem, hvorfor dette bidrag udgår af det indvendige varmeovergangstal. I rummodellerne 4 og 5 er der derfor regnet med $m_i = 0,33$. Beregningerne med rummodel 1, 2 og 3 er ikke ændret. Baggrunden herfor er, at de tre rummodeller udmærket kan sammenlignes indbyrdes, selvom $m_i = 0,13 \text{ m}^2\text{°C/W}$ er benyttet. Derimod kan modellerne 1, 2 og 3 ikke direkte sammenlignes med 4 og 5, hvilket heller ikke har været tanken.

I forbindelse med varmeovergangsmodstandene indtager vinduet en særstilling. Transmissionstabt gennem glasarealerne regnes helt fra rumluft til udeluft. D.v.s. at både m_i og m_u indgår. Da glastemperaturen er forskellig fra overfladetemperaturen vil det være rimeligt at sætte $m_i = 0,13 \text{ m}^2\text{°C/W}$, idet der nu ikke kan ses bort fra strålingsdelen.

3.3.10 Fordeling af solindfald gennem vindue

Spørgsmålet om, hvor stor en del af den direkte indfaldende solstråling, der tilføres henholdsvis over-

fladerne og rumluften er vanskeligt at besvare. Det har ikke været muligt at finde oplysninger i litteraturen, hvorfor en vurdering er foretaget ud fra beregninger foretaget med BA4-programmet.

Med de samme rumdata og de samme variable parametre (med undtagelse af FORDEL) er der foretaget beregninger af energiforbruget til opvarmning med FORDEL varierende fra 0,0 (al varme tilføres overfladerne) til 1,0 (al varme tilføres rumluften). Beregningerne er foretaget for den 15-11-1976 for rum Vest. Resultaterne er vist på fig 3.3.5

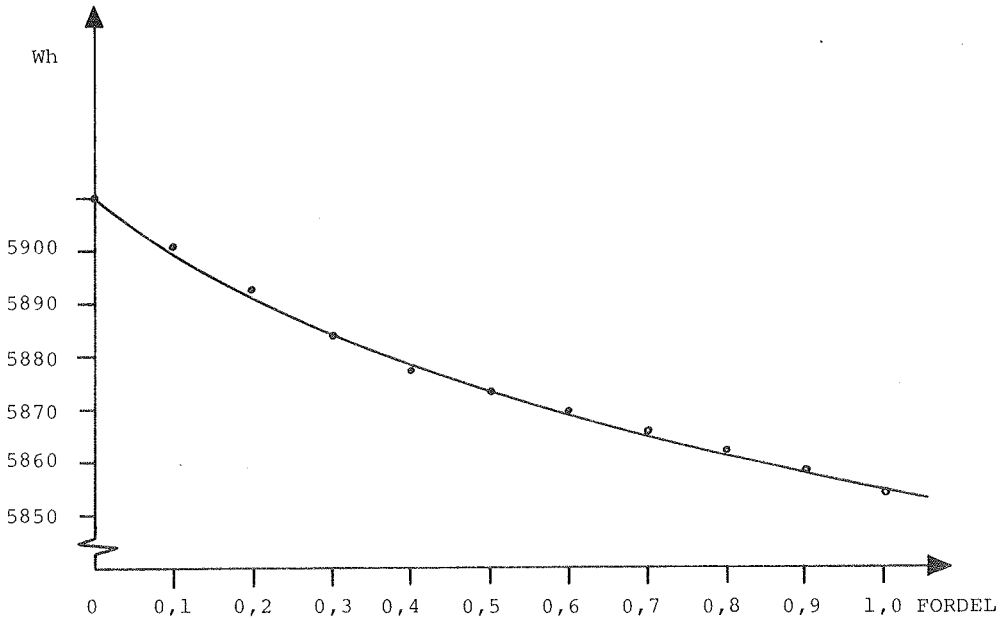


Fig. 3.3.5. Ændringen i det beregnede energiforbrug, når FORDEL varieres fra 0,0 til 1,0

Variationen i det beregnede energiforbrug ses at være beskednen. Således er forskellen mellem ydergrænserne 56 Wh, hvilket svarer til 0,9% af det beregnede forbrug. Ved at sætte FORDEL lig med 0,5 vil der altså være en usikkerhed, som i alle tilfælde er mindre end 5 o/oo. Det vil derfor være rimeligt at fastsætte FORDEL til den konstante værdi 0,5 for alle beregninger.

3.4 Placering af det varmeakkumulerende lag generelt

I afsnit 1.6 side 42 er den principielle placering af det varmeakkumulerende lag nævnt. Normalt vil det kunne placeres midt i en konstruktion, men dog før lag af isoleringsmaterialer, og ikke dybere end svarende til et varmetransmissionstal på $2,3 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$. I særlige tilfælde, hvor der bliver for store afvigelser mellem de enkelte fladers tidskonstanter, kan der desuden blive tale om at flytte akkumuleringslaget, så der bliver balance mellem TA og S for bygningsdelene

3.5 Beregning af rumdata generelt

Fra rumluften overføres varme til overfladerne (TO). Det indvendige overgangsmodstandstals størrelse er alene bestemmende for værdien af TO, idet alle arealer på forhånd er fastlagt. TO beregnes af

$$TO = \frac{1}{m_i} (A_{\text{overflader}} - A_{\text{vinduer}}) \text{ W/}^\circ\text{C} \quad (3.5.1)$$

Når vinduesarealet ikke regnes med, er det fordi der er gjort den forudsætning, at der ikke akkumuleres varme i glasset. Transmissionstabt gennem vinduerne henregnes til TU. Hertil regnes også varmetransmissionen fra den indvendige overflade gennem ydervægge og tag. Der regnes ikke med varmetab gennem gulvet, idet det forudsættes, at der er kælderrum med samme temperatur som i modelrummet. TU beregnes af

$$TU = \left(\frac{1}{m_k} + \frac{1}{m_u}\right)A_o + \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_v} + \frac{1}{m_u}\right)A_v \text{ W/}^\circ\text{C} \quad (3.5.2)$$

hvor

m_k er konstruktionernes varmemodstandstal i $m^2 \text{ } ^\circ\text{C}/W$

m_v er vinduets - - -

m_i og m_u er overgangsmodstandstallene - -

A_o er konstruktionernes overfladearealer i m^2

A_v er vinduets - - -

Varmestrømmen til de varmeakkumulerende lag beregnes af

$$TA = \frac{1}{m_{k \rightarrow AK}} \cdot A \quad W/^\circ C$$

hvor

$m_{k \rightarrow AK}$ er modstandstallet af lagene indtil det fiktive lag

A er arealerne

TK beregnes af

$$TK = \left(\frac{1}{m_k + m_u} \right) A \quad W/^\circ C$$

S beregnes af

$$S = \gamma \cdot c \cdot e \cdot A \quad W/^\circ C \quad (3.5.3)$$

hvor

γ er rumvægten af de forskellige materialer i kg/m^3

c er varmekapaciteten af de forskellige materialer i $kJ/kg^\circ C$

e er materialelagenes tykkelse i m

A er materialelagenes areal i m^2

Til S medregnes kun varmekapaciteten af de lag, der ligger mellem rumoverfladen og det varmeakkumulerende

lag. Lag med ringe varmekapacitet (mineraluld, tynde bræddelag, gulvbelægning) medregnes ikke.

3.6 Rummodel 1, 2 og 3

3.6.1 Placering af det varmeakkumulerende lag

Rummodel 1 (50 cm beton overalt)

Da alle flader er ens og transmissionstallet for alle flader også er det samme ($k = 3,0 \text{ W/m}^2\text{°C}$), vil det være rimeligt at placere det varmeakkumulerende lag midt i betonlaget (se fig. 3.6.1).

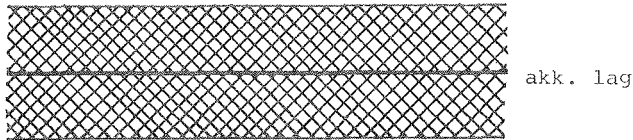


Fig. 3.6.1. Placering af akkumuleringslaget i rummodel 1.

Rummodel 2 (30 cm letbeton overalt)

Der gælder her samme resonement som i afsnit 3.4, og da transmissionstallet for alle flader er det samme ($k = 0,83 \text{ W/m}^2\text{°C}$), opfyldes alle de stillede krav ved at placere laget midt i konstruktionen. (se fig. 3.6.2)

Rummodel 3 (let rum)

Det antages her, at kun den inderste 16 mm træplade "deltager" i varmeakkumuleringen. Da der bag denne er anbragt et 200 mm mineralulds-lag uden betydelig varmekapacitet, vil antagelsen være realistisk. Det varme-

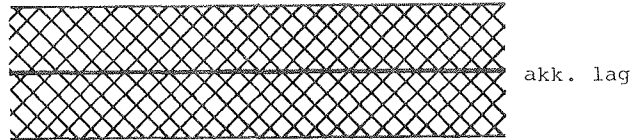


Fig 3.6.2. Placering af akkumuleringslaget i rummodel 2.

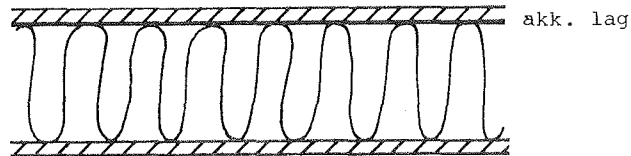


Fig. 3.6.3. Placering af akkumuleringslaget i rummodel 3.

akkumulerende lag er derfor placeret ved overgangen mellem træplade og isolering gældende for alle rummets flader (se fig. 3.6.3.)

3.6.2 Rumdata T_U , T_O , T_A , T_K og S

Udfra de mere generelle betragtninger i de foregående afsnit beregnes de tre rummodellens endelige rumdata. De indgående størrelser samt de beregnede størrelser er opstillet i skemaerne fig. 3.6.4, 3.6.5 og 3.6.6. Vinduesarealet, der ved beregningerne er variabelt, benævnes X_{m^2} . Det indvendige overgangsmodstandstal m_i er sat til $0,13 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, svarende til angivelsen i Ingeniørforeningens Varmetabsregler [6].

RUMMODEL 1

KONSTR. DEL	m_u	m_i	m_k	$m_{k \rightarrow AK}$	$e_{\rightarrow AK}$	$\gamma \cdot c$	A	TU	TO	TA	S
	$m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$				m	$Wh/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$	m^2	$W/^\circ\text{C}$	$W/^\circ\text{C}$	$W/^\circ\text{C}$	$Wh/^\circ\text{C}$
Ydervæg	0,04	0,13	0,33	0,17	0,25	552	9,6-x	2,7(9,6-x)	7,7(9,6-x)	5,9(9,6-x)	138(9,6-x)
Vindue	0,04	0,13	0,16				x	3x			
Gulv		0,13	0,33	0,17	0,25	552	20,0		154	118	2760
Loft	0,04	0,13	0,33	0,17	0,25	552	20,0	54	154	118	2760
Skillevæg		0,13	0,33	0,17	0,25	552	33,6		259	198	4637

fig. 3.6.4 Rumdata for rummodel 1

TU = 79,9 + 0,3x $W/^\circ\text{C}$

TO = 641 - 7,7x $W/^\circ\text{C}$

TA = 491 - 5,9x $W/^\circ\text{C}$

S = 11481 - 138x $Wh/^\circ\text{C}$

RUMMODEL 2

KONSTR. DEL	m_u	m_i	m_k	$m_{k \rightarrow AK}$	$e_{\rightarrow AK}$	$\gamma \cdot c$	A	TU	TO	TA	S
	$m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$				m	$\text{Wh}/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$	m^2	$\text{W}/^\circ\text{C}$	$\text{W}/^\circ\text{C}$	$\text{W}/^\circ\text{C}$	$\text{Wh}/^\circ\text{C}$
Ydervæg	0,04	0,13	1,2	0,6	0,15	258	9,6-x	0,81(9,6-x)	7,7(9,6-x)	1,7(9,6-x)	39(9,6-x)
Vindue	0,04	0,13	0,16				x	3x			
Gulv		0,13	1,2	0,6	0,15	258	20,0		154	34	780
Loft	0,04	0,13	1,2	0,6	0,15	258	20,0	16,2	154	34	780
Skillevægge		0,13	1,2	0,6	0,15	258	33,6		259	57	1310

fig. 3.6.5 Runda data for runmodel 2

TU = 24 + 2,2x $\text{W}/^\circ\text{C}$

TO = 641 - 7,7x $\text{W}/^\circ\text{C}$

TA = 141 - 1,7x $\text{W}/^\circ\text{C}$

S = 3244 - 39x $\text{Wh}/^\circ\text{C}$

RUMMODEL 3

KONSTR. DEL	m_u	m_i	m_k	$m_{k \rightarrow AK}$	$e_{\rightarrow AK}$	$\gamma \cdot c$	A	TU	TO	TA	S
	$m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$				m	$\text{Wh/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$	m^2	$\text{W/}^\circ\text{C}$	$\text{W/}^\circ\text{C}$	$\text{W/}^\circ\text{C}$	$\text{Wh/}^\circ\text{C}$
Ydervæg	0,04	0,13	5,48	0,11	0,016	490	9,6-x	0,18(9,6-x)	7,7(9,6-x)	9,1(9,6-x)	7,84(9,6-x)
Vindue	0,04	0,13	0,16				x	3x			
Gulv		0,13	5,48	0,11	0,016	490	20,0		154	182	157
Loft	0,04	0,13	5,48	0,11	0,016	490	20,0	3,6	154	182	157
Skillevægge		0,13	5,48	0,11	0,016	490	33,6		259	306	263

fig. 3.6.6 Rumdata for rummodel 3

TU = 5,3 + 2,8x $\text{W/}^\circ\text{C}$

TO = 641 - 7,7x $\text{W/}^\circ\text{C}$

TA = 757 - 9x $\text{W/}^\circ\text{C}$

S = 652 - 8x $\text{Wh/}^\circ\text{C}$

3.6.3 Beregningsresultater

På fig. 3.6.7 er de beregnede varmekonsum i fyringssæsonen (OKT - APRIL incl.) optegnet som funktion af vinduesarealet. Det mest iøjnefaldende er de tre kurvesæts beliggenhed i forhold til hinanden. Som følge af den voksende varmeisoleringsevne for klimaskærmens konstruktioner (50 cm beton - 30 cm letbeton - 20 cm mineraluld) vil energikonsumet være faldende. En energioptimering af de tre rum falder naturligvis ud til fordel for det lette velisolerede rum. Yderligere vil man lægge mærke til, at energikonsumet for alle tre rum bliver lavere, når vinduesorienteringen drejes fra nord via øst (eller vest) til syd. Dette hænger naturligvis sammen med, at solindfaldet gennem vinduet vil være størst for det sydvendte og mindst for det nordvendte.

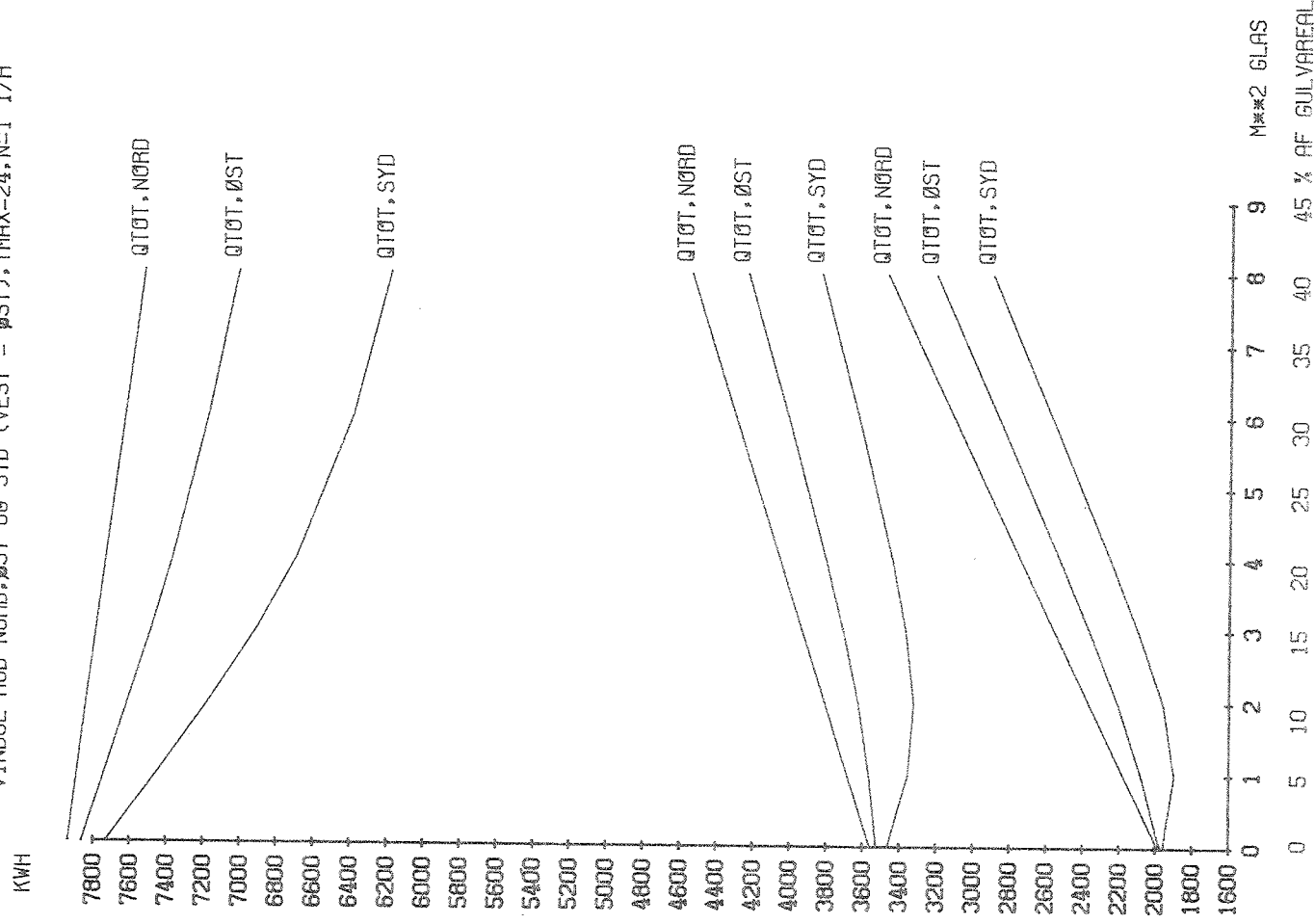
Betragtes de tre rum hver for sig, er det værd at bemærke, at det beregnede energikonsum i det meget tunge rum (model 3) vil være faldende for voksende vinduesareal uanset vinduesorienteringen. Da k -værdien for 50 cm beton plus overgangsmodstande er ca. $2 \text{ W/m}^2\text{°C}$ og for en dobbeltrude ca. $3 \text{ W/m}^2\text{°C}$, vil det si-ge, at transmissionsvarmetabet vil vokse med voksende vinduesareal, men som følge af solindfaldet og varmeakkumuleringen dækkes ikke blot det forøgede transmissionstab, men også en del af det øvrige varmetab gennem klimaskærmen. Denne tendens er naturligvis mest udtalt for et rum med sydvendt vindue, men også for det nord- og østvendte er energikonsumet faldende, når glasarealet øges.

For de to øvrige modeller er kurveforløbet nogenlunde ens. Med et nordvendt eller et østvendt vindue

FIG. 3.6.7

13-01-76 SAMMENLIGNING AF RUMMØDEL 1,2 OG 3. (25,26 OG 27)

VINDUE MOD NØR, ØST OG SYD (VEST = ØST), TMAX=24, N=1 1/H



vil det være forbundet med større fyringsudgifter at have et glasareal, der er større end nul kvadratmeter. Den reducerede varmekapacitet i de to rum i forhold til det tunge rum er således ikke i stand til at akkumulere nok solenergi til at dække det forøgede transmissionstab. Derimod udviser kurverne for et sydvendt vindue et energiminimum, der ikke svarer til 0 m² glas, men til henholdsvis 1 og 2 m² glas for model 2 og 3.

3.7 Rummodel 4

3.7.1 Placering af det varmeakkumulerende lag

Fig. 3.7.1 til 3.7.4 viser lodrette snit i de indgående konstruktioner, og den valgte placering af det varmeakkumulerende lag er vist med kraftig optrukket streg.

Som udgangspunkt er benyttet placeringen af laget i ydervæggen.

Væggens tidskonstant bliver:

$$\tau_{\text{ydervæg}} = \frac{S}{TA} = \frac{322 \cdot 0,1}{2,0} = 16,1 \text{ h} \quad (3.7.1)$$

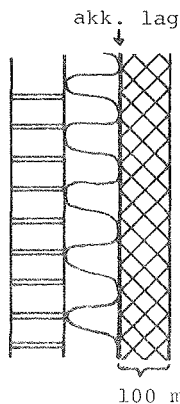


Fig. 3.7.1.
Placering af akkumuleringslaget i rummodel 4 på overgangen mellem letbeton og mineraluld.

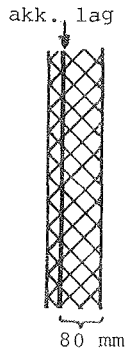


Fig. 3.7.2.

Placering af akkumulerings-
laget i rummodel 4, 80 mm
inde i skillevæggene



Fig. 3.7.3. Placering af akkumulerings-
laget i rummodel 4, 80 mm nede i gulvet.

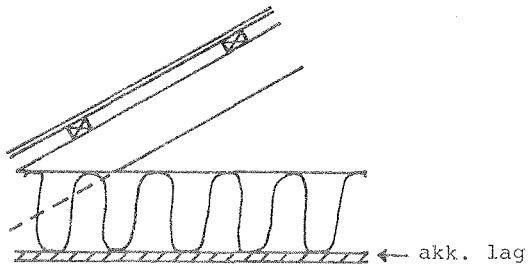


Fig. 3.7.4. Placering af akkumulerings-
laget i rummodel 4, på over-
gangen mellem de 22 mm brædder
og mineralulden.

Placeringen af de øvrige akkumuleringslag vælges nu, så alle tidskonstanter bliver af samme størrelsesorden. Da tidskonstanten for de 22 mm brædder i loftet er

$$\tau_{\text{loft}} = \frac{490 \cdot 0,022}{0,14/0,022} = 1,7 \text{ h}$$

er det valgt helt at se bort fra loftets bidrag til akkumuleringen. Derved undgås den meget store skævhed i tidskonstanterne, og da bræddernes bidrag til akkumuleringen er lille, er dette tilladeligt.

For skillevæggen giver en placering af det akkumulerende lag midt i letbetonen en tidskonstant på

$$\tau_{\text{skillevæg, midt}} = \frac{322 \cdot 0,05}{0,2/0,05} = 4,0 \text{ h} \quad (3,7.2)$$

For at opnå nogenlunde balance mellem tidskonstanterne, må laget lægges dybere. En placering 80 mm inde i letbetonen giver

$$\tau_{\text{skillevæg, 80 mm}} = \frac{322 \cdot 0,08}{0,2/0,08} = 10,3 \text{ h} \quad (3.7.3)$$

Denne tidskonstant er rimelig i forhold til ydervæggens.

For gulvkonstruktionen, der også er letbeton, vælges samme placering af akkumuleringslaget som for skillevæggene, med samme tidskonstant til følge. Denne placering ligger nær midten af konstruktionen, som er 70 mm nede i letbetonen.

For at undersøge effekten af en forøget akkumuleringsmasse, er der ligeledes foretaget beregninger med en variant af rummodel 4. Den eneste ændring er, at gulvkonstruktionen i varianten består af 200 mm beton og 200 mm isolering, som vist på fig. 3.7.5.

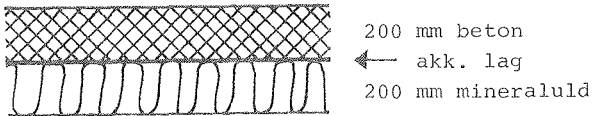


Fig. 3.7.5 Rummodel 4.

Variant af gulvkonstruktion

3.7.2 Rumdata T_U , T_O , T_A og S

Rummodellens data er beregnet udfra materialekonstanterne i afsnit 3.2 og de generelle betragtninger i afsnit 3.5. Skemaet fig. 3.7.6 viser de beregnede rumdata. X er vinduesarealet i m^2 .

For den "tunge" variant af rummodel 4 er T_U og T_O uændrede. T_A ændres, således at gulvets bidrag ikke bliver $50 W/^{\circ}C$, men $150 W/^{\circ}C$ svarende til, at transmissions-tallet for 200 mm beton er $7,5 W/m^2/^{\circ}C$. Ændringen af varmekapaciteten S bliver ialt på $(2208 - 516) W/^{\circ}C = 1692 W/^{\circ}C$, svarende til forskellen mellem varmekapaciteten af 200 mm beton og 80 mm letbeton, begge med et areal på $20 m^2$.

Med den valgte placering af det varmeakkumulerende lag fås en tidskonstant på

$$\tau = \frac{S}{TA} = \frac{552 \cdot 0,2}{1,5/0,2} = 14,7 \text{ h}$$

Denne tidskonstant passer godt til tidskonstanterne for de øvrige bygningsdele.

RUMMODEL 4

KONSTR. DEL	m_u	m_i	m_k	$m_{k \rightarrow AK}$	$e_{\rightarrow AK}$	$\gamma \cdot c$	A	TU	TO	TA	S
	$m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$			m		$Wh/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$	m^2	$W/^\circ\text{C}$	$W/^\circ\text{C}$	$W/^\circ\text{C}$	$Wh/^\circ\text{C}$
Ydervæg	0,04	0,33	3,33	0,5	0,1	322	9,6-x	0,30(9,6-x)	3(9,6-x)	2(9,6-x)	32,2(9,6-x)
Vindue	0,04	0,13	0,16				x	3x			
Gulv		0,33	0,83	0,48	0,08	322	20,0		60	50	516
Løft	0,04	0,33	4,53				20,0	4,2	60		
Skillevægge		0,33	0,50	0,4	0,08	322	33,6		101	84	866

Fig. 3.7.6. Rumdata for rummodel 4

TU = 7,1 + 2,7x $W/^\circ\text{C}$

TO = 250 - 3x $W/^\circ\text{C}$

TA = 153 - 2x $W/^\circ\text{C}$

S = 1692 - 32x $Wh/^\circ\text{C}$

3.7.3 Beregningsresultater

For vinduesarealer mellem 0 og 8 m² er der foretaget beregninger med vinduesorienteringer mod nord, øst og syd. Der er udført fem serier beregninger nemlig:

1. Med rummodellen uden tilskud af gratisvarme og uden ekstraisolerende foranstaltninger.
2. Med ekstraisolering af vinduet i nattetiden i fyringssæsonen. Det antages, at isoleringen betyder en reduktion af vinduets k-værdi fra ca. 3 W/m²°C til 0,5 W/m²°C. Rent beregningsmæssigt bliver TU reduceret med en faktor i det tidsrum, hvor den ekstra isolering er aktiv.
3. Med tilskud af varme fra el-lys. (se afsnit 3.3.3)
4. Med tilskud af varme fra el-lys og personer (se afsnit 3.3.3).
5. Med tilskud af varme fra ellys og personer. Derudover er der foretaget ekstraisolering af vinduet, som nævnt under pkt. 2.

For "det rene rum", d.v.s. uden gratisvarme og natisolering er beregningsresultaterne vist på fig. 3.7.7. Hovedtrækkene i kurveforløbene er de samme som for rummodel 2 og 3. Rummet med det nord- og østvendte vindue har voksende energiforbrug (i fyringssæsonen) med stigende vinduesareal. For rummet med det sydvendte vindue optræder der et energiminimum ved 1 m² glas eller 5% af gulvarealet.

Helt den samme tendens gør sig gældende, hvis rummet forsynes med en mobil natisolering, (se fig. 3.7.8). Her vil der imidlertid også være et energiminimum - med et glasareal større end 0 m² - for et rum med østvendt vindue, og desuden er minimumet for rummet med det sydvendte vindue rykket i retning af større glasareal (minimum for 3 m² glas). Generelt set, ligger kurverne for det natisolerede rum naturligvis under kurverne for "det rene rum", idet natisoleringen reducerer transmissionstabet til det fri.

FIG.3.7.7

RUMMODEL 4. "RENT RUM"

TMAX=24, N=1 1/H, VINDUE MOD NØRD, ØST OG SYD (VEST=ØXST)

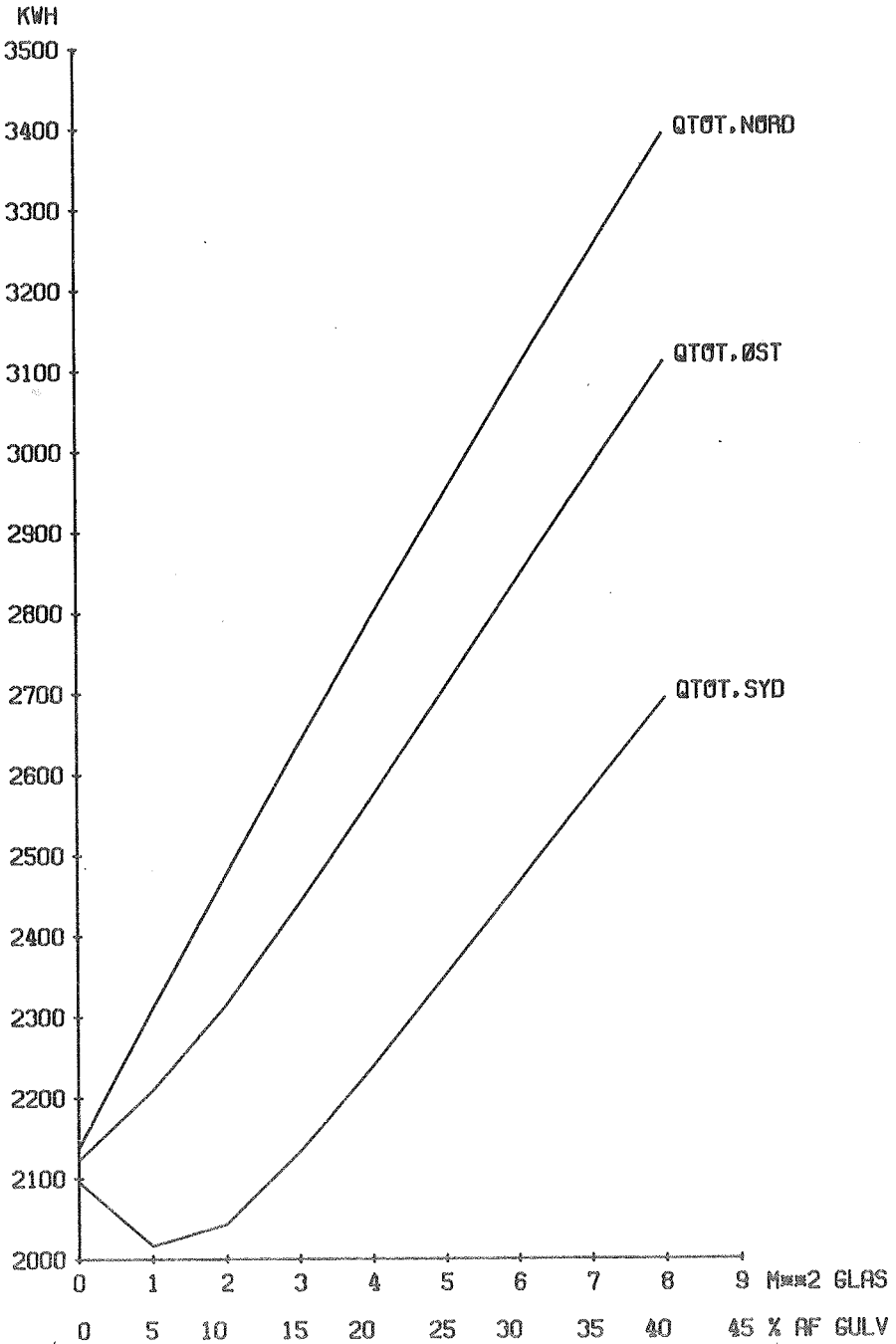
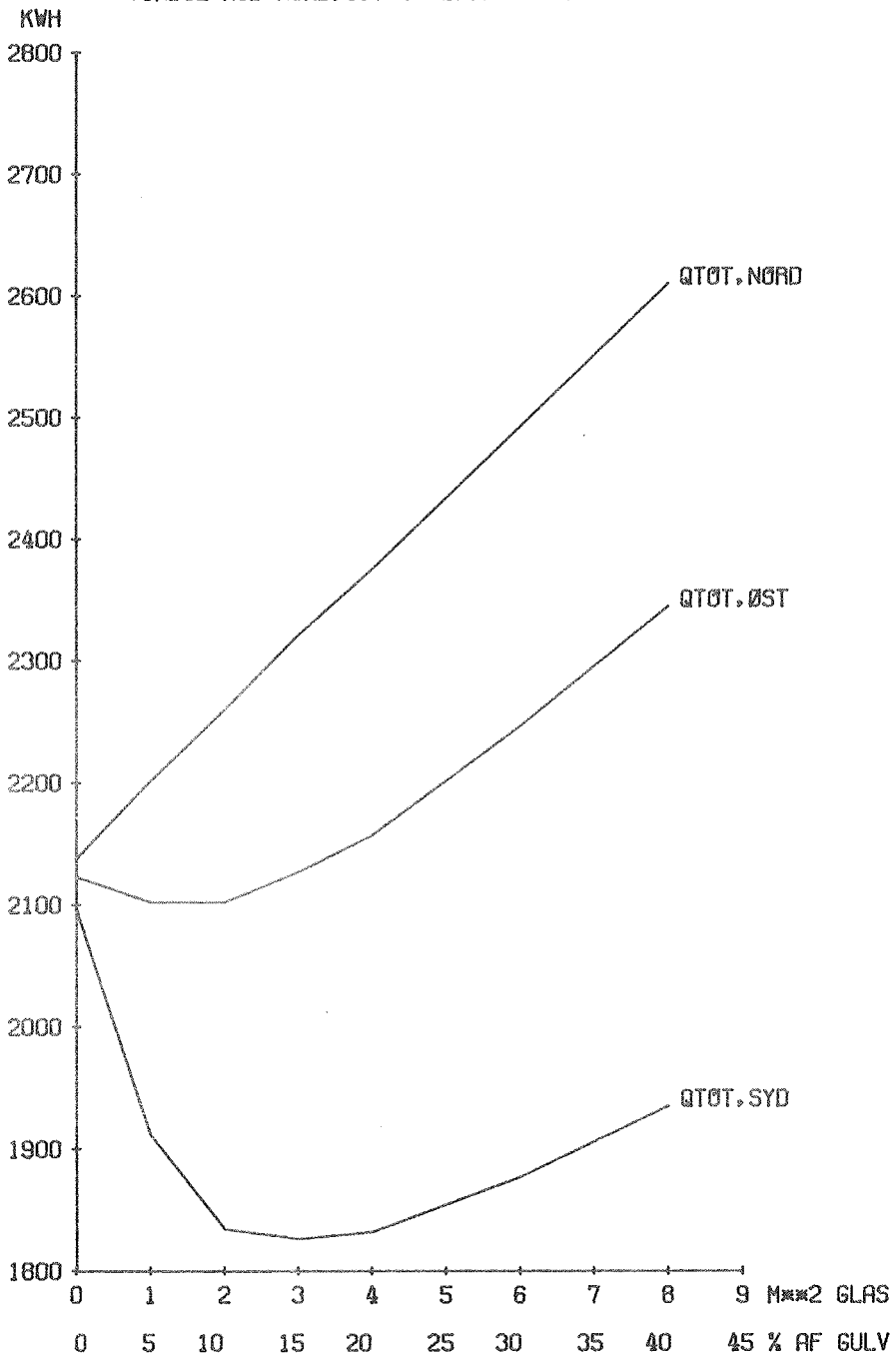


FIG. 3.7.8. RUMMODEL 4 MED NATISØLERING

VINDUE MOD NØRD, ØST (=VEST) OG SYD



Gøres rummet mere realistisk, d.v.s. at der sker en tilførsel af gratisvarme, bliver billedet et andet. For et rum uden natisolering, men med 250 W ellys i perioder, hvor solindfaldet er mindre end 50 W/m^2 , udviser ingen af kurverne et energiminimum. (se fig. 3.7.9). Forklaringen herpå kan aflæses af fig. 3.7.10.

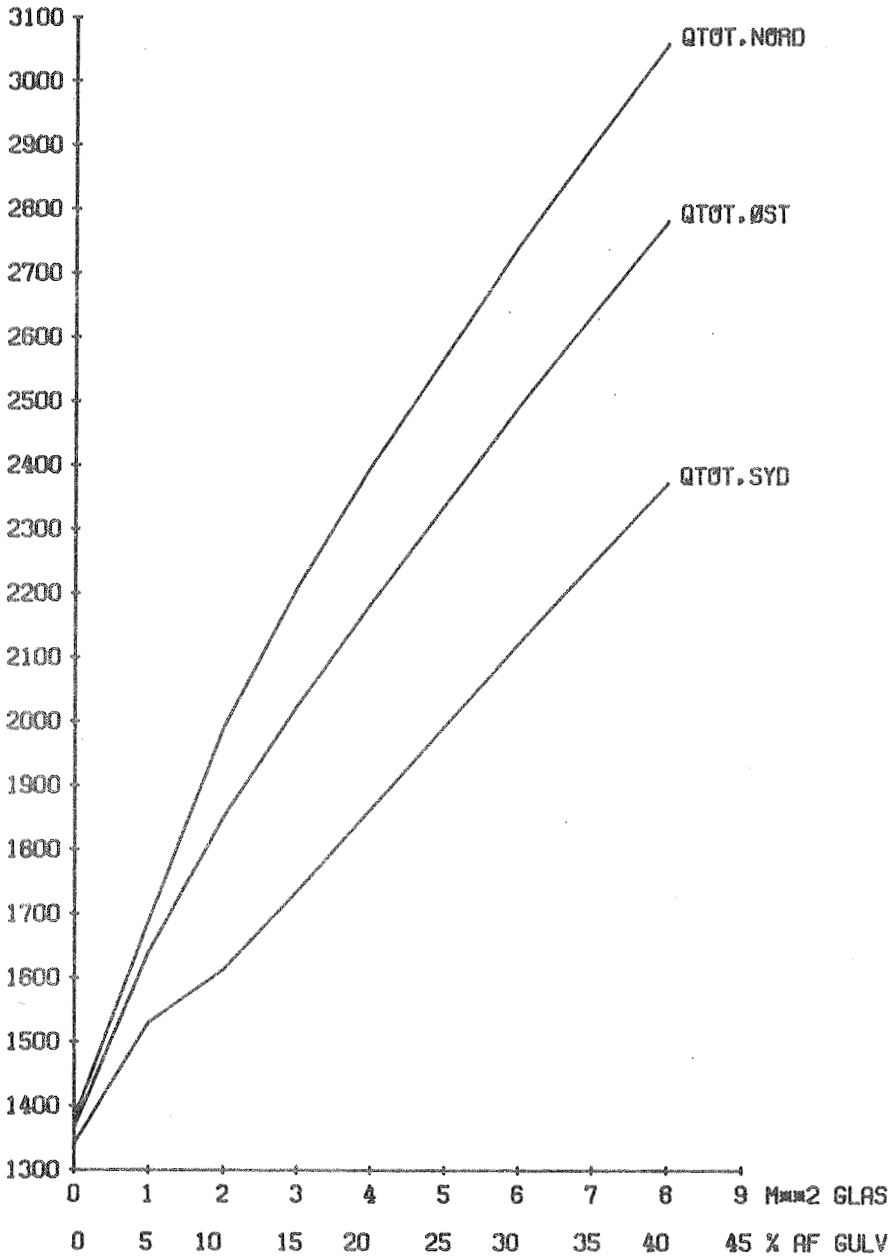
Tilførslen af gratisvarme fra ellys vil, med voksende vinduesareal, meget hurtigt aftage, mens solindfaldet vokser lineært. Sumkurven udviser også et brat fald i starten, hvorfor den nødvendige energitilførsel fra varmeanlægget vil stige, idet det både skal dække et stigende transmissionstab (TU vokser) og faldet i QELYS. For vinduesarealer større end $0,3 \text{ m}^2$ vil det voksende solindfald have en dominerende indflydelse på sumkurvens forløb (QSOL + QELYS). Den stigende energitilførsel er dog ikke i stand til at holde det voksende transmissionstab i skak, hvorfor QTOT vokser. Forløbet af sumkurven for QSOL og QELYS forklarer også, hvorfor kurven for rummet med det sydvendte vindue har et noget besynderligt forløb i forhold til andre kurver af samme art (Se fig. 3.7.9).

Et endnu mere realistisk rum opnås ved yderligere at tilføre rummet personvarme (250 W i tidsrummet 08 - 22). Se afsnit 3.3.3. Kurverne over beregningsresultaterne, på fig. 3.7.11, minder en hel del om kurverne, hvor der kun sker tilførsel fra ellys, men niveauet er naturligvis sænket noget. Det ekstra tilskud fra personer udgør

$$Q_{\text{personer}} = 0,25 \cdot 14 \cdot 212 = 742 \text{ kWh pr. fyringssæson.}$$

Imidlertid vil kun en del af Q_{person} kunne udnyttes, idet temperaturbegrænsningen på 24°C bevirker, at resten må fjernes ved en eller anden form for køling. Fig. 3.7.11 viser ligeledes, at kurveforløbet for rum-

FIG.3,7,9. RUMMODEL 4. MED ELLYS 250W STYRET ON/OFF AF SØL
TMAX=24, N=1 1/H, VINDUE MOD NØRD, ØST OG SYD (VEST=ØXST)
KWH



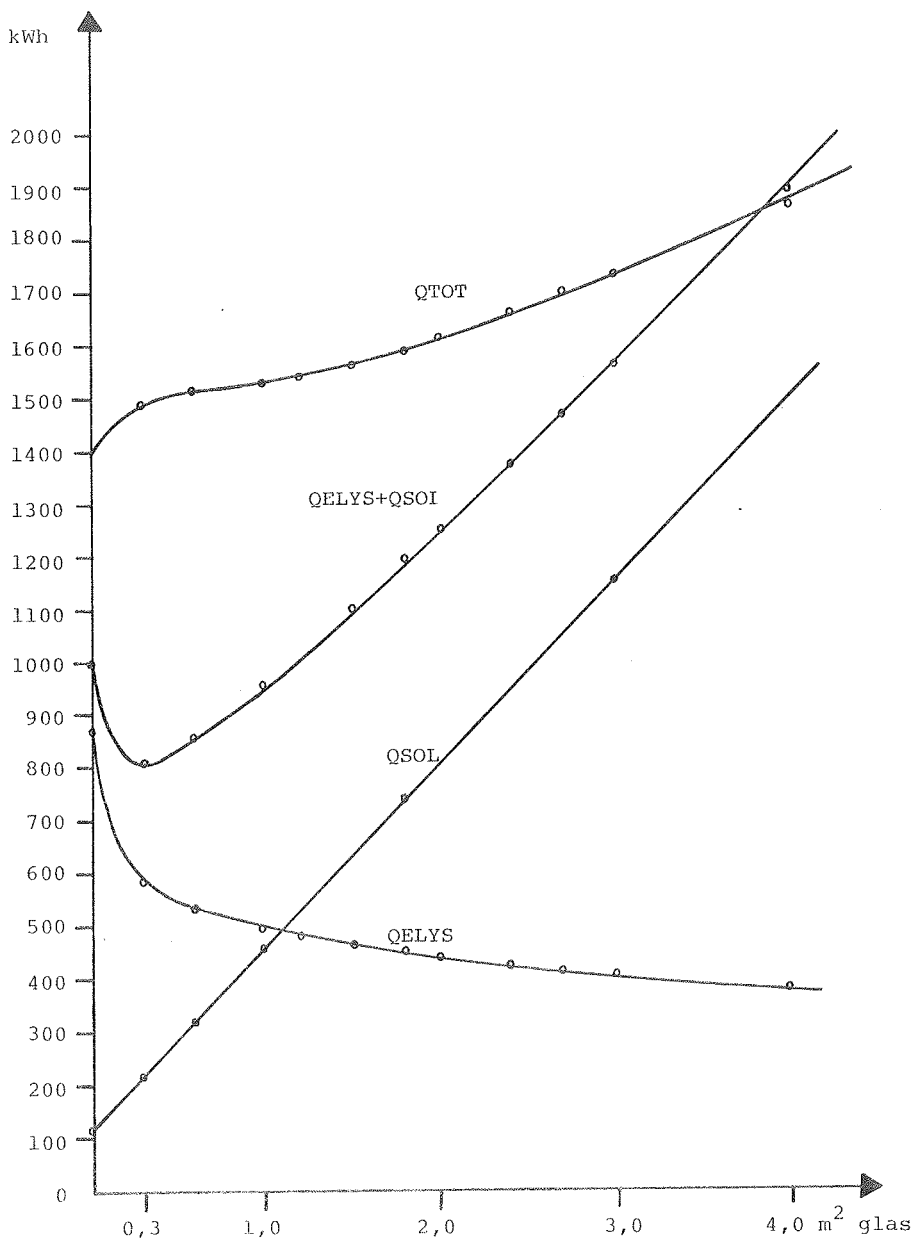
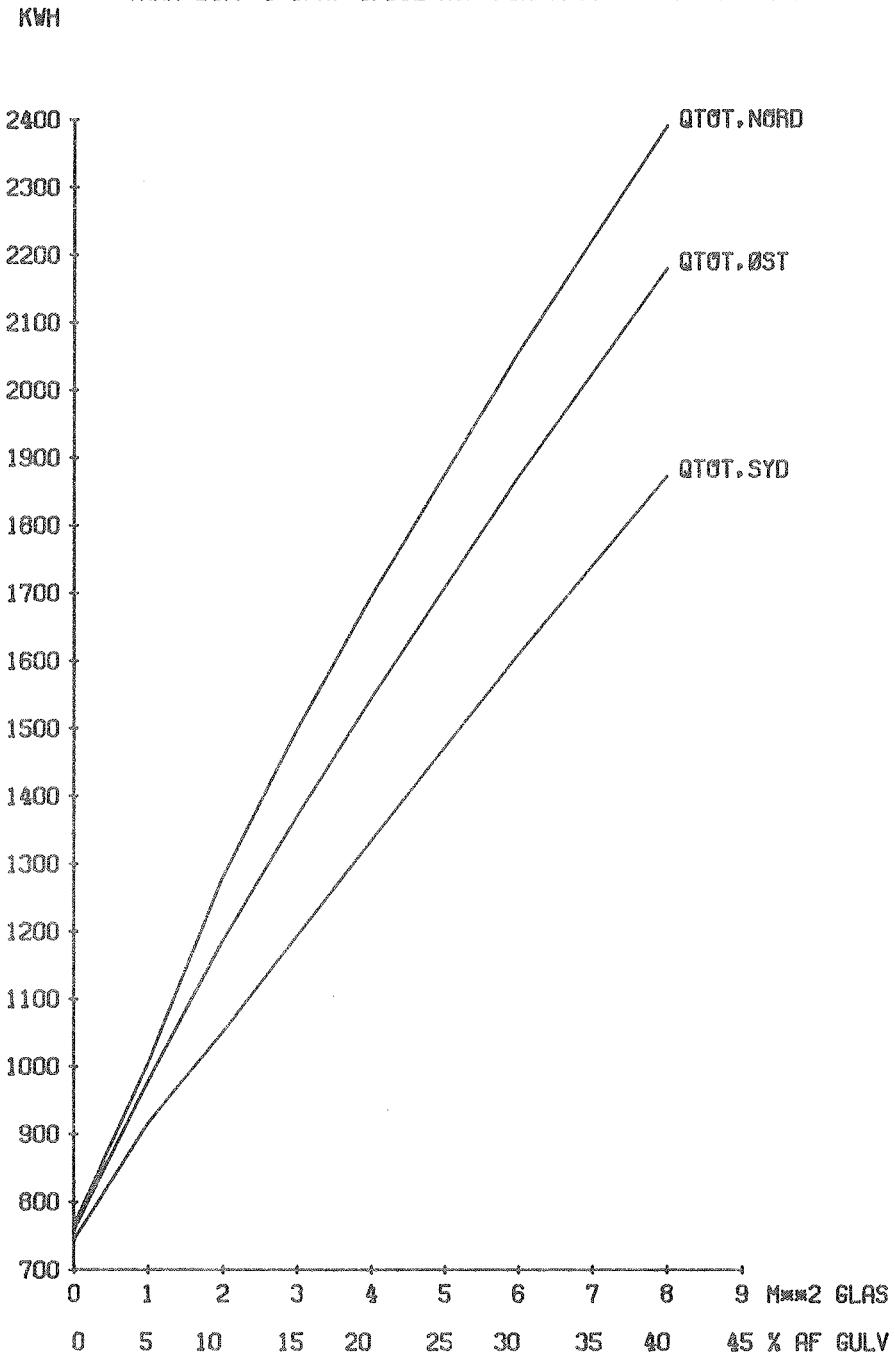


Fig. 3.7.10. Rummodel 4. Variation i QTOT, QSOL, QELYS og QSOL+QELYS som funktion af glasareal.

FIG.3.7.11. RUMMODEL 4, MED ELLYS OG PERSONER (BEGGE 250W)

TMAX=24, N=1 1/H, VINDUE MOD NORD, ØST OG SYD (VEST=DØST)



met med det sydvendte vindue er blevet udjævnet, og nu helt svarer til de to andre kurver. Dette hænger sammen med sumkurven for QSOL + QELYS + QPERSON ligger på et noget andet niveau end sumkurven på fig. 3.7.10. Til den skal nemlig lægges de 741 kWh, som QPERSON giver i tilskud. De to kurveforløb er altså identiske, men det procentuelle fald i energitilskuddet fra 0 m² til 0,3 m² glas bliver næsten halveret (se fig. 3.7.12).

Rummodel 4 med vindue mod syd	QSOL + QELYS + PERSONER		Forskel i %
	0 m ² glas	0,3 m ² glas	
med ellys	994	803	19,2
med ellys+personer	1736	1545	11,0

Fig. 3.7.12 Tilførsel af gratisvarme (kWh) i fyringssæsonen.

Rummet med ellys og personer forsynes nu med mobil natisolering for yderligere at reducere energiforbruget. Fig. 3.7.13 viser beregningsresultaterne. Kurverne svarer stort set til kurverne for rummet uden natisolering, men de er blevet drejet (med uret) omkring deres skæringspunkt med y-aksen. Energiforbruget med og uden natisolering må være det samme for 0 m² glasareal.

En sammenligning af beregningerne for et rum med sydvendt vindue er vist på fig. 3.7.14. Hertil skal ikke knyttes nærmere kommentarer, idet de enkelte beregningsserier og deres indbyrdes forhold er behandlet i det foregående. Diagrammet giver imidlertid et overblik over hvilke energimæssige konsekvenser, de forskellige

FIG.3.7.13. RUMMØDEL 4 MED LYS, PERSONER OG NATISØLERING

VINDUE MOD NØRD, ØST (=VEST) OG SYD

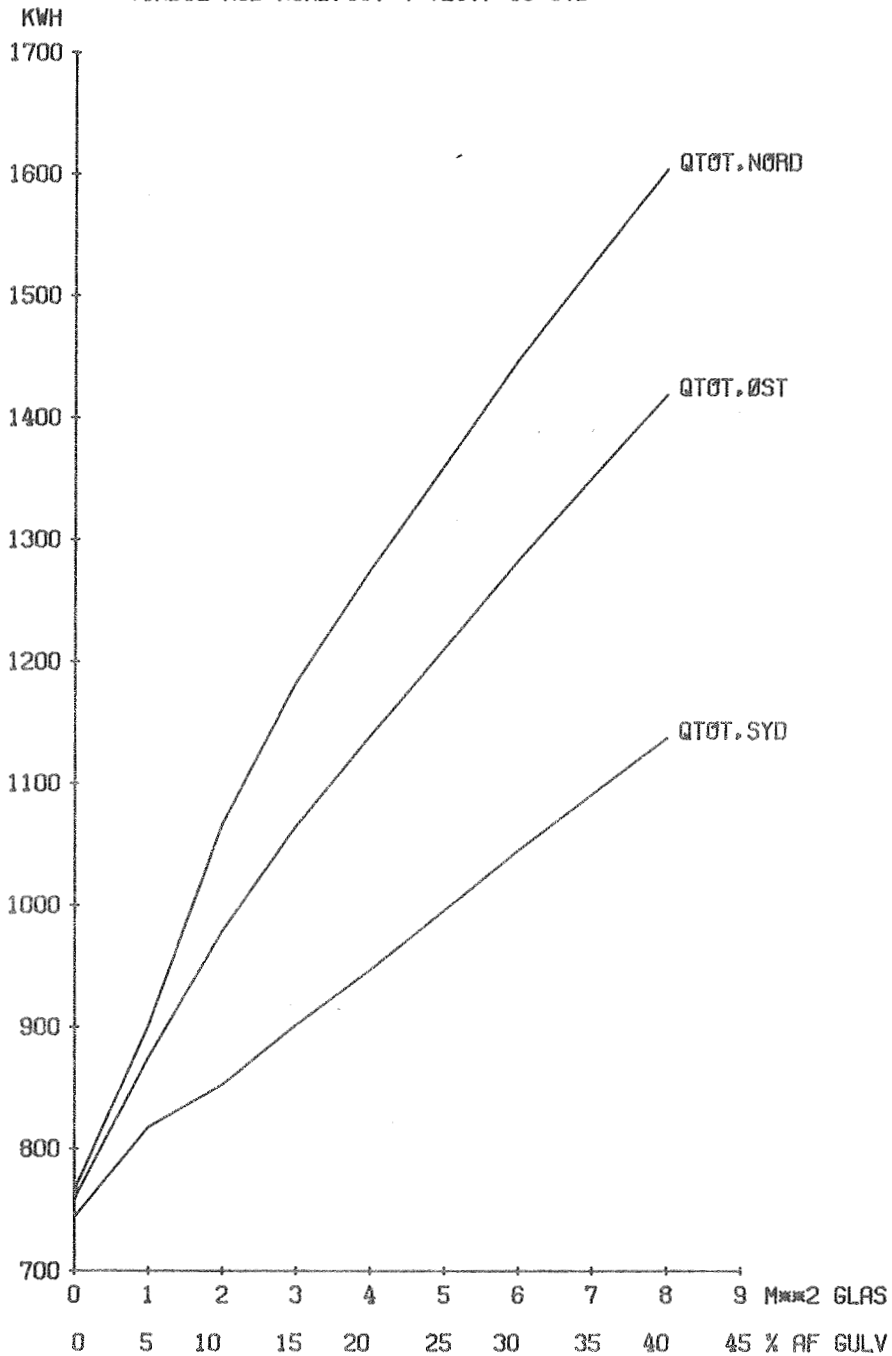
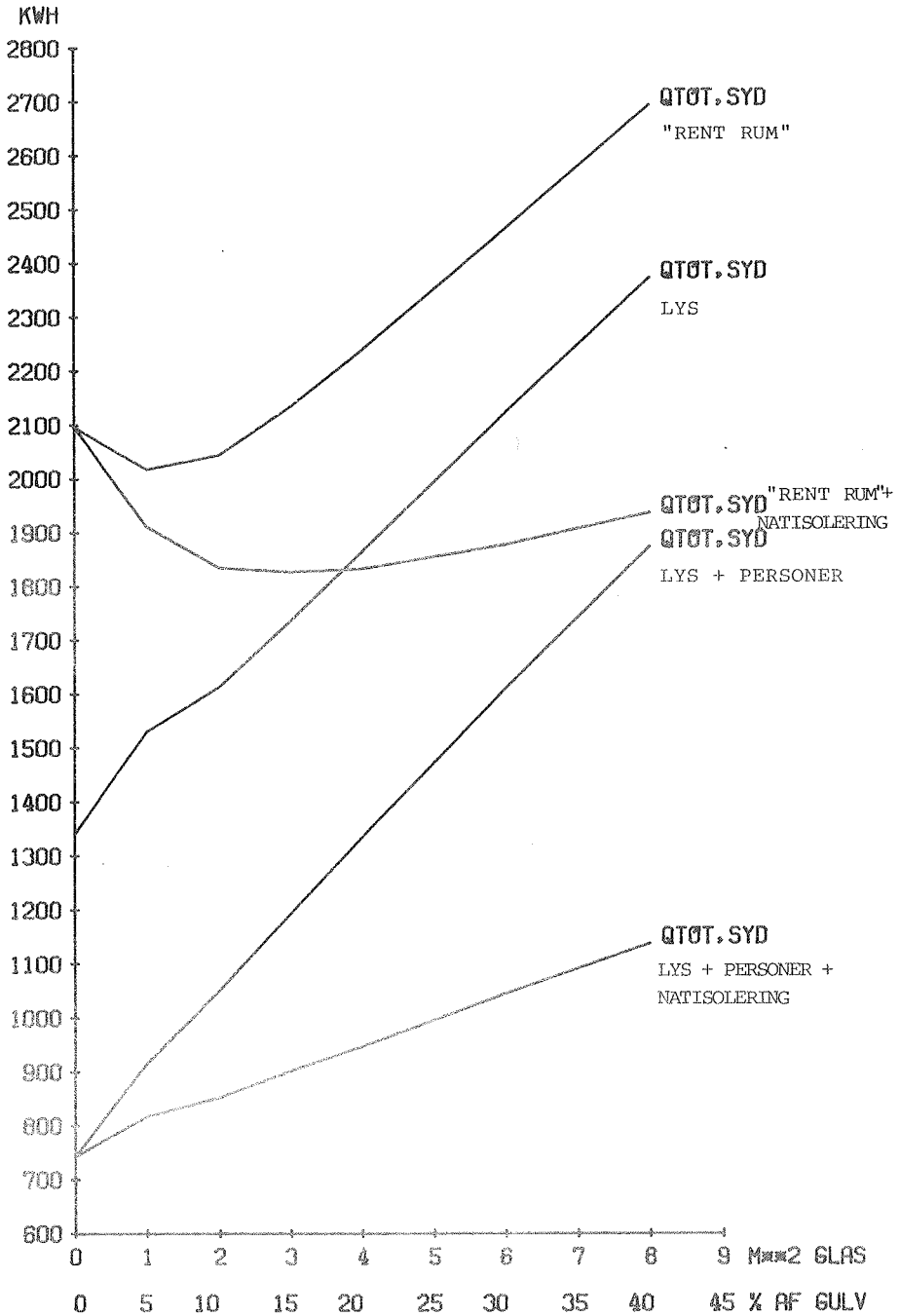


FIG.3.7.14. RUMMØDEL 4 SAMMENLIGNING AF 5 SERIER BEREGNINGER

VINDUE MØD SYD



foranstaltninger har. Når der kun er medtaget et rum med sydvendt vindue, er det, fordi et vindue med denne orientering under alle forhold giver det laveste energiforbrug.

3.7.4 Beregninger med tung variant af rummodel 4

De fem serier beregninger giver kurvesæt, der er helt analoge til de tilsvarende kurvesæt for den egentlige rummodel 4. Det gælder naturligvis også her, at når forudsætningen er et rum med kun ét vindue, så er en vinduesorientering mod syd det optimale set fra et energimæssigt synspunkt. Derfor er der kun vist beregningsresultaterne for et rum med denne orientering (se fig. 3.7.15).

Hvor meget energi, der kan spares ved at øge den varmeakkumulerende masse kan ses af fig. 3.7.16, der viser en sammenligning mellem de to rummodeller.

3.8 Rummodel 5

Rummodellen svarer i opbygning til rummodel 3. D.v.s. alle begrænsningsflader består af 200 mm mineraluld beklædt på begge sider med 16 mm hård plade. For rummodel 5's vedkommende er der dog placeret 200 mm beton over gulvisoleringen for at øge rummets varmekapacitet.

3.8.1 Placering af det varmeakkumulerende lag

Da de 200 mm beton er det eneste tunge lag i konstruktionerne, er det rimeligt at antage, at kun betonlaget er aktivt ved varmeakkumuleringen. Det vil ligeledes være rimeligt at antage, at al masse samles i ét lag på overgangen mellem beton og isolering.

3.8.2 Rumdata TU, TO, TA og S

I skemaet fig. 3.8.1 er angivet de beregningsudtryk, for de forskellige rumdata. De er opstillet på grund-

FIG.3.7.15.

RUMMODEL 4 MED 20 CM BETON (TUNG VARIANT) SAMMENLIGN. AF BEREGN.
VINDUE MØD SYD

KWH

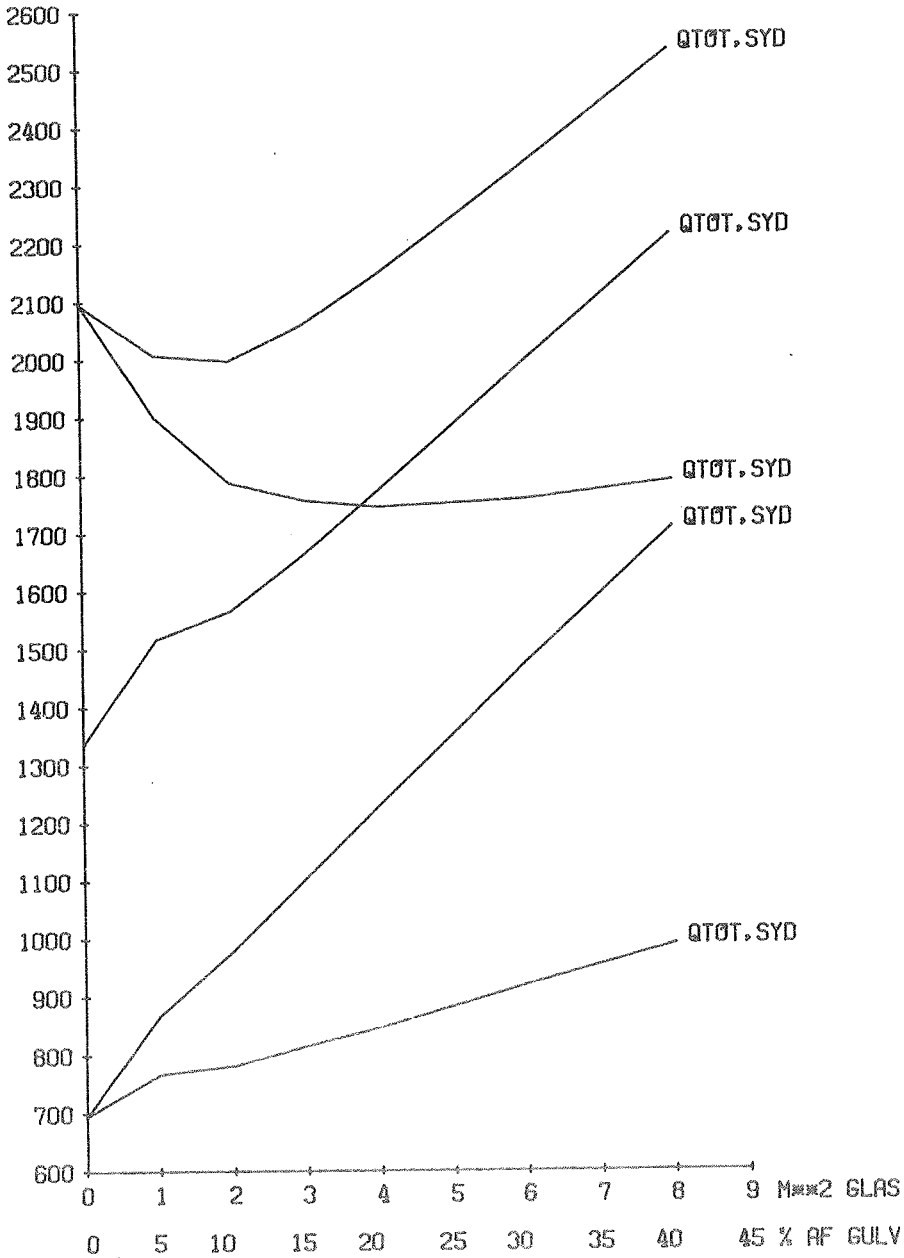
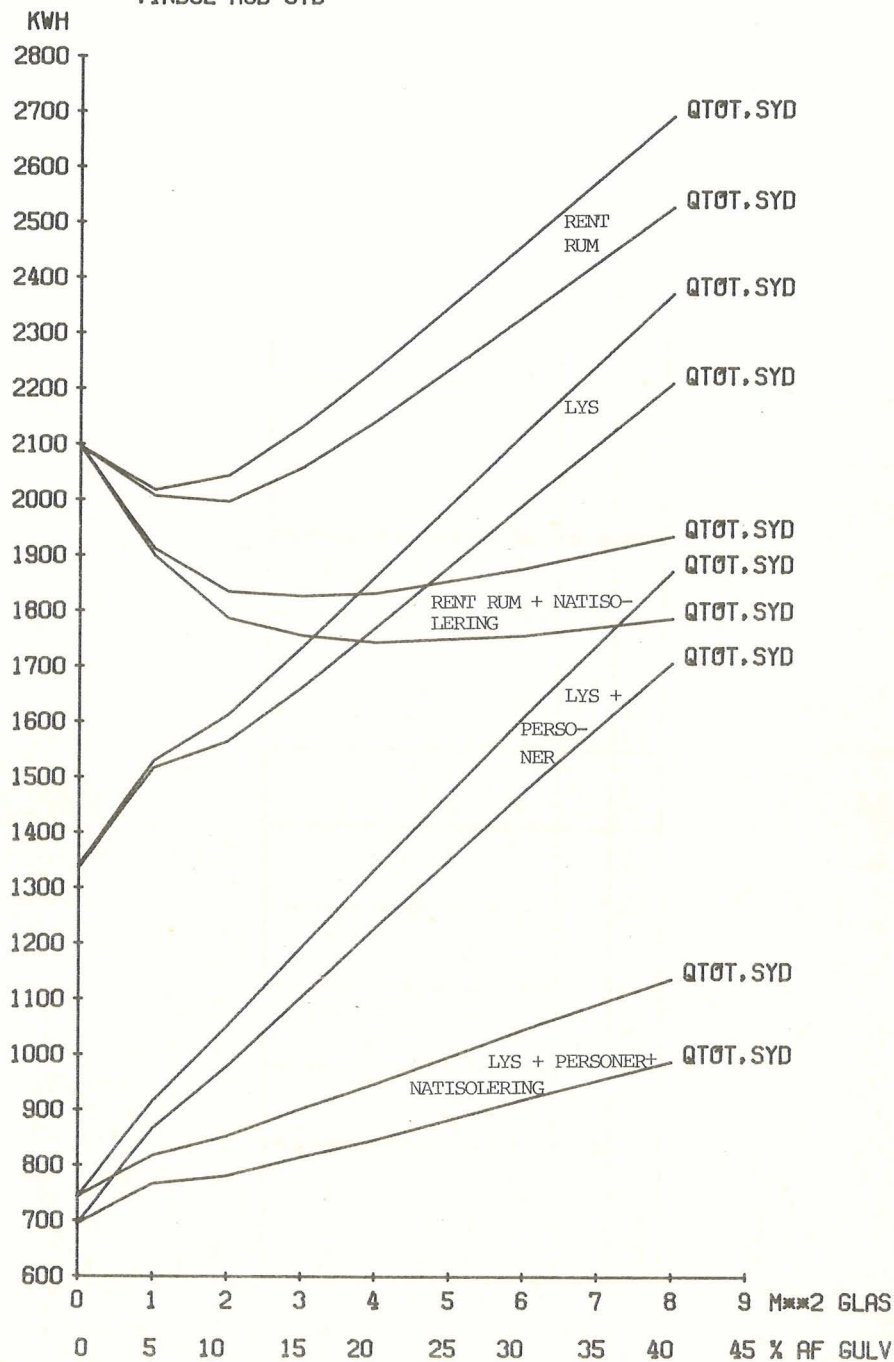


FIG.3.7.16. 01-02-77 RUMMØDEL 4 MED 20 CM BETØN SAMMENLIGNING AF BEREGN

VINDUE MØD SYD



RUMMODEL 5

KONSTR. DEL.	m_u	m_i	m_k	m_{k-AK}	e_{AK}	$\gamma \cdot c$	A	TU	TO	TA	S
	$m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$				m	$\text{Wh/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$	m^2	$\text{W/}^\circ\text{C}$	$\text{W/}^\circ\text{C}$	$\text{W/}^\circ\text{C}$	$\text{Wh/}^\circ\text{C}$
Ydervæg	0,04	0,33	54,8				9,6-x	0,18(9,6-x)	3(9,6-x)		
Vindue	0,04	0,13	0,16				x	3x			
Gulv		0,33		0,13	0,20	552	20,0		60	7,7 x 20	2208
Loft	0,04	0,33	5,48				20,0	0,18-20	60		
Skillevægge		0,33	5,48				33,6		101		

Fig. 3.8.1 Rumdata for rummodel 5

TU = 5,3 + 2,8x $\text{W/}^\circ\text{C}$

TO = 250 - 3x $\text{W/}^\circ\text{C}$

TA = 154 $\text{W/}^\circ\text{C}$

S = 2208 $\text{Wh/}^\circ\text{C}$

lag af de tilsvarende beregninger for rummodel 3 (hvad angår TU) og for rummodel 4 (hvad angår TO, TA og S). For rummodel 5 er det dog kun gulvet, der giver et bidrag til TA og S.

3.8.3 Beregningsresultater

Beregningerne er gennemført for et rum med sydvendt vindue. Alle fem serier, der er nævnt i afsnit 3.7.3 er gennemregnet. Resultaterne er vist på fig. 3.8.2.

I forhold til de tilsvarende beregninger med rummodel 4, er der ikke nogen afgørende forskel. Som følge af rummodel 5's bedre isolering er det samlede energiforbrug lavere. I samme retning trækker den lidt større varmekapacitet i model 5.

Hvor meget den forøgede akkumuleringsmasse betyder ses af fig. 3.8.3, hvor der er foretaget sammenligning af rummodel 3 og 5, for "det rene rum". Den eneste forskel på de to modeller er akkumuleringsmassen i rummodel 5. Reduktionen (i procent) varierer kun lidt med vinduesstørrelsen og ligger omkring 15%.

3.8.4 "Tung" variant af rummodel 5

Analogt til rummodel 4 forøges den varmeakkumulerende masse i rummet. Det antages her, at alle skillevægge indvendig forsynes med 20 cm beton, dog således, at rummodellen bevarer de indvendige mål. Denne foranstaltning vil kun ændre TA og S, idet der ikke er nogen varmetransmission igennem skillevæggene.

Beregningerne er kun gennemført for et rum med sydvendt vindue og med lys og personer, henholdsvis lys, personer og natisolering af vinduet. Resultaterne er vist på fig. 3.8.4, hvor der ligeledes er foretaget en sammenligning med den "lette" variant.

FIG.3.8.2. RUMMODEL 5. SAMMENLIGNING AF BEREGNINGER MED FEM SERIER

TMAX=24, N=1 1/H, VINDUE MOD SYD

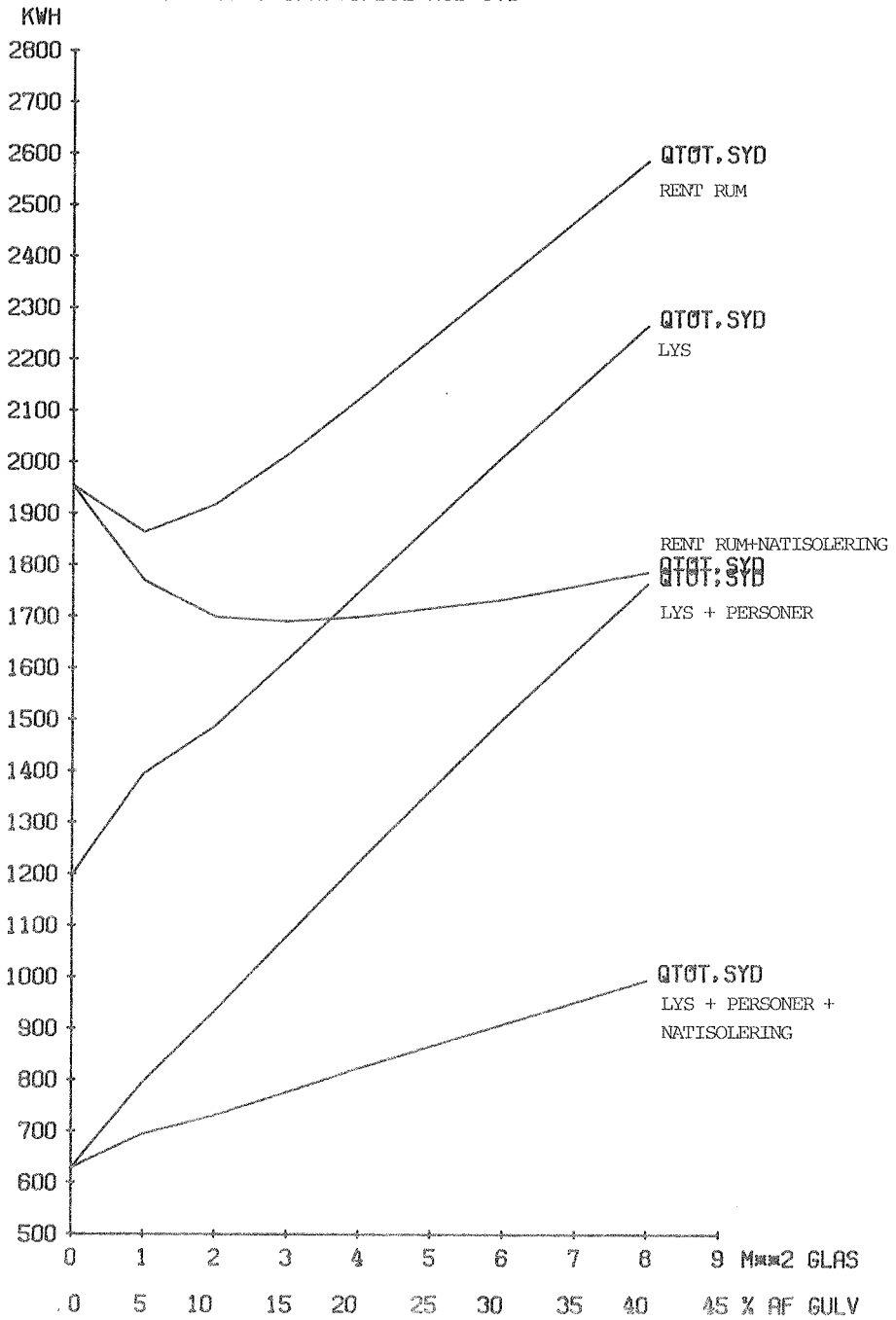


FIG.3,8,3. RUMMODEL 3 OG 5.SAMMENLIGNING AF 'RENT RUM'

TMAX=24.N=1 1/H. VINDUE MØD SYD

KWH

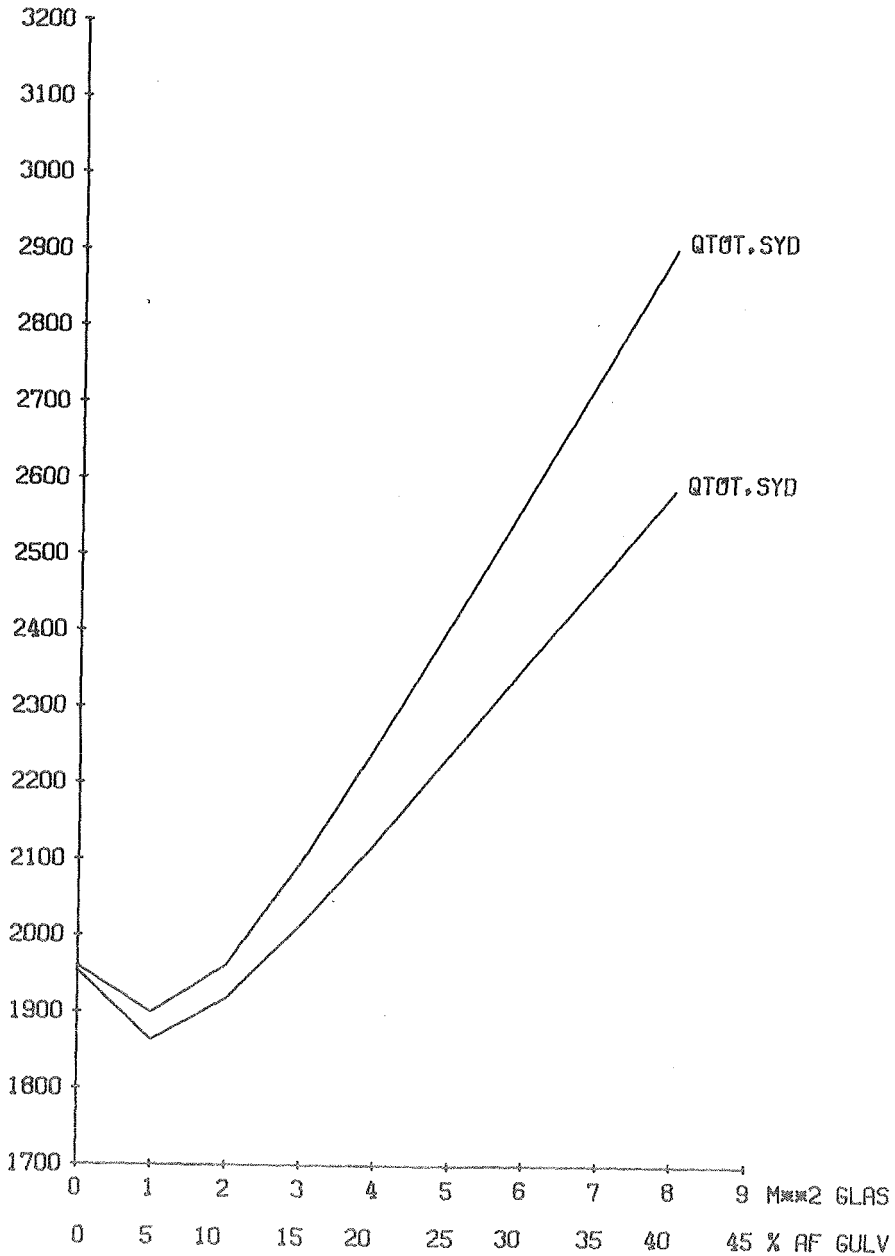
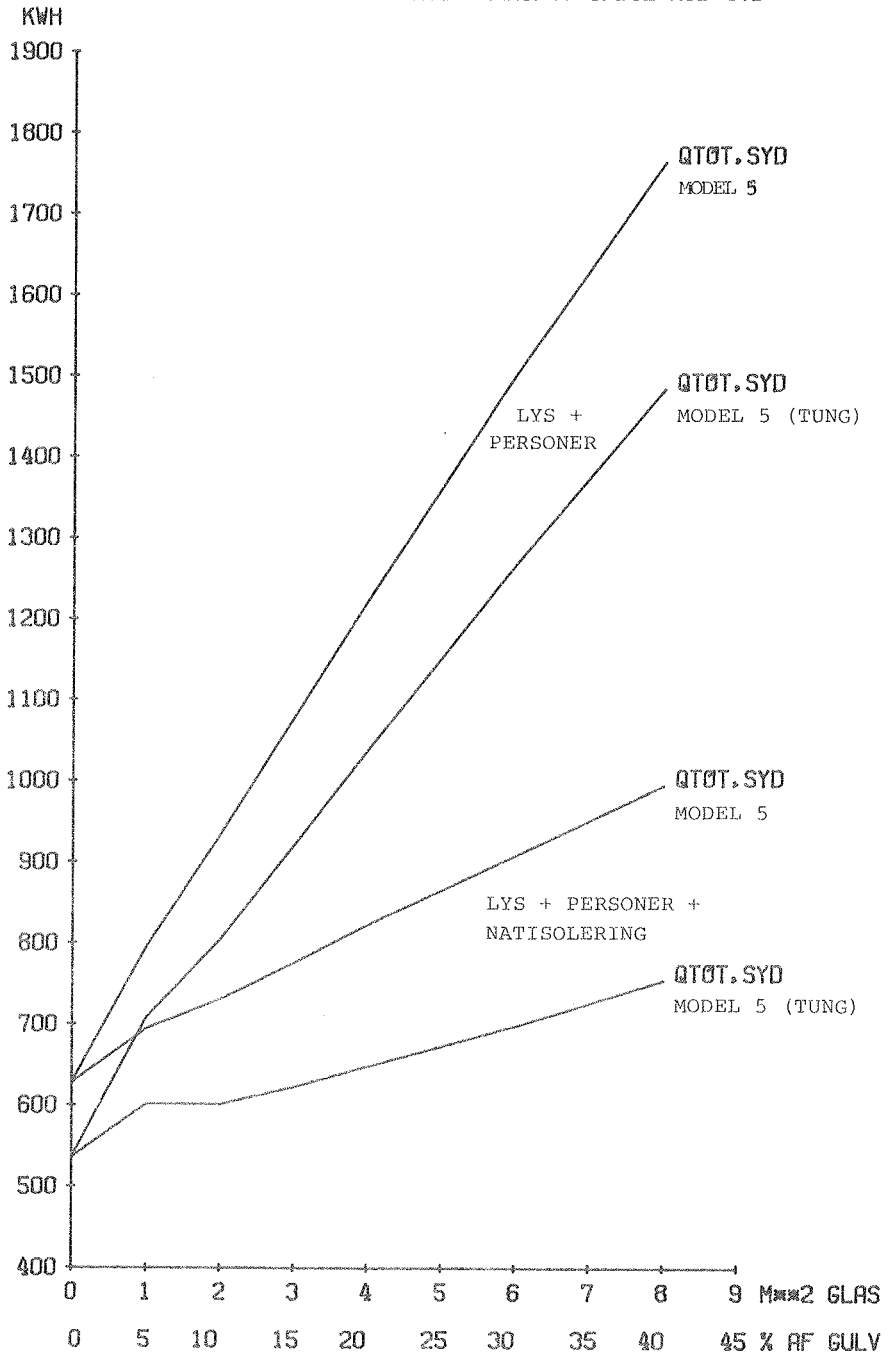


FIG.3.8.4. SAMMENLIGNING AF RUMMODEL 5 OG DENS TUNGE VARIANT
MED LYS, PERSONER OG NATISOLERING. VINDUE MOD SYD



De reduktioner, der er tale om, er i procent ret konstante. Således er reduktionen i modellen med lys og personer ca. 20% ved at gå fra den lette til den tunge variant. I rummodellen, hvor der yderligere er tilføjet natisolering af vinduet, er den tilsvarende reduktion ca. 40%.

3.9 Konklusioner

Af de beregninger, der her er foretaget med rummodellerne 1, 2, 3, 4 og 5 og BA4-EDB-programmet, kan der som den væsentligste konklusion nævnes, at når det drejer sig om at reducere energiforbruget (over en fyringssæson) ved at forøge vinduesarealet, så er dette kun muligt for urealistiske rum, d.v.s. uden personer og lys. Da dette for praktiske forhold er uden interesse, vil det sige, at med de her benyttede rummodeller er en sådan reduktion af energiforbruget ikke mulig. Det kan selvfølgelig tænkes, at en yderligere isolering og forøgelse af den varmeakkumulerende masse kan gøre en sådan reduktion mulig selv for realistiske rum. I så tilfælde vil der være tale om bygningskonstruktioner af helt andre tykkelser, end man er vant til idag, hvilket til trods for lys, personer m.v. vil gøre rummene urealistiske.

Beregningerne viser dog også, at man ved at øge isole-ring og akkumuleringsmasse og derudover måske natisolere sine vinduer, kan nå langt i retning af at reducere energiforbruget. Betragtes f.eks. et rum med ét sydvendt vindue på 3 m^2 ($\sim 15\%$ af facadearealet, hvilket er den foreslåede maximumsgrænse i det nye bygningsreglement) viser fig. 3.9.1 hvilke reduktioner, der opnås med rummodel 4 og 5, samt deres "tunge" varianter. Beregningsforudsætningerne er naturligvis de samme, som de tidligere nævnte. De beregnede forskelle er i forhold til rummodel 4 med lys (L) og personer (P). Natisolering er angivet med "N".

RUMMODEL	BEMÆRKNINGER	FORBRUG	FORSKEL	FORSKEL
		kWh	kWh	%
4	L + P	1193	-	-
4 (tung)	L + P	1103	90	7,5
5	L + P	1079	114	9,6
5 (tung)	L + P	921	272	22,8
4	L + P + N	902	291	24,4
4 (tung)	L + P + N	815	378	31,7
5	L + P + N	776	417	35,0
5 (tung)	L + P + N	623	570	47,8

Fig. 3.9.1 Effekten af energibesparende foranstaltninger for et 20 m² rum med ét 3 m² syd-
vendt vindue.

Det er helt tydeligt, at det, der har den dominerende indflydelse, er natisoleringen af vinduet. Uanset hvilken rummodel, der betragtes, reduceres energiforbruget med ca. 25% ved at benytte natisolering af vinduet, så k-værdien reduceres til 0,5 W/m²°C. Forøgelsen af varmekapaciteten har en effekt på omkring 10% (7,3% - 13,4%).

Endelig skal det nævnes, at såfremt man frit kan vælge placeringen af vinduer i en nybygning, bør deres orien-

tering være sydvendt. For énfamiliehuse vil det sige, at rum, der traditionelt set er mindst lyskrævende, (toilet, badeværelser, bryggers og soverum) bør være nordvendte, mens de mere lyskrævende som f.eks. køkken og stuer bør vende mod syd. I kontorbygninger, hvor lyskravene stort set vil være ens for alle lokaler, kan denne opdeling på rum med små og rum med store vinduer ikke opretholdes.

4. FORSØGSHUSETS OPBYGNING OG INDRETNING

4.1 Baggrund for gennemførelsen af forsøg

Beregninger med BA4-programmet er foretaget på grundlag af den beregningsmodel, der udgør den centrale del af BA4. I modellen er der gjort visse forudsætninger og foretaget visse simplifikationer (se afsnit 1.5 - 1.11), som gør, at BA4-beregninger er behæftet med en vis usikkerhed, som det er meget vanskeligt at få et skøn over.

Licentiatprojektets anden del har som hovedformål haft at prøve på at foretage et sådant skøn over BA4-programmets nøjagtighed.

Et til formålet specielt fremstillet forsøgshus blev opstillet på laboratoriets forsøgsareal. Huset blev indrettet med to forsøgsrum og et måleudstørsrum, og i en to måneders periode (primo oktober til primo december 1976) er der kontinuerligt blevet registreret temperaturer (både ude og inde) og energiforbrug som funktion af vinduesarealet. Ved derefter at "opbygge" forsøgsrummene som beregningsmodeller i BA4-programmet og indkode de faktisk målte temperaturer, energiforbrug og solindstråling (registreret ved laboratoriets NUL-ENERGI-HUS, der er beliggende nær ved forsøgshuset), har det været muligt direkte at sammenligne beregninger og forsøg, og derved få en vurdering af programmet.

4.2 Forsøgshusets opbygning

Udgangspunktet for valg af forsøgshus var, at det skulle kunne leveres hurtigt og nøglefærdigt. Et standard

kontorhus blev udvalgt, og de ændringer, der var nødvendige for at gøre huset velegnet, blev aftalt med byggefirmaet. Fig. 4.2.1 viser en grundplan af huset.

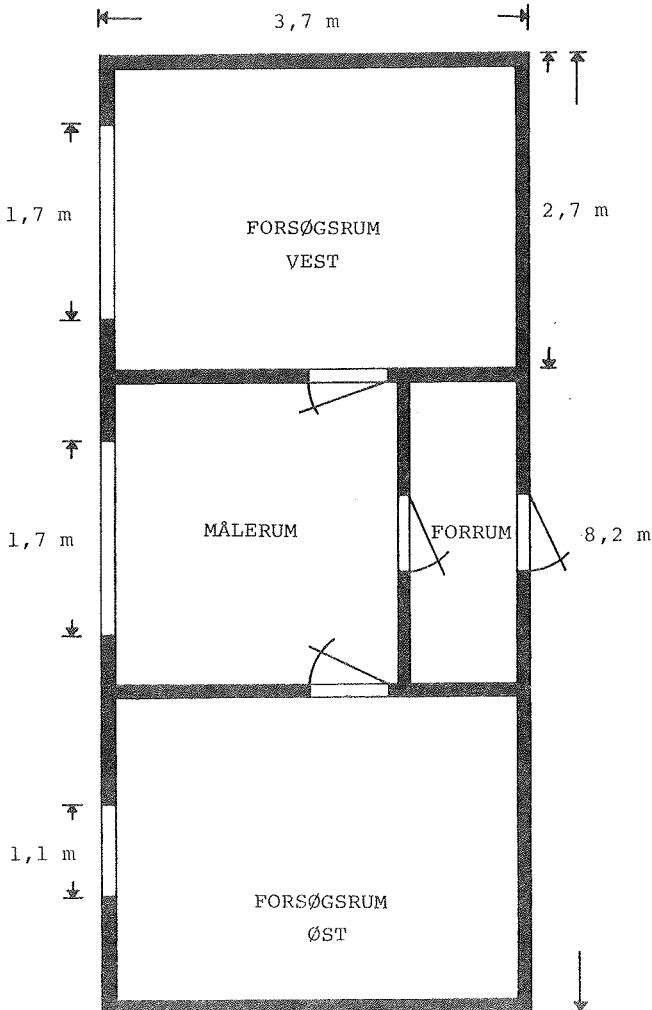


Fig. 4.2.1 Grundplan af forsøgshus

Det øst- og det vestvendte rum er de to forsøgsrum, der er tilstræbt opbygget helt identisk, bortset fra vinduesarealet. En direkte sammenligning af temperaturer og energiforbrug i de to rum er således muligt. Det midterste store rum er målerum, og det midterste lille rum er et forrum, der fungerer som en sluse, så den kolde udeluft ikke lukkes direkte ind i målerummet. Temperaturforholdene i målerummet ville derved blive påvirket mærkbart, hvilket er uheldigt, da de er tilstræbt holdt konstant.

Huset er overalt opført med et lægteskelet som den bærende del. Der er i alle ydervægge isoleret med 100 mm mineraluld og i alle skillevægge med 50 mm mineraluld. Huset er udvendig beklædt med to lag vandfaste finerplader, og indvendig med to tynde beklædningsplader af finer, fig. 4.2.2.

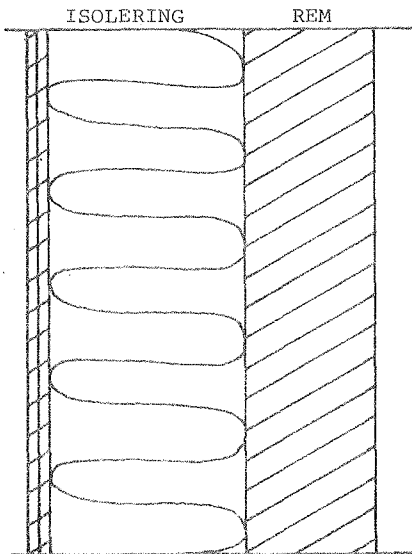


Fig 4.2.2 a Lodret snit i øverste del af ydervæg (tegning ikke målsat)

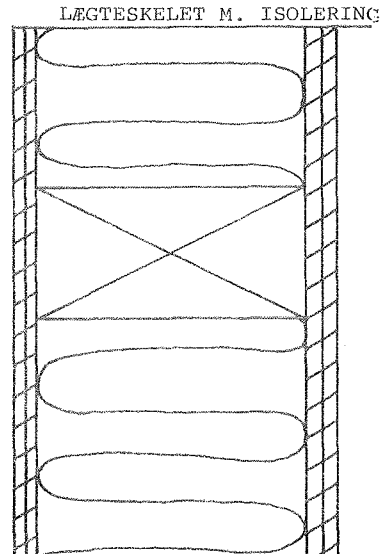


Fig 4.2.2 b Lodret snit i nederste del af ydervæg (tegning ikke målsat)

Gulvet er ligeledes opført af et lægteskelet. Mellem lægterne er der isoleret med 100 mm mineraluld, og nedad og opad er lægterne beklædt med finerplader, fig. 4.2.3.

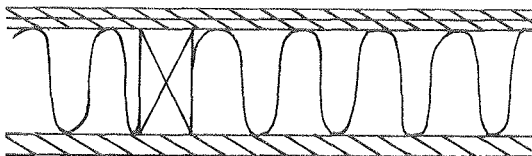


Fig 4.2.3 Lodret snit i gulvkonstruktion
Mål 1:5

Tagkonstruktionen svarer til gulvkonstruktionen, dog med den forskel, at loftsbeklædningen indvendig er gipsplader, og at der udvendigt er afdækket med to lag asfalt-pap. Hele huset hviler på 4 stk 6 x 8 tommer bjælker, der er understøttet med 20 sokkelsten. Der er altså fri luftpassage under huset, således at temperaturforholdene her med god tilnærmelse vil være de samme som i det fri iøvrigt. (Fig. 4.2.4) viser konstruktionen.

For at reducere det naturlige luftskifte, er der mellem de to indvendige finerplader i væggene, mellem finerplader og gipsplader i loftet og mellem de to finerplader i gulvet indlagt en kraftig 0,25 mm plastfolie. Folien er udlagt med overlæg på ca. 20 cm, og der er tapet over alle samlinger, som vist på fig. 4.2.5.

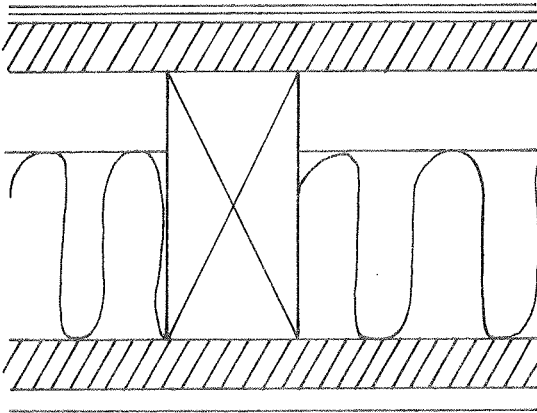


Fig 4.2.4 Lodret snit i tagkonstruktion

Mål 1:2

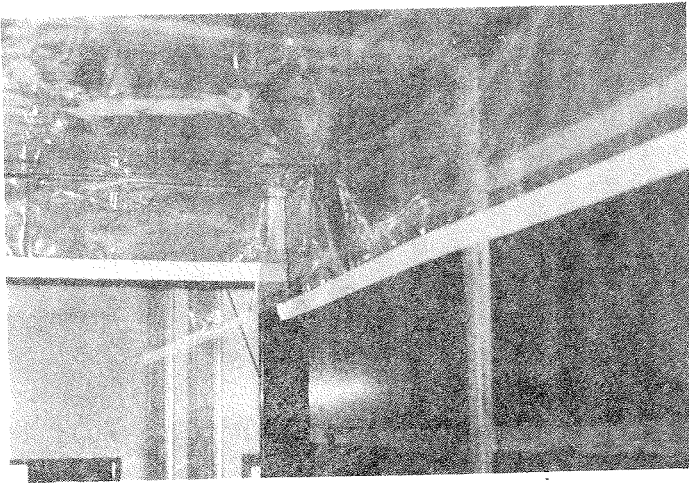


Fig. 4.2.5. Foto, der viser opsætning af plastfolie i forsøgsrum vest.

Da de to forsøgsrum vender henholdsvis mod øst og vest vil der uundgåeligt blive en forskel på hvor megen solstråling, der rammer de to gavle. Forskel i horisontafskæring, (d.v.s. den del af himmelhvælvingen - udtrykt i grader - der set fra den pågældende flade ikke er synlig) og forskelligt skydække dagen igennem er faktorer, der bevirker denne forskel.

Ved udvendig at forsyne de to gavle med hvidmalede plader i en afstand af ca. 10 cm fra selve vægoverfladen, vil denne skævhed i den indstrålede energimængde til gavlene blive reduceret betydeligt. Samtidig vil temperaturforholdene i mellemrummet mellem plader og gavl ikke afvige meget fra udetemperaturen. Transmissionstab gennem gavlene vil således med god tilnærmelse forblive uforandret.

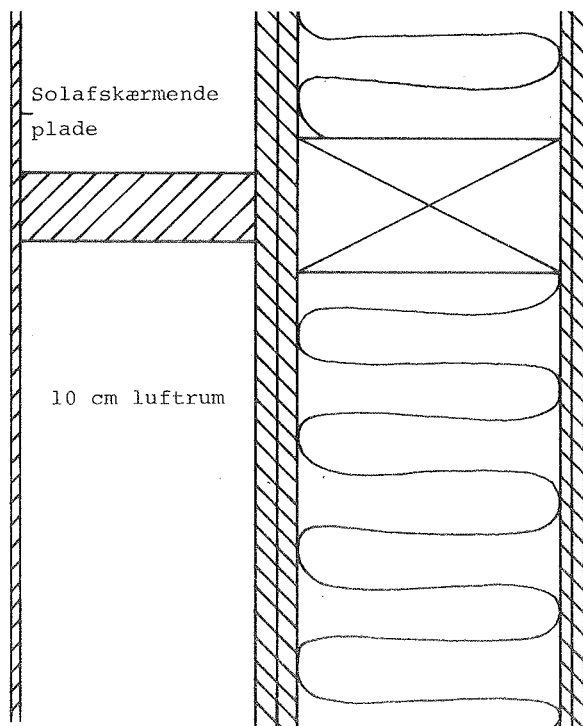


Fig 4.2.6 Lodret snit i gavlkonstruktion
med solafskærmende plader.
Mål 1:2

Som det fremgår af beskrivelsen af forsøgshusets konstruktioner, er der tale om et "let" hus. Det vil sige, at det stort set er uden varmeakkumulerende masse, der dels medvirker til at nedbringe energiforbruget og dels er med til at udjævne kraftige temperatursvingninger i rumtemperaturen, som følge af solindfald gennem vinduerne.

For delvis at afhjælpe denne mangel på varmeakkumulerende masse, er der på gulvet i hvert af de to forsøgsrum anbragt et 20 cm tykt lag af letbetonblokke svarende til ca. 1500 kg letbeton i hvert rum.

Fig. 4.2.7 viser den igangværende udlægning af letbetonblokke i forsøgsrum vest.

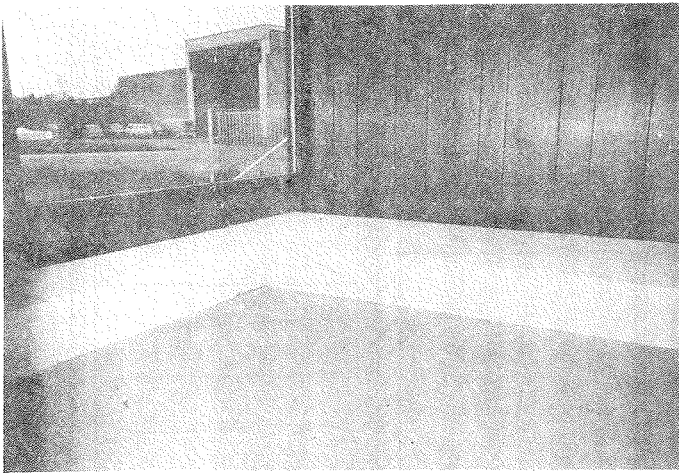


Fig. 4.2.7. Udlægning af letbetonblokke i forsøgsrum vest.

Over letbetonblokkene blev der lagt 9 mm mørke spånplader for at gulvfarven og dermed absorptionen af den direkte indfaldende solstråling skulle være nogenlunde den samme som i almindelige opholdsrum. Den meget lyse letbetonoverflade ville give for stor refleksion, således at den mængde solenergi, der blev absorberet og akkumuleret, blev for lille.

På dage med stort solindfald og dermed høj rumtemperatur afgav spånpladerne imidlertid så megen fenol, at det uden kraftig ventilation var umuligt at opholde sig i forsøgshuset. Selv med et stort luftskifte var luften meget ubehagelig og skadelig.

Spånpladerne i de to forsøgsrum blev derfor fjernet, og i stedet for blev der udlagt et kokostæppe. Derved blev lugtgenerne fjernet, og desuden fik gulvoverfladen en mørkere farve, som nok i højere grad svarer til gulve i almindelige opholdsrum.

4.3 Forsøgshusets varmesystem

4.3.1 Princip

Varmesystemet i forsøgshuset er opbygget af to enheder, der fungerer uafhængigt af hinanden. Princippet i systemet er, at forsøgsrummene tilføres en konstant luftmængde, der er forvarmet til ca. 5°C under den ønskede rumtemperatur. Den varmemængde, der derved afgives til rummene er basisvarmen, der kun i tilfælde af, at denne er utilstrækkelig suppleres med varme fra en termostattyret elvarmeovn, der er placeret umiddelbart under rummets vindue.

Når udetemperaturen er højere end ca. 5°C under den ønskede rumtemperatur, sker der ikke nogen forvarmning af ventilationsluften, men den indblæses direkte i forsøgsrummene, hvor elvarmeovnene sørger for tilførsel af den nødvendige energimængde til opretholdelse af det ønskede temperaturniveau.

Stiger udetemperaturen yderligere og når op over den fastsatte rumtemperatur, vil hverken ventilationsluft eller varmeovne tilføre forsøgsrummene varme, der koster penge. Da dette oftest indtræffer i forbindelse med solskin, vil det konstante luftskifte der tilstræbes, medvirke til at dæmpe solindfaldets indflydelse på rumtemperaturen, der ellers kan stige til op over 40°C (målt i forsøgsrummene inden ventilationsanlæggene blev monteret).

4.3.2 Opbygning

Selve opbygningen af varmeanlægget er vist på et lodret snit af et af forsøgsrummene, fig. 4.3.1.

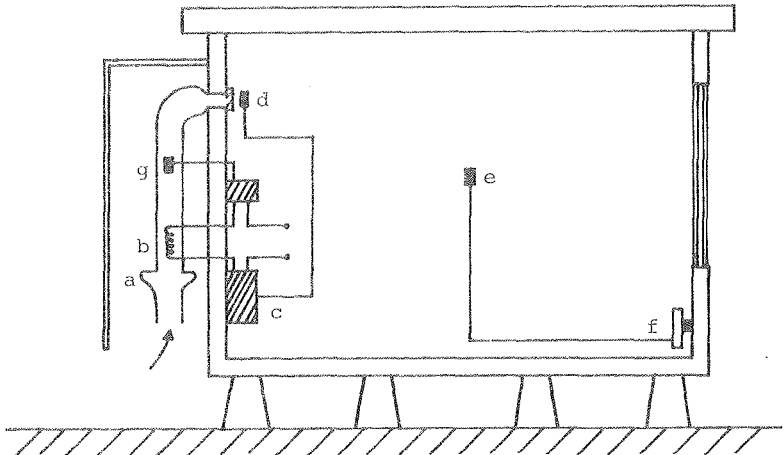


Fig 4.3.1 Lodret snit i forsøgshus visende princippet i varmeanlægget

- a) Trinløs regulerbar kanalblåser
- b) Varmelegeme indbygget i kanalen. Styres on/off af c
- c) Elektronisk regulator
- d) Rumføler
- e) Rumtermostat med accelerator
- f) Elvarmeovn
- g) Sikkerhedstermostat med føler i ventilationskanal

Kanalblåseren a) trækker udeluften ind i ventilationskanalen, hvor den i varmelegemet b) opvarmes. Den opvarmede luft blæses ind i forsøgsrummet. Umiddelbart indenfor indblæsningsåbningen er anbragt en rumføler d), der står i forbindelse med den elektroniske regulator c). Denne styrer (on/off) varmelegemet b), så indblæsningstemperaturen holdes konstant ca. 5°C under den ønskede rumtemperatur.

Skulle der opstå en fejl i systemet, så temperaturen stiger betydeligt, vil en sikkerhedstermostat g), hvis føler er anbragt lige over varmelegemet, sørge for, at eltilførslen afbrydes ved ca. 30°C. Der sker således ikke nogen overophedning med deraf følgende fare for brand i ventilationsenheden.

Elvarmeovnen er styret on/off af en rumtermostat, der er placeret midt i lokalet på en sådan måde, at den ikke kan blive påvirket af den direkte solstråling gennem vinduet. Dette ville nemlig medføre en uønsket opvarmning af termostaten, der således ville "føle" en forkert temperatur. For at opnå en god regulering er termostaten "hurtig", d.v.s. uden nogen masse af betydning, så selv små svingninger i temperaturen vil få termostaten til henholdsvis at slutte og bryde strømmen. Desuden er termostaten forsynet med en accelerator, der består af en elektrisk modstand placeret umiddelbart under bimetal-

fjederen. Ved strømmens passage af modstanden afsættes en del af effekten som varme, der hæver fjederens temperatur en smule. Termostaten vil derfor bryde strømmen lidt før rumtemperaturen når det niveau, da termostaten ellers ville bryde strømmen. Da dette niveau ligger over den ønskede rumtemperatur, medfører acceleratoren en bedre regulering.

Fra forsøgsrummet trykkes rumluften gennem to luftventiler ind i målerummet. Herfra videre til forrummet gennem endnu to luftventiler, for til sidst at blive trykket ud i det fri igen. På fig. 4.3.2, der viser forsøgs-
huset set fra oven med taget skåret bort, er placeringen af luftventilerne vist.

Ved at lade rumluften fra forsøgsrummene passere gennem de to øvrige rum opnås, at rumtemperaturen i disse kommer til at ligge nær den ønskede rumtemperatur i forsøgsrummene. Varmedvekslingen mellem forsøgsrum og målerum bliver derved mindst muligt. Desuden bliver elforbruget i måle- og forrum mindre ved denne ventilationsform, sammenlignet med, at luften fra forsøgsrummene blev "kastet" direkte ud i det fri.

I kolde perioder, hvor denne varmetilførsel, samt varmeafgivelsen fra måleapparatur til måle- og forrum ikke er tilstrækkelig til at holde den ønskede rumtemperatur, suppleres der med varme fra en termostatstyret elvarmeovn. Denne elvarmeovn er ligeledes placeret under vinduet og termostaten forsynet med accelerator for at opnå en god regulering.

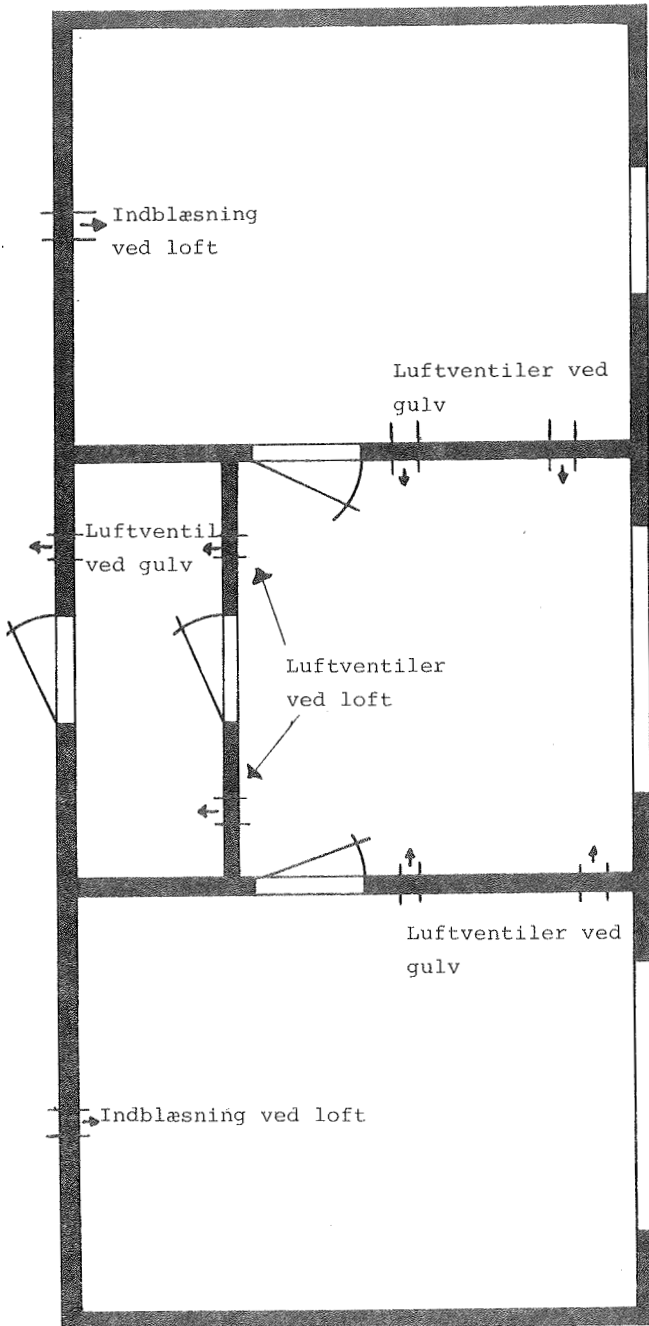


fig. 4.3.2. Placering af luftventiler i
forsøgshus. Ikke målsat.

5. FORSØGSHUSETS MÅLESYSTEM OG REGISTRERINGSUDSTYR

5.1 Temperatur-målinger

Samtlige målinger af temperaturer er udført med kobber-konstantan termoelementer.

Den valgte type PT-26-T har flere fordele, hvoraf lav pris og let håndterlig er blandt de væsentlige. Samtidig er det en type, som laboratoriet har benyttet gennem længere tid, og der er udviklet et beregningsudtryk, der i temperaturområdet -10 -40°C kan benyttes til om-sætning af målte termospændinger til temperaturdifferenser i $^{\circ}\text{C}$ (se afsnit 6.1).

På fig. 5.1.1 er vist, hvorledes opbygningen af målesystemet i princippet er foretaget.

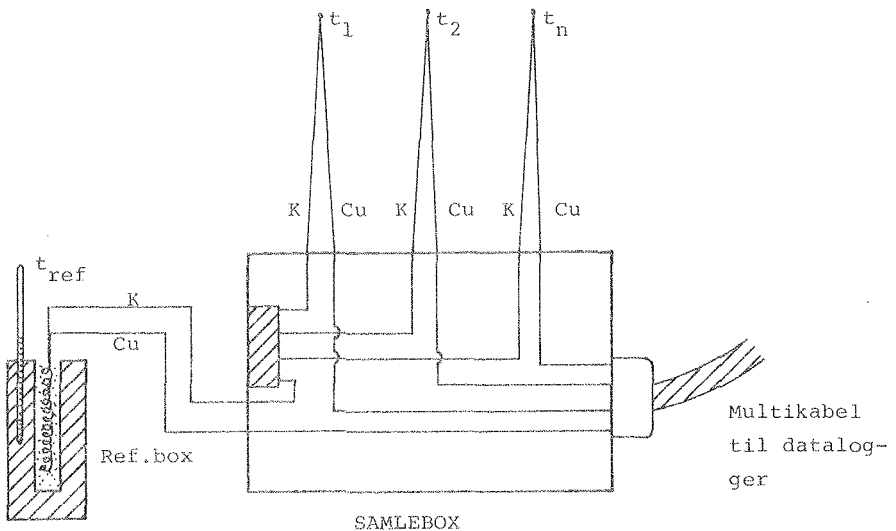


Fig 5.1.1 Princippet i opbygningen af målesystemet

Fra de enkelte loddesteder, hvor temperaturerne t_1 , t_2 , t_n ønskes bestemt, føres termoelementledningerne som skærmede kabler til en samlebox, hvor sammenlodning af alle konstantan ledninger, inklusive den fra referencen, finder sted. Kobberledningerne, der nu hver for sig sammen med referencens kobberleder udgør et termoelement, samles i ét skærmet multikabel (kun kobberledere), der overfører spændingssignalerne til registreringsudstyret.

5.2 Temperatur-referencen

For at få et absolut mål (grader celsius) for temperaturerne t_1 , t_2 , t_n skal temperaturen ved termoelementernes andet loddested kendes. Opsætning af en referencebox med konstant og kendt temperatur er den mest anvendte fremgangsmåde, som også er blevet benyttet her.

Referenceboxen består af en aluminiumcylinder, ca. 10 cm i diameter. I den ene ende er der boret et ca. 20 mm hul til anbringelse af referenceloddestedet. For at være sikker på, at loddestedet antager referenceboxens temperatur, er de yderste ca. 40 cm termoelementledning (ca. 1000 x diameteren) rullet op som en spiral, der er anbragt i boxens hul. Hullet er derpå fyldt op med tørt sand. Aluminiumcylinderen er elektrisk opvarmet, og ved hjælp af en indbygget termostat holdes en konstant temperatur, der aflæses på et termometer, der er anbragt i et hul i cylinderen.

Inden termometret er blevet anvendt til aflæsning af referencetemperaturen, er det blevet kalibreret. Ved at sammenligne termometervisningen ved forskellige temperaturer med et præcisionstermometer, er der kun konstateret en forskel på $+0,1^{\circ}\text{C}$. Forskellen var den samme ved de forskellige temperaturniveauer, hvorfor en korrektion af den målte referencetemperatur på $0,1^{\circ}\text{C}$ er foretaget ved alle aflæsninger.

I hele forsøgsperioden er referencetemperaturen blevet aflæst med jævne mellemrum, og der er kun blevet konstateret en afvigelse på $0,2^{\circ}\text{C}$ fra den egentlige referencetemperatur, $42,2^{\circ}\text{C}$. Ved omregningen fra mV til $^{\circ}\text{C}$ er temperaturen $42,2^{\circ}\text{C}$ blevet benyttet som en konstant. Den fejl, der derved er blevet begået, er maksimalt $0,2^{\circ}\text{C}$ på en temperaturdifferens på mellem $15 - 25^{\circ}\text{C}$, hvilket svarer til en fejl på mellem 1,3 og 0,8%.

5.3 Målepunkter

Målesystemet består af ialt 46 målepunkter, alle sammen temperaturmålinger.

Det var på forhånd givet, at der skulle registreres:

1. Rumlufttemperatur i alle rum
2. Indblåsningstemperatur i de to forsøgsrum
3. Udetemperatur

Disse temperaturer skulle nemlig benyttes ved de senere EDB-beregninger, hvor forsøgshuset skulle indgå som en beregningsmodel, og de nævnte temperaturer skulle udgøre de nødvendige temperaturdata.

Udover de således forud fastlagte temperaturmålinger, skønnedes det ønskeligt at få registreret:

4. Overfladetemperatur i de to forsøgsrum
5. Temperaturdifferensen over vinduerne
6. Globetemperaturen i de to forsøgsrum
7. Lufttemperatur ved indsugning til ventilationsunits
8. Lufttemperatur ved udblæsning fra forrum

ad 1

Målepunkterne til registrering af rumlufttemperaturen er anbragt i overensstemmelse med de forskrifter, der er givet i Termisk og atmosfærisk indeklima [24]. Det

vil sige, at der i tre niveauer, nemlig 10 cm, 120 cm og 175 cm over gulvet er anbragt loddesteder. Deres placering iøvrigt fremgår af fig. 5.3.1.

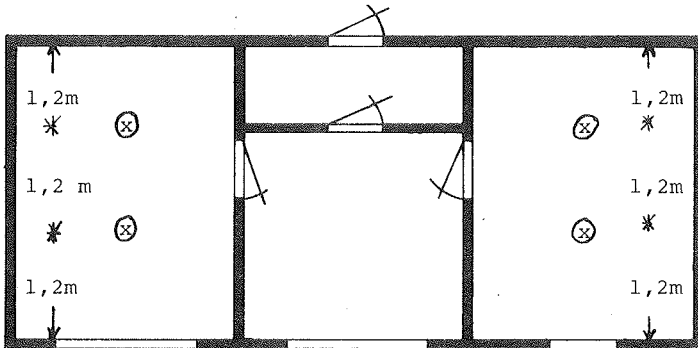


Fig 5.3.1 Placering af termoelementstandere i forsøgshus.

ad 2

Temperaturen af indblæsningsluften er målt umiddelbart før luften passerer gennem indblæsningsventilen. For at sikre en så nøjagtig måling som muligt, blev der i ventilationskanalen indbygget en blænde, hvori tværsnittet blev reduceret fra $\varnothing 100$ mm til $\varnothing 44$ mm. Ved at skulle passere blænden blev lufthastigheden øget fra ca. 0,75 m/s til ca. 3,80 m/s.

Vil den målte lufttemperatur nu også være den "rigtige". Afgørende herfor er, om luften i kanalen er godt opblandet, hvilket sikres ved at skabe en turbulent strømning. Med luft som medie vil der i en given kanal være en turbulent strømning for Reynolds tal > 8000 . I områ-

det $2320 < Re < 8000$ vil strømningsbilledet afhænge af kanaludformningen. Hvis strømningen således er faldet til ro, vil strømningen være laminar. For $Re < 2320$ er strømningen altid laminar [1].

I dette tilfælde hvor der i kanalen er indskudt en blænde, vil dette alene medføre nogen, måske total turbulens, idet luftstrømmen pludselig skal passere en skarpkantet forsnævring.

Udregnes Reynolds tal for de to rørtværsnit fås, idet der i begge tilfælde regnes med en lufttemperatur på 17°C (Denne temperatur er den ønskede indblæsningstemperatur ved en rumtemperatur på 22°C (se afsnit 4.3.1, side 121):

Kinematisk viskositet for luft ved 17°C : $\nu = 14,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Kanal $\varnothing$ 100 mm

$$Re = \frac{0,75 \cdot 0,1}{14,8 \cdot 10^{-6}}$$

$$\left[\frac{\text{m} \cdot \text{m} \cdot \text{s}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right]$$

$Re \sim 5000$

Kanal $\varnothing$ 44 mm

$$Re = \frac{3,8 \times 0,044}{14,8 \cdot 10^{-6}}$$

$Re \sim 11300$

I blændeåbningen vil der altså med sikkerhed være en turbulent strømning, således at luftopblandingen er total. En temperaturmåling i selve ventilationskanalen med kun et eller ganske få termoelementer, hvor $Re \sim 5000$ kunne måske give en fejl, idet opblandingen her sandsynligvis ikke er total.

ad 3

Udetemperaturen er målt to steder.

- a) På nordsiden af forsøgshuset. Tre termoelementer i højderne 0,5, 1,5 og 2,5 m over jorden er koblet parallelt, så den faktiske måling bliver en middelværdi af de tre. Målepunkterne er placeret ca. 20 cm fra væggen, således at en indflydelse hidrørende fra overgangsluftlaget umiddelbart udenfor væggen er elimineret.
- b) I en engelsk hytte ca. 5 m fra forsøgshuset. Denne målemetode svarer til den standardmetode, som også Meteorologisk Institut benytter.

ad 4

Til måling af overfladetemperaturer er der på hver flade (vægge, loft og gulv) anbragt 4 termoelementloddesteder. Fig. 5.3.2 viser, hvorledes de er placeret.

De er koblet parallelt, hvilket vil sige, at kobber henholdsvis konstantan lederne fra hvert af de fire loddesteder er loddet sammen, så den temperatur, der måles, bliver en middelværdi af de fire målinger. En betingelse for en korrekt middelværdimåling er, at alle termoelementlederne er lige lange, da forskel i ledernes elektriske modstand ellers ville bevirke, at hver loddested ikke bidrager ligeligt til middelværdimålingen.

For at opnå en god termisk kontakt mellem loddested og overflade, er der loddet en kobberplade på termoelementloddestedet. Desuden er kobberpladen og de første 20 cm ledning limet på selve overfladen.

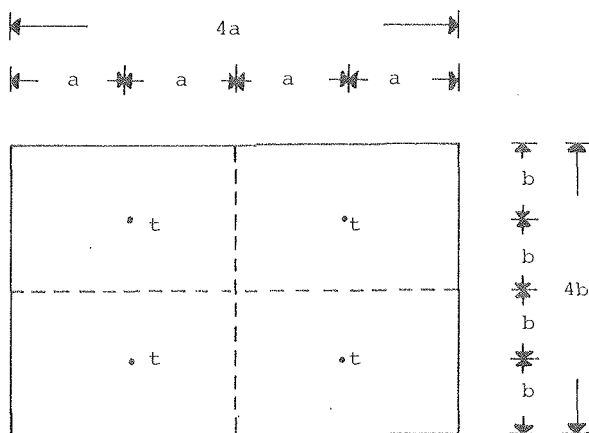


Fig 5.3.2. Placering af termoelementer 't' på vægge, gulv og loft.

ad 5

Samme monteringsprincip er benyttet ved termoelementerne til måling af glasoverfladernes temperatur. Dog er der her ikke tale om at koble flere termoelementer sammen. På hvert vindue er der to steder (se fig. 5.3.3) placeret et målested indvendig og udvendig, således at de ialt 8 målepunkter giver temperaturdifferensen over vinduerne.

ad 6

Globetemperaturen er målt ét sted i hvert forsøgsrum, nemlig 120 cm over gulvet omtrent midt på gulvfladen (se fig. 5.3.4).

I en sortmalet plastkugle er der anbragt et termoelementloddested. De yderste ca. 40 cm af ledningen er oprullet som en spiral for at sikre en korrekt måling.

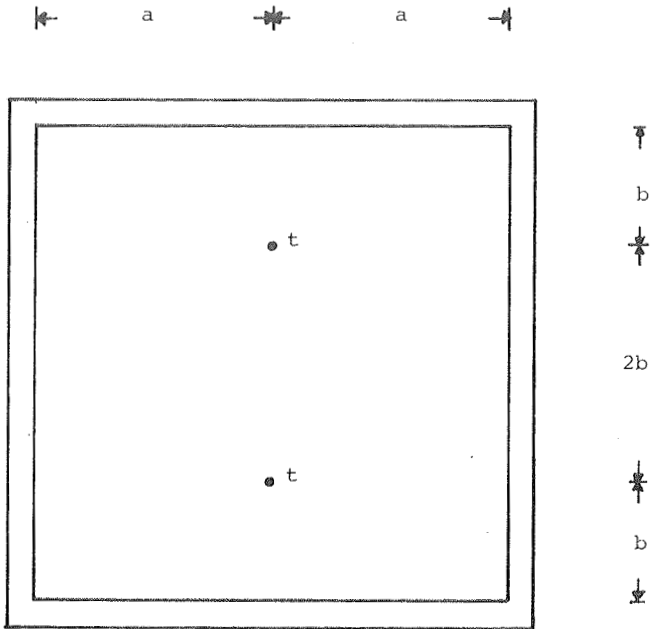


Fig 5.3.3. Placering af termoelementer på vinduer

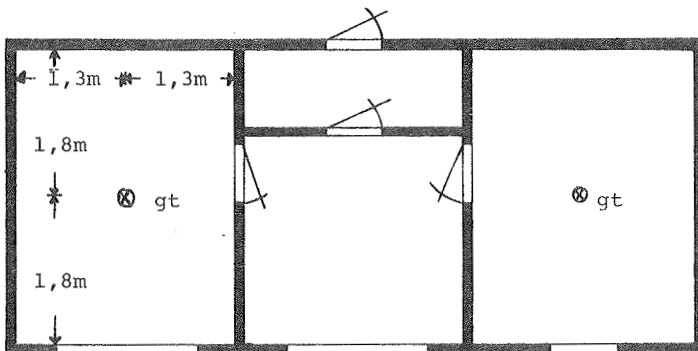


Fig 5.3.4. Placering af globetermoelement 'gt' i forsøgsrum. Samme placering i de to rum.

ad 7

I hver af de to ventilationsenheder er der umiddelbart indenfor indsugningsåbningen placeret ét termoelementloddested til måling af indsugningsluftens temperatur.

Kanal tværsnittet på dette sted er Ø 160 mm. Under forudsætning af, at indsugningstemperaturen er lig udetemperaturen, som i hele forsøgsperioden har ligget mellem $+10^{\circ}\text{C}$ og $+3^{\circ}\text{C}$, fås Reynolds tal til at ligge i området:

$$\frac{0,30 \cdot 0,16}{14,21 \cdot 10^{-6}} < \text{Re} < \frac{0,30 \cdot 0,16}{13,08 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow 3378 < \text{Re} < 3670$$

Idet lufthastigheden er ca. 0,30 m/s.

Reynolds tal ligger altså i området

$2320 < \text{Re} < 8000$, hvor strømningsbilledet er afhængigt af kanaludformningen. Da der her er tale om en indsugningsåbning og termoelementloddestedet er anbragt ca. 100 mm fra selve åbningen (mindre end én gang diameteren) kan det antages, at der er turbulent strømning med en god opblanding af luften til følge. Måling af indsugningsluftens temperatur med kun ét termoelement skulle derfor give en tilstrækkelig nøjagtig måling.

ad 8

I udblæsningsåbningen fra det lille forrum er der placeret ét termoelementloddested. Vedrørende vurderingen af, om ét loddested er tilstrækkeligt, skal det nævnes, at der her er tale om, at ventilationsluften fra det lille forrum pludselig tvinges gennem den snævre udblæsningsåbning (Ø 50 mm). Der er altså ikke tale om nogen rolig uforstyrret luftstrømning, hvorfor der vil være turbulens og en god luftopblanding.

En samlet oversigt over målepunkterne og deres placering er angivet på de følgende sider.

Kanal nr.	rum øst/vest	placering
0	øst	stander mod syd, øverste termoelement
1	øst	- - - ,midterste -
2	øst	- - - ,nederste -
3	øst	- - nord, øverste termoelement
4	øst	- - - ,midterste -
5	øst	- - - ,nederste -
6	øst	- - - ,globetemperatur
7	øst	termoelementer på nordvæg
8	øst	- - østvæg
9	øst	- - sydvæg
10	øst	- - vestvæg
11	øst	- - loft
12	øst	- - gulv
13	øst	- - vindue udv. nederst
14	øst	- - - indv. nederst
15	øst	- - - udv. øverst
16	øst	- - - indv. øverst
17	fungerer som fælles minus.	
18	vest	stander mod nord, øverste termoelement
19	vest	- - - ,midterste -
20	vest	- - - ,nederste -
21	vest	- - - ,globetemperatur
22	vest	- - syd ,øverst
23	vest	- - syd ,midterste
24	vest	- - syd ,nederst
25	vest	væg - nord
26	vest	væg - øst
27	vest	væg - syd
28	vest	væg - vest
29	vest	loft
30	vest	gulv
31	vest	vindue udv. øverst
32	vest	vindue indv. øverst
33	vest	vindue udv. nederst

34	vest	vindue indv. nederst
35	intet	

Kanal 36	målerum	stander, øverst
Kanal 37	-	- , midterste
Kanal 38	-	- , nederst
Kanal 39	forrum	- , øverst
Kanal 40	-	- , nederst
Kanal 41	rum øst	indsugning
Kanal 42	rum øst	indblæsning
Kanal 43	rum vest	indsugning
Kanal 44	rum vest	indblæsning
Kanal 45	forrum	udblæsning
Kanal 46	udetemperatur	

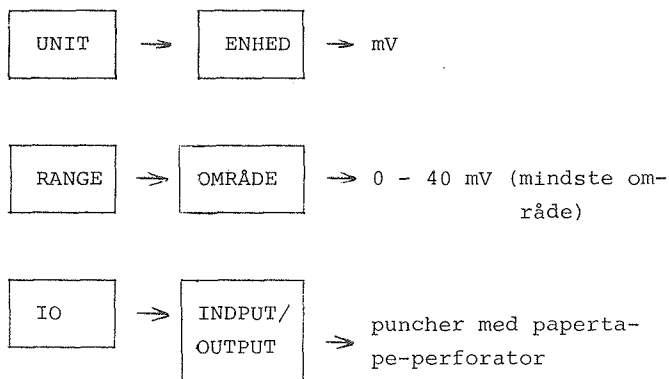
5.4 Registreringsudstyr

Udstyret består af to separate enheder, nemlig:

1. En datalogger
2. En puncher med paper-tape perforator

Dataloggeren indeholder 48 analoge kanaler, der hver for sig eller i grupper kan programmeres således, at out-put fra dataloggeren passer til de enkelte kanaler.

Da samtlige målinger her er temperaturmålinger med kobber-konstantan termoelementer, og indenfor temperaturområdet $\div 10^{\circ}\text{C} - + 40^{\circ}\text{C}$ er alle kanaler blevet programmeret med:



Desuden indeholder dataloggeren mulighed for at programmere tiden i dage (0 - 100), timer (0 - 24), minutter (0 - 60) og sekunder (0 - 60) og tidsintervallet mellem to på hinanden følgende scan.

Som tidsregning er valgt kalenderårets, og som interval mellem to scan er valgt 1 time. Som scantidspunkt er valgt hver hele time. Termospændingssignalerne til disse tidspunkter overføres via dataloggeren til puncheren,

der udhuller alle oplysninger fra dataloggeren. Et scan indeholder således:

Klokkeslet for scan

Kanalnummer efterfulgt af

Måleværdi (0 - 40 mV med tre decimaler) efterfulgt af

Enheden mV.

5.5 Registrering af energiforbrug

Forsøgshuset er udstyret med tre kilowatt-time målere, en for hvert af de tre sektioner i huset.

Det ville have været ønskeligt, at registreringen foregik helt automatisk, således at hver omdrejning af målerne blev registreret af dataloggeren, opsummeret og omregnet til et el-forbrug indenfor f.eks. én time. Et sådant system var imidlertid udenfor dette projekts økonomiske rammer, hvorfor der blev valgt en simplere mere arbejdskrævende og mindre driftssikker metode.

Til registreringen er blevet benyttet et fotoapparat med automatisk optræk. Ved hjælp af en elektisk udløsermekanisme og en programautomat med synkronmotor, er fotoapparatet blevet justeret til at tage et billede hver time, dels af el-målerne og dels af en timetæller (til kontrol af eksponeringstidspunkterne).

Fotoapparatet kunne kun indeholde en filmlængde, svarende til ca. 48 eksponeringer, hvilket vil sige, at der skulle skiftes film hveranden dag, også lørdag - søndag. De eksponerede film skulle derefter fremkaldes og endelig skulle der foretages en aflæsning af filmstrimlerne.

Dette system har stort set fungeret upåklageligt. Dog har der været problemer med den automatiske eksponering,

hvorfor der adskillige gange i forsøgsperiodens løb har manglet enkelte eller flere timeværdier. I de fleste tilfælde er der i resultaterne blevet foretaget en lineær interpolation til erstatning af de manglende registreringer. Kun hvis der i en længere periode (d.v.s. mere end 4 - 5 timer) har været fejl, er det pågældende tidsrum blevet kasseret som forsøgsperiode.

6. DATABEHANDLING AF MÅLERESULTATER FRA FORSØGSHUS

Til behandling af de indsamlede måledata fra forsøgshuset er der opbygget tre EDB-programmer, der beregner de ønskede værdier, og giver et output af resultaterne på en overskuelig form. På flow diagrammet, fig.6.1. , er vist, hvorledes databehandlingen er opbygget.

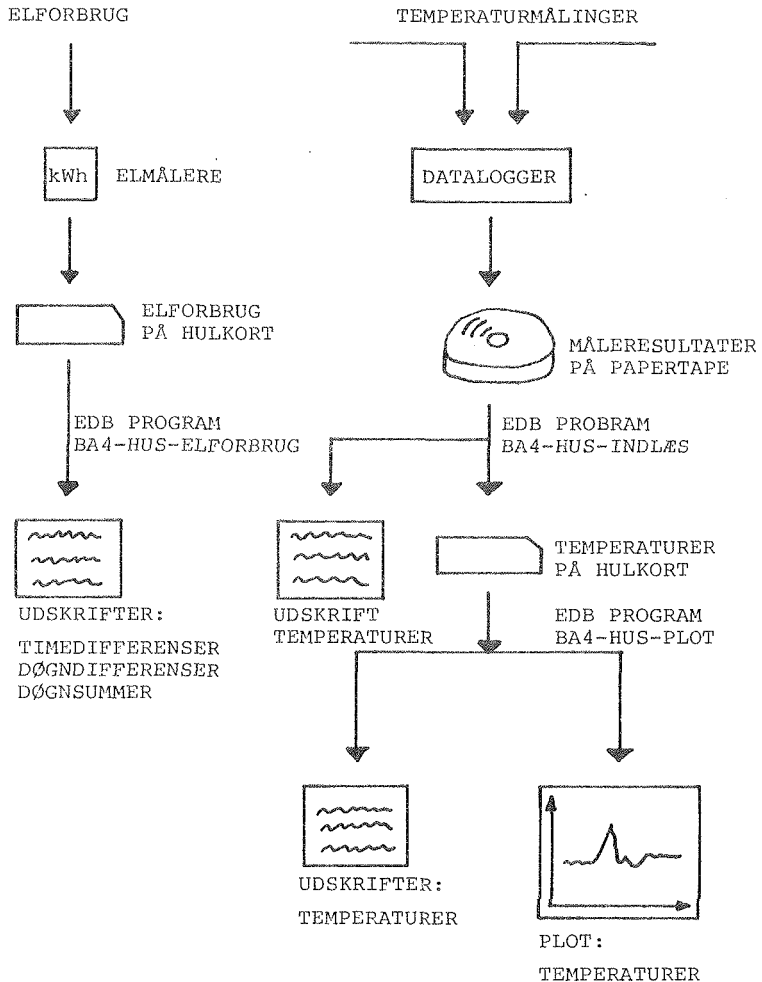


Fig 6.1. Flowdiagram af databehandling af måleresultater fra forsøgshus

Målingerne af temperaturen registreres i millivolt af dataloggeren, der udhuller resultaterne på papertape. Ved hjælp af EDB-programmet BA4-HUS-DATAIND omregnes millivolt til temperatur, og de beregnede temperaturer udskrives og udhulles. Hulkortene indgår i den videre behandling, idet de er indgangsdata til EDB-programmet BA4-HUS-PLOT, der sorterer de forskellige temperaturer og kun udskriver de resultater, der specificeres i programmet. Samtidig er der i programmet mulighed for at få plottet resultaterne i diagrammer, der angiver temperaturens tidsmæssige variation.

El-forbruget registreres som nævnt af det automatiske fotoudstyr. Efter aflæsning af filmstrimlen hules el-forbrugene time for time på hulkort (manuelt arbejde). Kortene er indgangsdata til EDB-programmet BA4-HUS-ELFORBRUG. Programmet beregner el-forbruget i de tre sektioner i forsøgshuset, dels for hver time, og dels for hvert døgn og endelig for en hel periode. Desuden beregnes differencen mellem timeenergiforbruget i de to forsøgsrum, den tilsvarende differens i døgnenergiforbruget, samt den procentuelle døgnforskel.

6.1 EDB-programmet BA4-HUS-DATAIND

Programmet foretager bl.a. en omregning af de målte millivolt termospændinger til temperaturforskelle i °C.

Til valget af det benyttede omregningsudtryk, skal der knyttes følgende kommentarer:

Det er nævnt i afsnit 5.1, at alle temperaturmålinger er foretaget med kobber-konstantan termoelementer, der har en næsten lineær karakteristik. I litteraturen findes mange formeludtryk, der giver omsætningen mellem

mV og $^{\circ}\text{C}$, og de forskellige udtryk varierer alt efter målemetode og referencetemperatur. På fig.6.1.1, er optegnet kurveforløbet på baggrund af IPIS 68 (International Practical Temperature Scale) [25] og Handbook of Chemistry and Physics [26]. Desuden er medtaget et omregningsudtryk, der er opstillet af Hans Lund ved Laboratoriet for Varmeisolering, DTH.

Alle kurver er optegnet i temperaturområdet $-10 - 30^{\circ}\text{C}$, idet alle de målte temperaturer ligger i det område.

Da der ikke er nogen forskel på de tre kurver, er der valgt at benytte det udtryk, som er opstillet af Hans Lund, og som er blevet benyttet mange gange i forbindelse med temperaturmålinger ved Laboratoriet for Varmeisolering.

Udtryk til omregning af målte termospendinger til temperaturforskelle i $^{\circ}\text{C}$:

$$\text{TDIF} = (25,9 - 0,06\text{TMID} + 0,00027\text{TMID}^2 - 0,000001\text{TMID}^3)\text{DATA} \quad ^{\circ}\text{C}$$

hvor

$$\text{TMID} = \text{TREF} - 25,9\text{DATA}/2 \quad ^{\circ}\text{C}$$

hvor

TREF=referencetemperaturen (her $42,2^{\circ}\text{C}$)

DATA= den målte termospendingsværdi i mV

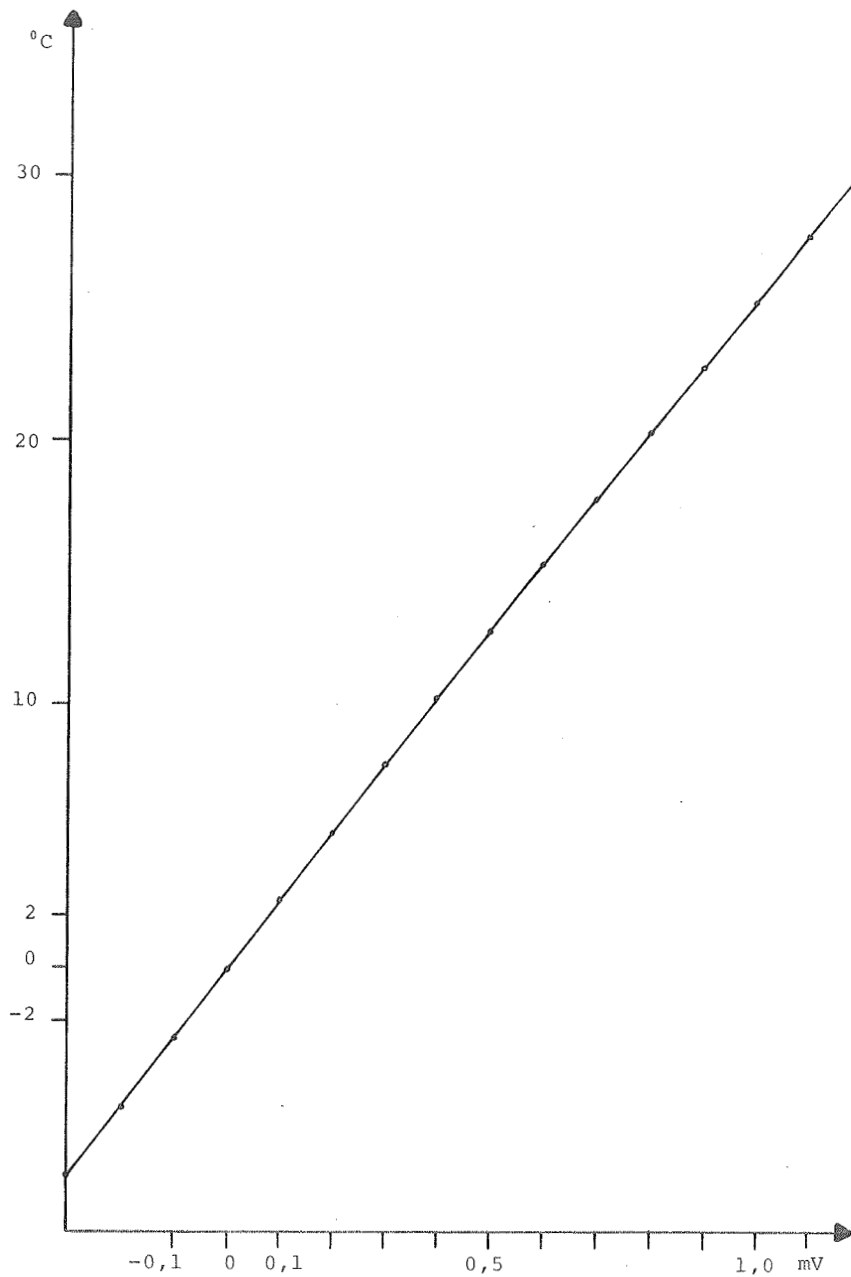


Fig 6.1.1 Diagram over omsætningen fra mV til °C

6.2 EDB-programmet BA4-HUS-PLOT

En kort beskrivelse af programmet kan opsummeres i tre hovedafsnit:

- 1) linje 0005-0072: Her indlæses og udskrives tekst og data. Tidspunkter fastlægges i forhold til kalenderåret, og der indlæses numre (KNR), der senere udvælger de temperaturer, der skal plottes. Endelig fastlægges et udgangskordinatsystem.
- 2) linje 0073-0400: De indlæste numre (KNR=1-13) udvælger de data, der skal plottes. x og y-koordinater samt tilhørende tekst udskrives.
- 3) linje 0406-0545: Her beregnes akseparametrene (længde, intervaller m.v.), og de enkelte plot udtegnes og påskrives tekst. Derpå returnerer programmet til begyndelsen af punkt 2, hvor der "spørges" om en ny værdi af KNR osv.

Betydningen af de enkelte KNR-værdier er:

- KNR = 1: Middelrumlufttemperaturen (af 6 målinger) i de to forsøgsrum.
- KNR = 2: Globetemperatur i de to forsøgsrum.
- KNR = 3: Udeluftens temperatur (to forskellige målinger)
- KNR = 4: Middelrumlufttemperatur i målerum (middel af 3 målinger).

- KNR = 5: Temperatur af udblæsningsluft fra forrum.
- KNR = 6: Loft- og gulvtemperatur, og deres differens.
- KNR = 7: Indsugnings- og udblæsningstemperatur af ventilationsluft, samt deres differens.
- KNR = 8: Temperatur af glasoverflader og differens mellem udvendig og indvendig glasoverflade.
- KNR = 9: Middelrumlufttemperatur i forrum (3 målinger)
- KNR = 10: De enkelte rumlufttemperaturer i rum Øst.
- KNR = 11: De enkelte rumlufttemperaturer i rum Vest.
- KNR = 12: Overfladetemperaturer i de to forsøgsrum.
- KNR = 13: Beregning af diverse temperaturdifferenser og gradtimetal, til brug ved beregningen med BA4-programmet, hvor forsøgshuset indgår som rummodel.

6.3 EDB-programmet BA4-HUS-ELFORBRUG

Programopbygningen skal kort gengives her:

Linje 2-15: Nulstilling af de variable

16-19: Udskrift af oplysende overskrifter, enheder m.v.

24-29: Indlæsning af data for tre timer (svarer til ét hulkort).

36-38: Betingelser, der finder frem til slutning af et døgn.

40-53: Her beregnes differensen i energiforbrug time for time og for et helt døgn.

linje 34-61: Udskrift af de indlæste energiforbrug og beregnede energidifferenser.

62-71: Beregning og udskrift af hele den betragtede periodes energiforbrug og -differenser (absolut tal og procent).

7. MÅLERESULTATER FRA FORSØGSHUS

7.1 Forsøgsperioder

Det var på forhånd fastlagt, at hele forsøgsperioden skulle deles i fire mindre perioder, i hvilke vinduesarealet i forsøgsrummet mod vest blev varieret fra $1,2 \text{ m}^2$ (= vinduesarealet i rum øst) til $2,8 \text{ m}^2$ (det maximale vinduesareal i rum vest). Variationen er sket med spring på ca. $0,5 \text{ m}^2$.

De fire forsøgsperioder er:

1. Kalibreringsperioden 21 - 26 OKT. 1976

De to forsøgsrum var i denne periode så ens som muligt, også hvad angår vinduesarealet.

2. Forsøgsperiode 1: 26 OKT. - 09 NOV. 1976

Vinduesarealet i rum vest var maksimalt d.v.s. et glasareal på $2,8 \text{ m}^2$. Som følge af en strømafbrydelse d. 4-11, måtte dataloggeren omprogrammeres og forsøgsrummene opvarmes påny. Perioden er derfor blevet delt i to. Den ene fra 26 OKT. - 4 NOV. og den anden fra 5 NOV. til 9 NOV.

3. Forsøgsperiode 2: 09 NOV. - 25 OKT. 1976.

Vinduet i rum vest blev reduceret til $1,75 \text{ m}^2$. Og så i denne periode skete der en afbrydelse i målingerne. En fejl på dataloggeren, som opstod ved skift til en ny spole papertape medførte, at målinger fra 19 NOV. kl. 09.00 til 20 NOV. kl. 12.00 ikke blev registreret.

4. Forsøgsperiode 3: 25 NOV. - 30 NOV. 1976.

Vinduet i rum vest var i dette tidsrum $2,25 \text{ m}^2$. Heller ikke denne sidste periode var forskånet for uheld, idet en relækontakt til varmelegemet i en ventilationsenhed måtte udskiftes d. 30 NOV.. Heldigvis blev fejlen opdaget så hurtigt, at den ikke fik nogen betydning for målingerne.

7.2 Det tilstræbte rumklima

I alle forsøgshusets rum er der tilstræbt en konstant ensartet rumlufttemperatur på ca. 20°C . Med den valgte reguleringsmetode har dette ikke helt været muligt. For at anskueliggøre hvor god reguleringen har været, er der på basis af de målte timeværdier for ti tilfældigt valgte døgn (uden solskin) beregnet døgnmiddeltemperatur (t_{mid}) og standardafvigelsen (s). Fig. 7.2.1 viser beregningsresultaterne.

Skemaet viser, at standardafvigelsen for alle rum har været $\pm 0,3^\circ\text{C}$ i den overvejende del af tiden. Rumlufttemperaturen i de to forsøgsrum har ligget på ca. $19,5^\circ\text{C}$, i målerummet på ca. $20,0^\circ\text{C}$ og i forrummet på ca. $18,5^\circ\text{C}$. Da skillevægsarealet mellem forsøgsrum og målerum er tre gange så stort som skillevægsarealet mellem forsøgsrum og forrum ($5,40 \text{ m}^2$ mod $1,90 \text{ m}^2$), vil der netto være tale om en varmetilførsel fra målerum/forrum til de to forsøgsrum. Da temperaturdifferensen er lille, vil der dog kun være tale om et beskedent varmetilskud.

Reguleringen har altså ikke helt opfyldt ønsket om samme konstante lufttemperatur i alle rum, men da målere-

sultaterne senere skal benyttessom indgangsdata til BA4-programmet, er dette forhold uden betydning. De målte timeværdier benyttes nemlig direkte af EDB- programmet. Det eneste problem har været, at BA4 kun opererer med én temperatur af naborum. Her er der to rum med en lidt forskellig temperatur. Ved at foretage en afvejning af temperaturer, varmetransmissionstal og arealer, er det imidlertid muligt at beregne en vægtet middeltemperatur i måle- og forrum, der er en tilfredsstillende tilnærmelse til de virkelige forhold.

	FORSØGSрум ØST		FORSØGSрум VEST		MÅLERUM		FORRUM	
DATO	t _{mid}	s	t _{mid}	s	t _{mid}	s	t _{mid}	s
28/10	19,2	±0,3	19,4	±0,3	19,8	±0,3	18,2	±0,3
31/10	18,9	±0,3	19,2	±0,3	19,4	±0,3	17,7	±0,2
07/11	19,6	±0,3	20,0	±0,4	20,3	±0,3	19,3	±0,4
08/11	19,5	±0,3	19,9	±0,3	20,3	±0,3	19,1	±0,2
10/11	19,4	±0,3	19,9	±0,3	19,9	±0,3	18,7	±0,3
14/11	18,9	±0,3	19,5	±0,3	19,6	±0,3	17,8	±0,2
18/11	19,3	±0,3	19,7	±0,3	19,9	±0,3	18,4	±0,1
21/11	19,4	±0,3	19,6	±0,3	19,9	±0,4	18,3	±0,2
26/11	19,2	±0,3	19,5	±0,2	19,9	±0,3	18,3	±0,2
27/11	19,2	±0,3	19,3	±0,3	19,8	±0,3	18,3	±0,4

Fig 7.2.1 Døgnmiddelværdier og standardafvigelse af rumlufttemperaturer i forsøgsrum, målerum og forrum. Alle angivelser er i °C.

Varmetransmissionstallene uden overgangsmodstande er beregnet på baggrund af beskrivelsen af forsøgshuset i afsnit 4.2.. Der er benyttet et EDB-program, der er udarbejdet af Anker Nielsen ved Laboratoriet for Varmeisolering. Resultatet af beregningen er vist på nedenstående skema.

RUM V ØSTVÆG MA	AREAL =	4.010 M2	
	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
TREPLADE	0.004	0.140	0.029
MINERALULD	0.050	0.044	0.791
TREPLADE 0.200		0.140	
TREPLADE	0.004	0.140	0.029
	K-VÆRDI =	1.179 W/M2C	

RUM V ØSTVÆG FD	AREAL =	1.900 M2	
	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
TREPLADER	0.004	0.140	0.029
MINERALULD	0.050	0.044	0.933
TREPLADE 0.100		0.140	
TREPLADE	0.004	0.140	0.029
	K-VÆRDI =	1.010 W/M2C	

RUM V ØST DØR	AREAL =	1.390 M2	
	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
DØR	0.035	0.140	0.250

RUM Ø VEST VÆG MA	AREAL =	4.010 M2	
	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
TREPLADE	0.004	0.140	0.029
MINERALULD	0.050	0.044	0.791
TREPLADE 0.200		0.140	
TREPLADE	0.004	0.140	0.029
	K-VÆRDI =	1.179 W/M2C	

RUM Ø VEST VÆG FD	AREAL =	1.900 M2	
	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
TREPLADER	0.004	0.140	0.029
MINERALULD	0.050	0.044	0.933
TREPLADE 0.100		0.140	
TREPLADE	0.004	0.140	0.029
	K-VÆRDI =	1.010 W/M2C	

RUM ØST DØR	AREAL =	1.390 M2	
	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
DØR	0.035	0.140	0.250

Den samlede varmetransmission gennem hele skilleveggen bliver pr. °C (idet der er medregnet to indvendige varmeovergangsmodstande hver på $0,13 \text{ m}^2\text{°C/W}$).

$$\text{Målerum} \leftrightarrow \text{forsøgsrum: } Q_{\text{M-F}} = 4,0 / (0,86 + 0,26) \text{ W/°C} = 3,6 \text{ W/°C}$$

$$\text{Forrum} \leftrightarrow \text{forsøgsrum: } Q_{\text{F-F}} = 1,9 / (0,99 + 0,26) \text{ W/°C} = 1,5 \text{ W/°C}$$

$$\text{Dør} \leftrightarrow \text{forsøgsrum: } Q_{\text{D-F}} = 1,4 / (0,25 + 0,26) \text{ W/°C} = 2,8 \text{ W/°C}$$

$$\text{ialt} \quad 7,9 \text{ W/C}$$

Heraf udgør transmissionen fra forrum til forsøgsrum ca. 19%. Den vægtede middeltemperatur for måle- og forrum bliver så

$$t_{\text{mid,må-fo}} = 0,19 t_{\text{mid,fo}} + 0,81 \cdot t_{\text{mid,må}} \quad (7.2.1)$$

hvor

$t_{\text{mid,fo}}$ er middellufttemperaturen i forrum og

$t_{\text{mid,må}}$ er middellufttemperaturen i målerum

Det er dette udtryk, der er blevet benyttet i EDB-programmet BA4-HUS PLOT.

På dage med klart solskin, har det naturligvis ikke været muligt at opretholde en konstant lufttemperatur i rummene. Luftsiftet på 1 gang i timen har kunnet fjerne en del af varmen, men i alle fire rum har der været tale om overtemperaturer. Fig. 7.2.2 - 7.2.4 viser således lufttemperaturen i de to forsøgsrum, målerum og forrum i perioden 29/10-76 til 3/11-76. Den 1/11 (timenr. 7321 - 7344) har været en dag med klart solskin hele dagen. Den højeste temperatur nås i rum Vest, hvor vinduesarealet i denne periode er maksimalt d.v.s. $2,8 \text{ m}^2$. I rum Øst er vinduesarealet kun $1,2 \text{ m}^2$. Måle-

FIG. 7.2.2
MIDDELRUNTEMPERATUR I FØRSØGSROM

START 29-10-76 KL. 1700 TAPE 34

GRD., C.

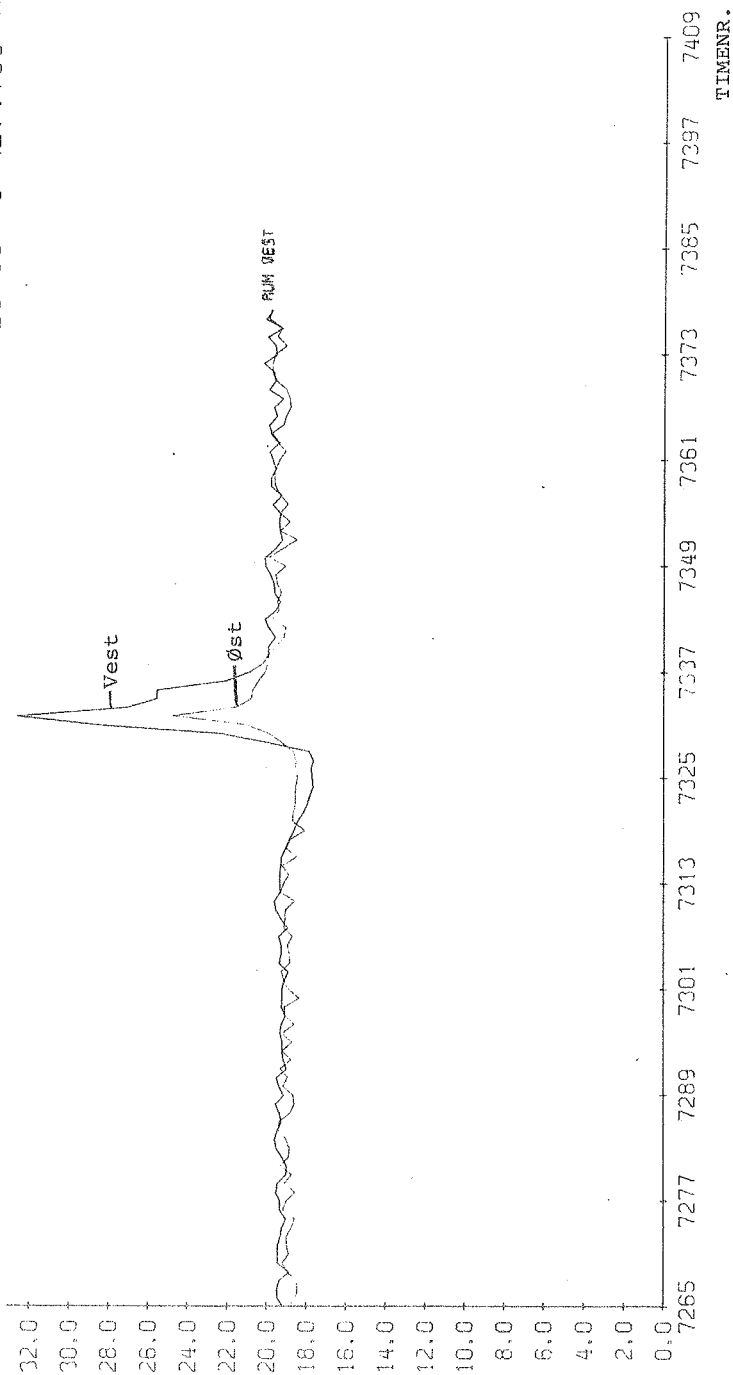
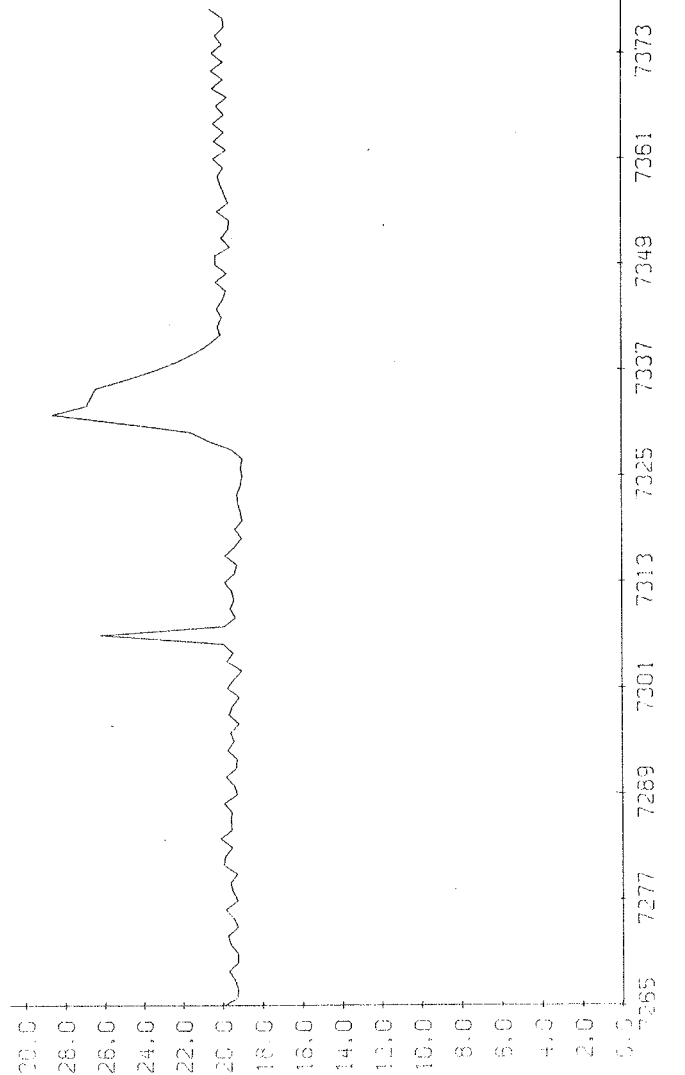


FIG. 7.2.3.

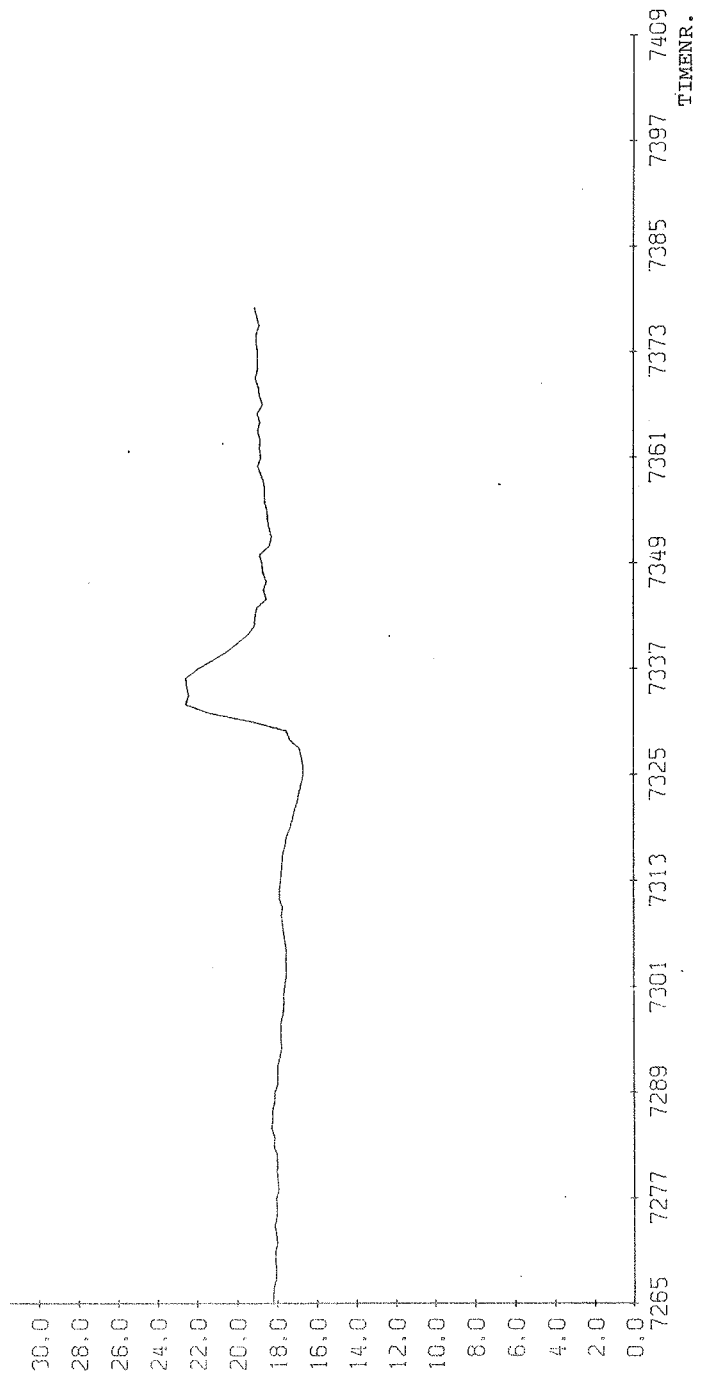
MIDDEL RUMTEMPERATUR I MÅLERUM

START 29-10-76 KL. 1700 TAPE 34

SDR. C.



GDR.C. FIG. 7.2.4. START 29-10-76 KL. 1700 TAPE 34



rummet har ganske vist også et vinduesareal på $2,8 \text{ m}^2$, men da der benyttes solafskærmning, bliver temperaturen ikke så høj som i rum Vest. I det nordvendte forrum uden vindue er temperatursvingningerne dæmpet noget i forhold til øvrige rum.

7.3 Det målte energiforbrug

Registreringen af energiforbruget i de to forsøgsrum og målerummet er stort set forløbet uden komplikationer. Ind imellem mangler der enkelte registreringer, hovedsagelig fordi det automatiske eksponeringsudstyr ikke har fungeret, som det skulle. Hvor der således mangler registrering af energiforbruget, er "hullerne" blevet fyldt ud ved at interpolere lineært mellem timeværdierne før og efter "hullerne". Derved er der ikke indført en fejl i de beregnede døgnenergiforbrug. De er nemlig beregnet som differensen mellem energiforbruget kl. 0.00 og kl. 24.00, og der har ikke på noget tidspunkt under forsøgene været "huller" i målingerne kl. 0.00 (= kl. 24.00).

Enkelte gange i løbet af forsøgsperioden har det dog været nødvendigt helt at udelade registreringen af energiforbruget. Således bevirkede den ovenfor nævnte strømafbrydelse den 04. NOV, at målinger fra 21 timer ikke kan benyttes. En fejl i fremkaldningen ødelagde 47 registreringer fra den 07 NOV kl. 10.00 til den 09 NOV kl. 09.00. De beregnede døgnenergiforbrug, for såvel de to forsøgsrum som for målerummet, er angivet i skemaet fig. 7.3.1.

På fig. 7.3.2 er vist, hvorledes timeværdierne af energiforbrug og -differenser er blevet udskrevet. Her er kun medtaget resultaterne fra et enkelt døgn, idet det samlede datamateriale er for omfattende til at blive gengivet i sin helhed.

DATO	DØGNERGIFORBRUG kWh			
	RUM Ø	MÅLE- RUM	RUM V	
21/10	7,15	4,70	7,65	KALIBRERINGS- PERIODE
22	7,05	4,85	7,30	
23	6,95	4,60	7,30	
24	7,25	4,90	7,75	
25	7,95	5,20	8,20	
26	8,65	5,75	9,20	
27/10	9,60	6,25	10,40	FORSØGSPERIODE 1
28	9,70	6,25	10,20	
29	9,50	6,10	10,90	
30	9,70	6,00	10,50	
31	10,70	6,55	11,55	
01/11	9,05	5,40	8,65	
02	8,75	5,60	9,40	FORSØGSPERIODE 2
03	7,60	4,95	8,50	
10/11	8,45	5,60	8,90	
11	7,55	5,10	8,20	
12	7,80	4,85	7,60	
13	10,45	6,30	10,55	
14	10,80	6,65	10,85	FORSØGSPERIODE 3
15	10,15	5,65	9,70	
16	10,80	6,25	10,90	
17	10,75	6,20	10,60	
18	10,35	6,15	10,55	
19	8,20	5,05	8,50	
20	10,25	5,85	9,95	FORSØGSPERIODE 3
21	8,80	5,95	9,80	
22	1,30	7,30	11,90	
23	9,80	5,90	9,50	
24	10,65	5,60	10,10	
25/11	12,50	7,70	12,20	
26	8,25	5,75	9,60	FORSØGSPERIODE 3
27	8,25	5,95	9,85	
28	9,15	6,40	10,65	
29	7,65	5,00	8,30	
30	8,20	5,20	8,75	

Fig 7.3.1 Målte døgnenergiforbrug
i forsøgshus

MINUTNR	TIMENR	RUM ØST		MALERUM		RUM VEST		DIFFERENS ØST-VEST KWH/H
		KWH	KWH/H	KWH	KWH/H	KWH	KWH/H	
49160	7536	1022.70	0.35	1659.80	0.20	1079.90	0.40	-0.05
49220	7537	1023.05	0.35	1660.00	0.25	1080.30	0.35	0.0
49280	7538	1023.40	0.35	1660.25	0.20	1080.65	0.35	0.0
49340	7539	1023.75	0.35	1660.45	0.20	1081.00	0.40	-0.05
49400	7540	1024.10	0.40	1660.65	0.25	1081.40	0.40	0.00
49460	7541	1024.50	0.35	1660.90	0.30	1081.80	0.40	-0.05
49520	7542	1024.85	0.45	1661.20	0.25	1082.20	0.45	0.0
49580	7543	1025.30	0.40	1661.45	0.25	1082.65	0.45	-0.05
49640	7544	1025.70	0.40	1661.70	0.25	1083.10	0.35	0.05
49700	7545	1026.10	0.40	1661.95	0.25	1083.45	0.40	0.00
49760	7546	1026.50	0.40	1662.20	0.20	1083.85	0.35	0.05
49820	7547	1026.90	0.35	1662.40	0.25	1084.20	0.35	0.00
49880	7548	1027.25	0.25	1662.65	0.25	1084.55	0.35	-0.10
49940	7549	1027.50	0.35	1662.90	0.15	1084.90	0.40	-0.05
50000	7550	1027.85	0.35	1663.05	0.20	1085.30	0.30	0.05
50060	7551	1028.20	0.30	1663.25	0.25	1085.60	0.35	-0.05
50120	7552	1028.50	0.35	1663.50	0.20	1085.95	0.35	0.0
50180	7553	1028.85	0.35	1663.70	0.25	1086.30	0.40	-0.05
50240	7554	1029.20	0.30	1663.95	0.20	1086.70	0.35	-0.05
50300	7555	1029.50	0.30	1664.15	0.20	1087.05	0.35	-0.05
50360	7556	1029.80	0.35	1664.35	0.25	1087.40	0.35	0.0
50420	7557	1030.15	0.35	1664.60	0.25	1087.75	0.35	0.00
50480	7558	1030.50	0.35	1664.85	0.20	1088.10	0.35	-0.00
50540	7559	1030.85	0.30	1665.05	0.20	1088.45	0.35	-0.05
50600	7560	1031.15		1665.40	0.35	1088.80		

SUM1: 8.45 SUM2: 5.60 SUM3: 8.90 DIFSUM: -0.45
 AFGVIGELSE I DØGNENERGIFORBRUGET I DE TO FORSØGSRUM (DIFSUM/SUM1)*100 -5.32 PROCENT

7.4 De målte temperaturer

Bortset fra de nævnte afbrydelser i temperaturmålingerne har datalogger og puncher været i drift hele tiden. Hver time har dataloggeren scannet alle 48 kanaler, og de målte øjebliksværdier er blevet hullet ud af puncheren. Der foreligger således et meget omfattende datamateriale, der i sin helhed forefindes som hulkort. Dataene er ligeledes blevet udtegnet som kurver, der viser de forskellige temperatures tidsmæssige variation. Fig. 7.2.2 - 7.2.4 er eksempler på sådanne plot (s.152-154).

Udtegningen af kurver har tjent to formål. Dels har de hurtigt og på en overskuelig måde givet oplysninger om samtlige relevante temperaturer som en orientering om forsøgenes forløb, og dels har de givet oplysninger om eventuelle fejl i målesystemet. Et eksempel herpå viser kurverne på fig. 7.4.1. Ved time nummer 7205 (27/10 kl. 05.00) er der et pludseligt dyk i temperaturerne på ca. 5°C. Et sådant pludseligt fald kan kun forklares ved, at der er opstået en fejl i dataloggeren. De målte temperaturer er derfor blevet kasseret og erstattet med middelværdien af temperaturerne umiddelbart før og efter.

7.5 Måling af luftskifte i forsøgsrum

Det er tilstræbt, at luftskiftet i de to forsøgsrum skal være 1 gang i timen. Efter montering er de to ventilationsenheder blevet indreguleret. Lufthastigheden er målt i en blænde i indblæsningsåbningen, og derefter omsat til et luftskifte. Hastighedsmålingerne er blevet udført med et DISA-anemometer.

Den benyttede blænde havde en diameter på 44 mm.

Da forsøgsrummenes volumen er

$$V = (2,14 \cdot 2,80 \cdot 3,44) \text{ m}^3 = 20,6 \text{ m}^3$$

GDR.C. MIDDEL RUMTEMPERATUR I FØRSØGS RUM

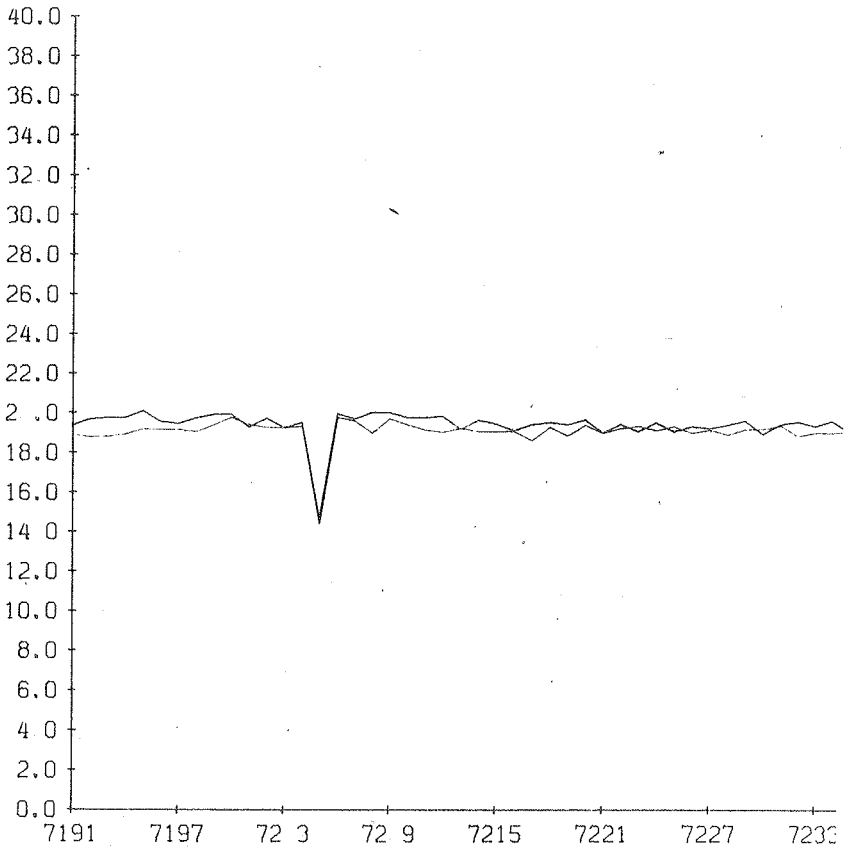


Fig. 7.4.1. Eksempel på, hvorledes kurveplot har kunnet afsløre fejl i målingerne.

vil det sige, at den lufthastighed, der giver et luftskifte på 1 gang i timen er

$$v_{n=1} = \frac{20,6}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,044^2 \cdot 3600} \quad \text{m/s}$$

$$v_{n=1} = 3,76 \text{ m/s} \quad \text{i blændeåbningen}$$

På det tidspunkt da indreguleringen fandt sted, havde laboratoriet lånt Teknologisk Instituts luftskiftemåleudstyr (Infrarød gasanalysator). Ved hjælp af dette, er luftskifte blevet målt d. 08/10 og 11/10 1976. Resultaterne er gengivet på fig. 7.5.1.

		RUM Ø	RUM V
DATO	MÅLE- PERIODE	LUFTSKIFTE h ⁻¹	LUFTSKIFTE h ⁻¹
08/10	50 min	0,97	1,32
11/10	45 min	1,10	1,25

Fig. 7.5.1 Målt luftskifte i forsøgsrum

De angivne luftskifter er beregnet på grundlag af måling af sporgaskoncentrationen i rummene. Målingerne er derefter blevet indtegnet på enkeltlogaritmisk papir, der har tiden som abcisse og koncentrationen af sporgas som ordinat. Gennem målepunkterne er lagt en ret linje, hvis hældning er udtryk for luftskiftet. Udfra formeludtrykket

$$n = 2,3 \cdot \frac{c_1 \log c_2}{t_2 - t_1} \quad h^{-1}$$

hvor c_1 er sporgaskoncentrationen til tiden t_1 og

c_2 er sporgaskoncentrationen til tiden t_2

kan luftskiftet n beregnes.

Fig. 7.5.2 viser et sådant diagram (fra 08/10), og man vil se, at der ved indlæggelse af den rette linie indføres en vis usikkerhed, der meget vel kan flytte kurven to enheder op/ned til tiden $t_1 = 0$ og en enhed op/ ned til tiden t_2 . For de beregnede luftskifter betyder det

at $0,97 \text{ h}^{-1}$ varierer mellem $0,91 \text{ h}^{-1}$ og $1,04 \text{ h}^{-1}$

at $1,10 \text{ h}^{-1}$ - - $1,04 \text{ h}^{-1}$ og $1,17 \text{ h}^{-1}$

at $1,25 \text{ h}^{-1}$ - - $1,18 \text{ h}^{-1}$ og $1,32 \text{ h}^{-1}$

at $1,32 \text{ h}^{-1}$ - - $1,21 \text{ h}^{-1}$ og $1,43 \text{ h}^{-1}$

Luftskiftet i de to forsøgsrum den 08/10 og 11/11 kan derfor med rimelighed siges at være ens. Endvidere er indreguleringen i rum Øst i orden, men i rum V er lufthastigheden lidt for høj i blændeåbningen, hvilket en kontrolmåling af lufthastigheden også viste. Luftmængden blev derpå justeret, men da Teknologisk Institut selv skulle benytte luftskiftemåleudstyret, var det ikke muligt at få flere målinger med det. Derfor er den videre kontrol med luftskiftet blevet udført ved at måle lufthastigheden i blændeåbningen.

Kontrollen er foretaget imellem de enkelte forsøgsperioder for ikke at gribe forstyrrende ind i forsøgene. Der er således målt lufthastigheder den 26/10, den 09/11, den 25/11 og den 30/11. Resultaterne er gengivet på fig. 7.5.3.

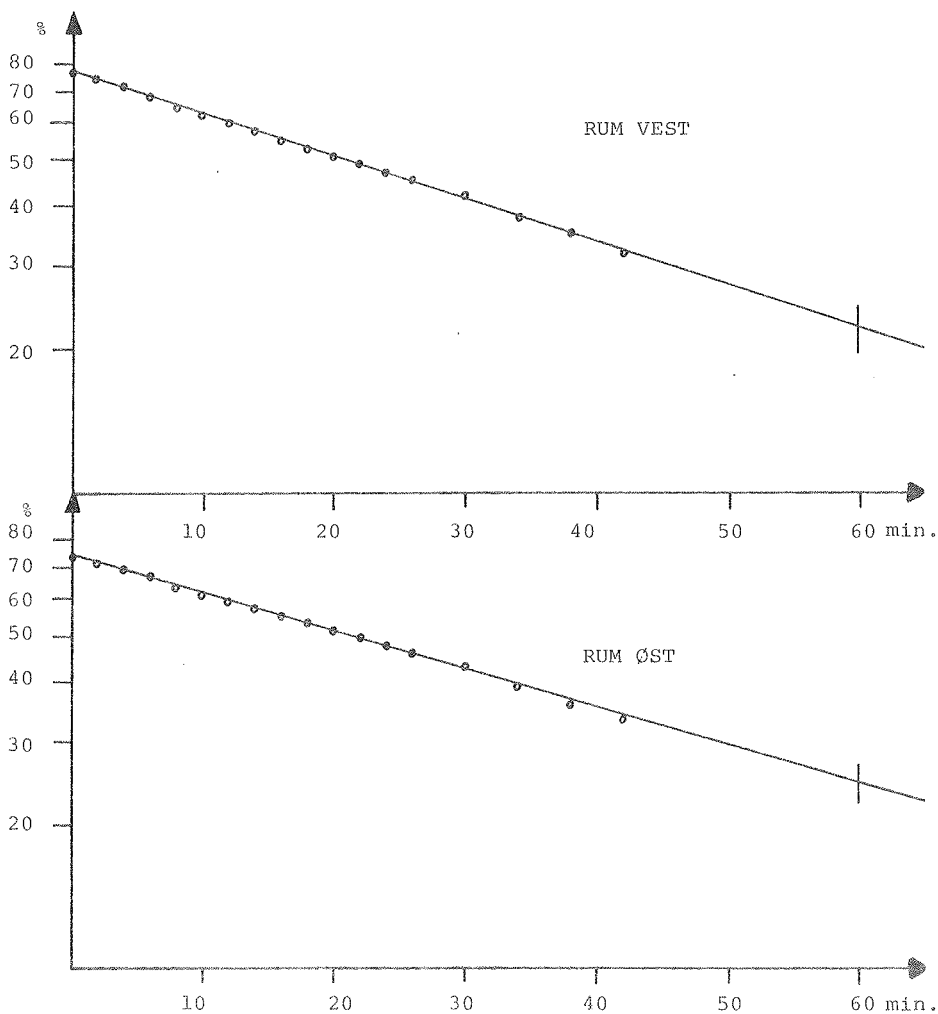


Fig 7.5.2 Diagram over resultater fra luftskiftemåling i for
den 08/10 1976

DATO	RUM Ø	RUM V
	LUFTHASTIGHED m/s	LUFTHASTIGHED m/s
26/10	3,78	3,80
09/11	3,78	3,82
25/11	3,79	3,79
30/11	3,81	3,80

Fig. 7.5.3 Kontrolmåling af lufthastighed

I forhold til den beregnede værdi (3,76 m/s) der svarer til et luftskifte på 1 gang i timen, er den største afvigelse for rum Ø 1,3% og for rum V 1,6%. Der er derfor rimelig grund til at antage, at luftskiftet i alle fire forsøgsperioder har ligget meget nær ved 1 gang i timen.

8. KALIBRERING AF FORSØGSHUS

En nødvendig forudsætning for at kunne foretage direkte sammenligning af energiforbruget i de to forsøgsrum er, at varmeudvekslingen mellem forsøgsrum og omgivelserne er det samme pr. $^{\circ}\text{C}$ temperaturforskel over konstruktionerne, samt at vinduesarealerne er de samme, så forskelle i indstrålet solenergi undgås.

De to forsøgsrum er som nævnt søgt opbygget helt identisk, når der ses bort fra vinduesarealet. Små forskelle, som f.eks. i mængden af træ, der indgår i træskelkonstruktionerne, er dog uundgåelige. Under opbygningen af forsøgshuset blev det således konstateret, at der ikke blev benyttet vægelementer af samme type overalt i ydervæggene. Beregning af de forskellige bygningsdeles varmemodstandstal, der er foretaget på grundlag af fotos (taget under opbygningen af huset) og en senere opmåling af afstande mellem lægtere m.v., viser da også, at konstruktionerne er lidt forskellige i deres opbygning (se fig. 8.1).

Forskellen mellem de beregnede varmemodstandstal er ikke stor (maximalt ca. 11%), og selv om alle, på nær ét, er størst for rum Øst, kan der ikke på forhånd siges noget om differensen mellem varmetabene pr. $^{\circ}\text{C}$ fra de to forsøgsrum. En beregning af den samlede varmetransmission gennem konstruktionerne, altså med indregning af arealer (også vinduet), viser, at de små forskelle i modstandstallene faktisk forsvinder i helheden. Der er regnet med $m_u + m_i = 0,17 \text{ m}^2/^{\circ}\text{C/W}$.

I skemaet fig. 8.2 er dette anskueliggjort. De to vinduesarealer er her sat lig hinanden, og der er regnet med, at reduktionen af vinduet i rum Vest er sket ved at afblænde en del af arealet med en konstruktion,

	RUM Ø m_k	RUM V m_k
KONSTRUKTIONSDEL	$m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$	$m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$
Gulv	3,21	3,21
Tag	2,01	2,01
Nordvæg, øverste del	1,90	1,81
- nederste del	1,79	1,73
Gavl, øv	1,90	1,79
- ned	1,91	1,74
Sydvæg, øv	1,90	1,95
- ned	1,83	1,63
Skillevæg, må	0,85	0,85
- for	0,99	0,99
- dør	0,25	0,25

Fig. 8.1 Varmemodstandstal for konstruktioner beregnet efter Ingeniørforeningens varmetabsregler [6]

hvis varmemodstandstal er lig den øvrige ydervægs.

Varmetransmissionen gennem skillevæggene er ikke medtaget, da der ikke er tale om nogen beregningsmæssig forskel mellem de to rum.

Varmetabene er beregnet ud fra udtrykket

$$Q = \frac{1}{m_k + m_i + m_u} \cdot A \text{ W/}^\circ\text{C} \quad (9.1)$$

hvor

m_k er konstruktionens varmemodstandstal i $m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$
 m_i og m_u er overgangsmodstandstallene i $m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$
 A er arealet i m^2

	RUM Ø	RUM V
Konstruktionsdel	W/°C	W/°C
Gulv	2,83	2,83
Tag	4,38	4,38
Nordvæg, øverste del	0,29	0,30
- nederste del	2,76	2,85
Øst/Vestvæg, øv	0,35	0,37
- ned	3,16	3,45
Sydvej, øv	0,29	0,28
- ned	2,00	2,22
Vindue	4,30	4,30
	20,36	20,98
Differens	0,62	
Differens i %	3,0%	

Fig. 8.2 Forskel i beregnet varmetab pr.
°C for rum Ø og rum V

Tages der hensyn til, at beregningerne er behæftet med en vis usikkerhed, kan det konkluderes, at de to forsøgsrum rent beregningsmæssigt er ens. Det må derfor forventes, at energiforbruget i de to forsøgsrum er det samme under de samme inde- og udeklimatiske forhold.

Inden kalibreringen er vinduesarealet i rum Vest blevet reduceret, så begge vinduer er lige store. Reduktionen er sket ved at blande en del af vinduet med hårde isoleringsplader (udvendigt og indvendigt), således at varmestanden af blandingspladerne netop svarer til

varmemodstanden af den øvrige del af væggen. Desuden er de udvendige plader pålimet en vandfast finerplade, hvis farve meget nøje svarer til forsøgshusets udvendige beklædningsplader. (Forskelle i absorberet solvarme er derved undgået).

Kalibreringen er foretaget i perioden 21/10, kl. 15 til 26/10 kl. 14, og resultatet er skematisk vist på fig.

8.3. Til enkelte af kolonnerne skal der knyttes en kommentar.

I kolonnen, der angiver "korrektion" er en korrigerende af energiforbruget i det ene rum som følge af, at temperaturforskellen mellem målerum/forrum og forsøgsrummene ikke har været den samme. For hele perioden gælder det, at rum Øst har fået tilført mere varme fra målerum/forrum end rum Vest. Det målte energiforbrug i rum Øst må derfor korrigeres med en størrelse, der er produktet af skillevæggens transmissionstal, skillevæggens areal, differensen i temperaturforskellen mellem målerum/forrum og de to forsøgsrum, samt tiden. Som rumlufttemperatur i målerum/forrum er benyttet den vægtede middelværdi (se afsnit 7.2).

I skemaet fig. 8.4 er beregningen af korrektionen angivet.

Gradtimetallet (inde/ude), (fig. 8.3, kolonne 8 og 9), er fremkommet som en opsummering af temperaturdifferensen (mellem udeluft og rumluft) multipliceret med tidsintervallet 1 time.

Den beregnede procentuelle forskel, dels for de enkelte datoer og dels for hele perioden, må siges at være små, specielt når der tages hensyn til, at alle målinger indeholder en vis usikkerhed. Det vil derfor være rimeligt at konkludere, at også på baggrund af målinger, er varmetransmissionen pr. °C gennem de to forsøgsrums vægge, gulv og tag under ét, den samme.

Vindue Ø = Vindue V.

RUM	EL-FORBRUG		KORREKTION		KORRIGERET EL-FORBRUG		GRADTIMER I PERIODEN (NDE/UDE)		VARMEFORBRUG		FORSKEL I VARMEFORBRUG	FORSKEL I %
	Ø	V	Ø	V	Ø	V	Ø	V	Ø	V		
Dato	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	°Ch	°Ch	W/°C	W/°C	W/°C	%
21/10 (15-24)	2,550	2,650	30		2580	2650	104,45	107,65	24,7	24,6	+0,1	0,4
22/10	7,050	7,300	114		7164	7300	240,85	252,87	29,7	28,9	+0,8	2,4
23/10	6,950	7,300	100		7050	7300	253,21	263,71	27,8	27,7	+0,1	0,4
24/10	7,250	7,750	113		7363	7750	253,00	264,85	29,1	29,3	-0,2	-0,7
25/10	7,950	8,200	71		8021	8200	277,71	285,23	28,9	28,7	+0,2	0,7
26/10 (0-14)	4,950	5,100	76		5026	5100	173,47	181,47	29,0	28,1	+0,9	3,1
Perioden	36700	38300	504		37204	38300	1302,69	1355,78	28,6	28,2	+0,4	1,4 %

Fig. 8.3 Kalibreringsresultater fra forsøgsrum Øst og Vest.

DATO	Gradtimer rum Ø	Gradtimer rum V	Differens i gradtimer	TK	Korrektion til rum Ø
	°Ch	°Ch	°Ch	W/°C	Wh
21/10	-3,49	-0,29	3,20	9,5	30
22/10	-9,98	+2,04	12,02	9,5	114
23/10	-14,29	-3,79	10,50	9,5	100
24/10	-12,24	-0,39	11,85	9,5	113
25/10	-7,80	-0,28	7,52	9,5	71
26/10	-7,00	+1,00	8,00	9,5	76

Fig. 8.4 Beregning af korrektion i energiforbrug for rum Øst.

9. USIKKERHEDSBEREGNING

De overslag over usikkerheden, der kan blive tale om, omfatter

1. Målinger af temperaturer
2. - - luftskifte
3. - - elforbrug
4. Bestemmelse af længder og arealer
5. - - rumvægt og varmekapacitet for letbeton
6. Beregning af varmekapaciteten S for letbeton
7. Tykkelsen af de indgående materiaalelag

En vigtig størrelse som varmetransmissionstallet foretages der ikke nogen egentlig usikkerhedsberegning for. Heri indgår nemlig dels usikkerheden på varmeledningstallet λ og dels den usikkerhed, der ligger i den håndværksmæssige udførelse af forsøgshuset. Endvidere indgår også overgangsmodstandene m_i og m_u i beregningen af transmissionstallene. Ingen af delene kan der siges noget eksakt om usikkerheden på. Hvad angår λ -værdierne vil det nok være rimeligt at antage, at de anvendte praktiske varmeledningstal ligger lidt over de faktiske. Dette kan begrundes med, at luftfugtigheden i forsøgshuset ligger på et ret lavt niveau, da der dels ikke produceres fugt og dels indblæses opvarmet udeluft. Desuden er den udvendige regnskærm god, således at indtrængningen af vand må anses for at være omtrent lig nul. Der er derfor grund til at tro, at bygningskonstruktionerne er relativt tørre. Forøgelsen af basisvarmeledningstallet, der tager hensyn til evt. større fugtindhold i materialerne, kan der således sættes et spørgsmålstejn ved i denne forbindelse. Med hensyn til den "indbyggede" sikkerhed for den håndværksmæssige udførelse af forsøgshuset, kan det

nævnes, at forsøgshusets elementer er fabriksfremstillede og derefter samlet i en montagehal. Det kan således forventes, at arbejdet (specielt med ilægning af mineraluld) er sket på forsvarlig måde.

9.1 Måling og beregning af temperaturer

Ved temperaturmålingerne indgår der usikkerheder fra:

- a. Montering af termoelementer
- b. Temperaturreferencen
- c. Dataloggeren
- d. Omsætningen fra mV til $^{\circ}\text{C}$

ad a

Alle termoelementer er placeret efter de anvisninger, der er givet i Termisk og atmosfærisk indeklima [24]. Det vil derfor være rimeligt at antage, at termoelementernes ene loddested antager netop den temperatur, der skal måles. Da termoelementledningerne alle er skærmede, kan der ses bort fra elektrisk støj.

ad b

Som angivet i afsnit 5.2 har referencetemperaturen varieret med maksimalt $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ i forhold til referencetemperaturen $42,2^{\circ}\text{C}$. Denne er målt med et termometer, hvis visning (i området $0 - 50^{\circ}\text{C}$) kun afveg $+0,1^{\circ}\text{C}$ fra visningen af et præcisionstermometer med en usikkerhed, der er mindre end $0,1^{\circ}\text{C}$. Ved at subtrahere de $0,1^{\circ}\text{C}$ fra referencetermometrets visning, er usikkerheden på målingen reduceret til $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ svarende til præcisions-termometrets maximale usikkerhed.

ad c

I dataloggerens manual er nøjagtigheden i området $0 - 40$ mV angivet til $\pm 0,01\%$ af inputsignalet.

ad d

Det udtryk, der er benyttet til omsætning af de målte termospændinger til temperaturer, er som nævnt opstillet af Hans Lund ved Laboratoriet for Varmeisolering. I området $-0,3$ mV til $+1,2$ mV er der nøje overensstemmelse mellem dette udtryk, og det, der er opstillet af NBS (National Bureau of Standards). Den benyttede termoelementledning er amerikansk, og dens karakteristik er tilpasset NBS standarden, hvorfor der ikke er nogen usikkerhed af betydning på omsætningen fra mV til $^{\circ}\text{C}$. "Manual on the use of Thermocouple for Temperature Measurements" [27] angiver en usikkerhed for en standard termoelement type til $\pm 0,8$ $^{\circ}\text{C}$ i området -59°C - $+93^{\circ}\text{C}$, med den største usikkerhed ved grænserne. Da det her benyttede temperaturområde ($0 - 30^{\circ}\text{C}$) ligger midt i området, skønnes det, at usikkerheden er betydelig mindre end de $0,8^{\circ}\text{C}$. I det følgende benyttes usikkerheden $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ på omsætningen.

Sammenfattende kan det siges, at det signal dataloggeren modtager, har en usikkerhed på $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ eller ca. $\pm 0,01$ mV. En typisk måling er af størrelsesordenen 1 mV, og dataloggeren bidrager med en usikkerhed på $\pm 0,01\%$ eller $\pm 0,0001$ mV. Denne størrelse er så lille, at der med rimelighed kan ses bort fra den. Tilbage er der så usikkerhed på omsætningen fra mV til $^{\circ}\text{C}$ på $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Alt i alt skønnes det, at alle temperaturmålinger har en usikkerhed på $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$.

9.2 Måling af luftskifte

Den luftmængde, der indblæses, og dermed luftskiftet, beregnes ud fra måling af lufthastigheden i en blændeåbning (jfr. afsnit 7.5). Det benyttede formeludtryk, der derefter giver varmeudvekslingen pr. $^{\circ}\text{C}$ (VENT) er

$$\text{VENT} = v \cdot c \cdot \gamma \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot W/^{\circ}\text{C} \quad (9.2.1)$$

hvor

v er den målte lufthastighed i m/s

c er luftens varmekapacitet (ved indblæsningstemperaturen)
i kJ/kg⁰C

γ er luftens rumvægt (ved indblæsningstemperaturen)
i kg/m³

d er blændens diameter i m

Usikkerheden på lufthastigheden "v" er sammensat af tre usikkerheder hidrørende fra selve anemometret, voltmeteret, der registrerer spændingssignalet og aflæsningen på det kurveblad, hvorpå omsætningen fra V til m/s foretages.

I anemometrets manual er ikke oplyst en generel anvendelig usikkerhed, men der er angivet en korrektionsfaktor, der skal benyttes, når der foretages målinger under andre temperatur- og trykforhold end ved kalibreringen af instrumentet (1013 mbar og 20⁰C).

$$\text{Korrektionsfaktor: } \sqrt{\frac{p \text{ mbar}}{1013} \cdot \frac{293}{273+t^{\circ}\text{C}}}$$

hvor

p er det aktuelle tryk og

t er den aktuelle temperatur af luften

Fra Meteorologisk Institut er det oplyst, at lufttrykket på måletidspunkterne har svinget mellem 995 mbar og 1018 mbar. Som temperaturområde benyttes 16 - 18⁰C, idet indblæsningstemperaturen i langt den overvejende del af forsøgsperioderne har ligget i dette område.

Korrektionsfaktorens øvre grænse bliver derfor, idet der benyttes 1018 mbar (medfører maximal tæller) og 16⁰C (medfører minimal nævner:

$$\sqrt{\frac{1018}{1013} \cdot \frac{293}{289}} = 1,009$$

Tilsvarende bliver den nedre grænse for 995 mbar og 18 C.

$$\sqrt{\frac{995}{1013} \cdot \frac{293}{291}} = 0,994$$

Anemometrets udgangssignal skal multipliceres med korrektionsfaktoren for at få værdien, der korresponderer med kalibreringsværdien. Der kan således maksimalt være tale om en korrektion på 0,6% nedad og 0,9% opad. Det skønnes rimeligt, at der som en fælles usikkerhed på anemometrets udgangssignaler benyttes $\pm 0,6\%$, svarende til $\pm 0,2$ V med et indgangssignal på 3,80 V.

Usikkerheden på voltmetret, der registrerer udgangssignalet fra anemometret, angives på instrumentet til $\pm (0,01\% + 1 \text{ skalaenhed})$. En spændingsværdi på 3,80 V får således usikkerheden 3,80 V $\pm 0,1$ V.

Endelig er der usikkerheden på omsætningen fra V til m/s. Udfra kalibreringskurven skønnes aflæsningsusikkerheden at være $\pm 0,2$ m/s.

Et indgangssignal til anemometret på 3,80 V (middelværdi af de foretagne kontrolmålinger) vil således som udgangssignal være 3,80 V $\pm 0,02$ V. Voltmeteraflæsningen bliver derefter 3,80 V $\pm 0,03$ V, og ved den endelige aflæsning af hastigheden på kalibreringskurven bliver værdien 4,16 m/s $\pm 0,15$ m/s.

Usikkerheden på luftens varmekapacitet er lille, da varmekapaciteten stort set er temperaturuafhængig. I temperaturområdet -50°C til $+40^{\circ}\text{C}$ angives i Glent og Co's håndbog [23] $c = 1005 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$. Det har ikke været muligt

at finde nogen usikkerhed på denne værdi, hvorfor den skønnes at være maksimalt 1 J/kg°C.

For γ 's vedkommende er variationen med tryk og temperatur ret betydelig. Der benyttes den konstante værdi 1,22 kg/m³ svarende til rumvægten ved 760 mm Hg og 16°C. I hele forsøgsperioden har lufttrykket varieret mellem 745 mmHg og 775 mmHg, og indblæsningstemperaturen som nævnt mellem 16°C og 18°C. Det giver følgende ydergrænser for γ :

$$745 \text{ mmHg og } 16^\circ\text{C} : \gamma = 1,198 \text{ kg/m}^3$$

$$775 \text{ mmHg og } 18^\circ\text{C} : \gamma = 1,237 \text{ kg/m}^3$$

Afvigelsen er således maksimalt 0,022 kg/m³ eller ca. 1,8%.

Usikkerheden på diameteren "d" skønnes at være 1 mm, svarende til aflæsningsnøjagtigheden på en målestok.

Da udtrykket til bestemmelse af VENT består af uafhængige størrelser, kan ophobningsloven benyttes til bestemmelse af den samlede usikkerhed på bestemmelsen af VENT. Ophobningsloven bliver her (jf. R.E.H. Rasmussen Elementær Måleteori [28]):

$$s_V = \sqrt{\left[\left(c\gamma \frac{\pi}{4} d^2\right) s_V\right]^2 + \left[\left(V\gamma \frac{\pi}{4} d^2\right) s_c\right]^2 + \left[\left(Vc \frac{\pi}{4} d^2\right) s_\gamma\right]^2 + \left[\left(Vc\gamma \frac{\pi}{4} d\right) s_d\right]^2} \quad \text{W/}^\circ\text{C}$$

Indsættes talværdier fås

$$s_V = \sqrt{\left[\left(1005 \cdot 1,22 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,044^2\right) 0,15\right]^2 + \left[\left(4,16 \cdot 1,22 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,044^2\right) 1\right]^2 + \left[\left(4,16 \cdot 1005 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,044^2\right) \cdot 0,022\right]^2 + \left[\left(4,16 \cdot 1005 \cdot 1,22 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 2 \cdot 0,044\right) 0,001\right]^2} \quad \text{W/}^\circ\text{C}$$

$$s_V = \sqrt{0,222 \text{ W/}^\circ\text{C}} = 0,471 \text{ W/}^\circ\text{C} \sim 0,47 \text{ W/}^\circ\text{C} / \text{ eller } 6,8\%$$

af den benyttede værdi $6,9 \text{ W/}^\circ\text{C}$

9.3 Måling af el-forbrug

De benyttede kilowatt-timemålere er af klasse 2. D.v.s. at usikkerheden normalt er $\pm 2\%$. Fra fabrikken er det imidlertid blevet oplyst, at ved en strøm på maximalt 3A (det er den skønnede maximale strøm i forsøgshuset) er usikkerheden mellem 0% og +1%.

9.4 Bestemmelse af længder og arealer

Det skønnes, at usikkerheden ved at benytte en tommestok til opmåling er 2 cm. Ganske vist er aflæsningsusikkerheden mindre, men i de 2 cm "ligger" også den usikkerhed, der er i forbindelse med uregelmæssigheden i fladernes størrelse.

På bestemmelsen af et areal, kan ophobningsloven benyttes. Bestemmes arealet af

$$a = b \times h \quad \text{m}^2$$

bliver

$$s_A = \sqrt{(b \cdot s_h)^2 + (h \cdot s_b)^2} \quad \text{m}^2$$

Den største usikkerhed vil optræde i forbindelse med beregning af gulv- og loftsareal, hvor h og b er størst.

Med

$$b = 2,80 \text{ m og}$$

$$h = 3,44 \quad \text{bliver}$$

$$A = 9,55 \text{ m}^2 \text{ og}$$

$$s_A = \sqrt{(2,80 \cdot 0,02)^2 + (3,44 \cdot 0,02)^2} \quad \text{m}^2$$

$$s_A = \sqrt{0,008 \text{ m}^2} = 0,09 \text{ m}^2 \sim 1\% \text{ af } 9,55 \text{ m}^2$$

9.5 Bestemmelse af rumvægt og varmfylde

Rumvægten bestemmes af

$$\gamma = v/(b \cdot h \cdot l)$$

hvor v er vægten af en letbetonblok.

Det skønnes, at usikkerheden på vejningen er 50 g, og på de målte dimensioner 0,001 m.

Ophobningsloven giver

$$s_Y = \sqrt{[(b \cdot h \cdot l)^{-1} \cdot s_v]^2 + [\frac{v}{h \cdot l} (\frac{1}{b^2}) s_b]^2 + [\frac{v}{b \cdot l} (\frac{1}{h^2}) s_h]^2 + [\frac{v}{b \cdot h} (\frac{1}{l^2}) s_l]^2} \quad \text{kg/m}^3$$

Indsættes en letbetonbloks målte dimensioner

$$l = 0,59 \text{ m}$$

$$b = 0,20 \text{ m}$$

$$h = 0,19 \text{ m}$$

og dens målte vægt (gennemsnit af et antal blokke)

$$v = 18,5 \text{ kg}$$

fås for usikkerheden

$$s_Y = \sqrt{[(0,59 \cdot 0,20 \cdot 0,19)^{-1} \cdot 0,05]^2 + [\frac{18,5}{0,19 \cdot 0,59} (\frac{1}{0,20^2}) \cdot 0,001]^2 + [\frac{18,5}{0,20 \cdot 0,59} (\frac{1}{0,19^2}) \cdot 0,005]^2 + [\frac{18,5}{0,20 \cdot 0,19} (\frac{1}{0,59^2}) \cdot 0,005]^2} \quad \text{kg/m}^3$$

$$s_Y = \sqrt{5,0 + 17 + 472 + 49} \text{ kg/m}^3 = \sqrt{543} \text{ kg/m}^3$$

$$s = 23,3 \sim 23 \text{ kg/m}^3 \quad \text{eller} \quad 2,8\% \text{ af } 825 \text{ kg/m}^3$$

For varmekapaciteten c benyttes $0,48 \text{ Wh/kg}^0\text{C}$, svarende til angivelsen i Glent og Co. [23] for rumvægten 825 kg/m^3 . I området ($400 < \gamma < 1200$) kg/m^3 angives ($0,42 < c < 0,53$) $\text{Wh/kg}^0\text{C}$. Usikkerheden på c skønnes at være maximalt halvdelen af forskellen mellem $c = 0,48 \text{ Wh/kg}^0\text{C}$ og $c = 0,42 \text{ Wh/kg}^0\text{C}$. D.v.s. $c = 0,48 \pm 0,03 \text{ Wh/kg}^0\text{C}$.

9.6 Beregning af varmekapaciteten S

Forsøgsrummets varmekapacitet S beregnes af

$$S = e \cdot A \cdot \gamma \cdot c \quad \text{Wh}/^0\text{C}$$

hvor

e er tykkelsen af akkumuleringslaget i m

A er gulvarealet i forsøgshuset i m^2

γ er letbetonens rumvægt i kg/m^3

c er letbetonens varmekapacitet i $\text{Wh/kg}^0\text{C}$

Da de fire størrelser er indbyrdes uafhængige kan opbobningsloven benyttes. Udtrykket bliver

$$s_S = \sqrt{[(A\gamma c)s_e]^2 + [(e\gamma c)s_A]^2 + [(eAc)s_\gamma]^2 + [(eA\gamma)s_c]^2} \quad \text{Wh}/^0\text{C}$$

I udtrykket indsættes

$$e = 0,10 \text{ m} \quad , \quad s_e = 0,001 \text{ m}$$

$$A = 9,55 \text{ m}^2 \quad , \quad s_A = 0,09 \text{ m}^2$$

$$\gamma = 825 \text{ kg/m}^3 \quad , \quad s_\gamma = 23 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 0,48 \text{ Wh/kg}^0\text{C} \quad , \quad s_c = 0,03 \text{ Wh/kg}^0\text{C}$$

$$s_S = \sqrt{[(9,55 \cdot 825 \cdot 0,48) \cdot 0,001]^2 + [(0,1 \cdot 825 \cdot 0,48) \cdot 0,09]^2 + [(0,1 \cdot 9,55 \cdot 0,48) \cdot 23]^2 + [(0,1 \cdot 9,55 \cdot 825) \cdot 0,03]^2} \quad \text{Wh}/^0\text{C}$$

$$s_S = \sqrt{14 + 13 + 111 + 559} \text{ Wh}/^{\circ}\text{C} = \sqrt{697} \text{ Wh}/^{\circ}\text{C}$$

$$s_S = 26,4 \text{ W}/^{\circ}\text{C} \text{ eller ca. } 7\% \text{ på}$$

$$S = 378,2 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$$

9.7 Tykkelse af de indgående materialelag

De steder i konstruktionerne, hvor det har været muligt direkte at måle materialelagenes tykkelse, er dette gjort. Det drejer sig om benyttede beklædningspladers tykkelse (både udvendig og indvendig) og om tykkelsen af isoleringslagene. Usikkerheden på disse målinger skønnes at være $\pm 0,0005$ m for pladetykkelser og $0,005$ m for isoleringstykkelser.

På steder, hvor det ikke har været muligt direkte at måle lagenes tykkelse, kan der ikke opgives nogen usikkerhed. Det vil dog være rimeligt at antage, at tolerancer for gulv, loft og beklædningsplader er af samme størrelsesorden som den angivne måleusikkerhed på de målte pladetykkelser. Tilsvarende vil de af fabrikanten opgivne isoleringstykkelser have en usikkerhed af størrelsesorden som de målte tykkelser.

10. BEREGNINGER MED FORSØGSHUS SOM RUMMODEL OG SAMMENLIGNING MED MÅLINGER

Som nævnt i afsnit 4.1 har licentiatstudiets anden del haft som hovedformål at foretage en vurdering af, hvorledes de måleresultater, der er opnået med forsøgshuset, passer med tilsvarende beregninger udført med BA4-programmet.

For at kunne gennemføre beregningerne må

1. forsøgshuset opbygges som beregningsmodel.
2. de indsamlede vejrdata, dels ved forsøgshuset og dels ved nulenergihuset, bearbejdes og opstilles i et specielt "referenceår", så BA4-programmet kan benytte måleresultaterne.

10.1 Forsøgshuset som beregningsmodel

På grundlag af beskrivelsen af forsøgshuset i afsnit 4.2 og opmåling af de relevante længder, er samtlige størrelser, der er nødvendige for beregning af forsøgshusets rumdata, angivet i skemaerne fig. 10.1.1 og 10.1.2 (side 181-182).

10.1.1 Kommentarer til rumdataberegning

Arealer

For alle ydervægge skelnes der mellem den øverste del og den nederste del, idet remmen udgør en betydelig del af konstruktionen i den øverste del. Der er overalt regnet med de indvendige rummål.

Varmemodstandstal for konstruktioner

Alle størrelser er beregnet ved hjælp af Ingeniørforeningens Varmetabsregler [6]. Iøvrigt fremgår λ -værdier, tykkelser og modstandstal for de enkelte lag i bygningsdelene af EDB-udskrifterne side 183-186. Det benyttede EDB-program er udarbejdet af Anker Nielsen ved

RUMDATA FOR RUM VEST, $m_i = 0,30 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$										
AREAL	m	m_i	m_u	γ	c	TU	TO	TA	TK	S
m^2	$\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$	$\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$	$\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$	kg/m^3	$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C/W}$	$^\circ\text{C/W}$	$^\circ\text{C/W}$	$^\circ\text{C/W}$	$\text{Wh/}^\circ\text{C}$
GULV	9,55	3,21	0,30	0,04		2,94	31,8			378,2
GULV, letbeton	9,55	1,00		825	0,48			19,1		
TAG	9,55	2,01	0,30	0,04		4,66	31,8			
NORDVEG, øverst	0,59	1,81	0,30	0,04		0,33	2,0			
NORDVEG, nederst	5,41	1,73	0,30	0,04		3,13	18,0			
VESTVEG, øverst	0,72	1,79	0,30	0,04		0,40	2,4			
VESTVEG, nederst	6,58	1,74	0,30	0,04		3,79	21,9			
SYDVEG, øverst	0,59	1,95	0,30	0,04		0,30	2,0			
SYDVEG, nederst	2,33	1,63	0,30	0,04		1,40	7,8			
SYDVEG, vindue	3,08	0,33				9,33				
ØSTVEG, målerum	4,01	0,85	0,30				13,4		4,09	
ØSTVEG, forrum	1,90	0,99	0,30				6,3		1,70	
ØSTVEG, dør	1,39	0,25	0,30				4,6		3,66	
IALT:						26,3	142,0	19,1	9,45	378,2

fig . 10.1.1.2.

GULV AREAL = 0.550 M2

	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
LETBETON	0.200	0.200	1.000
SPANPLADE	0.009	0.140	0.064
TRÆFIBERPLADE	0.012	0.140	0.086
MINERALULD	0.100	0.044	1.924
TRÆPLADE 0.083		0.140	
	0.019	0.140	0.136

K-VÆRDI = 0.312 W/M2C

TAG AREAL = 0.550 M2

	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
TAGPAP	0.008	0.170	0.047
TRÆPLADE	0.019	0.140	0.136
HULRUM	0.250	1.470	0.170
MINERALULD	0.075	0.044	1.443
		0.140	
HULRUM 0.083		1.470	0.170
GIPSPLADE	0.009	0.200	0.045

K-VÆRDI = 0.497 W/M2C

RUM Ø NORDVÆG ØV AREAL = 0.590 M2

	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
REM	0.050	0.140	0.357
MINERALULD	0.075	0.044	1.484
		0.140	
TRÆPLADE 0.068		0.140	0.057
	0.008		

K-VÆRDI = 0.527 W/M2C

RUM Ø NORDVÆG NE AREAL = 5.410 M2

	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
TRÆPLADER	0.012	0.140	0.086
MINERALULD	0.100	0.044	1.642
		0.140	
TRÆPLADER 0.170		0.140	0.057
	0.008		

K-VÆRDI = 0.560 W/M2C

RUM Ø ØSTVÆG ØV AREAL = 0.720 M2

	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
REM	0.050	0.140	0.357
MINERALULD	0.075	0.044	1.484
		0.140	
TRÆPLADER 0.068		0.140	0.057
	0.008		

K-VÆRDI = 0.527 W/M2C

RUM Ø ØSTVÆG NE AREAL = 6.950 M2

	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
TRÆPLADER	0.012	0.140	0.086
MINERALULD	0.100	0.044	1.768
		0.140	
TRÆPLADER 0.131		0.140	0.057
	0.008		

K-VÆRDI = 0.523 W/M2C

RUM Ø SYDVES VIG	AREAL =	0.590 M2	
	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
TRIEPLADE	0.057	0.140	0.357
MINERALULD	0.075	0.044	1.484
TRIEPLADE 0.048	0.075	0.140	0.057
	K-VÆRDI =		0.527 W/M2C
RUM Ø SYDVES VIG	AREAL =	2.990 M2	
	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
TRIEPLADE	0.012	0.140	0.086
MINERALULD	0.100	0.044	1.685
TRIEPLADE 0.160	0.030	0.140	0.057
	K-VÆRDI =		0.547 W/M2C
RUM Ø VINDUE	AREAL =	1.420 M2	
	K-GLAS	K-TRE	%GLAS
RUM Ø VINDUE	3.130	2.300	0.847
	K-VÆRDI =		3.003 W/M2C
RUM Ø VEST VIG MA	AREAL =	4.010 M2	
	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
TRIEPLADE	0.034	0.140	0.029
MINERALULD	0.050	0.044	0.791
TRIEPLADE 0.200	0.034	0.140	0.029
	K-VÆRDI =		1.179 W/M2C
RUM Ø VEST VIG PD	AREAL =	1.900 M2	
	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
TRIEPLADE	0.004	0.140	0.029
MINERALULD	0.050	0.044	0.933
TRIEPLADE 0.100	0.004	0.140	0.029
	K-VÆRDI =		1.010 W/M2C
RUM ØST DØR	AREAL =	1.390 M2	
	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
	0.035	0.140	0.250

CULV AREAL = 9.550 M2

	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
LETBETON	0.200	0.200	1.000
SPANPLADE	0.069	0.140	0.064
TRÆFIBERPLADE	0.012	0.140	0.086
MINERALULD	0.100	0.044	1.924
TRÆPLADE 0.083	0.019	0.140	0.136

K-VÆRDI = 0.312 W/M2C

TAG AREAL = 9.550 M2

	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
TAGPAP	0.008	0.170	0.047
TRÆPLADE	0.019	0.140	0.136
HULRUM	0.250	1.470	0.170
MINERALULD	0.075	0.044	1.443
0.083		0.140	
HULRUM	0.250	1.470	0.170
GIPSPLADE	0.009	0.200	0.045

K-VÆRDI = 0.497 W/M2C

RUM V NORDVÆG ØV AREAL = 0.590 M2

	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
REM	0.050	0.140	0.357
MINERALULD	0.075	0.044	1.399
0.100		0.140	
TRÆPLADE	0.008	0.140	0.057

K-VÆRDI = 0.551 W/M2C

RUM V NORDVÆG NE AREAL = 5.410 M2

	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
TRÆPLADER	0.012	0.140	0.086
MINERALULD	0.100	0.044	1.587
0.198		0.140	
TRÆPLADER	0.008	0.140	0.057

K-VÆRDI = 0.578 W/M2C

RUM V VESTVÆG ØV AREAL = 0.720 M2

	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
REM	0.050	0.140	0.357
MINERALULD	0.075	0.044	1.372
0.111		0.140	
TRÆPLADER	0.008	0.140	0.057

K-VÆRDI = 0.560 W/M2C

RUM V VESTVÆG NE AREAL = 0.580 M2

	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
TRÆPLADER	0.012	0.140	0.086
MINERALULD	0.100	0.044	1.592
0.196		0.140	
TRÆPLADER	0.008	0.140	0.057

K-VÆRDI = 0.576 W/M2C

RUM V SYDVÆG BV	AREAL =	0.590 M2	
REM	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
MINERALULD	0.050	0.140	0.357
TRÉPLADER 0.051	0.075	0.044	1.534
	0.008	0.140	0.057
			K-VÆRDI = 0.513 W/M2C
RUM V SYDVÆG NED	AREAL =	2.330 M2	
TRÉPLADER	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
MINERALULD	0.012	0.140	0.086
TRÉPLADER 0.240	0.100	0.044	1.492
	0.003	0.140	0.057
			K-VÆRDI = 0.612 W/M2C
RUM V VINDUE	AREAL =	3.080 M2	
RUM V VINDUE	K-GLAS	K-TRÉ	%GLAS
	3.130	2.300	0.912
			K-VÆRDI = 0.3057 W/M2C
RUM V ØSTVÆG MA	AREAL =	4.010 M2	
TRÉPLADE	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
MINERALULD	0.004	0.140	0.029
TRÉPLADE 0.200	0.050	0.044	0.791
	0.004	0.140	0.029
			K-VÆRDI = 1.179 W/M2C
RUM V ØSTVÆG FO	AREAL =	1.900 M2	
TRÉPLADER	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
MINERALULD	0.004	0.140	0.029
TRÉPLADE 0.100	0.050	0.044	0.933
	0.004	0.140	0.029
			K-VÆRDI = 1.010 W/M2C
RUM VEST DØR	AREAL =	1.390 M2	
	TYKKELSE	LAMBDA	ISOLANS
DØR	0.035	0.140	0.250

Laboratoriet for Varmeisolering.

For de to rum optræder der forskelle i varmemodstandstallene for vægge, der skulle være ens. Det skyldes, at procentdelen af træ i de to vægge er forskellig.

m_u og m_i

Der er regnet med, at m_u og m_i er konstante. Værdien af m_u er som angivet i Ingeniørforeningens Varmetabsregler [6], d.v.s. $m_u = 0,04 \text{ m}^2\text{°C/W}$, hvorimod der for m_i er benyttet værdien $0,30 \text{ m}^2\text{°C/W}$ i stedet for $0,13 \text{ m}^2\text{°C/W}$, jf. bemærkningerne i afsnit 3.3.9.

Rumvægte og varmfylde

For letbetonen er rumvægten bestemt ved vejning af et antal blokke efter at disse har ligget oplagret tørt i ca. 3 uger. Dermed er opsuget fugt, hidrørende fra udendørs oplagring, fjernet. De øvrige størrelser er skønnede udfra opgivelser i Varmetabsreglerne [6] og Glents Håndbog [23].

TU

Er beregnet af

$$TU = \frac{A}{m_k + m_u} \quad \text{W/°C}$$

hvor

A er den pågældende konstruktions areal i m^2 .

m_k er konstruktionens varmemodstandstal i $\text{m}^2\text{°C/W}$.

m_u er det udvendige overgangsmodstandstal i $\text{m}^2\text{°C/W}$.

TO

Er beregnet af

$$TO = \frac{1}{m_i} \cdot A$$

hvor

m_i er det indvendige overgangsmodstandstal i $m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$

A er som nævnt under TU

TK

er beregnet af

$$TK = \frac{A}{m_k + m_i}$$

hvor A , m_k og m_i er som nævnt ovenfor

TA og S

Det varmeakkumulerende lag er placeret midt i letbeton-laget (se fig. 10.1.3).

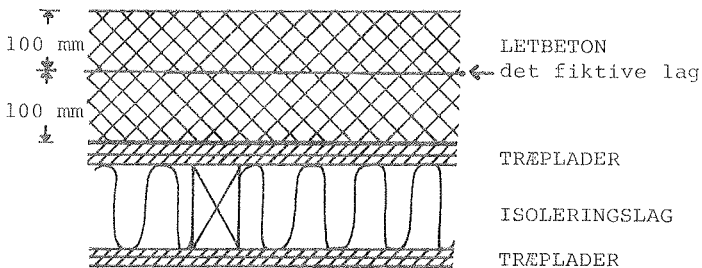


Fig 10.1.3. Placering af det fiktive lag i forsøgshusets gulvkonstruktion.

Denne placering opfylder de betingelser, som er opstillet af Bo Andersen [19] nemlig, at laget ikke må ligge dybere end svarende til et transmissionstal på ca. $2 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, at de ikke må ligge dybere end ca. 15 cm i

faste dele af konstruktioner, samt at det skal ligge over lag af lette isoleringsmaterialer.

Desuden antages det, at kun letbetonen er aktiv ved varmeakkumuleringen. Begrundelsen herfor anskueliggøres bedst ved at betragte de enkelte lags tidskonstanter.

Ydervægge (med akkumuleringslaget placeret på overgangen mellem beklædningsplader og isolering)

$$\frac{S}{TA} \sim 0,13 \text{ h}$$

Loft (med akkumuleringslaget placeret lige over gipspladerne)

$$\frac{S}{TA} \sim 0,1 \text{ h}$$

Skillevægge (med akkumuleringslaget placeret som ved ydervægge)

$$\frac{S}{TA} \sim 0,03 \text{ h}$$

Gulv (med akkumuleringslaget placeret som angivet)

$$\frac{S}{TA} = 19,8 \text{ h}$$

Ved at medregne de lette dele af rumkonstruktionerne, hvis varmekapacitet kun udgør ca. 16% af letbetonens, opstår der en betydelig skævhed i tidskonstanterne. Der er derfor valgt helt at se bort fra akkumuleringen i de lette lag.

Det medfører, at det også kun er varmeoverføringen fra gulvoverflade til det akkumulerende lag, der bidrager til TA.

10.1.2 Øvrige indgangsdata for forsøgshus

Udover de beregnede rumdata specificeres følgende parametre til brug for beregninger med BA4-programmet.

VINDUE	(areal og orientering)
VAEG	(k-værdi og areal)
TAG	(k-værdi og areal)
VENT	(varmeudveksling ved ventilation)
QMAX	(maximal varmeydelse)
HORISONT	(den del af himmelhvelvingen i grader, hvor huse, træer o.a. skygger, så det direkte solindfald er 0).
FORDEL	(Fordeling af indfaldende solvarme på konvektion og stråling)

Til de enkelte parametre skal knyttes følgende kommentarer:

VINDUE

RUM ØST	}	Areal: $(1,10 \times 1,11) \text{ m}^2 = 1,2 \text{ m}^2$ glas
VINDUE 3		Orientering: 0 grader (fra syd)
RUM VEST	}	Areal: X m^2 glas (arealet varieres svarende til de fire forsøgsserier, der er nævnt i afsnit 7.1).
VINDUE 3		Orientering: 0 grader (fra syd).

Desuden specificeres et vindue (VINDUE 1) med 0 m^2 glas og orientering -180° (se under "VAEG").

VAEG

Denne specifikation bevirker beregning af transmitteret solvarme gennem en væg. Har væggen ikke noget vinduesareal, må der alligevel specificeres et vindue med areal 0 m^2 , som nævnt under VINDUE".

Rum Øst og Vest: VAEG 1 : Areal $6,0 \text{ m}^2$, k-værdi =
Øst $0,51 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$
Vest $0,53 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$

VAEG 3 : Areal $(6,0 - x) \text{ m}^2$, k-værdi =
Øst $0,50 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$
Vest $0,56 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$

Selv om rum Øst desuden har en ydervæg mod øst og tilsvarende rum Vest én mod vest, specificeres disse ikke, idet de to gavle udvendigt er beklædt med hvidmalede plader (se afsnit 4.2), for at undgå forskelle i transmitteret solvarme gennem en øst- og en vestvendt falde. Der vil således kun være en ubetydelig transmission af solstråling gennem gavlene.

TAG

Specifikationen er analog til VAEG

Rum Øst og Vest: TAG: Areal $9,55 \text{ m}^2$, k-værdi $0,46 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

VENT

Med et luftskifte på 1 gang i timen (se afsnit 7.5) kan varmeudvekslingen ved ventilation beregnes pr. grads temperaturforskel mellem udeluft og ventilationsluft. For luftens rumvægt og varmefylde indsættes middelværdien i temperaturområdet $16 - 18^{\circ}\text{C}$ ved 760 mm Hg . Indenfor dette interval ligger ventilationsluftens temperatur i den overvejende del af forsøgsperioderne.

$$\text{VENT} = (20,6 \text{ m}^3/\text{h}) \cdot (1,005 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}) \cdot (1,22 \text{ kg/m}^3)$$

$$\text{VENT} : 25 \text{ kJ/h }^{\circ}\text{C} \quad \underline{6,9 \text{ W/}^{\circ}\text{C}}$$

QMAX

Den maximale varmeydelse i rummene er sat til 3000 W . Dette er ganske vist noget større end det maximale varmetab, der skønsmæssigt kan beregnes til $TU \cdot \Delta t_{\text{max}}$
 $\sim 1000 \text{ W}$. ($TU \sim 26$ og $\Delta t_{\text{max}} \sim 20 - (-15) = 35^{\circ}\text{C}$), men der

stilles kun én betingelse til QMAX, at den er større end det maximale varmetab. Da varmesystemet består af en ventilationsvarmenhed og en elvarmeovn, kan det med rimelighed antages, at al varme tilføres rumluften konvektivt.

HORISONT

Udfra planer over området omkring forsøgshuset, tegninger af de omgivende bygninger, en skønsmæssig vurdering af vegetationens højde og forskelle i terrænhøjde, er der skønnet følgende værdier

HORISONT 1 (mod nord) : 3 grader

HORISONT 3 (mod syd) : 5 grader

FORDEL

Som angivet i afsnit 3.3.10 sættes FORDEL til den konstante værdi 0,5. Det vil sige, at halvdelen af den indfaldende solstråling tilføres overfladerne og halvdelen rumluften.

10.2 Egne vejrdata

For at kunne opnå en realistisk sammenligning af beregnede resultater og forsøgsresultater med eksperimenthuset, er det nødvendigt, at Referenceårets vejrdata udskiftes med de faktiske vejrdata fra måleperioderne, når beregninger med BA4 skal foretages.

De data, der skal benyttes, kan deles i to grupper:

1. Data vedrørende solintensiteter
2. Data vedrørende temperaturer

ad 1

I forbindelse med nulenergihus-projektet registreres kontinuerligt:

- a) Total stråling på en vertikal flade

- b) Total stråling på en horisontal flade
- c) Den diffuse stråling på vandret flade

Disse tre intensiteter er tilstrækkelige til at kunne gennemføre beregninger med BA4. Da Referenceårets strålingsdata imidlertid ikke er de samme, har det været nødvendigt at foretage ændringer i subroutinen SOLIN (der beregner solindfald gennem vinduer, vægge og tag) for at kunne benytte data fra nulenergihuset direkte.

ad 2

Her benyttes udetemperaturen, der er blevet registreret i forbindelse med forsøgshuset.

Af de indsamlede data under 1 og 2 er der opbygget et foreløbigt sæt referencedata, der er lagret på datasæt ved NEUCC.

Det opbyggede sæt referencedata har nogle "huller", som skyldes opståede fejl i målesystemerne, dels ved nulenergihuset og dels ved forsøgshuset. Således foreligger der ingen brugbare strålingsdata før 28-10-1976, og der mangler nogle temperaturdata fra dagene 4/11, 5/11, 19/11 og 20/11, som omtalt i afsnit 7.1.

Endvidere er det nævnt (afsnit 7.3), at nogle registreringer af energiforbruget mangler. Det drejer sig om målinger fra den 07. - 09. NOV og 01. - 02. DEC.

Af de resterende data er der blevet opbygget tre endelige sæt referencedata, i det følgende kaldet VEJR 1, VEJR 2 og VEJR 3. De tre sæt dækker perioderne

VEJR 1	:	28/10 - 3/11	begge dage incl.		
VEJR 2	:	6/11 - 18/11	-	-	-
VEJR 3	:	21/11 - 28/11	-	-	-

Indenfor disse tre perioder er det muligt at foretage en sammenligning af det målte og det beregnede energiforbrug for forsøgshuset. Derved er det muligt at få en vurdering af beregningsnøjagtigheden for BA4-programmet, hvad angår energiforbruget.

10.3 Sammenligning af beregnede og målte energiforbrug

Til grund for udvælgelsen af de datoer, der skal benyttes ved sammenligningen, ligger et ønske om dels at medtage døgnet med varierende solintensitet og dels at medtage døgnet med varierende udetemperatur. Udfra de tre sæt vejrdata VEJR 1, VEJR 2 og VEJR 3 er følgende døgnet blevet udvalgt:

1/11-2/11-10/11-11/11-15/11-16/11-17/11-26/11-27/11-28/11 alle 1976.

For rum Øst er alle datoerne ikke medtaget, idet rummets udformning er den samme i alle forsøgsperioderne. Derimod varierer vinduesarealet i rum Vest, hvorfor det ligeledes er tilstræbt at udvælge datoer fra alle fire forsøgsperioder. Da der imidlertid ikke foreligger strålingsdata fra kalibreringsperioden (21 - 26 OKT 1976), var datoer fra denne periode udelukket på forhånd.

I skemaet fig. 10.3.1 er dels de målte og dels de beregnede energiforbrug angivet.

Kolonnen yderst til højre, der angiver den procentuelle forskel mellem energiforbrugene (i forhold til de målte), er i denne sammenhæng den mest interessante. Procenttallene varierer mellem 11,9 og 24,9, idet dog den overvejende del ligger omkring 20. Generelt gælder det, at beregningerne giver mindre energiforbrug end målingerne.

Forklaringen på disse store afvigelser skal søges

DATO		MÅLT	BEREGN.	FORSKEL ΔQ	ΔQ i %
		kWh	kWh	kWh	%
10/11	RUM ØST	8,45	6,48	1,97	23,3
11/11		7,55	6,03	1,52	20,1
16/11		10,80	8,37	2,43	22,5
17/11		10,75	8,20	2,55	23,7
26/11		8,25	6,80	1,45	17,6
27/11		8,25	7,01	1,24	15,0
28/11		9,15	7,24	1,91	20,1
1/11	RUM VEST	8,65	7,62	1,03	11,9
2/11	VINDUE 2,8 m ²	9,40	7,46	1,94	20,6
10/11	RUM VEST	8,90	7,13	1,77	19,9
11/11	VINDUE	8,20	6,44	1,76	21,6
15/11	1,75 m ²	9,70	7,79	1,91	19,7
16/11		10,90	9,00	1,90	17,4
17/11		10,60	8,70	1,90	17,9
26/11	RUM VEST	9,60	7,45	2,15	22,4
27/11	VINDUE	9,85	7,60	2,25	22,8
28/11	2,25 m ²	10,65	8,00	2,65	24,9

Fig. 10.3.1. Sammenligning af målte og beregnede døgnenergiforbrug i forsøgshus.

Ved beregningerne er $m_i = 0,30 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$.

1. I forbindelse med beregning af energiforbruget:
 - a. nøjagtigheden af de benyttede rumdata (TU, TO, TA, TK og S).
 - b. nøjagtigheden af de benyttede parametre:
k-værdien for vægge og tag, varmeudveksling ved ventilation, horisontafskæring og arealer af ydervæg, vindue og tag.
 - c. nøjagtigheden af de målte temperaturer, der benyttes.
 - d. de forenklinger, der gøres i BA4.
2. I forbindelse med måling af energiforbruget :
 - a. elmålerens nøjagtighed.

Af de faktorer, der således spiller en rolle for nøjagtigheden af de målte og de beregnede energiforbrug, vil TU, TO, S og varmeudveksling ved ventilation have den største betydning.

10.3.1 Indflydelsen af variationer i TU

TU, der jo angiver varmetransmissionen (pr. °C) gennem klimaskærmen, er en opsummering af de enkelte bygningskonstruktioners transmissionstal multipliceret med deres areal.

Usikkerheden på arealberegningerne er af størrelsesordenen 1%.

Usikkerheden på beregningen af transmissionstallene kan ikke beregnes, idet der blandt andet indgår usikkerheden på varmeledningstallet λ . Der er regnet med $\lambda = 0,044 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, svarende til mineraluldtype B, der er benyttet i forsøgshuset. For dog at få et indtryk af, hvilken rolle variationer i TU spiller for det beregnede energiforbrug, er der for rum Øst d. 10/11 foretaget beregninger, hvor TU er forøget med henholdsvis 10%, 20% og 40%. (Da de beregnede energiforbrug er mindre end de målte, skal TU forøges). Resultaterne er vist på fig. 10.3.2.

DATO		MÅLT	BEREGN.	FORSKEL ΔQ	ΔQ i %
		kWh	kWh	kWh	
10/11	<u>RUM ØST</u>				
	TU	8,45	6,48	1,97	23,3
	TU + 10%	8,45	6,90	1,55	18,3
	TU + 20%	8,45	7,34	1,11	13,1
	TU + 40%	8,45	8,15	0,30	3,6

Fig. 10.3.2 Sammenligning af målte og beregnede døgnenergiforbrug i forsøgshus. Figuren viser indflydelsen af variationer i TU, $m_1 = 0,30 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$.

Det ses, at indflydelsen af selv beskudne variationer i TU kan ændre det beregnede energiforbrug betydeligt.

De ændringer, der her først og fremmest er tænkt på, er forårsaget af usikkerhederne ved beregning af TU, og det er nok et spørgsmål, om det er rimeligt at sætte dem til mere end 10%. Et andet moment er, at BA4 regner med endimensionale varmemestrømme, hvilket ved de fleste varmetabsberegninger er tilstrækkelig nøjagtigt. Ved at benytte de indvendige overfladearealer som transmissionsarealer, indføres der derved en unøjagtighed i beregningerne. Dette kan der kompenseres for ved at benytte et transmissionsareal, der er større. Eksempelvis nævnes i N.F. Bisgård, Opvarmning og Ventilation I. [1], at en brugbar metode er at benytte et middelareal, der ligger midt i konstruktionerne.

Med de nye transmissionsarealer, der forøger TU fra $21,4 \text{ W/}^\circ\text{C}$ til $22,7 \text{ W/}^\circ\text{C}$ ($\sim 6\%$), er der foretaget beregninger for rum Øst. Resultaterne, der er angivet på fig. 10.3.3, viser, at forskellen mellem målinger og

beregninger reduceres med ca. 3%. Dette er i sig selv ikke nogen stor ændring, men kobles den sammen med f. eks. usikkerheden ved beregningen af TU, bliver den samlede indflydelse alligevel betydelig. Det viser fig. 10.3.4, hvor beregninger for rum Øst den 10/11 er udført med de nye transmissionsarealer og med varierende TU.

DATO		MÅLT	BEREGN.	FORSKEL ΔQ	ΔQ i %
		kWh	kWh	kWh	%
10/11	RUM ØST	8,45	6,73	1,72	20,3
11/11	$m_i = 0,30 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$	7,55	6,26	1,29	17,1
16/11		10,80	8,72	2,08	19,3
17/11		10,75	8,53	2,22	20,7
26/11		8,25	7,07	1,18	14,3
27/11		8,25	7,27	0,98	11,9
28/11		9,15	7,51	1,64	17,9

Fig. 10.3.3. Sammenligning af målte og beregnede døgnenergiforbrug i forsøgshus. Ved beregningerne er benyttet et transmissionsareal, der ligger midt i konstruktionerne.

DATO		MÅLT	BEREGNET	FORSKEL ΔQ	ΔQ i %
		kWh	kWh	kWh	%
10/11	Rum Øst				
	TU	8,45	6,73	1,72	20,3
	TU + 10%	8,45	7,18	1,27	15,0
	TU + 20%	8,45	7,61	0,84	9,9
	TU + 40%	8,45	8,46	-0,01	0,0

Fig. 10.3.4. Sammenligning af målte og beregnede døgnenergi-forbrug i forsøgshus. Ved beregningerne er der benyttet nye transmissionsarealer, beliggende midt i konstruktionerne. $m_i = 0,30 \text{ m}^2\text{C/W}$

10.3.2 Indflydelsen af variationer i TO

I beregningen af TO indgår det indvendige overgangsmo-standstal m_i og de indvendige overfladearealer. Her vil variationer i m_i være afgørende for størrelsen af TO. Det er som nævnt forudsat, at $m_i = 0,30 \text{ m}^2\text{C/W}$, idet der ses bort fra strålingsdelen (jf. afsnit 3.3.9). Antages det i stedet for, at $m_i = 0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$, som angivet i Ingeniørforeningens Varmetabsregler [6] fås de på fig. 10.3.5 viste beregningsresultater.

DATO		MÅLT	BEREGNET	FORSKEL ΔQ	ΔQ i %
		kWh	kWh	kWh	%
10/11	Rum Øst	8,45	6,99	1,46	17,3
11/11		7,55	6,49	1,06	14,0
16/11		10,80	9,03	1,77	16,4
17/11		10,75	8,83	1,92	17,9
26/11		8,25	7,26	0,99	12,0
27/11		8,25	7,54	0,71	8,6
28/11		9,15	7,80	1,35	14,8
1/11	Rum Vest vindue 2,8 m ²	8,65	8,31	0,34	3,9
2/11		9,40	7,96	1,44	15,3
10/11	Rum Vest vindue 1,75 m ²	8,90	7,74	1,16	13,0
11/11		8,20			
15/11	Rum Vest vindue 1,75 m ²	9,70	8,41	1,29	13,3
16/11		10,90	9,77	1,13	10,4
17/11	Rum Vest vindue 2,25 m ²	10,60	9,43	1,17	11,0
26/11		9,60	8,05	1,55	16,1
27/11	Rum Vest vindue 2,25 m ²	9,85	8,27	1,58	16,0
28/11		10,65	8,71	1,94	18,2

Fig. 10.3.5. Sammenligning af målte og beregnede
døgnenergiforbrug i forsøgshus.

Ved beregninger: $m_1 = 0,13 \text{ m}^2\text{°C/W}$.

I forhold til beregningerne med $m_i = 0,30 \text{ m}^2\text{°C/W}$, ligger afvigelserne mellem målinger og beregninger ca. 6% lavere. På grundlag heraf kan det imidlertid ikke konkluderes, at så skal m_i være $0,13 \text{ m}^2\text{°C/W}$ eller måske endnu mindre, idet usikkerheden i forbindelse med de øvrige faktorer også skal tages med i betragtning.

10.3.3 Både TU og TO ændres

Kombineres de tre forhold, der er nævnt, fås afvigelser mellem målte og beregnede døgnenergiforbrug, som vist på fig. 10.3.6. Beregningerne er kun gennemført for rum Øst den 10/11, idet tendensen vil være den samme for alle datoer og for begge rum.

Nu vil selv en beskeden variation af TU på 10% bringe den procentuelle forskel ned på 7,3% med de opstillede forudsætninger.

10.3.4 Indflydelsen af ændringer af S

I afsnit 9.6 er usikkerheden på S beregnet til ca. 7%.

På et tidligere tidspunkt i projektet er der blevet foretaget beregninger med rum Vest den 1/11, hvor S varierer. Resultaterne er gengivet på fig. 10.3.7.

Beregningerne er foretaget med en lidt anden rummodel end ved de øvrige beregninger. Der kan således ikke foretages en sammenligning med de øvrige resultater. Selv for store variationer af S vil variationen i det beregnede energiforbrug være af størrelsesordenen 1%.

Tages den beregnede usikkerhed på S i betragtning, er der derfor ingen grund til at tro, at forskellen mellem beregninger og målinger ændres nævneværdigt. Dette gælder også, selv om der er en lille forskel på de to benyttede rummodeller, idet indflydelsen af S må anses for at være stort set den samme.

DATO		MÅLT	BEREGN.	FORSKEL ΔQ	ΔQ i %
		kWh	kWh	kWh	%
10/11	<u>RUM ØST</u>				
	TU	8,45	6,99	1,46	17,3
	TU + 10%	8,45	7,49	0,96	11,4
	TU + 20%	8,45	8,01	0,44	5,2
	TU + 40%	8,45	9,01	-0,56	-6,6
10/11	<u>RUM ØST</u>				
	MED NYT TRANS- MISSIONSAREAL				
	TU	8,45	7,29	1,16	13,7
	TU + 10%	8,45	7,83	0,62	7,3
	TU + 20%	8,45	8,35	0,10	1,2
	TU + 40%	8,45	9,41	-0,96	-11,4

Fig. 10.3.6. Sammenligning af målte og beregnede døgnenergi-
forbrug i forsøgshus. Ved beregningerne er
 $m_i = 0,13 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$.

DATO		Q VARM	Q PRIM	ΣQ	FORSKEL ΔQ i %
		kWh	kWh	kWh	%
1/11	Rum Vest				
	S varierer:				
	S = 500 Wh/ $^{\circ}$ C	6,46	1,72	8,18	
	1000 -	6,35	1,72	8,07	1,3
	1500 -	6,26	1,72	7,98	1,1
	2000 -	6,18	1,72	7,90	1,0

Fig. 10.3.7. Beregning af døgnerenergiforbrug i forsøgshus den 01-11-76. Varmekapaciteten S er varieret.

10.3.5 Indflydelsen af ændringer i VENT

Den beregnede usikkerhed på VENT er i afsnit 9.2 angivet til ca. 6,5%. Ligesom for variationer i varmekapaciteten S, er der foretaget beregninger med varierende VENT for rum Vest d. 1/11 med en lidt anderledes rummodel.

Resultaterne på fig. 10.3.8 viser, at når VENT varieres 1,0 W/ $^{\circ}$ C ændres det beregnede energiforbrug med ca. 3,5%. Ændringen sker naturligvis hovedsagelig på QPRIM (varme tilført ventilationsluften).

Da den faktiske rummodel og den her benyttede kun afviger lidt fra hinanden, antages det, at der vil være stort set den samme indflydelse af VENT i de to modeller. Derfor er der ikke ofret yderligere tid og resourcer på at gennemføre beregningerne med "den rigtige" rummodel.

DATO		Q VARM	Q PRIM	Σ	FORSKEL ΔQ i %
		kWh	kWh	kWh	%
1/11	Rum Vest				
	VENT varierer				
	VENT = 5,0	7,09	1,25	8,34	3,8
	6,0	7,16	1,50	8,66	7,3
	8,0	7,29	2,00	9,29	3,3
	9,0	7,35	2,25	9,60	3,3
	10,0	7,42	2,50	9,92	

Fig. 10.3.8. Beregnede døgnenergiforbrug i forsøgshuset den 01-11-76. VENT er varieret.

Den beregnede usikkerhed på VENT (6,5%), der bevirker at VENT bliver $6,9 \pm 0,5 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$, vil højst kunne ændre forskellen med ca. 1,8%. For at denne ændring skal have en positiv virkning, må usikkerheden på VENT være ensidig d.v.s. 0 - 6,5%.

10.3.6 Konklusioner

På grundlag af de beregninger og sammenligninger, der er foretaget i de foregående afsnit 10.3. - 10.3.5, kan det konkluderes, at de betydelige forskelle mellem målinger og beregninger med udgangsrummodellen kan reduceres som følge af de usikkerheder, der uundgåeligt er i forbindelse med målinger og beregninger. Imidlertid vil hensyntagen til de beregnede og de skønnede usikkerheder ikke kunne bringe balance mellem beregninger og målinger. Tilbage vil der være en forskel på mellem 5 og 10%, som må tilskrives de forenklinger, der dels er i BA4-programmet og dels indføres ved beregning af rumdata og variable parametre.

De forenklinger, der er indbygget i BA4, kan naturligvis kun elimineres helt, hvis de forsvinder. Det vil dog ikke være realistisk at ændre så meget på BA4. I stedet for viser beregningerne, at benyttelsen af $m_1 = 0,13 \text{ m}^2\text{°C/W}$ i stedet for $0,30 \text{ m}^2\text{°C/W}$ og indførelse af et transmissionsareal, der ligger midt i konstruktionerne, bringer afvigelsen mellem målinger og beregninger så langt ned, at man med rimelighed kan sige, at der er balance.

De her fremførte betragtninger gælder strengt taget kun for bygninger af samme type som forsøgshuset. Imidlertid vil tendensen være den samme for andre bygninger, men indflydelsen af de forskellige faktorer vil være anderledes. Eksempelvis vil ændringen af m_1 fra $0,30 \text{ m}^2\text{°C/W}$ til $0,13 \text{ m}^2\text{°C/W}$ betyde mindre for en høj-isoleret bygning end for forsøgshuset.

RESUME

I denne afhandlings første hovedafsnit søges spørgsmålet om, hvorledes vinduers størrelse og orientering influerer på energiforbruget til rumopvarmning, klarlagt udfra teoretiske beregninger ved benyttelse af et eksisterende EDB-program.

Det andet hovedafsnit behandler derpå spørgsmålet om de foretagne beregningers nøjagtighed. Hertil benyttes resultaterne fra praktiske forsøg som grundlag for en sammenligning mellem teori og praksis.

Afhandlingens afsnit 0 og 1 behandler den teoretiske baggrund for beregningerne. Solintensitetens variation, dels i det fri, og dels ved passage af et eller flere lag glas omtales som funktion af solhøjden, indfaldsvinklen, hældningsvinklen og azimutvinklen.

Årsvarmebalancen for en dobbeltrude, d.v.s. den på grund af en temperaturforskelle mellem ude og inde-transmitterede varme plus den gennem ruden transmitterede solvarme, beregnes på grundlag af Referenceårets udeklimadata [16]. For en sydvendt dobbeltrude er resultatet det interessante, at der, både når der betragtes hele året, men også, når der kun betragtes fyringssæsonen (oktober til april begge inklusive), vil være en positiv varmebalance. Vinduets tilstedeværelse i klimaskærmen er således med til at nedbringe fyringsudgifterne.

I afsnit 1 gennemgås teorien for stationære varme-strømme, på grundlag af Fouriers varmeledningsligning, og vanskelighederne ved at løse ligningen ved praktiske forhold omtales. Som baggrund for de senere beregninger løses ligningen derfor ad numerisk vej, og den metode, som er foreslået af Bo Andersen [19] gen-

nemgås.

Til grund for metoden ligger en beregningsmodel af varmebalancen for et rum. De varmebidrag, der tilsammen udgør rummets varmebalance er:

Varmeoverføring fra sol, personer, lys m.v. til rumluften og overfladerne.

Varmeoverføring fra rumluft til overflader og ventilationsluft.

Varmeoverføring fra overfladerne til udeluften, naborum og varmeakkumulerende lag.

Alle varmebidragene kan sammenstilles til et antal varmebalanceligninger for:

rumluften

overfladerne

varmeakkumulerende lag

Teoretisk set er der uendelig mange ligninger, men i praksis begrænses antallet svarende til den ønskede beregningsnøjagtighed og -metode. Bo Andersens metode indeholder således kun tre ligninger nemlig:

én for overfladerne under ét

én for rumluften

én for det varmeakkumulerende lag

Antagelsen er her, at alle overflader har samme temperatur, at rumluftens temperatur er ensartet og at al masse er samlet i ét varmeakkumulerende lag.

De tre varmebalanceligninger udledes, og de forenklinger, der indføres, omtales og kommenteres. Endelig løses de tre ligninger, hvilket muliggør beregning af overfladetemperaturen ' t_o ', rumlufttemperaturen ' t_i ' og temperaturen af det varmeakkumulerende lag ' t_a ' til tiden n , på grundlag af kendskab til forholdene til tiden $n-1$.

$$t_{a,n} = A_1 t_{o,n-1} + A_2 t_{o,n-1}$$

$$t_{o,n} = B_1 t_{a,n} + B_2 t_{r,n} + B_3 t_{u,n} + B_4 t_{l,n} + B_5 Q_{k,n} + B_6 Q_{s,n}$$

$$t_{i,n} = C_1 t_{o,n} + C_2 t_{l,n} + C_3 Q_{k,n}$$

De tre ligninger danner grundlag for det benyttede EDB-program, der kort omtales i afsnit 2.

Afhandlingens afsnit 3 omfatter de foretagne beregninger af vinduers indflydelse på energiforbruget til rumopvarmning. Der benyttes ialt fem forskellige rummodeltyper:

1. et meget tungt rum (50 cm beton overalt)
2. et middeltungt rum (30 cm letbeton overalt)
3. et let rum (hovedsagelig 200 mm isolering i alle konstruktioner)
4. et rum svarende til et almindeligt parcelhus idag.
5. et tungt velisoleret rum

Opbygningen af de fem rummodeller gennemgås, og de forudsætninger, der lægges til grund for beregningerne, opstilles og kommenteres. Det drejer sig om:

1. Temperatur i rummodel og naborum, samt ventilationsluftens temperatur.
2. Vinduesantal og orientering.
3. Gratisvarme til rummet (fra personer, lys m.v.)
4. Varmeanlæggets type og maksimale ydelse.
5. Det naturlige luftskifte.
6. Horisontafskæring (d.v.s. den solhøjde hvorunder det direkte solindfald er nul, som følge af skygge fra bygninger, træer m.v.)
7. Køling i rummodellen.
8. Varmeovergangsmodstandenes størrelse.
9. Fordeling af den indfaldende solstråling på konvektiv del og strålingsdel.
10. Placering af det varmeakkumulerende lag.
11. Beregning af rumdata.

På grundlag heraf beregnes de nødvendige rumdata for rummodel 1, 2 og 3, og der foretages beregninger med varierende vinduesareal (mellem 0 og 8 m²) og orientering.

Ganske kort kan resultaterne sammenfattes i følgende:

For det meget tunge rum (model 1), med ét vindue, vil energiforbruget til rumopvarmning i fyringssæsonen

falde for voksende vinduesareal, uanset vinduesorienteringen. Samme tendens gør sig gældende for rummodel 2 og 3, men kun for det sydvendte vindue, og kun op til en vis vinduesstørrelse.

Rummodel 4 og 5's rumdata beregnes derpå, og analogt med model 1, 2 og 3 gennemføres beregninger med varierende vinduesstørrelse og orientering. For model 4 og 5 søges indflydelsen af natisolering af vinduet, personers tilstedeværelse i rummet og elektrisk lys, ligeledes analyseret. Endelig gennemføres beregninger med en tung variant af de to modeller, for at kunne vurdere indflydelsen af den akkumulerende masse.

Som hovedresultat kan nævnes, at det ønskede fald i energiforbruget, med voksende vinduesareal, kun optræder ved urealistiske rum (d.v.s. rum uden personer og lys), og da kun for at sydvendt vindue, og kun op til et vist maksimalt vinduesareal.

Afsnit 4 og fremefter er afhandlingens anden del, i hvilken en sammenligning af beregningsresultater og resultater fra praktiske forsøg foretages, for at få et overblik over EDB-programmets regnenøjagtighed.

Til forsøgene benyttes et præfabrikeret forsøgshus (med to forsøgsrum). Konstruktioner og den specielle indretning (herunder ekstra varmeakkumuleringsmasse, plastfolie til reduktion af det naturlige luftskifte og varme/ventilationssystemet) omtales i afsnit 4.

Forsøgshusets målesystem og registreringsudstyr, der

er specielt opbygget til dette formål, gennemgås i afsnit 5. Væsentligst her er placeringen af termoelementerne, der benyttes ved temperaturmålingerne.

Den senere behandling af måleresultaterne, der punches ud på papertape af en datalogger, sker ved hjælp af tre specielt opbyggede EDB-programmer, der kort omtales i afsnit 6. De færdige resultater præsenteres i det følgende afsnit, hvor også opståede fejl i målesystemet og eventuelle uoverensstemmelser mellem forudsætninger og resultater gennemgås og kommenteres.

Vurderingen af de to forsøgsrums forskelligheder, med hensyn til varmetransmissionen gennem konstruktionerne, foretages i afsnit 8. På grundlag af beregninger af varmetransmissionstallene og arealerne for de enkelte konstruktioner - i de to rum -, udregnes varmetransmissionen pr. grads temperaturforskul, for hvert rum. Under hensyntagen til beregningsusikkerheden kan det konkluderes, at de to rum har samme varmetab pr. grads temperaturforskul over konstruktionerne.

En tilsvarende vurdering gennemføres på grundlag af de i praksis opnåede forsøgsresultater, og det må også på dette grundlag anses for rimeligt, at betragte de to rum som værende ens, med hensyn til varmetransmissionen pr. °C.

Beregning af usikkerheder er henlagt til afsnit 9, således, at de kan indgå i den endelige vurdering af beregningsnøjagtigheden, der behandles i afsnit 10.

De usikkerheder, der foretages beregning af, eller skøn over, er:

1. Måling af temperaturer.
2. Måling af luftskifte.
3. Måling af elforbrug.
4. Bestemmelse af længder og arealer.
5. Bestemmelse af rumvægt og varmekapacitet for letbeton.
6. Beregning af varmekapaciteten for letbeton.
7. Tykkelsen af de indgående materialelag.

Beregningerne foretages hovedsagelig ved hjælp af op-hobningsloven for usikkerhed, men hvor det ikke har været muligt, er der foretaget et rimeligt skøn over usikkerhederne.

Sammenligningen af måleresultater og beregningsresultater er sket på grundlag af beregninger med de to forsøgsrum som rummodeller, og de faktisk opnåede forsøgsresultater.

Der omtales først opbygningen af de to rum som beregningsmodeller. De relevante rumdata beregnes ud fra kendskabet til de indgående konstruktioner, og der foretages en vurdering af det varmeakkumulerende lags placering.

Indgangsdata til BA4-programmet specificeres, og i stedet for de normalt benyttede referenceårsvejrdato, opbygges specielle vejrdato, på grundlag af de praktiske målinger af temperaturer (ved forsøgshuset) og solintensiteter (ved Nul-energi-huset).

Sammenligningen giver som det umiddelbare resultat, at beregningerne giver energiforbrug for fyringssæsonen, der i gennemsnit ligger ca. 20% under de målte energiforbrug. Tages der imidlertid hensyn til de beregnede usikkerheder, kan afvigelsen mellem beregning og forsøg bringes ned på 5-10%. Den tilbageblevne forskel må tilskrives de forenklinger og forudsætninger, der gøres i selve BA4-programmet, og i de indgangsdata, der benyttes.

SYMBOLLISTE I ALFABETISK ORDEN

a	temperaturledningstal [m^2/s]
a_s	solazimutvinkel [grader]
a_v	vægazimutvinkel [grader]
A	brøkdel af solstråling, der absorberes i glasrude (afsnit 0)
b	brydningsvinkel [grader]
B	rumudvidelseskoefficient [$^{\circ}C^{-1}$]
B_a	varmeoverføringskoefficienter [$W/^{\circ}C$]
B_l	
B_o	
B_r	
B_u	
C_1	sporgaskoncentrationer
C_2	
$C_p = C$	varmefylde [$KJ/kg^{\circ}C$] eller [$Wh/kg^{\circ}C$]
d	diameter [m]
dI_{λ}	tilvækst i strålingsintensiteten ved bølgelængden λ [W/m^2]
dq	tilvækst i varmestrøm pr. tidsenhed [W/m^2]
dQ	- - - - - [W]
dt	- - temperatur [$^{\circ}C$]
dt	
d θ	
dx	- - de retvinklede koordinater
dy	
dz	

G	luftmængde [m^3/h] eller [kg/h]
h	solhøjde [grader]
i	indfaldsvinkel [grader]
I_{index}	strålingsintensitet [W/m^2]
k	varmetransmissionstal [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$]
l	egenværdi
m_{index}	varmemodstandstal [$\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$]
n	luftskifte [$1/\text{h}$]
p	tryk [mbar]
q	varmestrøm pr. tisenhed og pr. arealenhed [W/m^2]
Q	varmestrøm [W/m^2] eller [W]
R	brøkdel af solstråling, der reflekteres i glastrude
s	vejlængde [m] (afsnit 0)
s	usikkerhed på beregninger (afsnit 9)
S	varmekapacitet af bygningsdel [$\text{Wh}/^\circ\text{C}$]
t_{index}	temperatur [$^\circ\text{C}$]
T	brøkdel af solstråling, der transmitteres gennem glastrude
v	hastighed [m/s]
V	rumvolumen [m^3]
x	} retvinklede koordinater
y	
z	

SYMBOLER I DET GRÆSKE ALFABET

α_{index}	varmeovergangstal [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$]
β	væg-sol azimutvinkel [grader]
Δt	temperaturforskel [$^\circ\text{C}$]
$\Delta \tau$	tidsinterval [h]

Δt	temperaturforskel [$^{\circ}\text{C}$]
$\Delta \tau$	tidsinterval [h]
δ	nettotransmissionskoefficient
$\partial \tau$	tilvækst i tiden [h]
ϕ	vinkelforhold (afsnit 0)
ϕ	} funktioner
Φ	
Ψ	
γ	hældningsvinkel [grader] (afsnit 0)
γ	rumvægt [kg/m^3]
λ	varmeledningstal [$\text{W}/\text{m } ^{\circ}\text{C}$]
λ	bølgelængde [m] (afsnit 0)
ν	kinematisk viscositet [m^2/s]
ρ	massefylde [kg/m^3]
ρ	reflektionskoefficient (afsnit 0)
θ	} temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
Θ	
τ	tid [h]
Σ	summationstegn

REFERENCELISTE

- [1] N.F.Bisgård,Opvarmning og Ventilation I,
Varmetransmission,København 1969
- [2] Bayley,Owen og Turner,Heat Transfer,London 1972
- [3] Poul Becher,Varme og Ventilation I,København 1971
- [4] Low Temperature Engineering Applications of solar
Energy,ASHRAE 1967
- [5] B.Schwarz,Die wärme- und stoffübertragung an
Aussenwandoberflächen, 1974
- [6] Dansk Ingeniørforenings regler for beregning af
bygningers varmetab,3.udgave, 5.oplag, 1975
- [7] Ivor S. Groundwater,Solar Radiation in Aircon-
ditioning,1967
- [8] G. Brown og E. Isfält,Solinstråling och solav-
skärmning,Rapport från Byggforskningen R19:1974
- [9] E. Petersen,Solindfald gennem vinduer, meddelelse
nr. 13, Laboratoriet for Varmeisolering, DtH,
1966.
- [10] ASHRAE handbook of Fundamentals,New York, 1967
- [11] J.W.Spencer,Estimation of Solar Radiation in
Australasien Localities on Clear Days.Division
ofBuilding Research,Technical Paper no. 15,
Melbourne 1965
- [12] SMHI = Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska
Institut
- [13] ASHRAE GUIDE, New York 1964
- [14] KTH = Kungliga Tekniska Högskolan,Sverige

- [15] J.L.Threkeld, Thermal Environmental Engineering (Prentice-Hall Inc.) Eaglewood Cliffs, N.J., 1962
- [16] Bo Andersen et al., Vejrdata for VVS-tekniske beregninger, Referenceåret, SBI-rapport nr.89 København 1974
- [17] Gröber, Erk og Grigull, Grundsetze der Wärmeübertragung, Berlin 1962
- [18] Hans Lund, Program BA-4, Lyngby 1976
- [19] Bo Andersen, Bygningers Varmebalance, København 1972
- [20] Bo Adamson, Värmebalans vid rum och byggnader Lunds Tekniska Högskola, Lund 1968
- [21] N.F.Bisgård, Klima- og ventilationsteknik, København 1971
- [22] Bygningsreglementet 1974
- [23] Glent og Co. Ventilation, Håndbog, 1969
- [24] Termisk og atmosfærisk indeklima, 1973
- [25] Thermocouple Reference Tables based on the IPTS 68, NBS Nomograph 125, Washington D.C. 1974
- [26] Handbook of Chemistry and Physics 42 ed. 1960-61
- [27] Manual on the use of Thermocouple in Temperature Measurements, ASTM STP 470A, Philadelphia 1974
- [28] R.E.H.Rasmussen, Elementær måleteori, København 1968