



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R162:1980

Dynamisk isolering

Teori för värmeisolering som genomströmmas av gas eller vätska

Gunnar Anderlind
Bernt Johansson

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	80-2424
Plac	Ser

R
AWA

BYGGDOK

Institutet för byggdokumentation
Hälsingegatan 49
113 31 Stockholm, Sweden
08-34 01 70 Telex 125 63

Byggtforskningsrådet

Ser

R162:1980

DYNAMISK ISOLERING

Teori för värmeisolering som
genomströmmas av gas eller vätska

Gunnar Anderlind
Bernt Johansson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 790146-5
från Statens råd för byggnadsforskning till Paul Petterssons
Konstruktionsbyrå AB, Stockholm.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R162:1980

ISBN 91-540-3399-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1980 058354

INNEHÅLL

BETECKNINGAR	5
FÖRORD	7
1 FUNKTIONSBESEKRVNING OCH FÖRUTSÄTTNINGAR	9
1.1 Konventionell isolering	9
1.2 Dynamisk isolering	10
2 HÄRLEDNING AV EKVATIONERNA FÖR ENERGI- OCH FUKTTRANSPORT	15
2.1 Energiflöde	15
2.2 Fuktflöde	16
3 RANDVILLKOR	19
3.1 Temperatur	19
3.2 Ånghalt	25
4 TEMPERATUR- OCH ÅNGHALTSFÖRDELNING	29
5 DYNAMISKT K-VÄRDE	33
6 YTTEMPERATUR	39
7 KONDENSATION I ISOLERINGSMATERIALET	43
7.1 Motflödesisolering	43
7.2 Medflödesisolering	44
8 FUKTTRANSPORT MOT KALLA SIDAN I MOTFLÖDES-ISOLERING	47
9 JÄMFÖRELSER MED MÄTNINGAR	49
10 EXEMPEL PÅ TILLÄMPNINGAR	55
10.1 Motflödestak	55
10.2 Medflödesgolv	59

11	BERÄKNINGSEXEMPEL	63
11.1	Motflödestak	63
11.2	Medflödesgolv	67
12	LITTERATUR	71
13	BILAGOR	73

BETECKNINGAR

Q	ventilationsbehov	kg/s
RF	relativ fuktighet	%
T	temperatur	°C
T _r	referenstemperatur	°C
a ₁	$dv/c_p/\lambda$ beräkningskonstant	-
a ₂	dv/δ beräkningskonstant	-
b ₁	$d\alpha_i/\lambda$ beräkningskonstant	-
b ₂	$d\beta_i/\delta$ beräkningskonstant	-
b _i	$d/(\lambda \cdot m_i)$ beräkningskonstant	-
b _u	$d/(\lambda \cdot m_u)$ beräkningskonstant	-
c	ånghalt	g/m ³
c _{if}	kritisk ånghalt, sida i, för fukttransport mot kalla sidan genom motflödesisolering	g/m ³
c _{ik}	kritisk ånghalt, sida i, för kondensation i isoleringen	g/m ³
c _m	mättnadsånghalt	g/m ³
c _p	värmekapacitivet	Ws/kg, °C
d	isoleringsmaterialets tjocklek	m
f ₁ -f ₄	tabellerade funktioner, se bilaga 1-4	-
i	index för den sida massflödet lämnar isoleringsmaterialet	-
k	värmegenomgångskoefficient	W/m ² , °C
k _{dyn}	dynamisk värmegenomgångskoefficient	W/m ² , °C
m _i	totalt värmemotstånd på sida i av den dynamiska isoleringen	m ² , °C/W
m _u	dito på andra sidan	m ² , °C/W
q	värmeflöde	W/m ²
q _e	energiflöde	W/m ²
q _f	massflöde	(kg/m ² , h) g/m ² , s
u	index för den sida massflödet träffar isoleringsmaterialet	-
v	hastighet	m/s (m/h)
x	lägeskoordinat	m

α	värmeövergångskoefficient	$W/m^2, ^\circ C$
α'	värmeövergångskoefficient (annat randvillkor)	$W/m^2, ^\circ C$
α_k	värmeövergångskoefficient för konvektion	$W/m^2, ^\circ C$
α_s	värmeövergångskoefficient för strålning	$W/m^2, ^\circ C$
β	fuktövergångskoefficient	m/s
δ	fuktdiffusionstal	m^2/s
λ	värmekonduktivitet	$W/m, ^\circ C$
ρ	densitet	kg/m^3

FÖRORD

Föreliggande rapport behandlar en icke-konventionell isole-ringsteknik kallad dynamisk isolering, dvs en värmeisolering som genomströmmas av en gas eller en vätska. Metoden har paten-terats och utvecklats av byggnadsingenjör Torgny Thorén.

Av författarna har Johansson haft huvudansvaret för avsnitten 1 och 10 och Anderlind för resterande avsnitt.

Utredningen har finansierats av Statens råd för byggnadsforsk-ning och ingår i ett större projekt under ledning av byggnads-ingenjör Torgny Thorén och civilingenjör David Södergren.

Tekn lic Johan Claesson, civilingenjör Bengt Larsson och teknolog Sven Jönsson har lämnat värdefulla kommentarer under arbetets gång. Till dessa vill vi därför framföra ett varmt tack.

Gunnar Anderlind

Bernt Johansson

1 FUNKTIONSBESKRIVNING OCH FÖRUTSÄTTNINGAR

1.1 Konventionell isolering

En konventionell värmeisolering består i allmänhet av ett poröst material så beskaffat att andelen fast material är minimal, varför materialet består mest av luft eller någon annan gas. Gaser är nämligen mycket dåliga värmeledare jämförda med fasta material och vätskor. Det fasta materialet, som oftast förekommer som fibrer eller cellväggar, har funktionen att förhindra strålning samt konvektion i den inneslutna gasen.

Värmetransporten genom isoleringsmaterialet sker huvudsakligen som värmeledning i gas och fast material samt som strålning. För högisolerande material som mineralull dominerar ledning i luften och ett teoretiskt undre gränsvärde för värmekonduktiviteten är därför ca $0.024 \text{ W/m,}^{\circ}\text{C}$, vilket gäller om övriga transportmekanismer är eliminerade. I praktiken kan man med exempelvis mineralull komma ned mot $0.030 \text{ W/m,}^{\circ}\text{C}$. Temperaturen är praktiskt taget rätlinjigt fördelad över isoleringen, vilket visas i FIG.1.1.

Värmeflödet q genom ett homogent isolerskikt kan skrivas

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

dvs som produkten av värmekonduktivitet och temperaturgradient. Denna enkla formel pekar direkt ut möjligheterna att minska värmeflödet. Om man önskar bättre isoleringsegenskaper måste man minska λ -värdet (exempelvis genom att ta bort luften eller ersätta den med en gas som isolerar bättre) eller minska temperaturgradienten.

Enkla sätt att minska temperaturgradienten (lutningen på temperaturkurvan) är att välja en tjockare isolering eller att sänka inomhustemperaturen.

1.2 Dynamisk isolering

Det finns emellertid ytterligare ett sätt att ändra temperaturgradienten. Detta kan göras med en ny isoleringsteknik, i denna rapport kallad dynamisk isolering. Härvid tillförs ytterligare en transportmekanism, nämligen en påtvingad luftrörelse. Luftrörelsen kan vara riktad mot eller med värmeflödet varav namnen motflödesisolering resp medflödesisolering. Temperaturfördelningen i isoleringen ändrar sig som följd av luftflödet så att kurvan blir krökt enligt FIG.1.2 och 1.3.

Med värmeflöde menas i det följande energimängd enligt ekv. (1.1). Om temperaturkurvan är krökt varierar värmeflödet i olika snitt. Med energiflöde avses summan av värmeflödet och den energitransport som sker på grund av luftrörelsen. Energiflödet antas konstant i varje snitt genom isoleringsmaterialet.

Vid motflödesisolering blir temperaturgradienten och därmed värmeflödet mycket litet på den kalla sidan, se FIG.1.2. Värmeförlusterna från den kalla sidan minskar radikalt redan vid mycket små luftflöden, säg hastigheter kring någon meter per timme. Nära den varma sidan är däremot temperaturgradienten och därmed värmeflödet in i isoleringen stor. Skillnaden mellan ingående och utgående värmeflöde används för att värme uppluften, som därigenom för med sig energi tillbaka till byggnaden. Vid motflödesisolering sänks temperaturen i hela isolerskiktet, mer ju högre lufthastigheten är.

Det man uppnår vid motflödesisolering är således en reduktion av värmeförlusterna ut från isoleringen. In till lokalen får man dessutom en viss mängd förvärmad och filtrerad luft, vilket är en fördel ur komfortsynpunkt. En förutsättning för att tekniken skall vara intressant är naturligtvis att luftmängden behövs, t ex för ventilation. Detta är fallet för de flesta lokaler och ventilationsbehovet motsvarar normalt en lufthastighet som ger god effekt vid motflödesisolering.

Vid medflödesisolering blir temperaturgradienten och därmed

värmeflödet i stället mycket små vid den varma sidan, se FIG.1.3. I detta fall höjs temperaturen i hela isolerskiktet. Om luftflödet är frånluft som i ett jämförelsefall skulle ha släppts ut direkt i det fria så har man gjort en energibesparing med medflödesisolering.

Dynamisk isolering kan uppfattas som en form av värmeväxling. Energin som skall täcka transmissions- och ventilationsförluster minskar genom användning av dynamisk isolering. Energibesparingen kan inte bli större än vad som motsvarar transmissionsförlusterna. Praktisk värmeförbehåll, dvs så gott som total eliminering av transmissionsförlusterna uppnås vid relativt låga lufthastigheter.

I begreppet dynamisk isolering innefattas således en ny isoleringsteknik, där ett poröst isoleringsskikt genomströmmas av en vätska eller en gas. Teorin som uppställs i denna rapport är generell, men där inte annat sägs avses här en tillämpning med luft som värmebärare och mineralull som isoleringsmaterial.

Genom att styra luftströmmen på olika sätt kan funktionen hos den dynamiska isoleringen varieras. Som nämnts kan man särskilja två principiellt olika fall: motflödesisolering, där värmeflödet är motriktat luftflödet, och medflödesisolering, där flödena har samma riktning. Som exempel på utförda tillämpningar inom byggnadsbranschen kan nämnas motflödestak i industri- och sporthallar samt motflödesväggar och medflödesgolv i småhus, se kapitel 10.

Tillämpningar för tekniken har utvecklats av Thorén (1978a,b), (1977) och Anderlind, Larsson (1977).

Avsikten med denna utredning är att härleda teorin för energi- och fukttransport i dynamisk isolering samt att underlätta de omfattande beräkningarna genom att ange elementarfall i tabellform. Dessutom diskuteras några praktiska tillämpningar inom byggnadstekniken. (Industriella tillämpningar behandlas i en annan utredning). Den uppställda teorin verifieras också genom

jämförelser med några utförda mätningar av temperaturer och värmeflöden i motflödeskonstruktioner.

Följande förutsättningar antas gälla:

Temperaturintervallet antas vara så snävt att materialparamet-rarna och lufthastigheten med god noggrannhet kan sättas kons-tanta. Luftströmningen genom mineralullen är laminär vid de lå-ga lufthastigheter som här är aktuella, vilket medför att vär-meledningsförmågan är oberoende av lufthastigheten. Vidare för-utsätts endimensionella flöden genom isoleringsskivorna samt att temperaturen är densamma i en fiber och i luften närmast fibern. Endast fallet med stationär temperaturfördelning be-handlas.

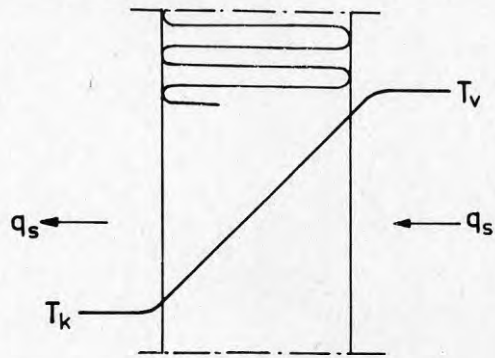


FIG.1.1 Temperaturfördelning i konventionell (statisk) isolering. Värmefflöde q_s .

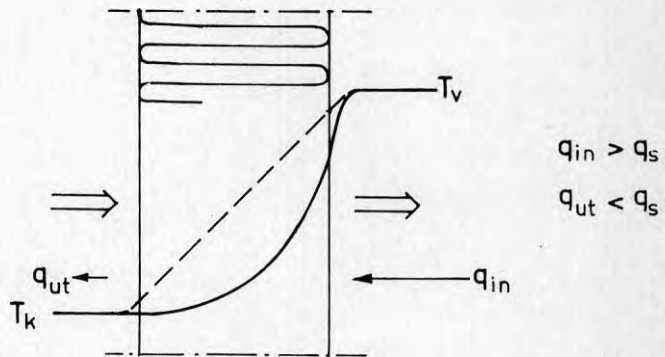


FIG.1.2 Temperaturfördelning i motflödesisolering.

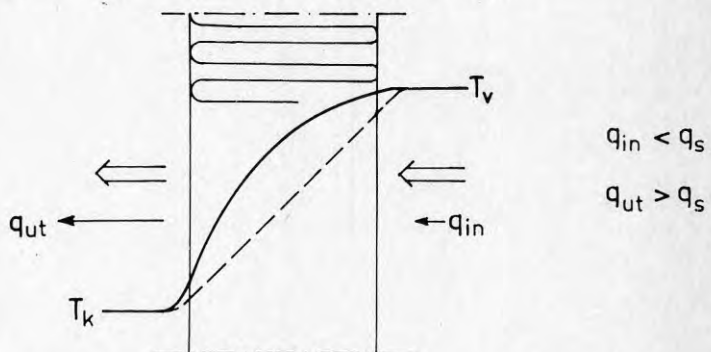


FIG.1.3 Temperaturfördelning i medflödesisolering.

2 HÄRLEDNING AV EKVATIONERNA FÖR ENERGI- OCH FUKTTRANSPORT

Det system vi betraktar består av en isolerskiva omgiven av luft. Temperaturen och ånghalten i den omgivande luften är T_i resp c_i på den sida luften lämnar materialet och T_u resp c_u på den andra sidan, se FIG.2.1. Index i betecknar således varma sidan i en motflödesisolering. I en medflödesisolering betecknar i den kalla sidan.

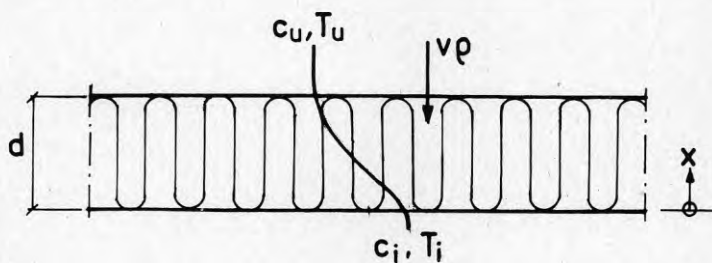


FIG.2.1 Definition av flödes- och koordinatriktning

2.1 Energiflöde

Värmeflödet genom snittet x i x -riktningen är

$$-\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Det konvektiva energiflödet i samma riktning är

$$-v_p c_p (T - T_r) \quad (2.2)$$

där

λ = värmekonduktivitet, $W/m, ^\circ C$

T = temperatur i snittet x , $^\circ C$

T_r = godtycklig referenstemperatur, $^\circ C$

v = lufthastighet, m/s

ρ = densitet för luft, kg/m³

c_p = värmekapacitivet för luft vid konstant tryck,
Ws/kg, °C

Vid stationära temperaturförhållanden (fortvarighet) är det totala energiflödet q_e konstant i varje snitt.

$$q_e = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} - v\rho c_p(T-T_r) \quad (2.3)$$

vilket efter derivering ger

$$\lambda \frac{d^2T}{dx^2} + v\rho c_p \frac{dT}{dx} = 0$$

Sätt

$$\frac{d v\rho c_p}{\lambda} = a_1 \quad (2.4)$$

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{a_1}{d} \frac{dT}{dx} = 0 \quad (2.5)$$

Denna ekvation har lösningen

$$T = A_1 \cdot e^{-\frac{a_1 x}{d}} + B_1 \quad (2.6)$$

där A_1 och B_1 löses ur randvillkoren, se kap 3.

2.2 Fuktflöde

Ångtransporten på grund av diffusion i x-riktningen är

$$-D \cdot \frac{dc}{dx} \quad (2.7)$$

och den konvektiva ångtransporten i samma riktning

$$-v \cdot c \quad (2.8)$$

där

$$\begin{aligned} \delta &= \text{fuktdiffusionstal, m}^2/\text{s} \\ c &= \text{ånghalt, kg/m}^3 \end{aligned}$$

Under förutsättning att kondensation eller avdunstning ej sker i materialskiktet är den totala fukttransporten q_f konstant

$$q_f = -\delta \cdot \frac{dc}{dx} - v \cdot c \quad (2.9)$$

På samma sätt som för energiflödet erhålles lösningen

$$c = A_2 \cdot e^{-\frac{a_2 x}{\delta}} + B_2 \quad (2.10)$$

där

$$a_2 = \frac{d \cdot v}{\delta} \quad (2.11)$$

A_2 och B_2 bestäms ur randvillkoren, se kap 3.

3 RANDVILLKOR

3.1 Temperatur

Värmeövergången mellan luft och fast material som inte genomströmmas av luft är väl undersökt. Den kan för torra material uppdelas i en strålningsdel och en konvektionsdel. För strålning kan med god noggrannhet värmeövergångskoefficienten sättas till nedanstående värden, som gäller för normala byggnadsmaterial (ej blanka metallytor) i en stor luftspalt med parallella sidoytor eller ett stort tak.

Yttemperatur	20	10	0	-10	-20 °C
Värmeövergångskoefficienten för strålning $\alpha_s^{(1)}$	5.1	4.6	4.1	3.7	3.3 W/m ² , °C

(1) α_s har beräknats ut nedanstående ekvation

$$\alpha_s = 4 \cdot \epsilon_{12} \cdot C_s (T+273.1)^3$$

$$\frac{1}{\epsilon_{12}} = \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1$$

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.93$$

$$C_s = 5.77 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2, \text{K}^4$$

Värmeöverföringskoefficienten för strålning är oberoende av ev luftströmning genom materialet, varför ovanstående värden är giltiga även för dynamisk isolering.

Värmeöverföringen mellan yta och luft på grund av konvektion är ofullständigt utredd för dynamisk isolering. Den är med säkerhet större på den sida där luften förs in i mineralullen än på motsatta sidan. Liksom för vanlig isolering ligger dock en mycket liten del av det totala värmemotståndet i värmeöver-

gångsmotstånden vid ytorna varför uppskattningar kan göras grova.

I det följande studeras två olika modeller, A och B, för härledning av randvillkoren. Efter jämförelse med mätresultat visas att modell A är lämpligast för låga lufthastigheter och modell B för höga.

Modell A illustreras i nedanstående FIG.3.1. Av pedagogiska skäl antas att figuren enbart illustrerar en motflödesisoleringsring, t ex ett tak över en varm lokal. Identiska resultat erhålles dock även för en medflödesisoleringsring. T_i och T_u betecknar lufttemperatur på insidan resp utsidan. T_o och T_d är ytemperatur på insidan resp utsidan.

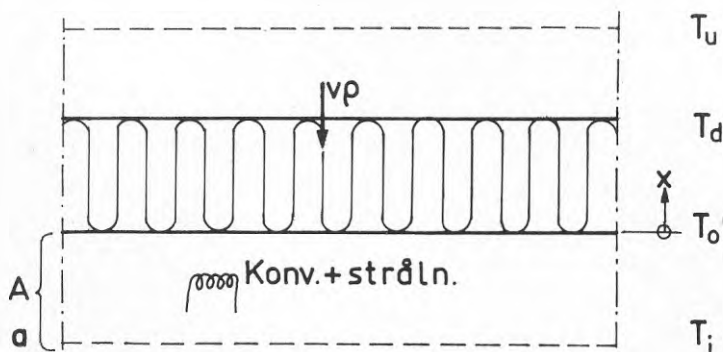


FIG.3.1 Randvillkor för temperatur modell A. Luften som lämnar område A har temperaturen T_i .

Energiflödet genom isoleringsmaterialet mot kalla sidan är vid varma ytan ($x=0$), se ekv.(2.3)

$$-\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right)_0 - v\rho c_p (T_o - T_r)$$

Detta energiflöde skall jämföras med flödet i något annat snitt i systemet. Detta andra snitt kan väljas efter det att värme från lokalen höjt den inströmmande luftens temperatur från

T_0 till T_i . Det luftburna energiflödet mot kalla sidan i detta snitt a är

$$-v\rho c_p(T_i - T_r)$$

Värmeöverföringen från lokalen till området A i FIG.3.1 kan skrivas

$$\alpha_i(T_i - T_0)$$

där α_i inkluderar såväl strålning som konvektion. α_i varierar troligen med v , T_i och T_u . Ovanstående term kan betraktas som en värmekälla inom området A. Värmekällan avger värme såväl till den från isoleringen inströmmande luften som till materialets yta. Om man, som vid byggnadstekniska tillämpningar, primärt är intresserad av temperaturförhållandena i isoleringsmaterialet, är det egentligen bara det värme som avges till materialets yta som är av intresse. Omvänt, om α_i bestäms med hjälp av temperaturmätningar i isoleringsmaterialet, bestämmer man naturligtvis endast den del av α_i som är relevant när man sedan skall beräkna temperaturfördelningen i materialet.

Energibalans för området A ger följande randvillkor

$$\alpha_i(T_i - T_0) - v\rho c_p(T_i - T_r) = -\lambda\left(\frac{dT}{dx}\right)_0 - v\rho c_p(T_0 - T_r)$$

eller

$$(\alpha_i - v\rho c_p)(T_i - T_0) = -\lambda\left(\frac{dT}{dx}\right)_0 \quad (3.1)$$

vilket kan skrivas

$$\alpha_i'(T_i - T_0) = -\lambda\left(\frac{dT}{dx}\right)_0 \quad (3.2)$$

där α_i' för en given konstruktion beror av v , T_i och T_u .

I och för sig kan vilket som helst av uttrycken (3.1) och (3.2) användas som randvillkor. Randvillkor med samma formella uppbyggnad som (3.2) får man om man tänker sig följande modell B av systemet som synes riktigare vid större luftflöden, se FIG. 3.2.

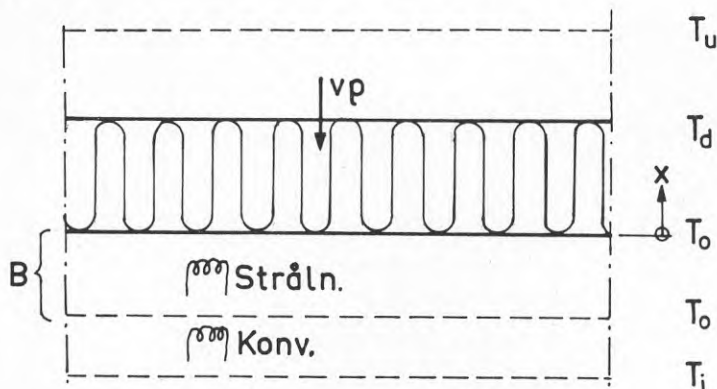


FIG.3.2 Randvillkor för temperatur, modell B. Luften som lämnar område B, har temperaturen T_0 .

Här antas den utströmmande luften ha konstant temperatur T_0 inom område B för att därefter uppvärmas konvektivt i lokalen. Från lokalen tillförs därför endast värme som strålning till område B, och i detta fall enbart till materialets yta. Energi-balansen blir

$$\alpha_s(T_i - T_0) - v\rho c_p(T_0 - T_r) = -\lambda \left(\frac{dT}{dx}\right)_0 - v\rho c_p(T_0 - T_r)$$

eller

$$\alpha_s(T_i - T_0) = -\lambda \left(\frac{dT}{dx}\right)_0 \quad (3.3)$$

Jämförelse mellan (3.2) och (3.3) ger det formella sambandet

$$\alpha_i' = \alpha_s$$

Vilken form randvillkoret lämpligen skall ha kan bedömas efter

jämförelse med mätningar.

Jönsson (1978) har uppmätt temperaturfördelningen i en motflödesisolering med tjockleken $d=15$ cm och $\lambda=0.031$ W/m, °C. Följande värden erhöles när luftflödet ökades

TAB.3.1 Uppmätta temperaturer i motflödesisolering

Fall	q_f kg/m ² h	T_i °C	T_o °C	T_d °C	α_i' W/m ² °C	α_i W/m ² °C
1	1.40	21.00	20.07	0.14	9.8	10.2
2	2.86	20.77	19.02	-0.06	8.9	9.6
3	5.48	20.61	17.37	-0.46	8.4	9.9
4	5.48	20.74	17.32	-0.37	7.9	9.4
5	7.94	20.94	13.92	0.71	4.2	6.4
6	9.04	21.32	13.57	0.01	4.4	6.9
7	14.29	21.30	11.20	-0.21	4.5	8.5

De två sista kolumnerna är beräknade. dT/dx har erhållits ur differentialekvationen med T_o och T_d som randvillkor. Det är intressant att jämföra α_i' med α_s (≈ 4.7) vid större luftflöden. Det är troligt att α_i' konvergerar mot α_s vid högre hastigheter, vilket ovanstående mätningar inte motsäger.

Då α_i' troligen går mot ett konstant värde för stora luftflöden ökar $\alpha_i = \alpha_i' + v\rho c_p$ vid stora och ökande luftflöden (se tendensen i fall 5, 6, 7).

För normala byggnadstekniska tillämpningar är luftflödet vanligen mindre än 7 kg/m²h. Inom detta intervall synes α_i vara tämligen konstant. Det är rimligt att använda det α -värde som varierar minst.

För den sida där luften lämnar isoleringen, randen $x=0$, förefaller därför följande slutsatser vara rimliga:

1. Välj randvillkoret enligt modell A

$$(\alpha_i - v\rho c_p)(T_i - T_0) = -\lambda \left(\frac{dT}{dx}\right)_0 \quad (3.1)$$

2. Vid normala byggnadstekniska tillämpningar kan α_i sättas till ett konstant värde. Värdet $7 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$ kan vara lämpligt att använda vid motflödesisolering, då detta enligt ovanstående mätningar ligger "på säkra sidan" för beräkning av kondensrisk och yttemperatur. Värdet stämmer dessutom ungefär med värden för normala, ej dynamiska konstruktioner.

3. När luftflödena är större, t ex $>7 \text{ kg/m}^2\text{h}$ sättes

$$\alpha_i = \alpha_s + v\rho c_p$$

in i randvillkoret enligt punkt 1 ovan.

Detta är identiskt med randvillkoret enligt modell B

$$\alpha_s(T_i - T_0) = -\lambda \left(\frac{dT}{dx}\right)_0 \quad (3.3)$$

För den andra randen, $x=d$, gäller att den konvektiva värmeöverföringen är stor då luften där förs in i materialet.

Ett rimligt val av randvillkor är därför

$$T_d = T_u$$

I verkligheten är T_d något högre än T_u . Denna skillnad påverkar vare sig temperaturförhållandena nära varma ytan eller värmeflödet på ett märkbart sätt.

3.2 Ånghalt

För härledning av randvillkor för ånghalten används nedanstående modell.

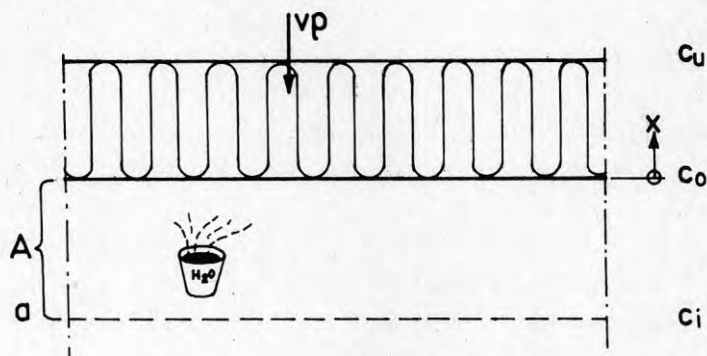


FIG.3.3 Modell för randvillkor för ånghalten.

Vid randen a har temperaturen och ånghalten uppnått värdena T_i resp c_i . Värderna vid den yta där luften lämnar isoleringen ($x=0$) betecknas liksom tidigare med index o.

Fukttransporten från lokalen till område A antas vara proportionell mot ånghaltsskillnaden mellan lokalen och ytan och kan betraktas som en fuktkälla inom område A.

Fuktbalans för A ger

$$\beta(c_i - c_o) - v_i \cdot c_i + v_o \cdot c_o + \delta \left(\frac{dc}{dx} \right)_o = 0$$

där

β = fuktövergångskoefficienten, m/s

δ = fuktdiffusionstal, m^2/s

Med approximationen $v_i = v_o = v$ erhålles

$$(\beta - v)(c_i - c_o) = - \delta \left(\frac{dc}{dx} \right)_o \quad (3.4)$$

Detta randvillkor har formellt samma form som randvillkoret för energibalansen, se ekv.(3.1). Differentialekvationen för fukttransport är också identisk med den för energitransport om v , δ och β antas vara konstanter, varför analogin mellan fukt- och energitransport är fullständig eftersom också randvillkoren på kalla sidan kan antas vara identiska.

Liksom randvillkoret (3.1) för energitransport är (3.4) endast begränsat giltigt. För större luftflöden (åtminstone när $v > \beta$) kan ekvationen uppenbart inte gälla om β antas vara konstant.

I litteraturen finns flera samband mellan β och den konvektiva värmeöverföringskoefficienten α_k . Enligt Lewis' lag gäller

$$\beta = \frac{\alpha_k}{\rho c_p} = \frac{\alpha_i - \alpha_s}{\rho c_p} \quad (3.5)$$

Enligt de tidigare slutsatserna bör α_i väljas till $7 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$ vilket med $\alpha_s = 5 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$ ger

$$\beta_i = \frac{2}{\rho c_p} \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \quad (3.6)$$

för normala byggnadstekniska tillämpningar, där luftflödena är mindre än ca $7 \text{ kg/m}^2\text{h}$.

För större luftflöden sattes $\alpha_i = \alpha_s + v\rho c_p$, vilket ger

$$\beta_i = v \quad (3.7)$$

Detta ger lösningen $c=c_u$ i hela isolerskiktet, dvs ingen kondensrisk i isolerskiktet föreligger vid större ($v\rho > 7 \text{ kg/m}^2\text{h}$) luftflöden.

Värdena på β_i enligt ekv.(3.6) och (3.7) är osäkra. Inga mätningar på dynamisk isolering som verifierar dessa värden har

ännu utförts. Ur säkerhetssynpunkt bör därför något högre värden möjligen väljas. Enligt TAB.3.1 kan α_i uppgå till 10 W/m²,°C vilket ger

$$\beta_i = \frac{10^{-5}}{1200} \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Följande värden på α_i och β_i föreslås därför vid beräkning av kondensrisk, trots att de inte är samhörande:

$$\alpha_i = 7 \text{ W/m}^2, \text{°C}$$

$$\beta_i = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Dessa värden sätts in i randvillkoren (3.1) resp (3.4). För större luftflöden än ca 7 kg/m²h behöver kondensrisken inte kontrolleras i enlighet med diskussionen efter ekv.(3.7).

För den andra randen, x=d, väljs i analogi med randvillkoret för temperaturen

$$c_d = c_u$$

vilket innebär att ånghalten vid isoleringens yta är lika stor som i luften utanför ytan.

4 TEMPERATUR- OCH ANGHALTSFÖRDELNING

Enligt de föregående kapitlen kan differentialekvationer och randvillkor uttryckas enligt nedan:

För temperaturen

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{v\rho c_p}{\lambda} \frac{dT}{dx} = 0$$

$$(\alpha_i - v\rho c_p)(T_i - T) = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad \text{för } x=0$$

$$T = T_u \quad \text{för } x=d$$

Om de två dimensionslösa storheterna

$$a_1 = d v\rho c_p / \lambda$$

$$b_1 = d \alpha_i / \lambda$$

införs, blir lösningen

$$T = T_u + (T_i - T_u) \frac{e^{-\frac{a_1 x}{d}} - e^{-a_1}}{1 - e^{-a_1} + \frac{a_1}{b_1 - a_1}} \quad (4.1)$$

För ånghalten

$$\frac{d^2 c}{dx^2} + \frac{v}{\delta} \frac{dc}{dx} = 0$$

$$(\beta_i - v)(c_i - c) = -\delta \cdot \frac{dc}{dx} \quad \text{för } x=0$$

$$c = c_u \quad \text{för } x=d$$

Införs

$$a_2 = dv/d$$

$$b_2 = d\beta_i/d$$

blir lösningen

$$c = c_u + (c_i - c_u) \frac{e^{-\frac{a_2 x}{d}} - e^{-a_2}}{1 - e^{-a_2} + \frac{a_2}{b_2 - a_2}} \quad (4.2)$$

Som synes är lösningarna för temperatur och ånghalt helt analoga. I båda fallen måste man beräkna ett tämligen komplicerat bråkuttryck, som är en funktion av tre dimensionslösa storheter x/d samt a_i och b_i , där $i = 1$ resp 2 .

För att underlätta beräkningen har uttrycket separerats i två termer, f_1 och f_2 , som tabellerats i BIL.1 och 2. Temperatur och ånghalt uttrycks då som

$$T = T_u + (T_i - T_u) \cdot f_1\left(\frac{x}{d}, a_1\right) \cdot f_2(a_1, b_1) \quad (4.3)$$

resp

$$c = c_u + (c_i - c_u) \cdot f_1\left(\frac{x}{d}, a_2\right) \cdot f_2(a_2, b_2) \quad (4.4)$$

där

$$f_1\left(\frac{x}{d}, a\right) = e^{-\frac{ax}{d}} - e^{-a} \quad (4.5)$$

$$f_2(a, b) = \frac{1}{1 - e^{-a} + \frac{a}{b-a}} \quad (4.6)$$

Dynamisk isolering kan naturligtvis även användas i konstruktioner, där den är omgiven av ytskikt vars värmemotstånd ej är försumbara. Ett exempel på en sådan konstruktion är då luften tas in eller förs ut punktvis i en luftspalt, vars ena sida utgörs av den dynamiska isoleringen och den andra av en ogenomsläpplig skiva. I sådana fall kan man visa att temperaturfördelningen kan beräknas ur

$$T = T_u + (T_i - T_u) \frac{\frac{b_u}{b_u - a_1} \cdot e^{-\frac{a_1 x}{d}} - e^{-a_1}}{1 - e^{-a_1} + \frac{a_1 (b_u + b_i)}{b_i (b_u - a_1)}} \quad (4.7)$$

där

$$b_i = \frac{d}{\lambda m_i}$$

$$b_u = \frac{d}{\lambda m_u}$$

m_i resp m_u betecknar summan av värmemotstånd (inkl värmeövergångsmotstånd) på resp sida av det dynamiska isoleringsskiktet.

Luften som lämnar den varma spalten vid en motflödesisolering uppvärms ej till rumstemperatur förrän den lämnat den dynamiska konstruktionen. Motsvarande gäller för en medflödesisolering. I ekv.(4.7) måste således randvillkor av modell B användas, se FIG.3.1 och 3.2. Detta förklarar varför ekv.(4.1) ej erhålles ur (4.7) då m_u går mot noll. I ekv.(4.1) valdes, som tidigare nämnts i avsnitt 3, randvillkor av modell A.

Vid härledning av ekv.(4.7) har en jämn temperaturfördelning i de omgivande luftspalterna antagits. Hur väl detta antagande uppfylls beror bl a på utformningen av luftspalterna och in- och utblåsningsöppningarna. I avsnitt 9 görs en jämförelse mellan uppmätta och beräknade temperaturer, vilken visar god överensstämmelse för den utformning och de lufthastigheter som använts vid försöken.

5 DYNAMISKT K-VÄRDE

Dynamisk isolering ger minskade energiförluster genom byggnadens klimathölje. I byggnader med ventilationsbehov kan man ta in eller föra ut luften genom isoleringsmaterialet, som då tjänstgör som värmeväxlare. Låt oss jämföra två byggnader med lika stort ventilationsbehov, där motflödesisolering används i den ena.

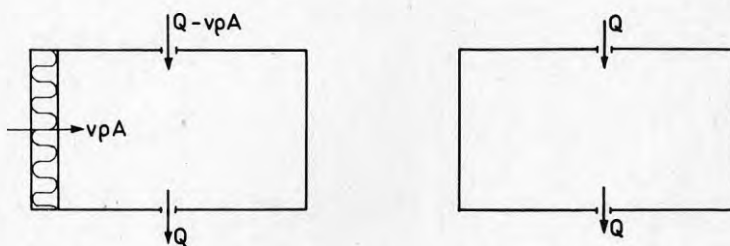


FIG.5.1 Byggnad med ventilationsbehov Q kg/s, med resp utan motflödesisolering.

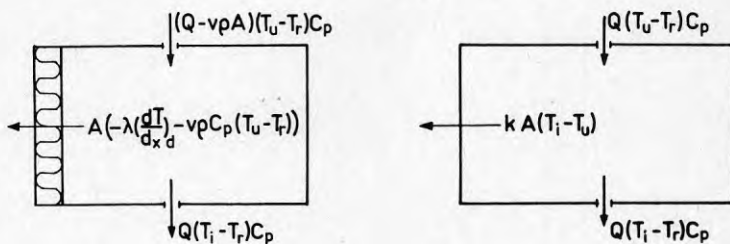


FIG.5.2 Energiflöden i de två byggnaderna i FIG.5.1.

Energitransporten genom den dynamiska isoleringen erhålles ur ekv.(2.3). Den är konstant i alla snitt. I FIG.5.2 har värdena för randen $x=d$ satts in, eftersom en del termer då genast tar ut varandra.

Uppvärmningsbehovet för byggnaderna blir lika stort om

$$k(T_i - T_u) = \lambda \cdot \left(\frac{dT}{dx}\right)_d \quad (5.1)$$

Efter derivering av ekv.(4.1) erhålles

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_d = (T_i - T_u) \frac{-\frac{a_1}{d} e^{-a_1}}{1 - e^{-a_1} + \frac{a_1}{b_1 - a_1}}$$

vilket efter insättning i (5.1) ger

$$k = \frac{\lambda}{d} \frac{a_1 \cdot e^{-a_1}}{1 - e^{-a_1} + \frac{a_1}{b_1 - a_1}} \quad (5.2)$$

Den dynamiska isoleringen motsvarar således en vanlig konstruktion med k-värde enligt ekv.(5.2).

Vi kallar detta värde dynamiskt k-värde, k_{dyn} . Värmeförlusterna i en ventilerad byggnad med dynamisk isolering kan alltså beräknas som summan av ventilationsförluster, beräknade på vanligt sätt, och transmissionsförluster beräknade med hjälp av dynamiska k-värden. Med detta betraktelsesätt har den energibesparing, som erhållits genom värmeväxlingen tillgodosåknats i minskade transmissionsförluster. Alternativt kan isoleringens vanliga k-värde användas och besparingen tillskrivas en motsvarande minskad ventilationsförlust.

Ekv.(5.2) kan skrivas

$$k_{\text{dyn}} = \frac{\lambda}{d} \cdot f_3(a_1, b_1) \quad (5.3)$$

där f_3 finns tabellerad i BIL.3.

För medflödesisolering kan motsvarande härledning göras. Samma k_{dyn} erhålles för såväl mot- som medflödesisolering vid till beloppet samma luftflöde.

I FIG.5.3 visas dynamiskt k-värde som funktion av lufthastigheten för olika värden på λ/d .

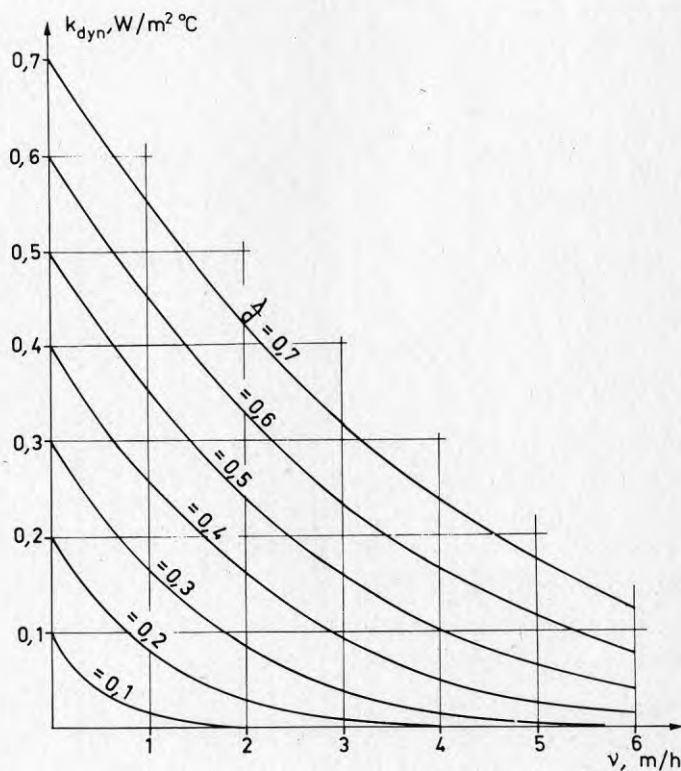


FIG.5.3 Dynamiskt k-värde som funktion av lufthastigheten då $\rho c = 1200 \text{ W s/m}^3, ^\circ\text{C}$ för olika värden på λ/d . $\alpha_i = \infty, \alpha_u = \infty$.

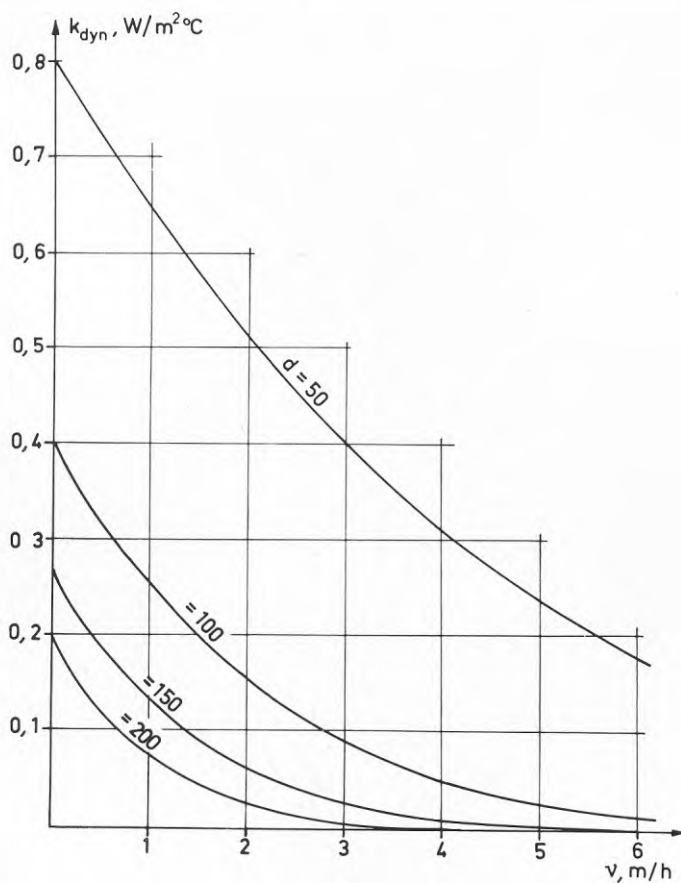


FIG.5.4 Dynamiskt k-värde som funktion av lufthastigheten då $\rho_c = 1200 \text{ Ws/m}^3, ^\circ\text{C}$. $\lambda = 0.040 \text{ W/m}, ^\circ\text{C}$. Isolertjocklekar 50, 100, 150 och 200 mm. $\alpha_i = \infty$, $\alpha_u = \infty$.

Ur FIG.5.4 framgår att man med dynamisk isolering kan uppnå mycket låga k_{dyn} -värden även med en så liten isolertjocklek som 100 mm. För lufthastigheten 2 m/h erhålles värdet 0.12 W/m²,°C, vilket motsvarar ca 300 mm vanlig isolering. Om luftflö-

det ökas till 5 m/h blir det dynamiska k-värdet $0.01 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$, vilket nästan motsvarar värmeflödesvärdet. Ökas isoleringstjockleken till 200 mm uppnås $0.01 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$ redan vid lufthastigheten 2.3 m/h. Det kan således konstateras att man även med dynamisk isolering får en avsevärd förbättring av k_{dyn} -värdet om isolertjockleken ökas. Skillnaden i k-värde ger ett mått på energibesparingen. En ökning av isolertjockleken från t ex 100 till 150 mm ger följande Δk -värden

$$\Delta k = 0.12 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C} \text{ vid } 0 \text{ m/h}$$

$$\Delta k = 0.10 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C} \text{ vid } 1 \text{ m/h}$$

$$\Delta k = 0.08 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C} \text{ vid } 2 \text{ m/h}$$

Det kan alltså, även vid dynamisk isolering, löna sig med en ökning av isolertjockleken. Vid vanliga isoleringstillämpningar är den ekonomiskt optimala isolertjockleken dock något mindre för dynamisk isolering och minskar ytterligare med ökande luftflöde.

Genom att ändra luftflödet kan man erhålla vilket k-värde som helst mellan det statiska k-värdet (flöde ≈ 0) och praktisk värmeflödesvärdet ($k_{\text{dyn}} \approx 0$). Möjligheten att variera värmeflödet kan ha praktisk betydelse vid industriella tillämpningar där också andra medier än luft t ex högisolerande gaser kan komma till användning.

I dynamiska konstruktioner, där ytsiktens värmemotstånd ej är försumbara beräknas det dynamiska k-värdet ur

$$k_{\text{dyn}} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\frac{b_u}{b_u - a_1} \cdot a_1 \cdot e^{-a_1}}{1 - e^{-a_1} + \frac{a_1(b_u + b_i)}{b_i(b_u - a_1)}} \quad (5.4)$$

där samma förutsättningar och beteckningar använts som i ekv. (4.7), se avsnitt 4.

Det är intressant att närmare studera vilken inverkan värmemot-

ståndet hos ytskikten (inklusive värmeövergångsmotstånden) har. Genom att invertera k_{dyn} erhålls det totala dynamiska värmemotståndet. Skillnaden i dynamiskt värmemotstånd för ett system med och utan ytskikt blir efter förenkling

$$\Delta M_{\text{dyn}} = m_u + e^{a_1} \cdot m_i \quad (5.5)$$

där m_i resp m_u är summan av de statiska värmemotstånden inklusive övergångsmotstånd på resp sida av den dynamiska isoleringen.

Ur ekv.(5.5) framgår att värmemotståndet hos ytskiktet på den sida där luften lämnar den dynamiska isoleringen kan ge ett avsevärt bidrag till den totala isolerförmågan. I avsnitt 9 jämförs teoretiskt beräknade k -värden enligt ekv.(5.4) med uppmätta värden, varvid god överensstämmelse erhållits.

6 YTTEMPERATUR

Vid vissa tillämpningar av dynamisk isolering utgör isoleringsmaterialet även det inre ytskiktet, exempelvis kan motflödestak utföras så. I sådana fall är yttemperaturen av betydelse för komforten, därför att yttemperaturen påverkar den riktade operativa temperaturen i lokalen. Luftflödets storlek och riktning har avgörande betydelse för yttemperaturen. Vid medflödesisolering ligger yttemperaturen på varma sidan alltid över värdet för vanlig isolering. Vid motflödesisolering gäller det omvända, varvid yttemperaturen beräknas ur ekv.(4.1) med $x=0$, dvs

$$T_o = T_u + (T_i - T_u) \frac{1 - e^{-a_1}}{1 - e^{-a_1} + \frac{a_1}{b_1 - a_1}}$$

vilket kan omformas till dimensionslös form till

$$\frac{T_i - T_o}{T_i - T_u} = \frac{a_1}{b_1 - e^{-a_1} (b_1 - a_1)} \quad (6.1)$$

Om hastigheten v uttryckes i m/h och ρc_p sätts till $1200 \text{ W/m}^3, ^\circ\text{C}$ kan (6.1) skrivas

$$\frac{T_i - T_o}{T_i - T_u} = \frac{v}{3\alpha_i - e^{-\frac{vd}{3\lambda}} (3\alpha_i - v)} \quad (6.2)$$

Vid stora luftflöden, se avsnitt 3.1, sätts $\alpha_i = \alpha_s + v\rho c_p$, varvid (6.2) övergår till

$$\frac{T_i - T_o}{T_i - T_u} = \frac{v}{3\alpha_s (1 - e^{-\frac{vd}{3\lambda}}) + v} \approx \frac{v}{3\alpha_s + v} \quad (6.3)$$

Denna dimensionslösa temperaturskillnad visas i FIG.6.1. För stora luftflöden kan som synes yttemperaturen endast höjas o-betydligt genom att öka isolertjockleken, se även ekv.(6.3).

I FIG.6.2 visas yttemperaturen i en motflödesisolering med olika tjocklekar och för utetemperaturen -20°C och innetemperaturen $+20^{\circ}\text{C}$. Stora luftflöden bör undvikas i byggnader där kraven på riktad operativ temperatur är stora. Vid 1.5 - 2 m/h är yttemperaturen acceptabel i de flesta typer av byggnader. Vid bedömning av komforten bör man dessutom beakta att man med hjälp av motflödeskonstruktioner enkelt kan undvika punktsläpp av kallluft. Den filtrerade friskluften genom motflödesisoleringen tas ju in genom en mycket stor yta, varför lufttillförseln blir jämnt fördelad över lokalen, och bl a drag undviks.

Mätningarna, som redovisats i avsnitt 3.1, tyder på att man åtminstone för mindre luftflöden än $4 \text{ kg/m}^2\text{h}$ borde kunna räkna med ett α_1 -värde på $10 \text{ W/m}^2,^{\circ}\text{C}$. I FIG.6.3 anges de yttemperaturer man i så fall erhåller.

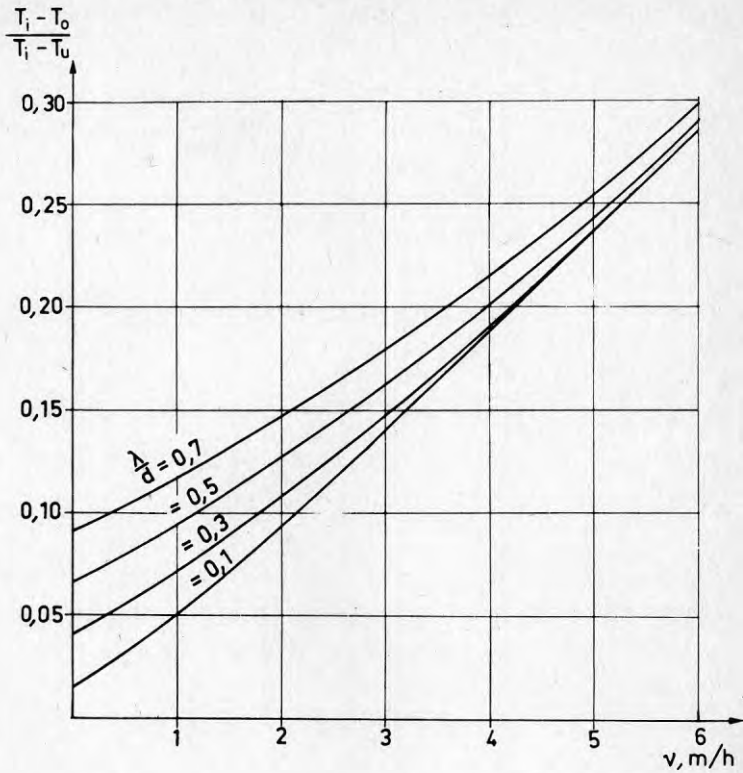


FIG. 6.1 Dimensionslös temperaturskillnad mellan luft och yta på den sida där luften lämnar isoleringen som funktion av lufthastigheten vid olika värden på λ/d .
 $\rho_c = 1200 \text{ W/m}^3, ^\circ\text{C}$. $\alpha_i = 7 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$. $\alpha_u = \infty$.

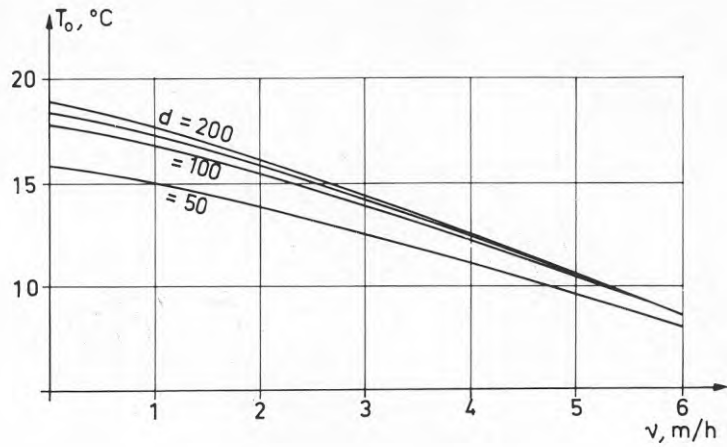


FIG.6.2 Yttertemperatur när $T_i = 20^{\circ}\text{C}$ och $T_u = -20^{\circ}\text{C}$ för isolertjocklekarna 50, 100, 150 och 200 mm.

$$\lambda = 0.040 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} \quad \alpha_i = 7 \text{ W/m}^2,^{\circ}\text{C}$$

$$\rho c = 1200 \text{ W/m}^3,^{\circ}\text{C} \quad \alpha_u = \infty$$

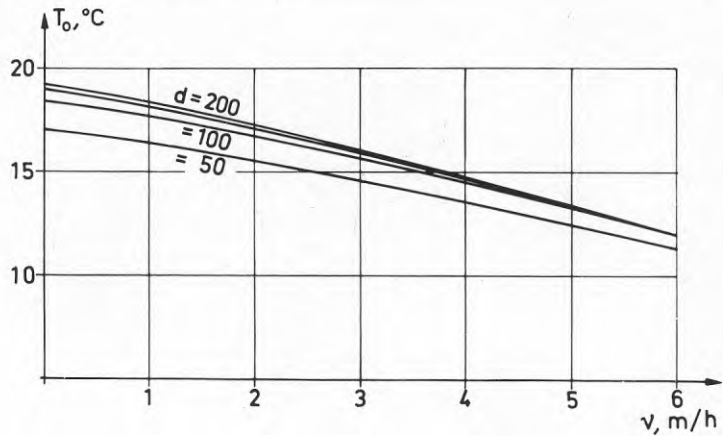


FIG.6.3 Yttertemperatur när $T_i = 20^{\circ}\text{C}$ och $T_u = -20^{\circ}\text{C}$ för isolertjocklekarna 50, 100, 150 och 200 mm.

$$\lambda = 0.040 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} \quad \alpha_i = 10 \text{ W/m}^2,^{\circ}\text{C}$$

$$\rho c = 1200 \text{ W/m}^3,^{\circ}\text{C} \quad \alpha_u = \infty$$

7 KONDENSATION I ISOLERINGSMATERIALET

7.1 Motflödesisolering

Uttrycket för ånghalten, se ekv.(4.2), är härlett under förutsättning att kondensation ej sker i isoleringsmaterialet. Kondensation kan ske om ånghalten överstiger mätnadsånghalten någonstans i isoleringsmaterialet. Ett krav för att kondensation ej skall inträffa är

$$c(x) < c_m(x) \quad \text{för alla } x \quad (7.1)$$

där

$$c_m = \text{mätnadsånghalten, g/m}^3$$

Mätnadsånghalten är en funktion av temperaturen. I avsnitt 11 ges exempel på hur kondensrisken kan beräknas med hjälp av tabellerna i BIL.1-5 och en beräkningsmall. Temperaturer, mätnadsånghalter och ånghalter enligt ekv.(4.4) beräknas i var tiondel av isoleringens tjocklek. Därvid kan man direkt konstatera om det sker kondensation eller ej. Beräkningen sker i följande steg:

1. Ingångsvärdena väljs ($d, \rho c_p, v, \lambda, \alpha_i, T_i, T_u, \delta, \beta_i, c_i$ och c_u).
2. De dimensionslösa parametrarna a_1, b_1, a_2, b_2 beräknas liksom ΔT och Δc . Funktionsvärdena $f_2(a_1, b_1)$ och $f_2(a_2, b_2)$ avläses från BIL.2.
3. Med hjälp av BIL.1 bestäms $f_1(\frac{x}{d}, a_1)$ och $f_1(\frac{x}{d}, a_2)$, varefter beräkning av temperatur- och ånghaltsfördelning kan ske.
4. Mätnadsånghalten i de olika snitten bestäms. Denna finns tabellerad i BIL.5. Därefter beräknas relativa fuktigheten c/c_m . Om denna är högre än 1 sker kondensation, annars inte.

Sedan beräkningen genomförts kan man enkelt bestämma den relativa fuktighet inomhus, vid vilken kondens nätt och jämt inträffar. Man behöver således ej göra om hela beräkningen för att få denna intressanta upplysning. Nedan härleds hur kritisk relativ fuktighet kan erhållas.

Vi söker den ånghalt c_{ik} som medför att kondens just inträffar i isoleringsmaterialet.

Varken temperatur- eller mätnadsånghaltsfördelningen ändras med c_i . Vi kan hitta maximalt tillåten ånghalt för kondens c_{ik} genom att sätta $c=c_m$ i ett snitt. I detta snitt gäller

$$c = c_m$$

$$c = c_u + (c_{ik} - c_u) \cdot f_1 \cdot f_2 \quad (\text{se (4.4)})$$

vilket ger

$$c_{ik} = \frac{c_m - c_u}{f_1 \cdot f_2} + c_u \quad (7.2)$$

I beräkningsmallen antecknas värdet $(c_m - c_u)/f_1 \cdot f_2$ för varje snitt. Maximalt tillåten ånghalt c_{ik} fås genom att betrakta det snitt där ovanstående kvot är minst. Kondens kan då inte ske i något annat snitt, vilket lätt inses.

Ekv.(7.2) för bestämning av c_{ik} kan användas oberoende av om man råkat få kondens eller ej vid det värde på c_i man ursprungligen valt.

7.2 Medflödesisolering

Risken för kondens i medflödeskonstruktioner är uppenbar, och de måste således utformas med särskild omsorg. För normala byggnadstekniska tillämpningar får medflödesisoleringen endast

ge en del av konstruktionens totala värmemotstånd. På den kalla sidan av den dynamiska isoleringen skall ett så stort statiskt värmemotstånd finnas att inte för hög relativ fuktighet erhålles inuti konstruktionen.

I avsnitt 11 redovisas beräkningar för ett medflödesgolv över ett kryputrymme, där marken utgör ett så stort värmemotstånd att ca 15 °C kan upprätthållas i kryputrymmet. I en sådan konstruktion uppstår normalt inga fuktproblem om ej inomhusluften är extremt fuktig.

8 FUKTTRANSPORT MOT KALLA SIDAN I MOTFLÖDEISOLERING

För exempelvis motflödestak utförda enligt kap.10 är det viktigt att fukt ej vandrar från byggnaden genom isolerskiktet till yttertaket. Vid minusgrader utomhus kan kondensupplagring i isform då ske på undersidan av yttertaket. Vid väderomslag till varmare väder kan så mycket is smälta att värmeisoleringen ej kan absorbera vattnet, varvid vattnet rinner genom isoleringsskiktet och takdropp uppstår. Sådan utåtriktad fuktvandring kan förekomma trots att kondens ej sker i isoleringsmaterialet.

Enligt ekv.(2.9) är den totala fukttransporten

$$q_f = -\delta \frac{dc}{dx} - v \cdot c \quad (2.9)$$

Denna måste vara ≤ 0 . Sätts dc/dx in och c beräknas ur (4.2) erhålls efter förenklingar villkoret

$$c_i \leq c_u \cdot \frac{e^{a_2} \cdot b_2}{b_2 - a_2} \quad (8.1)$$

Det värde på c_i då ingen fukttransport sker kallas c_{if} .

$$c_{if} = c_u \cdot f_4(a_2, b_2) \quad (8.2)$$

där

$$f_4(a, b) = \frac{b \cdot e^a}{b - a} \quad (8.3)$$

f_4 finns tabellerad i BIL.4.

Det minsta av värdena c_{if} och c_{ik} bestämmer den högsta tillåtna relativa fuktigheten inomhus. Kortare perioder kan värdena överskridas, speciellt om yttertaket har stor förmåga att tillfälligt suga upp fuktighet. I avsnitt 11 ges exempel på beräkning av c_{if} och c_{ik} .

9 JÄMFÖRELSE MED MÄTNINGAR

I litteraturen finns ganska få mätningar redovisade där jämförelse gjorts med teoretiskt beräknade resultat. Speciellt gäller detta för värmeflöden, kanske beroende på de praktiska svårigheterna att utföra sådana mätningar.

Jämförelse mellan uppmätt och beräknad temperaturfördelning har dock rapporterats. Korsgaard (1976) redovisar temperaturförloppet genom ett motflödeselement i full skala vid fyra lufthastigheter mellan 0.7 och 3.4 m/s. Överensstämmelsen mellan teori och mätningar är god.

Jönsson (1978) har gjort laboratorieförsök och jämfört uppmätt och beräknad temperaturfördelning i en motflödesisolering. Mätningarna utfördes på en glasullsskiva med nominell densitet 40 kg/m^3 och tjocklek 154 mm.

Värmeledning för mineralull varierar både med densitet och temperatur. För att få en så noggrann jämförelse som möjligt bestämdes densitetsfördelning i skivans tjockleksriktning genom att i efterhand snitta upp skivan i tio lameller. Den teoretiska beräkningen gjordes sedan iterativt med en värmeledning som varierade med såväl densiteten som temperaturen.

Temperaturfördelningen uppmättes och beräknades för tryckfall mellan 1.0 och 10.3 Pa, vilket motsvarar en lufthastighet på mellan 1.1 och 11.7 m/h på varma sidan.

Resultaten framgår av FIG.9.1a-f. Som synes är överensstämmelsen mellan teori och mätning god, vilket verifierar teorins giltighet.

Vid beräkningarna användes de uppmätta lufttemperaturerna som ingångsvärden. Värmeövergångskoefficienten sattes till $10 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$ på varma sidan. Samma randvillkor har använts för alla lufthastigheterna. En bättre överensstämmelse skulle dock ha erhållits för de tre högsta hastigheterna om randvillkor enligt modell B använts, se avsnitt 3.

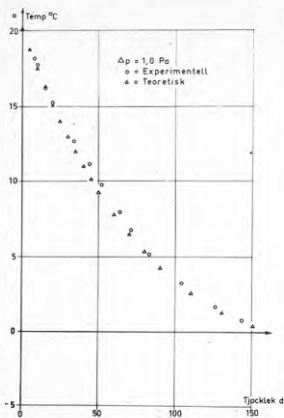
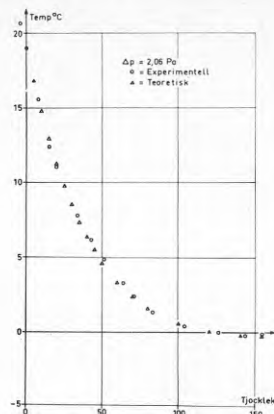
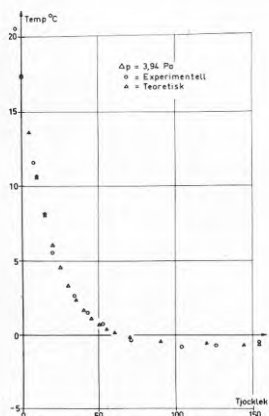
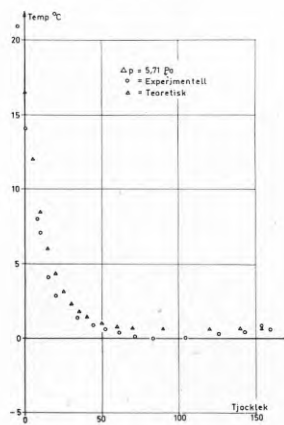
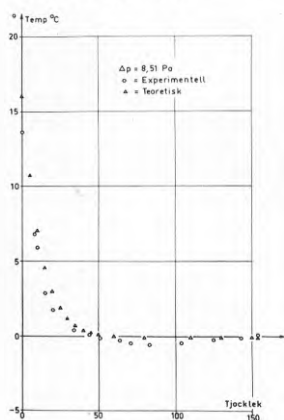
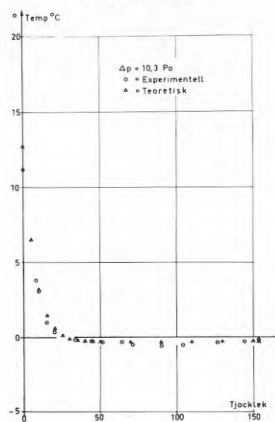
a. $v=1.1$ m/hb. $v=2.3$ m/hc. $v=4.5$ m/hd. $v=6.5$ m/he. $v=7.4$ m/hf. $v=11.7$ m/h

FIG.9.1 Uppmätt och beräknad temperaturfördelning i en motflödesisolering för olika luftflöden, enligt Jönsson (1978).

Anderlind och Larsson (1977) har redovisat temperaturfördelningen i ett motflödestak i en färdig byggnad. Mätningar och beräkningar stämmer väl överens även i detta fall.

Peterson (1978) rapporterar försök, där både värmeflöden och temperaturer har uppmätts. Försöken utfördes på ett vertikalt motflödeselement med måtten 800x1500 mm. Tvärsnittet framgår av FIG.9.2. Värmeflöden uppmättes med värmeflödesmätare av hjälpväggstyp på kalla och varma sidan.

Tjockleken och de statiska värmemotstånden för de olika skikten redovisas i TAB.9.1.

TAB.9.1 Provelementens skikt från kalla till varma sidan.
Tjocklekar och värmemotstånd.

	tjocklek m	värmemotstånd $m^2, ^\circ C/W$
övergångsmotstånd, u	-	0.19
spånskiva	0.010	0.08
luftspalt	0.020	0.17
mineralull	0.100	2.94
papper	0.0005	0.05
luftspalt	0.020	0.17
spånskiva	0.010	0.08
övergångsmotstånd, i	-	0.13

Mätvärden framgår av nedanstående TAB.9.2. I tabellen redovisas också beräknade värden enligt teorin i denna rapport, se avsnitt 4 och 5.

TAB.9.2 Temperaturer, värmeflöden och dynamiskt k-värde för olika luftflöden. Övre värde = uppmätt, undre värde = beräknat värde enligt teorin i kapitel 4 och 5 i denna rapport.



v	T_u	T_d	T_o	T_y	T_i	Q_u	Q_i	k_{dyn}
m/h	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	W/m^2	W/m^2	$W/m^2^{\circ}C$
0		$(T_i - T_u = 27.8)$				7.4	7.4	0.266
						7.3	7.3	0.262
0		$(T_i - T_u = 40.3)$				10.9	10.4	0.270
						10.6	10.6	0.262
0.5	-22.9	-19.3	11.8	15.5	17.6	7.8	14.5	0.193
		-19.3	11.8	15.8		8.2	13.5	0.203
1.0	-22.4	-19.6	11.1	15.2	17.6	5.7	16.4	0.143
		-19.7	10.6	15.5		6.1	16.3	0.152
1.5	-22.8	-20.7	9.6	14.6	17.5	4.6	19.6	0.114
		-20.8	9.1	15.0		4.5	19.5	0.111
2.0	-22.6	-21.0	8.7	14.6	18.0	3.3	23.1	0.081
		-21.2	8.2	15.0		3.2	22.8	0.079
2.5	-22.8	-21.6	7.4	14.0	17.8	3.2	26.9	0.079
		-21.8	6.6	14.4		2.2	26.0	0.055

De beräknade värdena i TAB.9.2 stämmer väl överens med de uppmätta värdena. Största skillnaden i temperatur, värmeflöden resp dynamiskt k-värde är $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1.0 W/m^2 resp $0.024\text{ W/m}^2, ^{\circ}\text{C}$. Uppmätta och beräknade värmeflöden visas även i FIG.9.3.

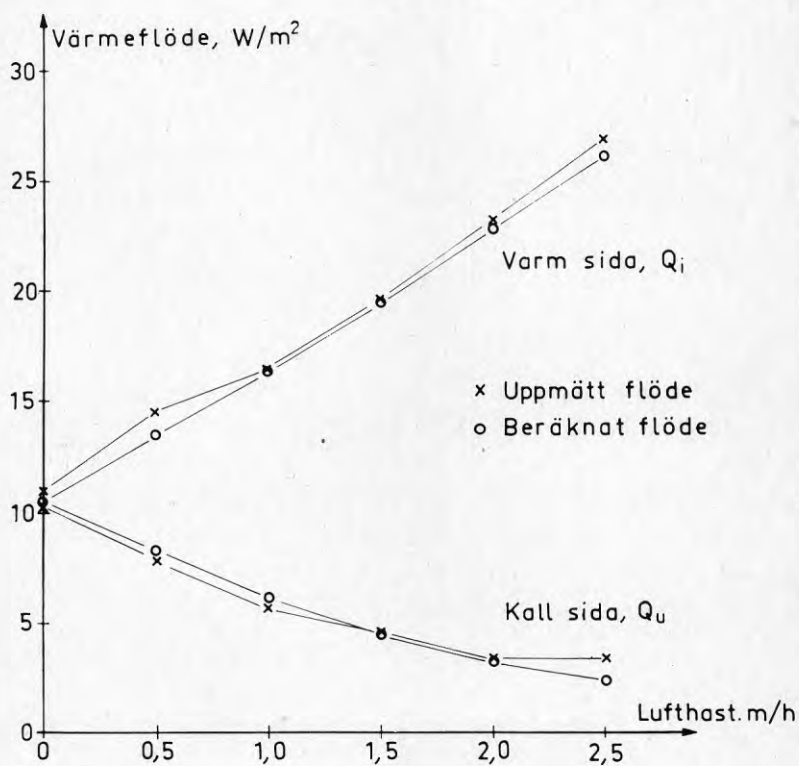


FIG.9.3 Uppmätta värmeflöden enligt Peterson (1978) och beräknade värmeflöden enligt denna rapport. Temperaturskillnad ca $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($40.0 - 40.6$).

Temperaturerna (T_d och T_o) har beräknats med hjälp av värdena i TAB.9.1, T_i , T_u samt v. Ekv.(4.7) har använts. Det dynamiska k-värdet har beräknats med ekv.(5.4). Q_u , Q_i och T_y har därefter erhållits ur

$$Q_u = k_{dyn}(T_i - T_u) \quad (\text{beräknat } k_{dyn})$$

$$Q_i = (T_i - T_o)/0.43 \quad (\text{beräknat } T_o)$$

$$T_y = T_i - (T_i - T_o) \frac{0.13}{0.43} \quad (\text{beräknat } T_o)$$

där 0.43 och 0.13 är värmemotstånd som erhållits ur TAB.9.1.

Trots den goda överensstämmelsen mellan beräkningar och mätningar bör teorin verifieras genom ytterligare försök. I de ovan relaterade försöken förekom tyvärr ett okontrollerat luftläckage (ca 13%) som gör försöksresultaten något osäkra. I beräkningarna har detta läckage antagits inträffa från den kalla sidan, dvs all utsugen luftmängd som uppmättes antas också ha passerat den dynamiska isoleringen.

Mätningar bör också göras för att verifiera ekv.(5.5), dvs att värmemotståndet hos ytskikten kan ge ett avsevärt bidrag till konstruktionens totala isolerförmåga. När detta bekräftats experimentellt har man ett bra underlag för att konstruera en optimalt effektiv konstruktion med rätt avpassning mellan dynamisk isolertjocklek och värmemotstånd hos ytskikten.

10 EXEMPEL PÅ TILLÄMPNINGAR

Nedan belyses möjligheterna att tillämpa dynamisk isolering genom två exempel på konstruktioner. Den första är motflödestak till hallbyggnader, en konstruktion som sedan flera år har använts i praktisk drift. Den andra är medflödesisolerat golv till i första hand småhus. Denna konstruktion är under utveckling och den har hittills använts endast i provhus.

10.1 Motflödestak

Motflödestaket består i sin enklaste version av ett yttre tätskikt av profilerad plåt, en luftspalt och nederst en mineralullsskiva enligt FIG.10.1, jfr Anderlind och Larsson (1977). Konstruktionen bärs av åsar, exempelvis av limträ. Eftersom åsarna är genomgående innebär de en köldbrygga som måste beaktas. Ur denna synpunkt är träåsar överlägsna stålåsar. Alternativt kan mineralullen hängas underifrån som ett undertak där skivorna bärs av T-profiler eller liknande. På taket placeras en eller flera fläktar som blåser in luft i spalten mellan plåt och mineralull. Spalten får härigenom ett mindre övertryck som pressar luften genom mineralullen.

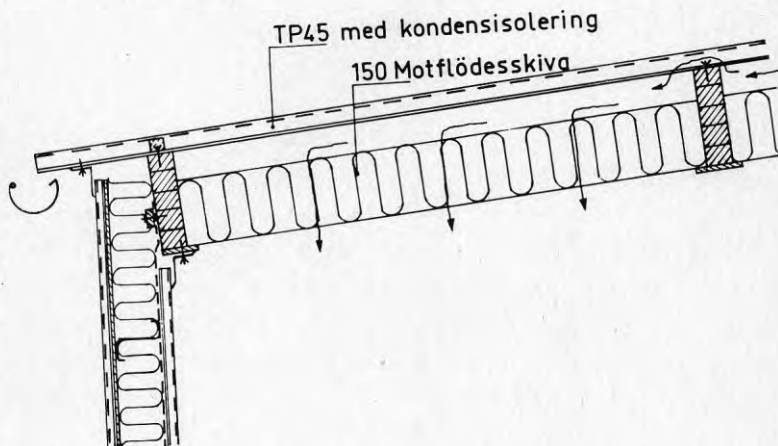


FIG.10.1 Exempel på utförande av motflödestak med träåsar, där isoleringsmaterialet är exponerat mot lokalen.

Motflödestaket ger mycket små värmeförluster vid byggnader med normalt ventilationsbehov. k-värdet enligt kap 5 blir med 150 mm mineralull normalt mindre än $0.05 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$. Vidare ger taket en utmärkt bullerabsorption eftersom hela eller större delen av takytan består av exponerad mineralull.

Tryckfallet över mineralullen är litet, varför täthetskraven på yttertaket är måttliga. Tätning utförs runt om takets kanter och i plåtarnas sidöverlapp. Man kan använda plåtbeslag och konventionella profilerade tätningsband samt för sidöverlappen tätningsfett och relativt tät nitning. Med ett normalt arbetsutförande blir taket tillräckligt tätt. Dock måste utförandet av anslutningar mot väggar mm studeras och redovisas i detalj. Läckflöde av storleksordning en tredjedel av totalflödet kan accepteras men normalt erhålls lägre läckage. Det är fråga om kallluft som läcker ut och enda förlusten är fläktarbetet som är en liten post i sammanhanget. Man kan vidare peka på en fördel med läckflödet; det motverkar vatteninträning i otätheterna.

Fläktarna kan placeras med inblåsning direkt genom takplåten eller via en fördelningskanal i nock. I detta förra fallet används ofta en fläkt per takfall medan i det senare fallet en fläkt kan räcka om kanalen ges tillräcklig area och utformas så att luftflödet fördelas jämnt. Vid dimensionering av inblåsningssystemet skall också hänsyn till skorstenseffekt tas.

Det är vidare nödvändigt att luftflödet kan fördelas längs takfallet utan större tryckfall. Med utförandet enligt FIG.10.1 måste luftströmmen passera över åsarna i takplåtens vågor. Man skall i detta fall välja en profilerad plåt som ger erforderlig area. En 20 mm hög trapetsplåt kan räcka för korta takfall (<10 m) medan en 45 mm hög profil är lämplig upp till ca 15 m långa takfall. Den erforderliga arean är här vald efter kriteriet att luftflödet genom isoleringen skall ligga inom $\pm 25\%$ av medelflödet.

Det ovan beskrivna motflödestaket har byggts i Sverige till en sammanlagd yta av ca 60 000 m² och i Finland över 500 000 m². De flesta taken har fungerat tillfredsställande, men vissa barnsjukdomar har förekommit.

Om fläktarna stannar uppkommer en termiskt betingad uppåtriktad luftström, som går upp genom isoleringen och ut genom fläktarna och eventuella otätheter. Härvid avsätts smutspartiklar på mineralullens undersida och takytan mörknar. Ett botemedel är att inte stänga av fläktarna helt utan behålla ett luftflöde så valt att den termiska luftströmmen motverkas. Detta förutsätter att fläkten är reglerbar, i steg eller steglöst.

Om belysningsarmatur placeras allt för nära taket kan värmen från armaturen orsaka en uppåtriktad luftström som tar överhand över den avsedda nedåtriktade strömmen. Detta leder till lokal nedsmutsning och minskad verkningsgrad. Samma gäller inblåsningsdon i lokaler med varmluftsuppvärmning. Inblåsningsdon bör riktas så att de inte stör luftflödet igenom taket.

Nedsmutsning kan även förekomma lokalt i taket även om fläktarna inte har stängts av under längre tid. Det är då fråga om ojämn fördelning av luftflödet och det är inte bara ett estetiskt problem utan även en funktionsstörning. Problemet undviks genom att luftflödet styrs dels så att den snabba luftströmmen vid fläkten inte direkt träffar isoleringen, dels så att luftströmmen utan större tryckfall kan nå ut över hela taket. Detta låter sig göras med enkla medel om man väl är medveten om problemet.

Om fläktarna stängs av kan ytterligare ett problem uppstå, nämligen takdropp. Fuktig luft tränger då ut och kan kondensera på takplåten om denna är tillräckligt kall. Kondensvattnet droppar sedan ned och om det pågår tillräckligt länge tränger vattnet så småningom genom mineralullen.

Kondens på yttertakplåten kan även förekomma under vissa väderbetingelser. Plåten bör därför vara försedd med kondensisole-

ring som kan magasinera fukt under sådana perioder och torka ut när förhållandena medger.

Av det ovanstående framgår att det är viktigt att fläktarna går kontinuerligt om denna typ av motflödestak skall fungera tillfredsställande. Det är att rekommendera att anläggningen förses med en fläktvakt som signalerar när trycket faller.

Det kan vara dålig ekonomi att ha fläktarna igång kontinuerligt även när ventilationsbehovet är ringa eller obefintligt. Ett vanligt driftfall är att man önskar stoppa fläktarna nattetid. Man bör då välja en annan utformning av motflödestaket, exempelvis enligt FIG.10.2.

Konstruktionen består i detta fall av en perforerad trapetsprofilerad plåt, mineralull och en ytterplåt monterad på distansreglar. Distansreglarna bör vara av öppen typ stegregel, varigenom man vinner en stor area för lufttransport. Man kan då välja en billig ytterplåt, exempelvis en 20 mm hög profil och avstånd mellan distansreglarna ca 2 m.

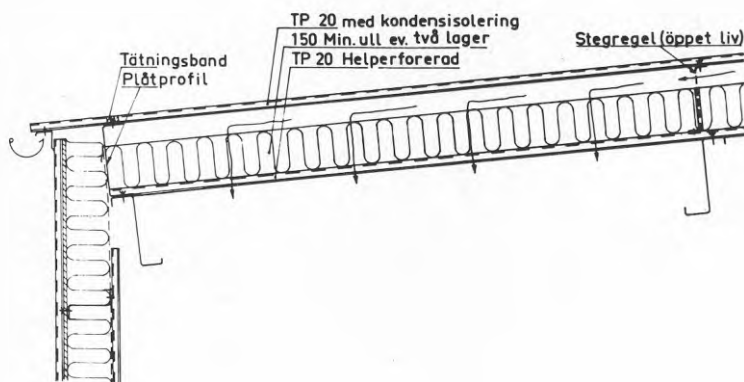


FIG.10.2 Exempel på utförande av motflödestak med stålåsar och perforerad innerplåt.

Fördelarna med denna lösning är dels ett enkelt montage, dels att eventuell nedsmutsning av ullen inte besväras. Vill man stänga av fläktarna nattetid så går detta bra. Man bör även för denna takutformning använda en yttertakplåt med kondensisolering. Nackdelar jämfört med den först beskrivna konstruktionen i FIG.10.1 är ett något högre pris och en försämrad bullerabsorption.

10.2 Medflödesgolv

Medflödesisolering av golv har byggts i provhus. Konstruktionen i ett av provhusen framgår av FIG.10.3. Husets väggar har motflödesisolering. Det innebär att ventilationsluften tas in genom väggisoleringen och släpps ut genom golvisoleringen. I provhuset mäts bl a effektbehov. Mätningarna är inte slutgiltigt bearbetade men av en preliminär redovisning framgår att uppmätt och beräknad effekt överensstämmer bra. Effektförbrukningen har beroende på utetemperatur legat i intervallet 2.5-5 kW och avvikelser från beräknad effekt har varit i medeltal 0.16 kW.

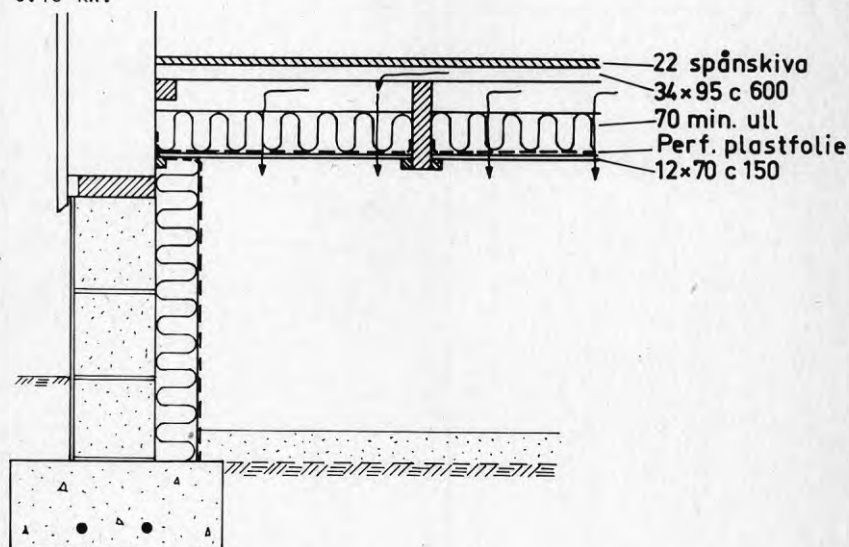


FIG.10.3 Exempel på medflödesgolv med värmeisolering i golvbjälklag.

Konstruktionen av medflödesisolerat golv kan varieras på många sätt och även kombineras med andra energibesparingsåtgärder. Ett alternativ framgår av FIG.10.4.

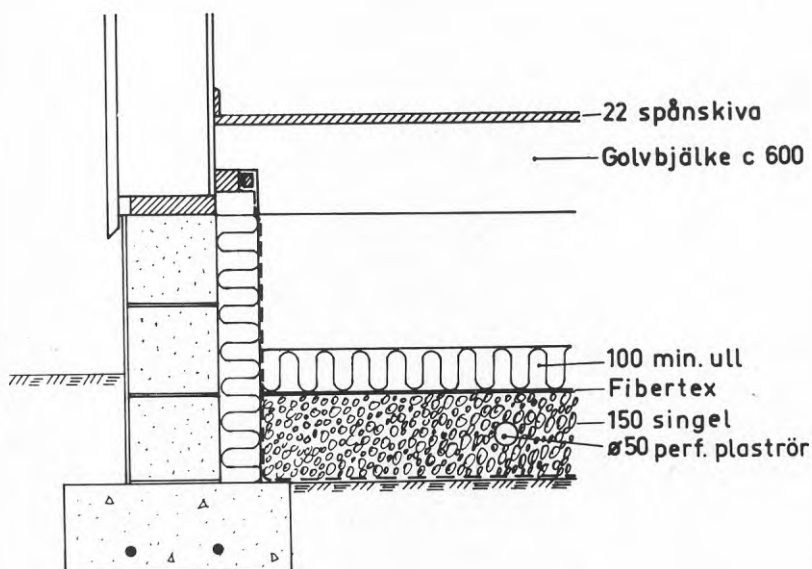


FIG.10.4 Medflödesgolv med oisolerat bjälklag och värmeisolerings direkt på marken.

I detta fall har isoleringen lagts på marken och luften sugts ut via en perforerad plastslang. Luften är då tillgänglig för vidare åtgärder för energibesparing. I detta fall fordras ett tryckutjämnande skikt för att luftflödet skall fördelas jämnt över isoleringen.

Tekniken förefaller lovande såtillvida att effekten i form av energibesparing är klar och kostnaden för åtgärderna måttlig eller rent av lägre än för en konventionell konstruktion. Här kan även noteras att det finns en besparingsmöjlighet i de fall då grunden är tjälfarlig. Man kan lätt åstadkomma en säker uppvärmning av marken som hindrar tjälnedträngning. Här-

igenom minskas erforderligt grundläggningsdjup.

Ytterligare studier av tekniken pågår bl a med avseende på fuktproblem. I och med att varm frånluft förs ned i kryputrymmen och kyls föreligger risk för kondensutfällning. Dessa problem studeras för närvarande. Resultaten hittills visar att problemen kan bemästras med enkla tekniska lösningar.

11 BERÄKNINGSEXEMPEL

I detta avsnitt ges exempel på hur de tidigare härledda ekvationerna kan tillämpas. Två olika konstruktioner behandlas, nämligen ett motflödestak och ett medflödesgolv. Varianter av båda typerna är provade i praktiken med gott resultat, se avsnitt 10.

11.1 Motflödestak

I ett motflödestak utformat utan ytskikt på varma sidan bör alltid risken för fukttransport mot kalla sidan samt kondensrisken undersökas, se avsnitt 7 och 8. Beräkningarna är tämligen arbetskrävande, men underlättas genom att använda de tabeller som finns i BIL.1-5. Beräkningsgången har beskrivits i avsnitt 7. För det standardutförande av motflödestak som hittills använts kan också FIG.11.1 användas direkt.

Teoretiskt finns risk för kondensation inne i en motflödesskiva vid mycket ogynnsamma förhållanden. I praktiken har detta aldrig observerats annat än när fläktarna stått stilla. Tillfälligt kondensvatten torkar dessutom ut mycket snabbt. Följande kondensberäkning är gjord med ogynnsamma antaganden angående randvillkoren, se avsnitt 3.

Beräkningen i TAB.11.1 avser ett tak bestående av plåt och 150 mm mineralull. Lufthastigheten genom skivan är 2 m/h, vilket motsvarar 0.4 luftomsättningar i timmen om takhöjden är 5 m. Övergångstalen för värme och fukt, α_i resp β_i , har diskuterats i avsnitt 3. Värme- och fuktkonduktiviteten, λ resp δ , är normala för denna typ av mineralull, se TAB.11.1.

TAB.11.1 Beräkningsexempel motflödestak

$d=0.150 \text{ m}$	$\lambda=0.04 \text{ W/m, } ^\circ\text{C}$	$\delta=0.00002 \text{ m}^2/\text{s}$					
$\rho \cdot c_p=1200 \text{ Ws/m}^3, ^\circ\text{C}$	$\alpha_i=7 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$	$\beta_i=0.004 \text{ m/s}$					
$v=2 \text{ m/h} = 0.00055 \text{ m/s}$	$T_i=+20 \text{ } ^\circ\text{C}$	$c_i=12.10 \text{ g/m}^3, \text{RF}=70\%$					
	$T_u=-10 \text{ } ^\circ\text{C}$	$c_u=1.90 \text{ g/m}^3, \text{RF}=88\%$					
$a_1=d \cdot v \cdot \rho \cdot c_p / \lambda = 2.5$	$a_2=d \cdot v / \delta = 4.2$						
$b_1=d \cdot \alpha_i / \lambda = 26.3$	$b_2=d \cdot \beta_i / \delta = 30$						
$K = f_2(a_1, b_1) = 0.9767$	$L = f_2(a_2, b_2) = 0.8712$						
$\Delta T = T_i - T_u = 30$	$\Delta c = c_i - c_u = 10.20$						
A	B	C	D	E	F	G	H
x/d	$f_1(\frac{x}{d}, a_1)$	$T=T_u + B \cdot K \cdot \Delta T$	c_m	$f_1(\frac{x}{d}, a_2)$	$c=c_u + E \cdot L \cdot \Delta c$	$\text{RF} = c/c_m$	$\frac{c_m - c_u}{E \cdot L}$
0.0	.9179	16.9	14.39	.9850	10.65	0.74	14.55
0.1	.6967	10.4	9.64	.6429	7.61	79	13.82
0.2	.5244	5.4	6.98	.4167	5.60	80	13.99
0.3	.3903	1.4	5.34	.2687	4.29	80	14.70
0.4	.2858	-1.6	4.27	.1714	3.42	80	15.87
0.5	.2044	-4.0	3.53	.1075	2.86	81	17.40
0.6	.1410	-5.9	3.02	.0655	2.48	82	19.78
0.7	.0917	-7.3	2.70	.0379	2.24	83	24.23
0.8	.0533	-8.4	2.46	.0197	2.08	84	32.63
0.9	.0233	-9.3	2.28	.0078	1.97	86	55.92
1.0	.0000	-10.0	2.15	.0000	1.90	88	-
	k_{dyn}		$\text{MAX } c_i \text{ (KONDENS)}$		$\text{MAX } c_i \text{ (FUKT UTAT)}$		
	$k_{\text{DYN}} = \frac{\lambda}{d} \cdot f_3(a_1, b_1) =$		$c_{ik} = c_u + H_{\text{MIN}} =$		$c_{if} = c_u \cdot f_4(a_2, b_2) =$		
	$= 0.05 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$		$= 15.7 \text{ g/m}^3$		$= 147.3 \text{ g/m}^3$		
TILLÅTEN RF INNE = 91%							

Den relativa fuktigheten i lokalen är 70% vid utetemperaturen $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, vilket ger ånghalten $c_i = 0.70 \cdot c_m$. Mättnadsånghalten c_m är vid $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 17.29 g/m^3 , se BIL.5.

Beräkningarna visar temperaturfördelningen (kolumn C), ånghaltfördelningen (F) och relativa fuktigheten (G), som alltid är mindre än 1, dvs ingen kondens sker. Genom att söka det minsta värdet i kolumn H (13.82) kan man lätt beräkna maximal ånghalt inne när kondens just sker. Detta blir $c_{ik} = 15.7$, vilket svarar mot relativa fuktigheten 90%. Det finns ingen risk för fukttransport utåt. (Det kritiska värdet c_{if} ligger långt över mättnadsvärdet 17.29).

För låga lufthastigheter är c_{if} mindre än c_{ik} , vilket innebär att risken för fukttransport utåt är avgörande för vilken inomhusfuktighet taket kan tåla. FIG.11.1 visar vilket fukttillskott (skillnad i ånghalt mellan inomhusluft och utomhusluft) som kan tillåtas för ett motflödestak av vanlig typ. Vanligen används lufthastigheten 2 m/h, vilket medför att luftfuktigheten inne kan få uppgå till värden enligt TAB.11.2.

TAB.11.2 Tillåtet fukttillskott resp relativ fuktighet i lokal med motflödestak av standardutförande, lufthastighet = 2 m/h.

T_u $^{\circ}\text{C}$	c_u g/m^3	$c_i - c_u$ g/m^3	c_i g/m^3	RF %
-10	1.94	13.7	15.6	90
-20	0.80	10.5	11.3	65
-30	0.32	6.0	6.3	35

Som synes kan risk för kondens bara föreligga vid mycket låga temperaturer. Vid $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ kan ett fukttillskott på 6 g/m^3 tillåtas i det valda exemplet. Detta motsvarar en relativt fuktig verksamhet.

Kondensmängden kan bestämmas genom passningsräkning som dock är mycket arbetskrävande. En sådan beräkning för taket i ovanstående exempel har utförts för utetemperatur -30°C och fuktillskottet 10.5 g/m^3 . Under 10 dagar blir kondensmängden mindre än 0.6 kg/m^2 . Denna mängd motsvarar 0.4 volymsprocent vatten i mineralullen och kan utan problem tillfälligt lagras i isolerskivor av mineralull.

Motflödestaket måste därför betecknas som en mycket säker konstruktion ur fuktsynpunkt, väl lämpad för användning i mycket fuktiga lokaler. Lufthastigheten bör dock väljas så att säkerhet erhålles mot fukttransport utåt. Med 2 m/h för en 150 mm motflödesskiva är denna säkerhet tillfredsställande vid närapå alla klimatförhållanden, se FIG.11.1.

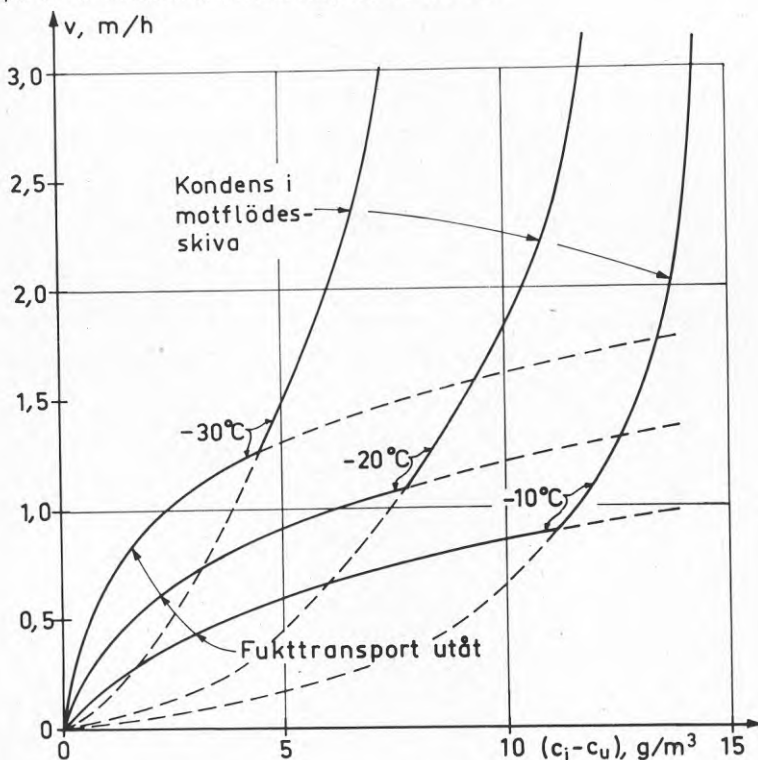


FIG.11.1 Fuktdimensionering av motflödestak. Förutsättningar: $d=0.15\text{ m}$, $\lambda=0.04\text{ W/m,}^{\circ}\text{C}$, $\alpha_i=7\text{ m}^2,^{\circ}\text{C/W}$, $T_i=20^{\circ}\text{C}$, $\delta=0.00002\text{ m}^2/\text{s}$, $\beta_i=0.004\text{ m/s}$, relativ fuktighet ute = 90%.

11.2 Medflödesgolv

En enfamiljsvilla med medflödesgolv har byggnadsytan 8×14 m. Golvet är utfört med 150 mm mineralull med λ -värde $0.04 \text{ W/m, } ^\circ\text{C}$. Värmemotståndet för golvläggning är $0.35 \text{ m}^2, ^\circ\text{C/W}$ inklusive värmeövergångsmotstånd. Luften fördelas jämnt över isoleringen och förs ned till kryppgrunden vars väggar är 1 m höga och har värmemotståndet $3 \text{ m}^2, ^\circ\text{C/W}$. Den horisontella markytan har ett genomsnittligt värmemotstånd på $4 \text{ m}^2, ^\circ\text{C/W}$. Innetemperaturen i huset är $21 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Det man i första hand är intresserad av är det dynamiska k-värdet samt temperaturen i krypprummet. För att beräkna detta måste man först bestämma värmemotståndet för "ytskiktet" på kalla sidan. Detta består dels av marken, dels av sidoväggarna i krypputrymmet.

Värmeförlusterna från krypputrymmet blir

$$\frac{8 \cdot 14}{4} + \frac{2(8+14) \cdot 1}{3} = 42.7 \text{ W/} ^\circ\text{C}$$

Värmemotståndet m_i för ett fiktivt ytskikt med ytan 8×14 m bestäms så att värmeförlusten blir lika stor som från kryppgrunden

$$\frac{8 \cdot 14}{m_i} = 42.7$$

vilket ger

$$m_i = 2.63 \text{ m}^2, ^\circ\text{C/W}$$

Observera att för medflödesisoleringar blir "sida i" den kalla sidan.

Därmed har kryppgrunden ersatts av ett ytskikt med värmemotstånd

det $m_i = 2.63 \text{ m}^2, ^\circ\text{C/W}$. Det dynamiska k-värdet kan beräknas ur ekv.(5.4) med följande ingångsvärden

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{0.04}{0.15} = 0.267$$

$$b_u = \frac{d}{\lambda \cdot m_u} = \frac{0.15}{0.04 \cdot 0.35} = 10.71$$

$$b_i = \frac{d}{\lambda \cdot m_i} = \frac{0.15}{0.04 \cdot 2.63} = 1.43$$

$$a_i = \frac{d \cdot v \cdot \rho C}{\lambda} = 1.25 \cdot v \quad (v \text{ i m/h})$$

Aktuella lufthastigheter för en villa är 1-2.5 m/h, vilket motsvarar $n=0.4-1$ omsättning per timme. Vi får följande värden för det dynamiska k-värdet, se TAB.11.3.

TAB.11.3 Dynamiskt k-värde för medflödesgolv

v m/h	k_{dyn} W/m ² , °C
1.0	0.06
1.5	0.04
2.0	0.02
2.5	0.01

Temperaturen i kryprummet kommer att bli nära konstant under hela året på grund av markens stora värmekapacitet. Som utetemperatur kan ortens medeltemperatur under året användas, eller i snörrika trakter en något högre temperatur.

Kryprummets temperatur kan beräknas ur ekv.(4.7) med $x=0$, se TAB.11.4.

TAB.11.4 Kryprumstemperatur som funktion av lufthastighet och ortens medeltemperatur.

v m/h	ortens medeltemperatur, °C				
	0	2	4	6	8
1.0	11.3	12.3	13.2	14.1	15.0
1.5	12.6	13.4	14.2	15.0	15.8
2.0	13.7	14.4	15.1	15.8	16.5
2.5	14.6	15.2	15.8	16.4	17.0

För orter som Stockholm (medeltemperatur 6.6 °C) och Örebro (medeltemperatur 5.9 °C) kommer således kryprumstemperaturen att bli ca 15 °C året runt. Värmeförlusterna genom golvet blir mycket små, se TAB.11.3.

Vid t ex lufthastigheten 2.0 m/h blir $k_{\text{dyn}} = 0.02 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$ och värmeförlusten genom golvet (årsmedeltemperatur 6 °C) blir

$$0.02(21-6) = 0.3 \text{ W/m}^2$$

Detta gäller även för låga utetemperaturer, t ex -20 °C, då ett normalt golv med $k=0.30 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$ släpper igenom

$$0.30(21+20) = 12.3 \text{ W/m}^2$$

Om man så önskar kan den 15-gradiga kryprumsluften användas, t ex som värmekälla till en värmepump för varmvatten. Tack vare kryprummets höga temperatur kan heller inga fuktproblem förutses. Golvtemperaturen blir mycket nära lufttemperaturen över hela golvytan. Medflödesgolv har således många fördelar och får därför anses som en mycket lovande konstruktion, som borde kunna finna en utbredd användning. Konstruktionen kan dessutom utföras på ett enkelt sätt och bör bli ekonomiskt mycket konkurrenskraftig.

12 LITTERATUR

- Anderlind, G, Larsson, B, 1977, Motflödestak - en ny konstruktionsprincip. Väg- och Vattenbyggaren, nr 11/77.
- Arponen, M, 1973, Raittiin ilman sisäänotto huokoisen kattorakenteen kautta (Intagning av frisk luft genom en porös takkonstruktion). Diplomarbete 1973. Otnäs.
- Graee, T, 1974, Breathing building constructions. (1974 Annual Meeting American Society of Agricultural Engineers). Paper No.74-4057.
- Jönsson, S, 1978, Temperaturfördelning i motflödeskonstruktion. (Gullfiber AB). Laboratorierapport 11/78.
- Korsgaard, V, 1976, Lav-energihus med modströmsvägge. Varme 1976 februari.
- Pattie, D.R., 1966, Heat transmission of Porous Materials in Ventilation. (ASHRAE Transactions). vol.9, No.3, 1966.
- Peterson, F, 1978, Investigation of the air-forced insulation method. (Institutionen för uppvärmnings- och ventilations-teknik, KTH).
- Thorén, T, 1977, Ny isoleringsmetod. Husbyggaren, nr 3/77.
- Thorén, T, 1978a, Dynamisk isolering. (Styrelsen för teknisk utveckling). STU-information nr 76-1978. Stockholm.
- Thorén, T, 1978b, A unique Swedish system for energy efficient housing. (Forest Products Research Society). Konferensrapport. Chicago.

13 BILAGOR

Följande bilagor redovisas

BILAGA 1 Tabell över funktionen

$$f_1\left(\frac{x}{d}, a\right) = e^{-\frac{x}{d} \cdot a} - e^{-a}$$

Se ekv.(4.3) och (4.4).

BILAGA 2 Tabell över funktionen

$$f_2(a, b) = \frac{1}{1 - e^{-a} + \frac{a}{b-a}}$$

Se ekv.(4.3) och (4.4).

BILAGA 3 Tabell över funktionen

$$f_3(a, b) = \frac{a \cdot e^{-a}}{1 - e^{-a} + \frac{a}{b-a}}$$

Se ekv.(5.3).

BILAGA 4 Tabell över funktionen

$$f_4(a, b) = \frac{b \cdot e^a}{b-a}$$

Se ekv.(8.2).

BILAGA 5 Mättnadsånghalten c_m som funktion av temperaturen T.

Bilaga 6 Beräkningsmall för motflödesisolering.

Tabell över $f_2(a, b) = \frac{1}{1 - e^{-a} + \frac{1}{b - a}}$

a =	b =	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	∞
0.3	3.577	3.644	3.686	3.714	3.734	3.749	3.770	3.785	3.795	3.803	3.858	3.4
0.4	2.801	2.856	2.891	2.914	2.930	2.943	2.961	2.973	2.981	2.988	3.033	3.5
0.5	2.337	2.386	2.416	2.437	2.451	2.462	2.478	2.488	2.496	2.502	2.541	3.6
0.6	2.029	2.074	2.102	2.120	2.134	2.144	2.158	2.168	2.175	2.180	2.216	3.7
0.7	1.810	1.853	1.879	1.896	1.909	1.919	1.932	1.941	1.947	1.952	1.986	3.8
0.8	1.641	1.688	1.713	1.730	1.742	1.751	1.764	1.772	1.779	1.783	1.816	3.9
0.9	1.521	1.561	1.585	1.602	1.613	1.622	1.635	1.643	1.649	1.653	1.685	4.0
1.0	1.421	1.460	1.484	1.500	1.512	1.520	1.532	1.541	1.547	1.551	1.582	4.2
1.1	1.340	1.379	1.402	1.418	1.429	1.438	1.450	1.458	1.464	1.468	1.499	4.4
1.2	1.273	1.311	1.335	1.350	1.362	1.370	1.382	1.390	1.396	1.400	1.431	4.6
1.3	1.216	1.255	1.278	1.294	1.305	1.314	1.326	1.334	1.340	1.344	1.375	4.8
1.4	1.168	1.207	1.230	1.246	1.258	1.266	1.278	1.287	1.292	1.297	1.327	5.0
1.5	1.126	1.166	1.189	1.206	1.217	1.226	1.238	1.246	1.252	1.256	1.287	5.2
1.6	1.090	1.130	1.154	1.170	1.182	1.191	1.203	1.211	1.217	1.222	1.253	5.4
1.7	1.058	1.099	1.123	1.140	1.152	1.160	1.173	1.181	1.187	1.192	1.224	5.6
1.8	1.030	1.071	1.096	1.113	1.125	1.134	1.147	1.155	1.161	1.166	1.198	5.8
1.9	1.005	1.047	1.072	1.089	1.102	1.111	1.124	1.132	1.139	1.143	1.176	6.0
2.0	9818	1.025	1.051	1.068	1.081	1.090	1.103	1.112	1.118	1.123	1.157	6.5
2.1	9612	1.005	1.032	1.050	1.062	1.072	1.085	1.094	1.101	1.106	1.140	7.0
2.2	9424	9874	1.015	1.033	1.046	1.056	1.069	1.078	1.085	1.090	1.125	7.5
2.3	9252	9712	9989	1.018	1.031	1.041	1.055	1.064	1.071	1.076	1.110	8.0
2.4	9093	9563	9848	1.004	1.017	1.028	1.042	1.052	1.058	1.064	1.100	8.5
2.5	8945	9427	9718	9913	1.005	1.016	1.030	1.040	1.047	1.052	1.089	9.0
2.6	8807	9301	9599	9798	9941	1.005	1.020	1.030	1.037	1.042	1.080	9.5
2.7	8678	9184	9489	9693	9839	9948	1.010	1.020	1.028	1.033	1.072	1.010
2.8	8557	9075	9387	9596	9745	9857	1.001	1.012	1.020	1.025	1.065	1.10
2.9	8441	8972	9292	9506	9659	9774	9935	1.004	1.012	1.018	1.058	1.20
3.0	8332	8876	9203	9422	9579	9697	9862	9972	1.005	1.011	1.052	1.30
3.1	8227	8784	9120	9344	9505	9625	9794	9927	9988	1.005	1.047	1.40
3.2	8127	8698	9041	9271	9435	9558	9731	9847	9929	9991	1.042	1.50
3.3	8031	8615	8967	9202	9370	9496	9673	9791	9876	9939	1.038	1.60

Tabell över $f_4(a, b) = \frac{b \cdot e^a}{(b - a)}$

b =	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	∞	
a =	0.3	1.38	1.37	1.37	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.35	1.35
	0.4	1.53	1.52	1.51	1.51	1.51	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.49
	0.5	1.71	1.69	1.68	1.68	1.67	1.67	1.66	1.66	1.66	1.66	1.65
	0.6	1.90	1.88	1.87	1.86	1.85	1.85	1.84	1.84	1.84	1.84	1.82
	0.7	2.10	2.09	2.07	2.06	2.05	2.05	2.04	2.04	2.03	2.03	2.01
	0.8	2.35	2.32	2.30	2.29	2.28	2.27	2.26	2.26	2.25	2.25	2.23
	0.9	2.62	2.58	2.55	2.54	2.52	2.52	2.50	2.50	2.49	2.49	2.46
	1.0	2.91	2.86	2.83	2.81	2.80	2.79	2.77	2.76	2.75	2.75	2.72
	1.1	3.24	3.18	3.14	3.12	3.10	3.09	3.07	3.06	3.05	3.05	3.00
	1.2	3.61	3.53	3.49	3.46	3.44	3.42	3.40	3.39	3.38	3.37	3.32
	1.3	4.02	3.92	3.87	3.84	3.81	3.79	3.77	3.75	3.74	3.73	3.67
	1.4	4.47	4.36	4.30	4.25	4.22	4.20	4.17	4.15	4.14	4.13	4.06
	1.5	4.98	4.85	4.77	4.72	4.68	4.66	4.62	4.60	4.58	4.57	4.48
	1.6	5.54	5.38	5.29	5.23	5.19	5.16	5.12	5.09	5.07	5.05	4.95
	1.7	6.17	5.98	5.87	5.80	5.75	5.72	5.67	5.63	5.61	5.59	5.47
	1.8	6.87	6.65	6.52	6.44	6.38	6.33	6.28	6.24	6.21	6.19	6.05
	1.9	7.66	7.39	7.24	7.14	7.07	7.02	6.95	6.90	6.87	6.85	6.69
	2.0	8.53	8.21	8.03	7.92	7.84	7.78	7.70	7.64	7.61	7.58	7.39
	2.1	9.50	9.12	8.92	8.78	8.69	8.62	8.52	8.46	8.42	8.39	8.17
	2.2	10.6	10.1	9.90	9.74	9.63	9.55	9.44	9.37	9.32	9.28	9.03
	2.3	11.8	11.3	11.0	10.8	10.7	10.6	10.5	10.4	10.3	10.3	9.97
	2.4	13.1	12.5	12.2	12.0	11.8	11.7	11.6	11.5	11.4	11.4	11.0
	2.5	14.6	13.9	13.5	13.3	13.1	13.0	12.8	12.7	12.6	12.6	12.2
	2.6	16.3	15.5	15.0	14.7	14.5	14.4	14.2	14.1	14.0	13.9	13.5
	2.7	18.1	17.2	16.7	16.4	16.1	16.0	15.7	15.6	15.5	15.4	14.9
	2.8	20.2	19.1	18.5	18.1	17.9	17.7	17.4	17.2	17.1	17.0	16.4
	2.9	22.5	21.3	20.6	20.1	19.8	19.6	19.3	19.1	19.0	18.9	18.2
	3.0	25.1	23.6	22.8	22.3	22.0	21.7	21.4	21.1	21.0	20.9	20.1
	3.1	28.0	26.3	25.3	24.8	24.4	24.1	23.7	23.4	23.2	23.1	22.2
	3.2	31.2	29.2	28.1	27.5	27.0	26.7	26.2	25.9	25.7	25.6	24.5
	3.3	34.8	32.5	31.2	30.5	29.9	29.6	29.0	28.7	28.5	28.3	27.1

Blank ruta: $f_4 > 100$

> 4.8

Beräkningsmall för motflödesisolering

d=	m	λ =	W/m, °C	δ =	m ² /s
$\rho \cdot c_p$ =	Ws/m ³ , °C	α_i =	W/m ² , °C	β_i =	m/s
v=	m/h=	T_i =	°C	c_i =	g/m ³ , RF= %
=	m/s	T_u =	°C	c_u =	g/m ³ , RF= %

$a_1 = d \cdot v \cdot \rho \cdot c_p / \lambda =$	$a_2 = d \cdot v / \delta =$
$b_1 = d \cdot \alpha_i / \lambda =$	$b_2 = d \cdot \beta_i / \delta =$
$K = f_2(a_1, b_1) =$	$L = f_2(a_2, b_2) =$
$\Delta T = T_i - T_u =$	$\Delta c = c_i - c_u =$

A	B	C	D	E	F	G	H
x/d	$f_1(\frac{x}{d}, a_1)$	$T = T_u + \frac{B \cdot K \cdot \Delta T}{x}$	c_m	$f_1(\frac{x}{d}, a_2)$	$c = c_u + \frac{E \cdot L \cdot \Delta c}{x}$	RF=	$\frac{c_m - c_u}{E \cdot L}$

- 0.0
- 0.1
- 0.2
- 0.3
- 0.4
- 0.5
- 0.6
- 0.7
- 0.8
- 0.9
- 1.0

k_{DYN}	MAX c_i (KONDENS)	MAX c_i (FUKT UTAT)
$k_{DYN} = \frac{\lambda}{d} \cdot f_3(a_1, b_1) =$	$c_{ik} = c_u + H_{MIN} =$	$c_{if} = c_u \cdot f_4(a_2, b_2) =$
= W/m ² , °C	= g/m ³	= g/m ³
TILLÅTEN RF INNE =		%

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 790146-5
från Statens råd för byggnadsforskning till Paul Petterssons
Konstruktionsbyrå AB, Stockholm.**

R162: 1980

ISBN 91-540-3399-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700262

**Abonnemangsgrupp:
Ingår ej i abonnemang**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm**

Cirka pris: 30 kr exkl moms