

91970/147

Forelesninger  
ved Norges Landbrukshøgskole

i

HUSBYGGING.

Hoveddel I: Isolasjonslære.

2. utgave

Av

Karl Alf Løken

Landbruksbokhandelen/Universitetsforlaget  
Vollebekk 1970

Norges landbrukshøgskoles  
bibliotek

q1970/147/ex.2

Forelesninger  
ved Norges Landbrukshøgskole

i

HUSBYGGING.

Hoveddel I: Isolasjonslære.

2. utgave

Av

Karl Alf Løken



Landbruksbokhandelen/Universitetsforlaget  
Vollebakk 1970



## F O R O R D

Forelesningene i materialer og konstruksjoner (husbygging) er delt opp i følgende hoveddeler:

I	Isolasjonslære	(Utgitt 1966)
II	Bygningsmaterialer	(Utgitt 1964)
III	Bygningsarbeider	(Utgitt 1966)
IV	Bygningskonstruksjoner	(Utgitt 1965)

De kompendier som hittil har vært brukt i denne del av bygningslæren var skrevet av tidligere forsøksleder Asbjørn Torp.

Hoveddelene I-IV vil bli forelest for alle studentgrupper. For de grupper som bare har ca. 30 forelesningstimer, vil endel av stoffet utgå av pensum. Isolasjonslæren og deler av materiallæren er fundamentale og vil kreve forholdsvis stor del av tiden. I alle deler er tatt med mange tabeller som er håndbokstoff til støtte for senere bruk ved planleggingsarbeid o.l. Del III og IV omfatter praktisk beskrivende emner med illustrasjoner vel egnet for selvstudium.

Montering av figurer og maskinskriving er utført av kontorfullmektig Astrid Klokk og kontorassistent Aud Aune og tegnearbeidet av tekniker Arne Solbrekke. Jeg er meget takknemlig for den gode hjelp til disse arbeider.

Vollebekk, august 1966.

Karl Alf Løken

## FORORD til 2. utgave.

Før overgang til den nye studieordningen har en funnet det riktig å bare foreta mindre forandringer i kompendiene i husbygging. I første utgave av isolasjonslæren var det dessverre et forholdsvis stort antall trykkfeil som nå er rettet.

I delen om varmeisolering er foretatt en omarbeiding av avsnittet om varmeovergangsmotstand.

Delen om lydisolering har bydd på enkelte problemer både for foreleseren og studentene. Omarbeiding av avsnittene om luftlydisolering og trinnlydisolering vil forhåpentlig gjøre de mange nye begrep mere forståelige.

Vollebekk, februar 1970.

Karl Alf Løken

# INNHOOLD

	Side
Del 1. VARMEISOLERING	
Enheter for temperatur og varmemengde .....	1. 1.
Varmetransport og varmeoverføring .....	1. 1.
Varmeledning .....	1. 2.
Konveksjon .....	1. 2.
Stråling .....	1. 3.
Varmegjennomgang i luftrom .....	1. 5.
Varmeovergang ved materialoverflater, varmeovergangsmotstand .....	1. 6.
Varmegjennomgangsmotstand, varmegjennom- gangstall, k-verdi .....	1. 9.
Varmeledningstall for byggematerialer .....	1. 11.
Forhold som virker inn på varmeledningstallet .....	1. 12.
Struktur og romvekt .....	1. 12.
Temperatur .....	1. 15.
Fuktighet .....	1. 15
Eksempler på beregning av varmegjennomgangstall og temperaturkurver for bygningskonstruksjoner .....	1. 17.
Betydningen av konstruksjonenes varmekapasitet .....	1. 20.
Varmegjennomgangsmotstand av papplag, folier etc. ....	1. 21.
Varmegjennomgang gjennom vinduer .....	1. 22.
Varmegjennomgang gjennom tak .....	1. 23.
Varmegjennomgang gjennom golv direkte på grunn .....	1. 24.
Beregning av nødvendig varmeisolasjon .....	1. 25.
Økonomisk varmeisolering .....	1. 26.
Beregning av isolasjonsenhetspris .....	1. 26.
Beregning av økonomisk varmeisolering .....	1. 28.
Litteratur .....	1. 31.
Del 2. LUFTSTRØMNINGER	
Vind .....	2. 1.
Temperaturdifferanser .....	2. 1.
Ventilasjon .....	2. 3.
Luftgjennomgang .....	2. 3.
Luftgjennomgang i bygningsmaterialer .....	2. 4.
Luftgjennomgang i bygningskonstruksjoner .....	2. 5.
Litteratur .....	2. 8.

	Side
<b>Del 3. FUKTIGHET</b>	
Beregning av overflatekondens .....	3. 3
Fuktbinding til porøse materialer, fuktlikevekt .....	3, 3
Dampdiffusjon .....	3. 4
Eksempel på beregning av fuktvandring og kondensasjon i en bygningskonstruksjon .....	3. 11
Kapillærsuging .....	3. 14
Slagregn .....	3. 15
Lekkasjer gjennom fuger og sprekker .....	3. 17
Tetting mot slagregn .....	3. 18
Fuging .....	3. 19
Midler til å hindre eller redusere vann- oppsuging .....	3. 20
Litteratur .....	3. 21
 <b>Del 4. LYDISOLERING</b>	
Beregnelser og måleenheter .....	4. 1
Luftlydisolering .....	4. 3
Måling av luftlydisolering .....	4. 3
Luftlyd i hus .....	4. 5
Luftlydisolerende konstruksjoner .....	4. 6. a
Dekker .....	4. 9
Trebjelkelag .....	4. 9
Åpninger i vegg eller dekke .....	4. 9
Vegg med dør eller vindu .....	4. 10
Trinnlydisolering .....	4. 11
Trinnlyd .....	4. 11
Trinnlydisolerende konstruksjoner .....	4. 12. a
Romakustikk .....	4. 16
Akustisk regulering .....	4. 16
Lyddemping .....	4. 16
Litteratur .....	4. 18

## Del 1. VARMEISOLASJON

### Enheter for temperatur og varmemengde.

Hos oss brukes mest enheten  $1^{\circ}\text{C}$ , grad Celcius, som er basert på en temperaturskala hvor  $0^{\circ}\text{C}$  svarer til vannets frysepunkt og  $100^{\circ}\text{C}$  til vannets kokepunkt ved 1 atm. trykk. Absolutt temperatur er temperaturen målt fra det såkalte absolutte nullpunkt som i Celcius' temperaturskala svarer til  $-273^{\circ}\text{C}$ . Den absolutte temperatur målt fra det absolutte nullpunkt kalles Kelvin-grader,  $^{\circ}\text{K}$ .

Som enhet for varmemengde brukes i byggteknikken en kilokalori, 1 kcal. Definisjonsmessig svarer denne enhet til den varmemengde som kreves til å heve temperaturen i 1 kg vann fra  $+14$  til  $+15^{\circ}\text{C}$ . En annen energienhet som brukes for bl. a. elektriske apparater er kilowatttime, 1 kwh = 860 kcal. Ved økonomiske beregninger kan det være praktisk å bruke en større enhet enn kilokalori, en megakalori, 1 Mcal = 1000 kcal = 1,163 kwh.

I engelsktalende land brukes i stedet for kalorier enheten British Thermal Unit, BTU. En BTU svarer til den varmemengde som trenges til å heve temperaturen i et pound (1 lb = 0,454 kg), vann fra  $63^{\circ}\text{F}$  til  $64^{\circ}\text{F}$ , 1 BTU = 0,252 kcal.

### Varmetransport og varmeoverføring.

Varmetransport i og varmeoverføring mellom faste legemer, væsker og gasser kan skje ved ledning, konveksjon (strømning), stråling, fordampning og kondensasjon. Når lufttemperaturen er forskjellig på to sider av en konstruksjon, f. eks. en vegg, vil veggens innside bli varmet opp ved ledning og konveksjon fra lufta og ved stråling fra varme flater i rommet. Fuktighet i lufta kan kondenseres på en kald veggflate og kan avgi betydelig varmemengde. Gjennom konstruksjonen overføres varme ved ledning i kompakte materialer, ved konveksjon i luftlag og høyporøse materialer og ved stråling over luftfylte hulrom.

På den kalde siden avkjøles konstruksjonen ved ledning, konveksjon og utstråling og ved fordampning fra en fuktig flate.

### Varmeledning.

I et materialsjikt skjer varmeledning i temperaturfallets retning, og den er proporsjonal med temperaturgradienten, dvs. med temperaturkurvens helning ( $\frac{dt}{dl}$ ) og med det areal varmetransporten foregår gjennom.

$$Q = - \lambda \cdot F \cdot \frac{dt}{dl}$$

$Q$  = transportert varmemengde pr. tidsenhet (kcal/h)

$F$  = det areal varmetransporten foregår gjennom ( $m^2$ )

$\lambda$  = en proporsjonalitetsfaktor som forteller hvor lett eller vanskelig denne varmetransport foregår, den kalles materialets varmeledningstall (kcal/mh<sup>o</sup> C)

$\frac{dt}{dl}$  = betegner temperaturkurvens helning

Minustegnet betegner at varmetransporten foregår i retning av synkende temperatur.

Har vi et plant homogent materialsjikt med tykkelse  $l$  hvor overflatetemperaturen på de to materialsider er henholdsvis  $t_1$  og  $t_2$  vil varmetransporten gjennom en flate  $F$  bli

$$Q = F \cdot \frac{\lambda}{l} (t_1 - t_2) \text{ kcal/h}$$

Forutsatt endimensjonal varmetransport under konstante temperaturforhold er det meget enkelt å beregne varmetransporten ved ledning når vi kjenner materialets varmeledningstall. Vi skal senere komme tilbake til varmeledningstallet ( $\lambda$ ) for forskjellige bygningsmaterialer. Varmeledningstallet er ikke konstant men varierer med temperatur, fuktighetsinnhold, konveksjonsforhold etc.

### Konveksjon.

Væsker eller gasser kan overføre varme ved at de settes i bevegelse, det oppstår strømminger. Når luften i et hulrom tilføres varme fra en av begrensingsflatene, vil den utvide seg og få lavere romvekt, derved en viss oppdrift som setter igang strømming. Den oppvarmete luft stiger opp og tvinges over til den kjølige side av luftrommet, mens ny kjølig luft strømmer til. Den oppvarmete luft



avgir varme når den kommer mot den kalde veggflate, og det oppstår en nedadrettet luftstrøm langs den kalde siden. Denne konveksjon som skyldes temperaturforskjeller kalles egenkonveksjon. Luftstrømninger som kan gi årsak til betydelig varmetransport, kan også skyldes lufttrykkforskjeller på grunn av vind, ventilasjon o. a., og dette kalles påtvunget konveksjon.

Varmetransporten ved konveksjon er ikke, som ved ledning, proporsjonal med temperaturgradienten. For luftfylte hulrom med begrenset størrelse er det mulig å utføre tilnærmete beregninger av konveksjonstall,  $\lambda_k$ . Størrelsen av disse er avhengig av temperaturredifferansen mellom flatene og luftrommets tykkelse. Tabell 1.1 angir konveksjonstall for vertikale luftrom.

Tabell 1.1. Konveksjonstall  $\lambda_k$   $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h } ^\circ \text{C}}$  for vertikale hulrom.

Temperaturdifferanse mellom veggssidene overflater	Luftsjiktets tykkelse, cm				
	1	2	5	10	20
< 10 °C	0,003	0,010	0,045	0,123	0,302
ca. 50 °C		0,022	0,091	0,227	

For horisontale luftrom med varmeste begrensingsflate nederst er konveksjonstallet omtrent som for tilsvarende vertikale luftrom. For horisontale luftrom med varmeste begrensingsflate øverst vil det derimot bli vesentlig mindre konveksjon fordi den varmeste luften stadig vil holde seg øverst.

### Stråling.

Loven for varmeutstråling fra et punkt med absolutt temperatur  $T^{\circ}\text{K}$  kan for praktiske beregninger angis ved ligningen

$$E = C \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

$$E = \text{utstrålt energi per tids- og flateenhet} \left( \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h } ^\circ \text{C}} \right)$$

$$C = \text{overflatens strålingstall} \left( \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h } ^\circ \text{K}^4} \right)$$

Strålingstallet  $C$  har sin største verdi for absolutt svarte legemer

$$C_0 = 4,96 \left( \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{h} \text{ } ^\circ\text{K}^4} \right)$$

For alle vanlige materialoverflater er  $C < C_0$

En kan sette  $C = \epsilon \cdot C_0$  hvor faktoren  $\epsilon$  er et ubenevnt forholdstall, det s. k. relative strålingstall eller emisjonsfaktoren.

Tabell 1.2. Strålingstall for en del materialoverflater.

Materiale	Strålingstall $C$ kcal/m <sup>2</sup> h °K <sup>4</sup>	Relativt strålingstall
Abs. svart materiale	4,96 "	1,0
Tegl, murverk, puss	4,6	0,93
Treverk, glatt	4,0 - 4,5	0,80 - 0,90
Papp, papir (grå)	4,0 - 4,5	0,80 - 0,90
Asfaltpapp	4,6	0,93
Aluminium, polert	0,25	0,05
Aluminium, oksydert	0,55	0,11
Glass, glatt	4,65	0,94
Tekstiler, ca.	3,9	0,78
Vann, is, ca.	3,2	0,65

Ligningen for varmetransport ved stråling mellom to flater med forskjellig temperatur kan for beregning av bygningsisolasjon settes lik

$$Q = F C_{12} \beta (t_1 - t_2) \text{ kcal/h}$$

$$C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_0}}$$

er det resulterende strålings-  
tall

$$\beta = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{t_1 - t_2}$$

kalles temperaturfaktoren

For temperaturområdet omkring  $0^{\circ}\text{C}$  er verdien for  $\beta$  ca. 0,81.

### Varmegjennomgang i luftrom.

I et luftrom skjer varmetransporten samtidig ved ledning, konveksjon og stråling. I tynne luftsjikt vil den vesentligste varme-transport skje ved ledning og stråling, mens konveksjonen vil gjøre seg sterkere gjeldende når luftsjiktets tykkelse øker. Strålingen vil avta sterkt når en eller begge sider av luftrommet har et lavt strålings-tall, f. eks. en blank aluminiumsflate.

Det er mulig å beregne det såkalte ekvivalente varmeledningstall ( $\lambda_{\text{ekv}}$ ) for et luftrom

$$\lambda_{\text{ekv}} = (\lambda_1 + \lambda_k + d\beta C_{12}).$$

Ved praktiske beregninger av varmegjennomgang i vegger, bjelkelag etc. er det mere hensiktsmessig å regne med luftrommets gjennomgangsmotstand enn med det ekvivalente varmeledningstall. Luftrommets varmegjennomgangsmotstand er

$$m_1 = \frac{d}{\lambda_{\text{ekv}}} = \frac{d}{\lambda_1 + \lambda_k + d\beta C_{12}}$$

Tabell 1.3. er satt opp på grunnlag av teoretisk beregnet varmegjennomgang i luftrom.

Tabell 1.3. Varmegjennomgangsmotstand for ikke ventilerte/luftsjikt vertikale ved ca.  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $\frac{\text{m}^2 \text{ h } ^{\circ}\text{C}}{\text{kcal}}$

Begrensningsflatenes art	Luftsjiktets tykkelse, mm			
	5	10	20	50
Ingen aluminiumsfolier	0,12	0,15	0,20	0,20
Aluminiumsfolie på en side	0,20	0,35	0,50	0,55
Aluminiumsfolie på begge sider	0,20	0,40	0,55	0,60

Varmeovergang ved materialoverflater, varmeovergangsmotstand.

Når varme går over fra et fast legeme til luft eller omvendt vil det være en viss motstand mot varmeoverføring, den såkalte varmeovergangsmotstand. For at varmetransport skal kunne foregå må det være en temperaturdifferanse mellom overflaten og luften i rommet. Ved små temperaturdifferanser regner en gjerne at varme-transporten er proporsjonal med temperaturdifferansen mellom overflaten og den omgivende luft.

$$Q = F \alpha (t_0 - t_1) \text{ (kcal/h)} = F \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

hvor proporsjonalitetsfaktoren

$\alpha$  = varmeovergangstallet (kcal/m<sup>2</sup>h°C)

$t_0$  = overflatens temperatur (°C)

$t_1$  = luftens temperatur (°C)

F = det areal vi betrakter (m<sup>2</sup>)

Varmeoverføringen til materialoverflaten skjer ved ledning, konveksjon, stråling og eventuell fordamping eller kondensasjon. Ved varmeoverføring til en bygningskonstruksjon dominerer som regel konveksjon og stråling. Varmeovergangstallet kan vi sette lik

$$\alpha = \alpha_{lk} + \alpha_s$$

$\alpha_{lk}$  = varmeovergangstall på grunn av ledning og konveksjon (kcal/m<sup>2</sup>h°C)

$\alpha_s$  = varmeovergangstall på grunn av stråling (kcal/m<sup>2</sup>h°C)

Varmeovergangsmotstanden  $m = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_{lk} + \alpha_s}$  (m<sup>2</sup>h°C/kcal)

Virkingen av påtvungne luftstrømninger med lufthastighet  $v$  m/sek kan en uttrykke ved:

$$\alpha_{lk} = A \cdot v^n \text{ (kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C)}$$

Proporsjonalitetsfaktoren  $A$  og eksponenten  $n_1$  ( $n < 1$ )<sub>1</sub> avhenger av lufthastigheten.

For praktiske beregninger kan vi sette

$$\alpha_{lk} = 10 v^{0,5} = 10\sqrt{v}$$

Temperaturdifferansen mellom den omgivende luft og overflaten vil gi luftstrømninger som påvirker varmeovergangstallet.

Ved vertikale flater og flater med varmestrøm oppover har en

$$\alpha_{lk} = 2,2 \Delta t^{0,25} = 2,2 \sqrt[4]{\Delta t}$$

hvor

$$t = t_o - t_l$$

Ved horisontale flater med varmestrøm nedover (golv), vil det bli redusert luftsirkulasjon, og en kan tilnærmet sette

$$\alpha_{lk} = 1,0$$

Varmeovergangstallet på grunn av stråling uttrykkes ved

$$\alpha_s = \beta C_{ol} \quad , \text{ for vanlige bygningsflater kan vi sette}$$

$$\alpha_s = \text{ca. } 4,0 \text{ (kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C)}$$

#### Innendørs forhold:

Ved vertikale flater og horisontale flater med varmestrøm oppover,  $\Delta t = 2^\circ\text{C}$  og vanlige bygningsflater kan vi beregne  $\alpha_i$

$$\alpha_i = \alpha_{lk} + \alpha_s = 2,2 \Delta t^{0,25} + \beta C_{ol} = 2,6 + 4,0 = 6,6$$

og herav

$$\underline{m_i} = \frac{1}{\alpha_i} = \frac{1}{6,6} = \underline{0,15 \text{ (m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal)}}$$

Ved horisontale flater med varmestrøm nedover er

$$\alpha_i = \alpha_{lk} + \alpha_s = 1,0 + 4,0 = 5,0 \text{ (kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C)}$$

$$\underline{m_i} = \frac{1}{\alpha_i} = \frac{1}{5,0} = \underline{0,20 \text{ (m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal)}}$$

I hjørner mellom flater med omlag samme overflatetemperatur blir strålingen redusert og der vil en også få reduserte luftbevegelser. Varmeovergangsmotstanden i hjørner vil derfor som regel bli noe høyere enn på resten av flaten og vil føre til øket fare for overflatekondens. Ved kondensberegninger kan en sette  $m_i = 0,20$  for hjørner.

Ved blanke materialflater blir strålingen vesentlig redusert, og varmeovergangsmotstanden blir følgelig større. Ved en blank aluminium overflate vil en ha  $\alpha_s = \text{ca. } 0,5$ . Veggflaten får noe lavere temperatur og vi kan sette  $\Delta t = 3^\circ\text{C}$ , og får

$$\alpha_i = \alpha_{lk} + \alpha_s = 2,2 \Delta t^{0,25} + \beta C_{ol} = 2,9 + 0,5 = 3,4$$

og herav

$$m_i = \frac{1}{\alpha_i} = \frac{1}{3,4} = 2,9 \text{ (m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal)}$$

Denne større varmeovergangsmotstand ved blanke flater har som regel mindre betydning for konstruksjonens varmegjennomgangstall, men den kan bety en vesentlig øket fare for overflatekondens. Spesielt i himlinger kledd med blank aluminium må en sørge for ekstra lav k-verdi for å unngå drypp fra kondensvann.

#### Utendørs forhold.

For horisontale og vertikale flater kan vi regne med en gjennomsnittlig lufthastighet  $v = 2,5$  m/sek. Regner vi med normal stråling vil vi få

$$\alpha_u = \alpha_{lk} + \alpha_s = 10 v^{0,5} + \beta C_{ol} = 16 + 4 = 20 \text{ (kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C)}$$

og

$$m_u = \frac{1}{\alpha_u} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ (m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal)}$$

I sterk vind vil varmeovergangsmotstanden bli praktisk talt lik null.



I skyfrie netter vil varmestrålingen fra en bygning bli stor da motstrålingstemperaturen i det ytre rom kan ligge 15-20 °C lavere enn den utvendige lufttemperatur. De utvendige bygningsflater kan bli kaldere enn lufttemperaturen ute, og da er varmeovergangsmotstanden i realiteten negativ. Dette kan særlig ha betydning ved beregning av varmetap gjennom takvinduer og veksthus.

Når det er klart vær og samtidig høg utvendig luftfuktighet, vil det bli kondens på de kalde bygningsflater i form av dugg eller rim. Om vinteren vil en ofte se rim på godt isolerte bygningsflater. På veggflater vil deler med høgere varmegjennomgangstall avtegne seg som partier uten rim.

Varmegjennomgangsmotstand, varmegjennomgangstall, k-verdi. x)

Vi kan gå tilbake til ligningen for endimensjonal varmetransport gjennom et homogent materiale med tykkelse  $d$  (m)

$$Q = F \frac{\lambda}{d} (t_1 - t_2)$$

som kan skrives slik

$$Q = F \frac{1}{\frac{d}{\lambda}} (t_1 - t_2) = F \frac{1}{m} (t_1 - t_2)$$

Størrelsen  $m = \frac{d}{\lambda}$  er uttrykk for motstand mot varmegjennomgang og kalles materialsjiktets varmegjennomgangsmotstand.

For en konstruksjon med flere materialsjikt og hvor temperaturen i luften på de to sider av konstruksjonen er  $t_i$  og  $t_u$  ønsker vi å finne et uttrykk for isolasjonsevnen for konstruksjonen. Ved stasjonære forhold vil den varmemengde som går gjennom samtlige sjikt av konstruksjonen pr. tidsenhet være den samme. Vi kan da sette opp ligningene for varmetransport for de forskjellige sjikt, og også for varmeovergang ved materialoverflatene. Har vi en konstruksjon med  $n$  materialsjikt, så er:

$$Q = F \frac{1}{m_i} (t_i - t_1)$$

$$Q = F \frac{1}{m_1} (t_1 - t_2)$$

.....

x) NS 3031. Beregning av bygningers varmebehov. Bruker betegnelsen varmegjennomgangskoeffisient, kcal/m<sup>2</sup>h°C eller W/m<sup>2</sup>°C).

$$Q = F \frac{1}{m_n} (t_n - t_{n+1})$$

$$Q = F \frac{1}{m_u} (t_{n+1} - t_u)$$

Ordner vi ligningene på formen

$$Q m_i = F (t_i - t_1)$$

og summerer ligningene, får vi

$$Q (m_i + m_1 + \dots + m_n + m_u) = F (t_i - t_u)$$

og herav

$$Q = F \frac{1}{m_i + m_1 + \dots + m_n + m_u} (t_i - t_u) = F k (t_i - t_u)$$

Uttrykket  $k = \frac{1}{m_i + m_1 + \dots + m_n + m_u}$  kalles konstruksjonens

varmegjennomgangstall, k-verdien. Det er den inverse verdi av den samlede varmegjennomgangsmotstand, og den har samme dimensjon som varmeovergangstallet,  $\alpha$ ,  $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}}$

Vi kan beregne temperaturfallet i et materialsjikt da temperaturfallet er proporsjonalt med varmegjennomgangsmotstanden i sjiktet. Over en konstruksjon har vi at

$$\frac{t_1 - t_2}{m_1} = \frac{t_i - t_u}{\text{sum } m} = \frac{1}{\text{sum } m} (t_i - t_u) = k (t_i - t_u)$$

følgelig er

$$t_1 - t_2 = m_1 k (t_i - t_u)$$

Foruten ved beregninger blir varmegjennomgangstallet for konstruksjoner bestemt ved målinger i forsøkshus og ved laboratorieforsøk. For tørre konstruksjoner uten påtvunget konveksjon vil det som regel være god overensstemmelse mellom målte og beregnede verdier. Virkningen av fuktighet fra kondensasjon eller slagregn og fra konveksjon som følge av sterk vind, kan en bare få undersøkt ved målinger av konstruksjoner. Et banebrytende arbeide med å undersøke veggkonstruksjoner i forsøkshus ble utført av professor Andreas

Bugge ved Norges Tekniske Høgskole. I de siste årtier er dette arbeid videreført av bl. a. Norges Byggforskningsinstitutt.

### Varmeledningstall for byggematerialer.

Varmeledningstallet,  $\lambda$ , gir uttrykk for om et materiale er en god eller dårlig varmeleder. Det blir bestemt ved laboratoriemålinger.

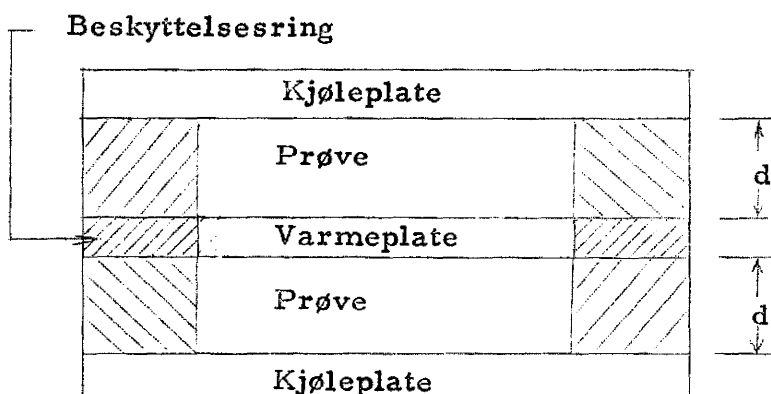
Definisjon: Varmeledningstallet angir den varmemengde i kilokalorier som ved stasjonær tilstand går gjennom  $1 \text{ m}^2$  av et materiale med  $1 \text{ m}$  tykkelse i en time (h) når temperaturfallet gjennom materialet er  $1^\circ\text{C}$ .

Dimensjonen på varmeledningstallet  $\lambda$  er altså

$$\frac{\text{kcal}}{\frac{\text{m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}}{\text{m}}} = \frac{\text{kcal}}{\text{m h } ^\circ\text{C}}$$

Det brukes forskjellige metoder til måling av varmeledningstall. Den metode som har vært mest brukt her i landet er måling i et såkalt plateapparat, Poensgen-metoden. I prinsippet består dette apparat av en varmeplate som tilføres en konstant elektrisk effekt gjennom en kilowattmemåler og av to termostatstyrte kjøleplater som ved hjelp av et kjølemedium holdes på en konstant temperatur lavere enn varmeplaten. Det materiale som skal måles, legges i samme tykkelse,  $d$ , på hver side av varmeplaten mellom denne og kjøleplatene. Etter en tids forløp oppnås en stasjonær varmestrøm gjennom materialet.

Fig. 1.1. Plateapparat.



Apparatet egner seg ikke særlig godt til måling av fuktige materialer da varmemstrømmen vil gi årsak til fuktighetsbevegelser som forstyrrer målingene og kan gi feil i resultatet.

Tabell 1. 5 angir varmeledningstall for de fleste typer av bygningsmaterialer. Tallene gjelder materialer med et middels stort praktisk fuktighetsinnhold. Blir materialene utsatt for større fuktighet, bør verdiene økes.

Som en ser vil lette, høyporøse materialer ha lavere  $\lambda$ -verdier enn tyngre materialer. For et materiale er varmeledningsevnen ikke konstant, men vil avhenge av temperatur, fuktighet og konveksjon.

#### Forhold som virker inn på varmeledningstallet.

De viktigste forhold som virker inn på størrelsen av varmeledningstallet for et isolasjonsmateriale er struktur og romvekt, temperatur og fuktighetsinnhold.

#### Struktur og romvekt.

De fleste isolasjonsmaterialer er porøse og består for en vesentlig del av luft. De kan derfor betraktes som et luftsjikt med mange horisontale og vertikale skillevegger. Varmen går gjennom materialet ved ledning, konveksjon og stråling. Jo større og grovere porene er desto mere vil stråling og konveksjon gjøre seg gjeldende. Når det gjelder struktur vil et materiale med grove porer, et glissent materiale, lede varmen bedre enn et tilsvarende materiale med samme romvekt men med finere porer. I et vanlig bygningsmateriale er det varmetransport ved ledning som spiller størst rolle. Varmeledningstallet for tørr, stillestående luft ved ca.  $0^{\circ}\text{C}$  er  $0,02 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ . Alle faste materialer som poreveggene er bygget opp av, har mange ganger større varmeledningstall. Derfor bør vekten av porevegger være lav, dvs. isolasjonsmaterialet bør ha lav romvekt. Varmeledningstallet avtar med romvekten til en viss grense og stiger så igjen fordi porene er blitt for grove eller kommuniserer med hverandre slik at konveksjonen og strålingen øker. Dette gjelder bl. a. mineralull, fig. 1. 2. Ved svenske undersøkelser av varmeledningsevnen for mineralull har en funnet at det er sammenheng mellom varmeledningstallet og luftgjennomstrømningstallet.

Tabell 1.5. Forskjellige materialers varmeledningstall  $\frac{\text{kcal}}{\text{mh}^\circ\text{C}}$ 

Materiale	Romvekt kg/m <sup>3</sup>	$\frac{\text{kcal}}{\text{mh}^\circ\text{C}}$
<b>1. Teglstein, murverk</b>		
Sortering A, Ekstra	2 150	0.80
" A (fasadestein)	2 150 - 2 000	0.80
" B	2 000 - 1 850	0.75
" C	1 850 - 1 700	0.60
" D (lettbrent)	1 700 - 1 600	0.50
Lettstein	1 400	0.40
Mangehullstein	1 450	0.40
<b>2. Betong</b>		
Betong, uarmert	2 200 - 2 000	1.30
" armert	2 200	1.40
Gassbetong, dampherdet	600	0.17
" "	500	0.14
" "	400	0.12
Leca blokker	700	0.18
" utstøpt 1 : 8	500	0.16
<b>3. Mineralull</b>		
Glassvatt, løs	60	0.035
" sydde matter	60	0.035
" golvfilt	30	0.035
" veggfilt	45	0.035
Glassull, elastiske matter	12	0.035
Steinull, granulert	120	0.035
" sydde matter	60	0.035
" bjelkelagsfilt	35	0.035
" veggfilt	35	0.035,
" elastiske matter	45 - 70	0.033
" " plater	90 - 150	0.030
<b>4. Trematerialer</b>		
Gran og furu vinkelrett på fibrene	600 - 400	0.15
Eik vinkelrett på fibrene	825	0.20
<b>5. Bygningsplater</b>		
Trefiberplater, harde	1 000 - 900	0.12
" halvharde	650 - 450	0.08
" porøse	350 - 250	0.06
Treullsementplater	600	0.12
"	400	0.08
Korkplater, ekspandert	125	0.04
Bølgepapp, asfaltimpregnert	50	0.04
Polystyren, ekspandert	20 - 30	0.030
Skumglass	145	0.045
Polyuretan, stiv skumplast	30	0.017 x)

x)  $\lambda$  ligger mellom 0.016 - 0.017 kcal/mh<sup>o</sup>C og kan etter normal kondisjonering stige til 0.020 - 0.022 kcal/mh<sup>o</sup>C



Tab. 1.5 forts.

Materiale	Romvekt kg/m <sup>3</sup>	$\frac{\text{kcal}}{\text{mh}^{\circ}\text{C}}$
<u>6. Papp</u>		
Ullpapp	700 - 600	0.06
Bygningspapp	800	0.09
Tjære-papp	790 - 850	0.15
Asfalt-papp	1 200 - 1 100	0.22
<u>7. Mørtel og puss</u>		
Sementmørtel	1 900	1.20
Kalkmørtel	1 650	0.80
Gipsuss	1 350	0.45
<u>8. Jord, leire og sand</u>		
Jord, leire og sand med ca. 10 vol. % fukt.	2 000 - 800	1.7 - 0.4
<u>9. Fyllmaterialer</u>		
Stubbeloftsleire		0.22
Slagg, granulert	750	0.20
Kutterflis	140 - 95	0.08
Sagflis	215 - 190	0.10
Korkskrot	50	0.035
Torvstrø	190	0.10
Leca 3 - 10, løs	350	0.080
" 10 - 20, "	350	0.085
Skumplast, innsprøytet, karbamid	5 - 8	0.030
<u>10. Forskjellige materialer</u>		
Asfalt	2 100	0.60
Glass	2 500	0.65
Linoleum	1 200	0.16

Tallene i tabellen gjelder for materialer med midlere fuktighetsinnhold. Bli materialene utsatt for større fuktighet bør verdien økes. Porøse plater (f. eks. treullsementplater) som oppsettes i forskaling og støpes fast til betong eller for porøse plater som pussens kastes direkte på, vil betongen eller mørtelen trenge delvis inn i platen og nedsette isolasjonen. I beregningen av varmeledningstallet bør en ta hensyn til dette ved å redusere den beregningsmessige platetykkelse med 0,5 - 1 cm for hver pusset eller innstøpt side.

Finfibret mineralull har lavere luftgjennomstrømningstall og lavere  $\lambda$ -verdi enn grovfibret mineralull med samme volumvekt.

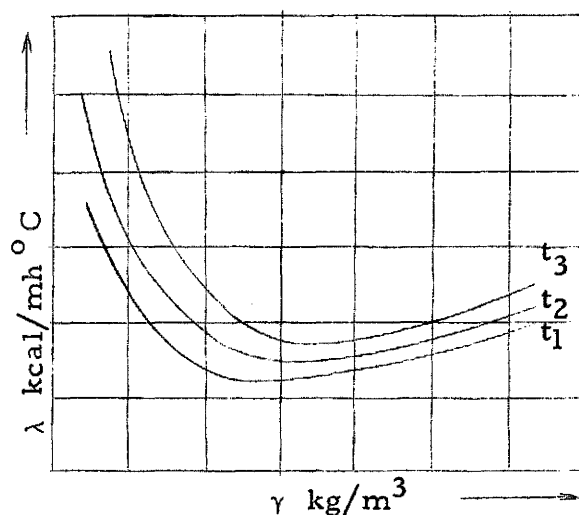


Fig. 1.2. Varmeledningstallet for mineralull som funksjon av volumvekt  $\gamma$  og temperatur, ( $t_3 > t_2 > t_1$ )

De beste isolasjonsmaterialer med luft i porene har varmeledningstall på ca. 0,025 kcal/mh  $^{\circ}$ C. Isolasjon av polyuretan skummet opp med tung freongass har en  $\lambda$ -verdi på 0,014 til 0,017. Men en må regne med at en del av freongassen etter en tid vil diffundere ut slik at varmeledningstallet vil kunne stige til ca. 0,022 kcal/mh  $^{\circ}$ C.

#### Temperatur.

Varmeledningstallet vil for de fleste byggematerialer stige med stigende temperatur, fig. 1.2. Dette henger sammen med at varmeledningen i luftporene spiller en betydelig rolle. Videre vil stråling og konveksjon øke med stigende temperatur. Ved praktiske beregninger av k-verdier o.l. ser vi imidlertid bort fra temperaturens virkning på  $\lambda$ -verdien.

#### Fuktighet.

Varmeledningstallet for vann er ca. 0,5 kcal/mh  $^{\circ}$ C, dvs. 25 ganger høyere enn for luft ved samme temperatur. Fuktighet i porøse

materialer har langt større virkning på varmeledningen enn en tilsvarende økning i volumvekt. Varmeoverføringen i den fuktige poreluft skjer ved ledning og diffusjon. Diffusjonen øker sterkt ved stigende temperatur, og ved  $59^{\circ}\text{C}$  er det ekvivalente varmeledningstall for fuktig poreluft lik vannets varmeledningstall.

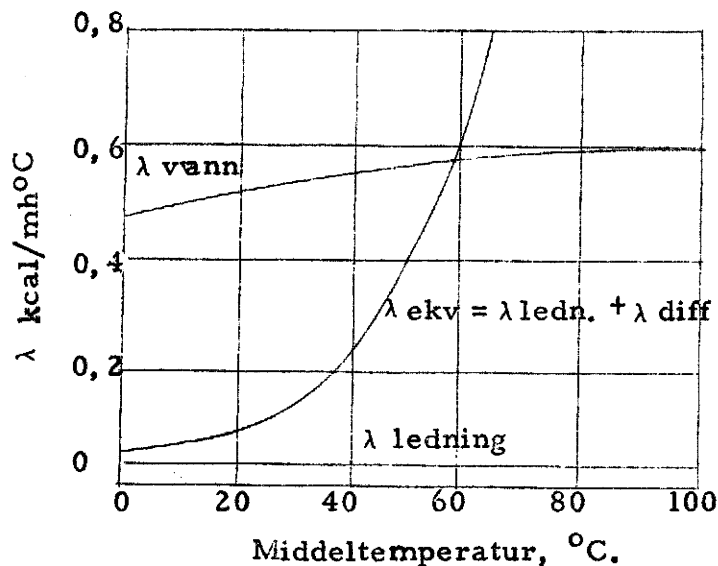


Fig. 1.3. Ekvivalent varmeledningstall for fuktig poreluft.

Ved temperaturer under  $0^{\circ}\text{C}$  fryser vannet til is, og  $\lambda$ -verdien for vannet stiger fra 0,5 til 1,5. Varmeledningstallet for det fuktige materiale øker når temperaturen går under  $0^{\circ}\text{C}$ . Fig. 1.4 viser hvordan  $\lambda$ -verdien for fuktig gassbetong varierer med temperaturen.

Det er forskjell på fuktighetens innvirkning på varmeledningstallet for uorganiske og organiske materialer. De organiske materialer er i større grad hygroskopiske, dvs. at materialet kan oppta fuktighet direkte fra vanddampen i luften, uten at porene inneholder vann i væskeform. Dette fuktighetsinnhold har langt mindre innflytelse på varmeledningen enn kapillært oppsugt vann.

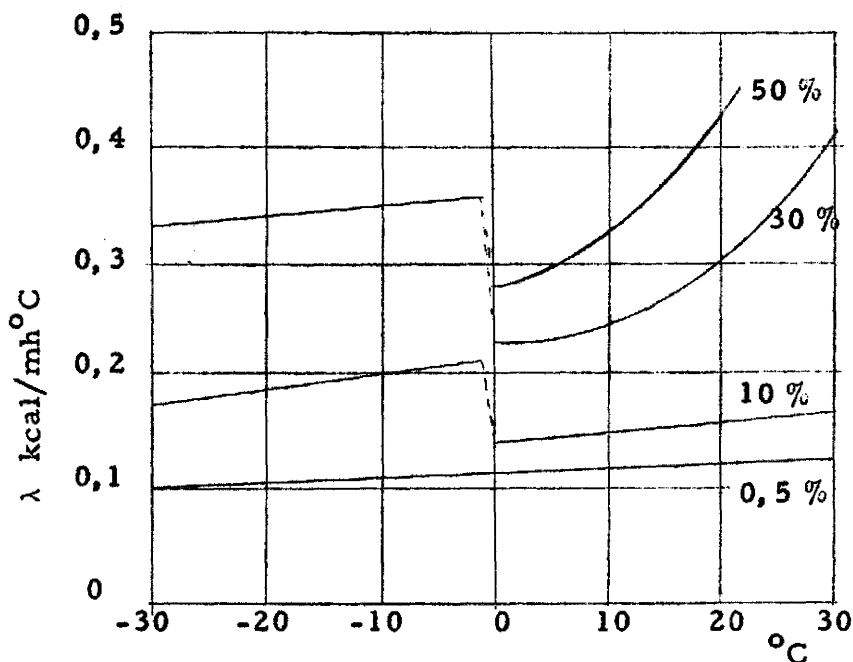


Fig. 1.4. Varmeledningstall for gassbetong som funksjon av temperaturen ved forskjellig fuktinnhold i vekt-%.  
 $\gamma = 0,53 - 0,54 \text{ kg/dm}^3$

Eksempler på beregning av varmegjennomgangstall og temperaturkurver for bygningskonstruksjoner.

For beregning av k-verdien bruker vi formelen:

$$k = \frac{l}{\text{sum } m} = \frac{l}{m_1 + m_1 + \dots + m_n + m_u} = \frac{l}{m_1 + \frac{d_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} + m_u}$$

og for beregning av temperaturdifferansen i hvert sjikt

$$\Delta t_1 = m_1 k (t_i - t_u) = m_1 \frac{t_i - t_u}{\Sigma m}$$

Eksempel 1:

En skallmur av tegl ( $d = 12 \text{ cm}$ ) med  $10 \text{ cm}$  mineralull i hulrommet. Innvendig lufttemperatur  $20^\circ\text{C}$ , utetemperatur  $-10^\circ\text{C}$ . Beregn k-verdien og temperaturforløpet gjennom konstruksjonen.

Sjikt	d m	$\lambda$	m	$\Delta t$ $^{\circ}\text{C}$	t $^{\circ}\text{C}$
Utv. overg. m.			0,05	0,5	- 10,0
Tegl, sortering A	0,12	0,80	0,15	1,4	- 9,5
Mineralull	0,10	0,04	2,50	24,4	- 8,1
Tegl, sortering C	0,12	0,60	0,20	2,0	16,3
Puss, kalkpuss	0,02	0,80	0,03	0,3	18,6
Innv. overg. m.			0,15	1,4	20,0
Sum			3,08	30,0	

$$k = \frac{1}{m} = \frac{1}{3,08} = 0,32 \text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$$

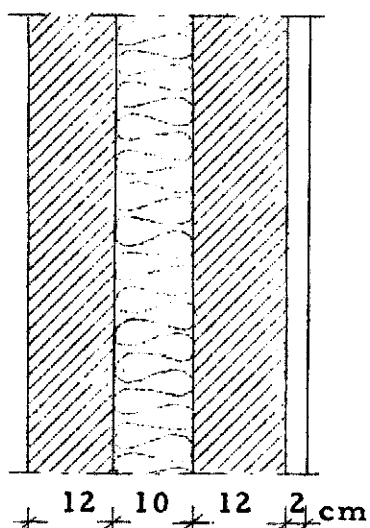


Fig. 1. 5. Veggkonstruksjonen i eksempel 1.

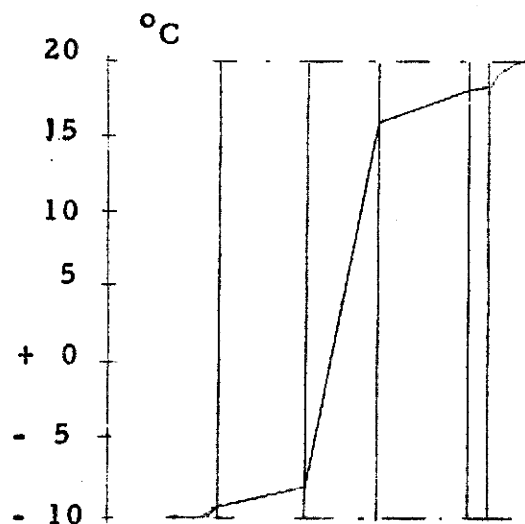


Fig. 1. 6. Temperaturkurvens forløp i eksempel 1.

#### Eksempel 2:

En skallmur av tegl med 10 cm luftrom uten isolasjon. Innvendig lufttemperatur  $20^{\circ}\text{C}$ , utetemperatur  $-10^{\circ}\text{C}$ . Beregn k-verdien og temperaturforløpet gjennom konstruksjonen.

Sjikt	d m	$\lambda$	m	$\Delta t$ $^{\circ}\text{C}$	t $^{\circ}\text{C}$
Utv. overg. motst.			0,05	1,9	-10,0
Tegl, sortering A	0,12	0,80	0,15	5,8	-8,1
Luftrom	0,10		0,20	7,7	-2,3
Tegl, sortering C	0,12	0,60	0,20	7,7	5,4
Puss, kalkpuss	0,02	0,80	0,03	1,1	13,1
Innv. overg. motst.			0,15	5,8	14,2
Sum			0,78	30,0	20,0

$$k = \frac{1}{m} = \frac{1}{0,78} = 1,28 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^{\circ}\text{C}$$

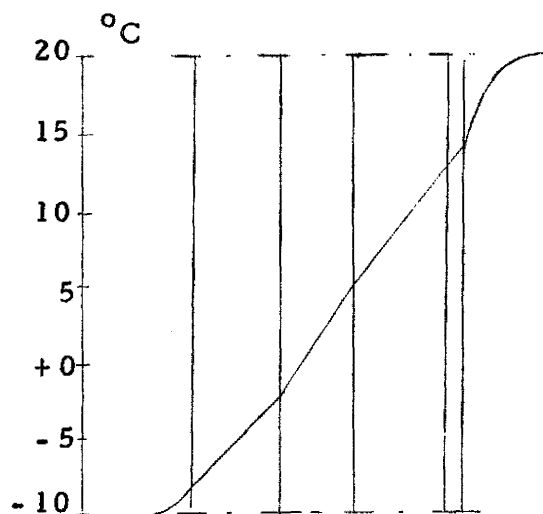
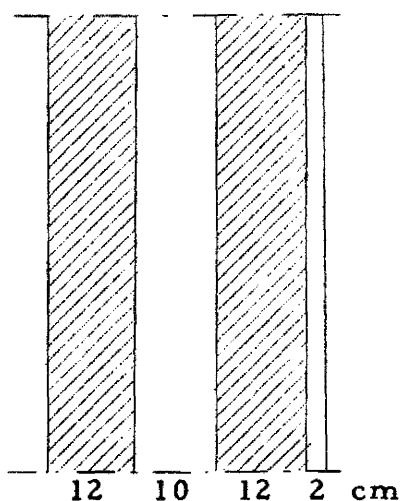


Fig. 1.7. Skisse av veggkonstruksjonen i eksempel 2. Fig. 1.8. Temperaturkurvens forløp i eksempel 2.

Varmetransporten gjennom veggene finner vi av ligningen

$$Q = F k (t_i - t_u) \text{ kcal/h}$$

Gjennom den uisolerte skallmur vil følgelig bli transportert fire ganger så mye varme som gjennom den mineralullisolerte vegg. Ved å sammenlikne temperaturkurvenes forløp i de to eksempler kan vi se at den innvendige veggoverflate er vesentlig kaldere for den dårlig isolerte vegg, og i rom med høy luftfuktighet vil det kunne oppstå



kondens. Videre kan vi se at temperaturen over den utvendige vange er vesentlig h ogere for veggen uten mineralull. Dette er en vesentlig årsak til at frostskafer sjelden oppstår på dårlig isolerte skallmurer.

#### Betydningen av konstruksjonenes varmekapasitet.

Varmekapasiteten av en konstruksjonsdel er produktet av konstruksjonens vekt gange materialets spesifikke varme

$$C = v \gamma c \text{ kcal/}^{\circ}\text{C}$$

hvor  $v$  = bygningsdelens volum ( $\text{m}^3$ )

$\gamma$  = materialets romvekt ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c$  = materialets spesifikke varme ( $\text{kcal}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$ )

Varmekapasiteten for en konstruksjon gir uttrykk for den treghet bygningsdelen har mot å forandre temperatur.

Tabell 1.6. Romvekt og spesifikk varme for en del bygningsmaterialer.

Materiale	Romvekt $\text{kg}/\text{m}^3$	Spesifikk varme $\text{kcal}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$
Vann	1 000	1,0
Betong	2 200	0,23
Lettbetong	400 - 600	0,23
Tegl	1 600 - 1 800	0,20
Tre, gran	400 - 600	0,65
Stål	7 800	0,12

Tunge konstruksjoner har som regel stor varmekapasitet og lette konstruksjoner liten varmekapasitet på grunn av den store forskjell i vekt. Et rom hvor konstruksjoner og inventar har liten varmekapasitet vil våre raskere å varme opp enn et rom med stor varmekapasitet. Konstruksjoner med stor varmekapasitet er trege overfor temperaturforandringer.

Varmekapasiteten har bare betydning under transiente, dvs.

ikke stasjonære temperaturforhold, og det er meget vanskelig å beregne virkningen av varmekapasiteten. For å kunne utnytte varmekapasiteten må det være temperaturforskjell mellom konstruksjonene og romluften som kan føre til en avkjøling eller oppvarming av konstruksjonene. Den varme som er magasinert i et sjikt i en ytterveggkonstruksjon, vil ledes raskt bort hvis det er liten varmegjennomgangsmotstand i konstruksjonen utenfor dette sjikt. Ønsker vi å utnytte en tung betongkonstruksjon til å stabilisere temperaturen i f. eks. et husdyrrom, må vi sørge for å ha betongsjiktet på innsiden av godt isolerende sjikt.

For rom som varmes opp sjelden og for en kortere tid vil det som regel være en fordel å ha liten varmekapasitet i bygningskonstruksjoner og inventar, f. eks. i kirker og forsamlingslokaler. I bygninger hvor soloppvarming til visse tider kan være en plage, er stor varmekapasitet en vesentlig fordel, f. eks. i skoler.

#### Varmegjennomgangsmotstand av papplag, folier etc.

I bygningskonstruksjoner blir brukt papplag, folier, tynne plater etc. til tetting mot luftgjennomgang, slagregn og dampdiffusjon. Som en gjennomsnittsverdi regner vi at et papplag har en varmegjennomgangsmotstand på  $0,05 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}$ .

Papp med et lag aluminiumsfolie vendt mot et luftlag vil bidra med betydelig høyere varmegjennomgangsmotstand på grunn av det lave strålingstall, og tabell 1.3 angir varmegjennomgangsmotstand for luftrom med og uten blanke flater. Da den aluminiumsfolierte papp er meget damptett, må den legges på den varme siden av luftrommet.

Den varmeisolerende evne for et papplag er av underordnet betydning sammenliknet med pappens øvrige funksjoner. Riktig valg av papp eller folie, og riktig bruk slik at den ønskete tetthet oppnås, er ofte helt avgjørende for om en konstruksjon skal fungere. Alle papplag skal ha overlappskjøter som er effektivt klemt til underlaget med lekter og spikring, eventuelt med limte skjøter.

### Varmegjennomgang gjennom vinduer.

Varmegjennomgangsmotstanden for vinduer skyldes i første rekke varmeovergangsmotstanden på begge sider av glasset og varmegjennomgangsmotstanden for eventuelle luftsjikt mellom flere lag glass. Glassets egen varmeisolerende evne er så ubetydelig at vi som regel ser bort fra den ved beregninger.

Tabell 1.7 angir varmegjennomgangstall for vinduer med 1, 2 og 3 glass. Det er regnet med innvendig varmegjennomgangsmotstand  $m_i = 0,15$  og utvendig  $m_u = 0,05$ . Dette gjelder faste trekkfri vinduer og er de gunstigste verdier vi kan få for vinduer. For hengslete mindre tette vinduer kan k-verdiene bli vesentlig høyere. I skyfrie netter og i vind vil også vinduene ha høyere k-verdier.

Tabell 1.7. Varmegjennomgangstall, k-verdier, for faste vinduer med glassavstand over 2 cm. Kcal/m<sup>2</sup>h°C.

	1 glass	2 glass	3 glass
Varmeovergangsmotstand $m_i + m_u$	0,20	0,20	0,20
Varmegjennomgangsmotstand for luftrom	0	0,20	0,40
Sum m	0,20	0,40	0,60
k-verdi	5,0	2,5	1,7

For forseglete ruter vil glassavstanden variere med glass-tykkelsen og for store ruter blir brukt tykt glass og større luftmellomrom. Tabell 1.8 viser beregning av varmegjennomgangstall for forseglete ruter med 2 og 3 glass.

Tabell 1.8. Varmegjennomgangstall, k-verdier, for forseglete vindusruter. Kcal/m<sup>2</sup>h°C.

Luftmellomrom		5 mm	10 mm	12 mm
Varmeovergangsmotstand $m_i + m_u$		0,20	0,20	0,20
Varmegjennomgangsmotst. pr luftrom		0,12	0,15	0,16
2 glass ruter:	Sum m	0,32	0,35	0,36
	k-verdi	3,1	2,9	2,8
3 glass ruter:	Sum m	0,44	0,50	0,52
	k-verdi	2,3	2,0	1,9

### Varmegjennomgang gjennom tak.

Takflaten kan ha stor betydning for varmehusholdningen i et hus. Vi vil bl. a. få sterk varmeutstråling fra tak i kalde, skyfrie netter, og vi får sterk oppvarming fra solen på varme sommerdager.

Et forhold vi som regel må legge særlig vekt på, er å hindre snøsmelting på grunn av oppvarming av taket innenfra. Når smeltedann renner nedover taket, vil det kunne avkjøles og fryse til is ved takskjegget og i takrennene. Og dette kan gi årsak til at vann demmes opp og renner innunder taktekkingen, til at det dannes istapper og til skader på takrenner og nedfallsrør.

Nyfallen snø har et varmeledningstall på ca.  $0,04 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ . Det vil være praktisk talt umulig å isolere taket så godt at en kan hindre snøsmelting når utetemperaturen er nær  $0^{\circ}\text{C}$ . Foruten god isolasjon er det nødvendig med effektiv ventilasjon mellom isolasjonssjiktet og taktekkingen. Fig. 1.9 viser forskjellige alternative løsninger av isolerte tak.

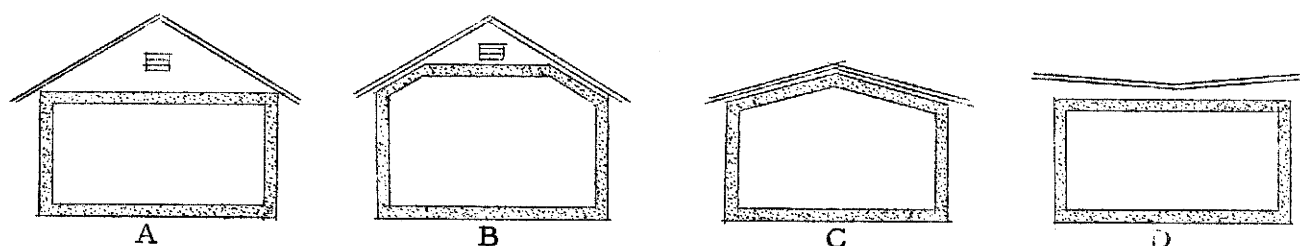


Fig. 1.9. Forskjellige typer varmeisolerte tak.

Ved alternativ A og B er det forholdsvis lett å få til effektiv ventilasjon ved inntakspalter ved gesimsen, luftspalte over isolasjonslaget og tilstrekkelig store ventiler i gavlspissene. Ved alternativ C går det innvendige skråtak helt til mønet, og det er vanskelig å få til en effektiv utlufting. Det bør da være ventilasjonsspalte i mønet. Spikerslag på tvers av sperrene og luftspalter langs gavlene kan også gi en bra løsning.

For flate tak vil utlufting være særlig viktig for å hindre opp-

samling av kondensvann på grunn av dampdiffusjon. I enkelte tilfelle kan det være nødvendig å bruke vifter for å oppnå tilstrekkelig ventilasjon. Når en bygning med flatt tak er utstyrt med innvendig taknedløp, vil eventuell snøsmelting være uten større skadevirkning hvis nedløpene er i den varmeste del av taket.

Av hensyn til varmemehusholdningen, snøsmeltingsproblem m. v. bør vi som regel isolere takflatene best mulig. Hvis konstruksjonene gir plass til det, bør vi bruke 20 cm mineralull i våre kaldere distrikter. Over mineralulla skal legges et lag forhudningspapp for å unngå at isolasjonsevnen reduseres av konveksjon.

#### Varmegjennomgang gjennom golv direkte på grunn.

Kommunal- og arbeidsdepartementet har nå gitt nye bestemmelser for krav til golv på grunnen i rom for varig opphold for mennesker. En deler golvet i et ytre randfelt med 1 m bredde fra grunnmuren og et indre randfelt med 5 m bredde innenfor det ytre randfelt. Fig. 1.10. Innenfor dette randfelt kreves ikke varmeisolasjon av golvet. For ikke oppvarmete golv skal k-verdien være 0,40 kcal/m<sup>2</sup>h°C eller bedre.

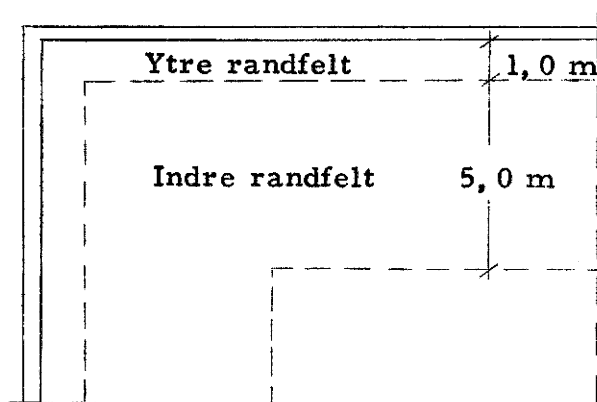


Fig. 1.10. Feltinndeling av golv direkte på grunn.

For beregning av varmegjennomgangstall for golv direkte på grunn kan en regne med at grunnen har en viss varmegjennomgangsmotstand. I tabell 1.9 er angitt varmegjennomgangsmotstanden for forskjellige jordtyper, og i disse verdier er medregnet varmeover-

gangsmotstanden  $m_1$ . For å kunne regne med de verdier som er oppgitt for jordarter, må jordlaget under golvet være 1,2 m tykt, og grunnvannstanden må vanligvis ikke nå opp til dette jordlaget. Hvis det ligger fjell nærmere golvet enn 1,2 m, må det interpoleres for de verdier som gjelder for fjell og de som gjelder for vedkommende jordart. Hvis det ikke er undersøkt hva grunnen består av eller hvis grunnvannstanden ligger nærmere golvet enn 1,2 m, må det regnes med de verdier som gjelder for fjell.

Drenslag av materiale som ikke er følsomt for fuktighet, for eks. grus, singel eller kult, kan medregnes i golvkonstruksjonens varmegjennomgangsmotstand. For et minst 15 cm tykt drenslag av grus, singel eller kult antas varmegjennomgangsmotstanden å være  $0,2 \text{ m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}/\text{kcal}$ .

Tabell 1. 9. Grunnens <sup>gjennomgangs-</sup>varmemotstand i  $\text{m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}/\text{kcal}$

Jordtype	Ytre randfelt 1,0 m bredt	Indre randfelt 5,0 m bredt
Leire (tørr sand og grus, jfr. anm.)	1,1	2,2
Silt	0,8	1,4
Sand x)	0,8	1,4
Grus x)	0,8	1,4
Morene og leiret morene	0,8	1,4
Fjell	0,6	1,0

x) Om grunnen består av sand eller grus og grunnvannets overflate ikke ligger høyere enn 2,5 m under golvet, kan det regnes med samme varmemotstand som oppgitt for leire.

#### Beregning av nødvendig varmeisolasjon.

Hvor godt vi skal isolere en bygning beror på flere forhold. Bygningsforskriftene stiller visse krav til den minimumsisolasjon en bygning skal ha, og dette vil som regel være så svak isolasjon at det av økonomiske og andre grunner er årsak til å isolere vesentlig bedre. xx)

I bygninger som varmes opp med et varmeanlegg, vil det være

xx) (NS 3031. Beregning av bygningers varmebehov.)



mulig å beregne den mest økonomiske isolasjon når en tar hensyn til kapitalkostnader og oppvarmingskostnader, og en velger da den isolasjon som gir de minste årlige kostnader.

Bygninger for husdyr og avling blir oftest varmeisolert så godt at en normalt kan holde den ønskete romtemperatur uten varmetilførsel fra et varmeanlegg. For å kunne beregne den nødvendige varmeisolasjon for et husdyrrom må en kjenne den utvendige dimensjonerende lavtemperatur og husdyras varmeproduksjon og vannedampproduksjon. Den fri varmeproduksjon skal kunne dekke varmetap ved ventilasjon og ved varmegjennomgang gjennom konstruksjonene. Denne såkalte varmebalanseberegning blir det gjort nærmere rede for under fagdelen Jordbrukets driftsbygninger.

Det kan også være nødvendig med en viss varmeisolasjon av praktiske, tekniske og hygieniske grunner bl. a. for å unngå overflatekondens. Beregning av nødvendig varmeisolering for å unngå overflatekondens vil bli behandlet i del 3, Fuktighet.

### Økonomisk varmeisolering.

For å kunne treffe et gunstig valg av bygningskonstruksjon, isolasjonsmateriale og optimal tykkelse på varmeisolasjonssjiktet kan det være riktig å utføre enkle økonomiske beregninger.

#### Beregning av isolasjonsenhetspris.

I de fleste tilfelle står en overfor valg mellom flere materialer til varmeisolering av en konstruksjon. De fleste materialer kombinerer flere egenskaper, og foruten varmeledningstallet må vi kjenne volumvekt, mekaniske egenskaper, motstandsevne overfor fuktighet og branntekniske egenskaper. Materialets isolasjonsenhetspris er produktet av varmeledningstallet og pris pr. m<sup>3</sup>, og den kan gi et holdepunkt når valget står mellom materialer som har tilsvarende tekniske og fysiske egenskaper. I tabell 1.10 er satt opp en oversikt over en del bygningsmaterialer, deres varmeledningstall, hvilke tykkelser de må ha for å gi lik varmeisolasjon og isolasjonsenhetsprisen.

Tabell 1. 10. Sammenlikning av isolasjonseffekt og isolasjonsenhetspris for en del bygningsmaterialer. Priser fra fabrikk tilkjørt byggeplass i Oslo. Uten oms. avg. April 1966.

Materiale og type	kg/m <sup>3</sup>	Varmeledn. tall kcal/mh <sup>o</sup> C	Tykkelse for lik isolasjon cm	Pris pr. m <sup>3</sup> kr.	Pris pr. isolasj. enhet kr.
<u>Fyllmaterialer</u>					
Steinull, elastiske matte	35	0,035	10	33,50	1,17
" " "	25	0,035	10	30,00	1,05
" golvfilt	25	0,035	10	22,00	0,77
Glassvatt, veggfilt	45	0,035	10	28,50	1,00
" golvfilt	30	0,035	10	21,40	0,75
Glassull, elastisk matte	12	0,035	10	32,80	1,15
Mineralull, sydde matter, 50 mm	60	0,035	10	57,00	2,00
Leca perler, 10-20	350	0,085	24	65,00	5,53
<u>Platematerialer</u>					
Rupanel	450	0,15	43	ca. 420,00	63,00
Trefiberplater, porøse	300	0,060	17	300,00	18,00
Ekspandert polystyren	20	0,030	8,6	170,00	5,10
Skumglass	145	0,045	13	ca 600	27,00
Treullsementplater x)	400	0,080	23	ca 120	9,60
<u>Bærende materialer</u>					
Reisverkplank	450	0,15	43	ca 400	60,00
Gassbetong, stav og plater	400	0,12	34	125,00	15,00
" blokker	500	0,14	40	108,00	15,12
Leca lettbetong	700	0,18	51	132,00	23,26

x) Ved faststøping av treullsementplater blir den effektive tykkelse redusert med 0,5 - 1,0 cm.

Det er naturlig å dele materialene inn i tre grupper. Fyllmaterialene har varmeisolasjon som eneste funksjon, og de må legges inn i et hulrom i konstruksjonene. Platematerialene kombinerer isolasjonsevne og mekanisk styrke slik at de kan støpes fast, spikres fast eller legges inn i en laminert konstruksjon. De bærende materialer kan brukes til konstruksjon av varmeisolerte vegger, dekker etc.

Beregning av økonomisk varmeisolering.

For vurdering av økonomien ved valg mellom forskjellige bygningskonstruksjoner og forskjellig tykkelse på isolasjonssjikt kan en beregne de årlige kostnader for de forskjellige alternativ og sammenlikne disse. Det er ikke nødvendig å se på økonomien for hele bygningen under ett. Vi kan som regel vurdere økonomien for den enkelte konstruksjonsdel for seg så fremt en tar hensyn til at de konstruksjoner valget står mellom passer med byggemåten forøvrig.

De totale årlige kostnader omfatter også kostnader uten direkte sammenheng med varmeisoleringen som de bærende deler og reparasjon og vedlikehold. For veggkonstruksjoner o.l. kan en beregne årskostnaden med ligningen

$$K_{\bar{A}} = p K_b + p_1 K_u + p \Delta d K_r + k 0,024 G K_v$$

hvor

$K_{\bar{A}}$  = total årskostnad (kr/m<sup>2</sup> år)

$K_b$  = byggeutgift (kr/m<sup>2</sup>)

$K_u$  = vedlikeholdsutgifter (kr/m<sup>2</sup>)

$K_r$  = romutgift pr. cm endring av veggtykkelsen (kr/cm m<sup>2</sup>)

$K_v$  = varmepris (kr/Mcal)

$\Delta d$  = veggtykkelse i forhold til en viss normaltykkelse (cm)

$p$  = annuitet til renter og amortisasjon for bygge- og romkostnader ( % )

$p_1$  = annuitet til vedlikeholdskostnader ( % )

$G$  = graddagstall (graddager/år)

$k$  = varmegjennomgangstall (kcal/m<sup>2</sup> h<sup>o</sup>C)

Når valget står mellom konstruksjoner hvor romutgifter og vedlikeholdskostnader ikke blir påvirket av valget, f. eks. valg mellom vinduer med enkelt eller dobbelt glass, kan en forenkle ligningen slik

$$K_{\bar{A}} = p K_b + k 0,024 G K_v \text{ (kr/m}^2 \text{ år)}$$

Antall graddager pr. år er summen av den midlere daglige temperaturdifferans mellom temperaturen inne og utetemperaturen for hele fyringssesongen. Det er regnet med at fyringssesongen

begynner når middeltemperaturen om høsten er  $11^{\circ}\text{C}$  eller lavere og at den slutter når middeltemperaturen om våren er  $9^{\circ}\text{C}$ , og det er regnet med en gjennomsnittlig romtemperatur på  $17^{\circ}\text{C}$ .

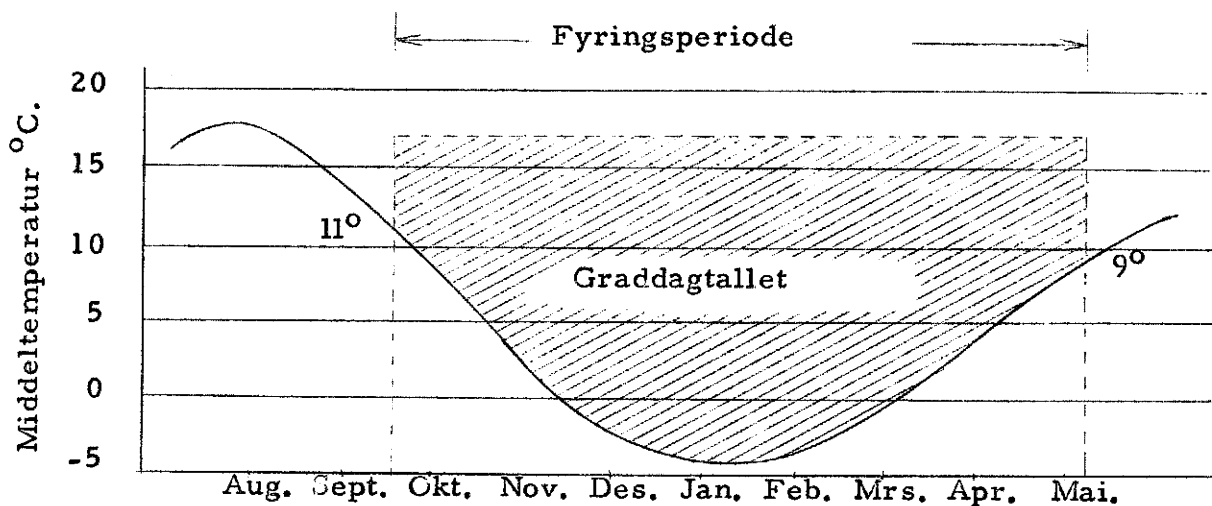


Fig. 1.11. Temperaturfordelingen i fyringsperioden.

Tabell 1.11. Graddagtall (Etter T. Werner Johannessen)

Oslo (Blindern)	3.854	graddager
Kristiansand S	3.206	"
Bergen	3.031	"
Trondheim	3.855	"
Lillehammer	4.772	"
Røros	5.982	"
Bodø	4.209	"
Kirkenes	5.891	"
Kautokeino	6.664	"

Hvis vi ser bort fra romkostnad og vedlikeholdskostnad, kan vi på en enkel måte finne en ligning til å beregne den optimale tykkelse av isolasjonslaget.

Vi har da ligningen:

$$K_{\bar{A}} = p l K_i + \frac{\lambda}{l} 0,024 G K_v \text{ (kr/m}^2 \text{ år)}$$

hvor

$K_{\bar{A}}$  = total årskostnad (kr/m<sup>2</sup> år)

$K_i$  = isolasjonslagets pris (kr/m<sup>3</sup>)

$l$  = isolasjonslagets tykkelse (m)

$p$  = annuitet til renter og amortisasjon (%)

$\lambda$  = isolasjonslagets varmeledningstall (kcal/m h<sup>o</sup> C)

$K_v$  = varmepris (kr/Mcal)

$G$  = graddagstall (graddager/år)

Minimum årskostnad kan bestemmes ved derivasjon av funksjonen m. h. p. isolasjonslagets tykkelse  $l$ , og vi setter den deriverte lik null.

$$\frac{d K_{\bar{A}}}{d l} = p K_i - \frac{\lambda}{l^2} 0,024 G K_v = 0$$

Vi løser ligningen m. h. p.  $l$  og får da et uttrykk for den optimale isolasjonstykkelse

$$l = \sqrt{\frac{\lambda 0,024 G K_v}{p K_i}} \quad (\text{m})$$

Isolasjonslagets pris omfatter utgifter til varmeisolasjonsmaterialer, materialer til ekstra tykkelse på stendere, spikerslag etc., arbeidsutgifter, administrasjonsutgifter osv. beregnet pr. m<sup>3</sup>.

Varmeprisen (øre/Mcal) kan vi beregne når vi kjenner brensløts brennverdi pr. enhet, brenselpris pr. enhet og fyringsanleggets virkningsgrad. Ved en slik beregning tar vi ikke hensyn til fyringsanleggets kapitalkostnader og vedlikehold og arbeidet med fyringen. Når det er spørsmål om å vurdere økonomien ved å øke varmeisolasjonen, er det forsvarlig å regne med den rene varmeprisen. Tabell 1.12 gir de beregnede varmepriser for de vanligste brenselstyper. Fyringsanleggenes virkningsgrad varierer med varmeanleggets størrelse og utnyttingsgrad, og det er regnet med middelveier. For olje nr. 2 gjelder det et større sentralvarmeanlegg.

Tabell 1.12. Brennverdi, pris og varmepris for forekjellige brenselstyper.

Brensel	Brennverdi kcal/ enhet	Pris kr/enhet	Fyrings- anleggets virkn. grad	Varme-pris	
				øre/ Mcal	øre/ kwh
Skogsved	3 000 000/favn	140, -/favn	0,65	7,2	6,2
Koks	6 700/kg	0,30/kg	0,70	6,4	5,5
Petroleum	8 140/liter	0,40/liter	0,75	6,5	5,6
Olje nr. 1	8 650/liter	0,30/liter	0,65	5,3	4,6
Olje nr. 2	8 888/liter	0,28/liter	0,75	4,2	3,6

Litteratur.

- Bygg. 3. uppl. Del I, Kap. 143. Stockholm 1961. Del IV. Kap. 611. Stockholm 1964.
- Brown, S.: Ytterväggars varmeisoleringsförmåga. St. nämnd för byggforskning. Handl. nr. 36. Stockholm 1959.
- Finne, E.: Det kalde taks funksjon. NBI. Særtrykk nr. 77. Oslo 1963.
- Granum, H.: Varmeisolering. Fuktighet. Forelesninger ved NTH. Stensiltrykk. Trondheim.
- Hagen, H.: Hvilken oppvarmingsmetode er billigst? NBI. Rapport nr. 31. Oslo 1960.
- Henriksson, R.: Värmeförluster genom golv lagda direkt på mark. SFL. Meddel. nr. 45. Lund 1959.
- Henriksson, R.: Värmeförluster genom väggar provade under praktiska förhållanden. SFL. Meddel. nr. 47. Lund 1959.
- Henriksson, R.: Värmeförluster genom väggar provade under praktiska förhållanden II. SFL. Meddel. nr. 58. Lund 1963.
- Höglund, I.: Värmeförluster i småhus. Byggforskningen. Handl. nr. 43. Stockholm 1963.
- Höglund, I.: Högisolerande ytterväggars värmemotstånd. Byggforskningen. Handl. nr. 41. Stockholm 1963.

- Höglund, I. och Hansson, T.: Inre konvektion i byggnadskonstruktio-  
tioner, - några studier spesielt av isolering med  
mineralull. Byggforskningen. Rapport nr. 106.  
Stockholm 1964.
- Johannesen, T. Werner: Varmevekslingen i bygninger og klimaet.  
NBI. Rapport nr. 21, 256 s. Oslo 1956.
- Jørgen, G. Ø.: Hus i kaldt klima. NBI. Særtrykk nr. 24, Oslo 1957.
- Lyng, O.: Värmetransport genom fönster. Byggforskningen.  
Rapport 15/65. Stockholm 1965.
- Pratt, A. W.: Some Observations on the Variation of the  
Thermal Conductivity of Porous Organic Solids  
with Moisture Content. Build. Res. Sta.  
Res. ser. 30. Garston, England.
- Tveit, A.: En metode til måling av varmegjennomgangstall  
for vegger og bjelkelag. NBI. Rapport nr. 8.  
Oslo 1953.
- Tveit, A.: Klimaets innflytelse på betonghulsteinsveggers  
varmeisolasjon. NBI. Rapport nr. 30. Oslo 1959.
- Tveit, A.: Undersøkelse av varmegjennomgang i vegger.  
NBI. Særtrykk nr. 38, Oslo 1959.
- Tveit, A.: Klimaets og utførelses innflytelse på varme-  
gjennomgangen i lettbetongvegger. NBI. Særtrykk  
nr. 52. Oslo 1961.

Litteraturhenvisn. forts.

- Bergschiöld, B och Jansson, I.: Frostisolering. Handling nr. 112, Institutionen för lantbrukets byggnadsteknik, Lantbrukshögskolan, Lund. 1968.
- Elmroth, A. och Höglund, I.: Analys av icke stationära värmeströmsförhållanden för plant tak med RC-nätverksmetod. Byggmästaren nr. 11, 1966, s. 382-394.
- Gjellsvik, T.: Randeffekter og andre termiske forhold ved vinduer med forseglete ruter. NBI, særtrykk 129. Oslo 1966.
- Granum, H. og Aschehoug, Ø.: Bygningsfysikk. Universitetsforlaget, Oslo 1969. 337 s.
- Göstring, B.: Plattapparat för bestämning av värmeledningsförmåga hos byggnadsmaterial. Byggforskningen. 16/67. Stockholm. Særtrykk av VVS 3:1967.
- Kvifte, G.: Termodynamikk. Fysisk Institutt, NLH, Vollebakk 1965. 128 s.
- Poljak, I.: Konvektionsandel i värmetransporten genom en mineralullskiva. Byggmästaren 48:8, 1969. s. 36-40.
- Schødt, R. og Blegen, K.: Wall and roof design for hot climates. NBI særtrykk 147. Oslo 1967. 22 s.



## Del 2. LUFTSTRØMNINGER.

Når det er en lufttrykkdifferans mellom de to sider av en konstruksjon vil luft kunne strømme gjennom porer, sprekker og fuger. Denne såkalte påtvungne konveksjon kan føre til vesentlig øket varmetap og kan medvirke til vandring av fuktighet i damp- og væskefase. Årsakene til lufttrykkdifferansene kan være vind, temperaturdifferanse og ventilasjon.

### Vind.

Når vinden treffer en bygning, stues luften opp på vindsiden og gir et overtrykk, mens det på lesiden blir et undertrykk i forhold til lufttrykket inne i huset. Teoretisk kan overtrykket på en flate perpendikulært på vindretningen beregnes av formelen

$$p = \frac{v^2}{16}$$

hvor

$p$  = overtrykket, mm V.S. eller  $\text{kg/m}^2$

$v$  = vindhastighet, m/sek.

Vindstyrken varierer sterkt. Meteorologisk institutt fegner med at den midlere lufthastighet over en 10 min. periode varierer med anslagsvis  $\pm 50\%$ . Variasjonen i overtrykket vil da svare til de skraverte områder på fig. 2.1. Fig. 2.2 illustrerer trykkforholdene rundt en lukket bygning utsatt for vind.

### Temperaturdifferanser.

Når lufttemperaturen inne i et hus er høyere enn ute, vil det også bli en forskjell i lufttrykket over konstruksjonene på grunn av at varm luft er lettere enn kald. Fig. 2.3 viser skjematisk framstilling av trykkforholdene i et rom med høyere lufttemperatur enn ute. I den øvre del av rommet vil det være overtrykk, og den nedre del undertrykk.

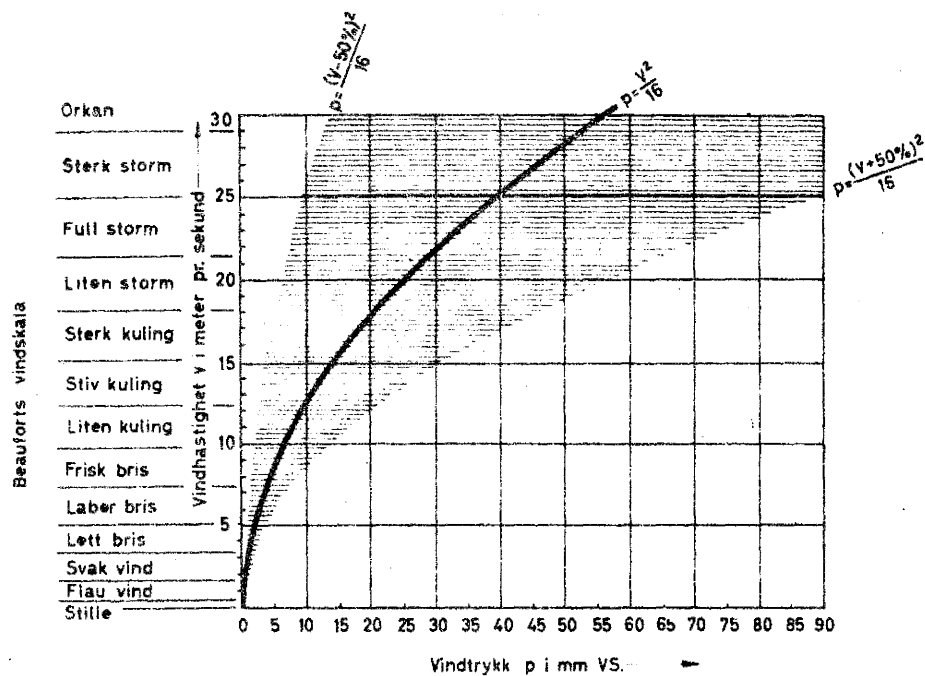


Fig. 2.1. Diagram for vindtrykket mot en yttervegg som funksjon av vindhastigheten.

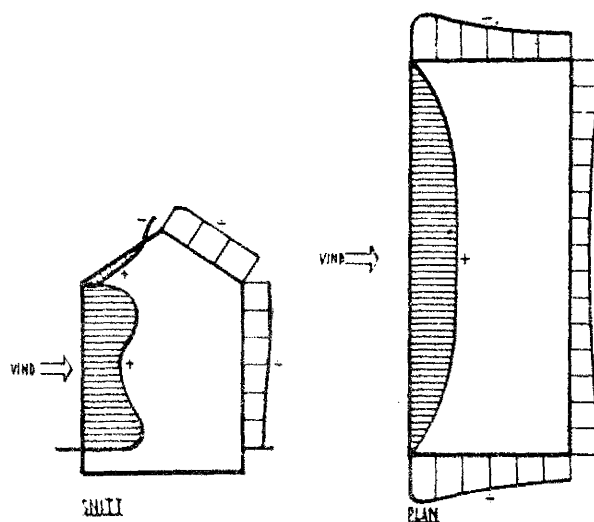


Fig. 2.2. Trykkforholdene på begrensingsflatene av en lukket bygning utsatt for vind.

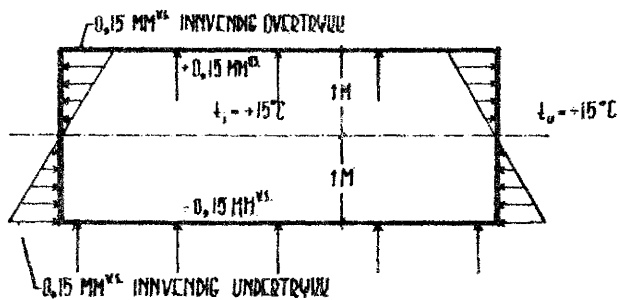


Fig. 2.3. Trykkforholdene i et oppvarmet rom med nøytralsjiktet i rommets halve høyde.

Luftrykkdifferansen i forhold til nøytralsjiktet som for et uventilert rom ligger i rommets midtakse, kan beregnes etter formelen

$$\Delta p = 273 \gamma \left( \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_i} \right) h_o$$

hvor

- $\Delta p$  = trykkdifferansen til nøytralsjiktet (mm VS)  
 $\gamma$  = 1,293 kg/m<sup>3</sup>, tørr lufts spesifikke vekt ved 0°C og 760 mm Hg  
 $t_i$  = temperatur inne, °C  
 $t_u$  = " ute, °C  
 $T_u$  = 273 +  $t_u$  absolutt temperatur, °K  
 $T_i$  = 273 +  $t_i$  - " - °K  
 $h_o$  = høyde fra nøytralsjiktet, m

### Ventilasjon.

I rom med ventilasjon vil det kunne være et over- eller undertrykk i forhold til ute, avhengig av det ventilasjonssystem som blir brukt. I oppholdsrom er det regnet som fordelaktig med overtrykksventilasjon da en derved unngår trekk fra vinduer etc. Men som vi senere skal komme tilbake til, vil overtrykksventilasjon kunne øke faren for fuktoppsamling i konstruksjoner i rom med høy luftfuktighet. I husdyrrom er det vanlig med undertrykksventilasjon med avtrekkspipe eller elektriske vifter. En kan tilnærmet sette undertrykket til 0,2 - 0,5 mm VS ved rommets midtakse. Nøytralsjiktet vil da ligge nærmere taket, og ved sterk ventilasjon kan vi få undertrykk over alle begrensingsflater.

### Luftgjennomgang.

Luftgjennomgangen pr. flateenhet gjennom en konstruksjon kan beregnes av formelen

$$Q = L (\Delta p)^n$$

hvor

$Q$  = gjennomstrømmet luftmengde,  $m^3/h$

$L$  = konstruksjonens luftgjennomgangstall,  $m^3/h$  mm VS

$\Delta p$  = totalt trykkfall gjennom konstruksjonen, mm VS

$n$  = koeffisient som avhenger av strømningsarten.

For turbulent strømming er  $n = 0,5$  for laminær strømming er  $n = 1,0$ .

### Luftgjennomgang i bygningsmaterialer.

Målinger har vist at for vanlige porøse bygningsmaterialer er luftgjennomgangen proporsjonal med trykkdifferansen, og det kan uttrykkes ved det såkalte luftgjennomgangstall,  $\frac{m^3}{m^2 h mm VS}$

De materialer som har størst interesse, er ulike plate-typer, papptyper og folier. I paneler vil sprekene som regel føre til stor luftgjennomgang, og de fleste isolasjonsmaterialer vil ha åpen porestruktur og vil vanskelig kunne monteres slik at de effektivt vil kunne hindre luftgjennomgang.

Tabell 2.1. Luftgjennomgangstall for en del bygningsmaterialer. (Omregnet etter Tveit, NBI Rapport 45, 1966)

Materiale	Tørr vekt $kg/m^3$	Tykkelse mm	Luftgj.gangstall $\frac{m^3}{m^2 h mm VS}$
Sponplate	560	11,6	0,078
Trefiberplate, porøs	215	11,0	1,24
Trefiberplate, panelplate	610	12,1	0,027
Trefiberplate, hard	870	3,4	0,002
Trefiberpl., porøs, asfaltimpr.	280	10,8	0,60
Trefiberpl., hard, oljeherdet	1040	2,8	0,0012
Cellulosepapp, 0,5 $kg/m^2$		0,5	2,0
Asfaltimpregnet papp, 0,6 $kg/m^2$		0,65	0,004
Linoleum, 2,1 $kg/m^2$		1,7	0,0015
Ekspandert polystyren	17,2	15,1	0,0004

### Luftgjennomgang i bygningskonstruksjoner.

I en bygningskonstruksjon vil tettheten mot luftgjennomgang ofte i større grad avhenge av andre faktorer enn selve materialets tetthet. Det er særlig fuger, skjøter, spikerhull og skader som vil forårsake luftgjennomgang.

Norges byggforskningsinstitutt har gjort en rekke forsøk med luftgjennomgang i bindingsverkskonstruksjoner. Som det framgår av sammenstillingen i tabell 2.2, er det særlig stor betydning at overlappskjøter blir effektivt klemt med lekter og spikring mot et underlag. I en vegg med bjelkelagsopplagring, er det meget vanskelig å unngå luftlekkasjer da bjelkene som regel må bryte gjennom det innvendige papplaget. Fig. 2.4 viser luftgjennomgang i veggfelt med bjelkelagsåpning. Kurvene merket a, b og c viser luftgjennomgang i veggfelt hvor den utvendige pappen har åpne omleggsskjøter og hvor det er gjort forsøk på å tette mellom bjelkehodene fra innsiden. Kurve d viser luftgjennomgangen i tilsvarende veggfelt uten bjelkelagsåpning.

Tabell 2. 2. Beregnete luftgjennomgangstall fra feltforsøk og materialsforsøk.

Materialer	Luftgjennomgangstall $\frac{m^3}{m^2 \text{ h mm VS}}$	
	Rene materialsforsøk	Feltforsøk m/skjøter etc.
20 mm porøs fiberplate	0,34	0,38
20 " " plate m/tapet	0,086	0,20
Asfaltbelagt papp (800 g/m <sup>2</sup> ) med overlappskjøter i isolasjonsfelt	0,0015	2,65 (3000 ganger større)
Samme papp m/klemte overlappskjøter	0,0015	0,057 (40 ganger større)
Kraftpapp 600 g/m <sup>2</sup> uimpr. m/klemte skjøter	0,1	0,21 (2 ganger større)

Ved en undersøkelse av lufttetthet av fuger rundt trevinduer ble prøvet dytting med forskjellige materialer og med forskjellig bredde på dyttefugen. Steinull viste seg å <sup>gi</sup>vesentlig større lufttetthet enn vanlig dyttestry. Det viste seg også å ha stor betydning å redusere bredden på fugen mest mulig, gjerne til 5-10 mm. Det ble også prøvet å tette fugen rundt vinduer i bindingsverksvegger med trelister med og uten papp. Særlig god tetthet ble oppnådd ved å føre veggpappen inn på vinduskarmen og klemme denne med list. Fig. 2. 5 viser luftgjennomgangen for vinduer med og uten dytting. Som en ser oppnår en mere ved å tette fugen med lektet papp enn med dytting. En bør likevel ikke sløyfe dytting av fugen for det tilfelle at pappen skulle briste.

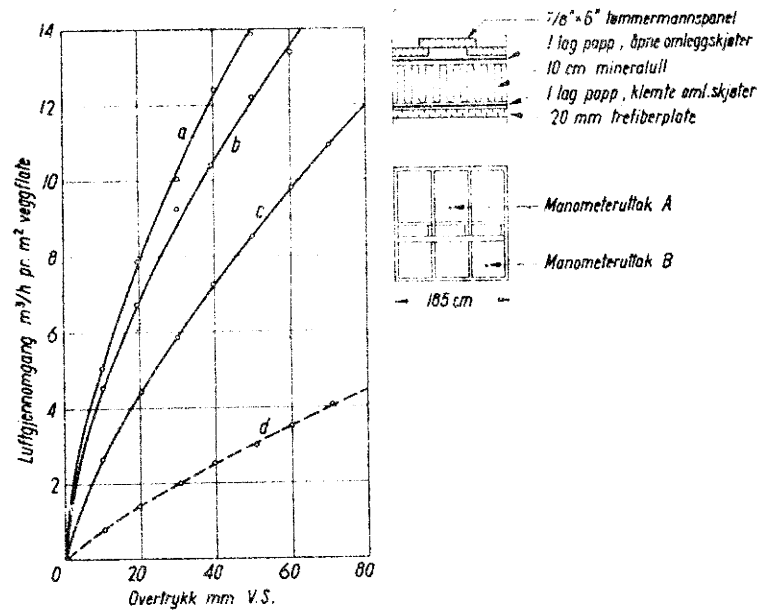


Fig. 2.4. Luftgjennomgang i veggfelt med bjelkelags-åpning. Den utvendige papp har åpne omleggs-skjøter. a, b og c viser luftgjennomgang hvor det er gjort forsøk på å tette mellom bjelkehodene. d viser luftgjennomgang i veggfelt uten bjelkelags-åpning.

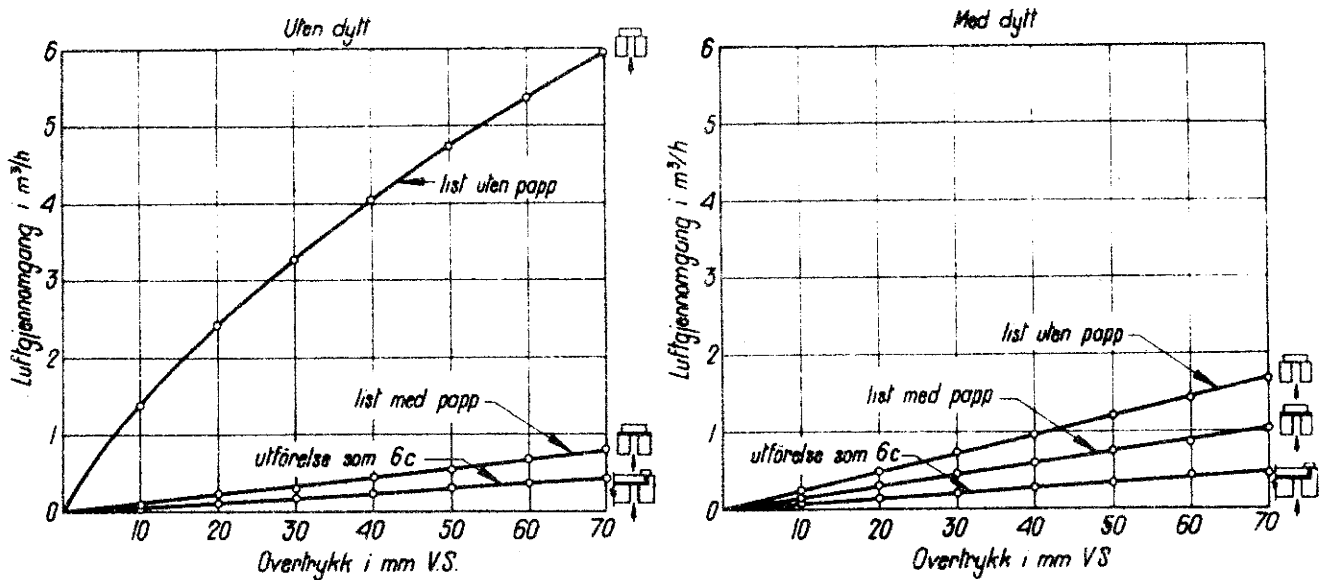


Fig. 2.5. Luftgjennomgang i fuge rundt trevinduer i bindingsverksvegger.

Litteratur.

Birkeland, Ø. og Wigen, R.: Vindusundersøkelser. Fuge mellom karm og vegg. NBI. Rapport nr. 15. Oslo 1955.

Finne, E.: Kondensering på grunn av luftgjennomgang i tak. NBI. Særtrykk nr. 84. Oslo 1964.

Granum, H., Svendsen, Sven D. og Tveit, A.: Lette treveggers vindtetthet. NBI. Rapport nr. 7. Oslo 1954.

Torp, A. og Græe, T.: Konveksjonsstrømninger i isolasjonsmaterialer. Inst. for bygningsteknikk, Særtrykk nr. 15. Vollebekk 1956.

Torp, A. og Græe, T.: Luftstrømningers betydning for fuktighetsvandring og kondensasjon i bindingsverkskonstruksjoner. Inst. for bygningsteknikk, Særtrykk nr. 42 og melding nr. 15. Vollebekk 1961.



### Del 3. FUKTIGHET.

Fuktighet i form av is, snø, fritt eller bundet vann eller vanndamp er årsak til en lang rekke problemer i bygningsteknikken. De vanligste fuktkilder er nedbør, grunnfukt, vannsøl eller lekkasjer og vanndamp fra utånding fra mennesker og dyr, matlaging, vasking eller fordamping fra fuktige flater.

I det følgende skal vi i første rekke behandle fuktvandring og kondensasjon som følge av høyt vanndampinnhold i luft og oppfukting på grunn av slagregn. I konstruksjonslæren vil senere bli behandlet hvordan en i praksis beskytter seg mot grunnfukt og nedbør ved drenering, takteking osv.

Vann forekommer som fast stoff, væske og gass, og vannets aggregattilstand avhenger av trykk og temperatur. Vi har særlig interesse av å kjenne hvordan vann er bundet til porøse materialer og hvordan vannet transporteres eller vandrer i luft og i materialer.

Vanndamp er en av de gassene luften består av, og de viktigste andre gasser er surstoff, vannstoff og kvelstoff. Hver gass utøver sitt eget partialtrykk avhengig av den gassmengde som er til stede, og summen av trykkene utgjør det totale lufttrykk. Den maksimale mengde vann luften kan inneholde som vanndamp er bestemt av temperaturen, og varm luft kan inneholde mere vanndamp enn kald luft. Når luften inneholder den maksimale mengde vanndamp, sier vi at luften er mettet, og i tabell 3.1 og i Moliere-diagrammet i fig. 3.1 er gitt vanndampens metningstrykk i mm Hg ved forskjellige temperaturer.

Avkjøles vanndampmettet luft vil vi få kondens i form av tåke, regn eller kondensvann på kalde flater.

For en ikke vanndampmettet luft angir vi fuktighetsgraden ved forholdet mellom vanndampens partialtrykk og vanndampens metningstrykk ved den aktuelle temperatur. Dette uttrykkes som regel i prosent og betegnes som luftens relative fuktighet.

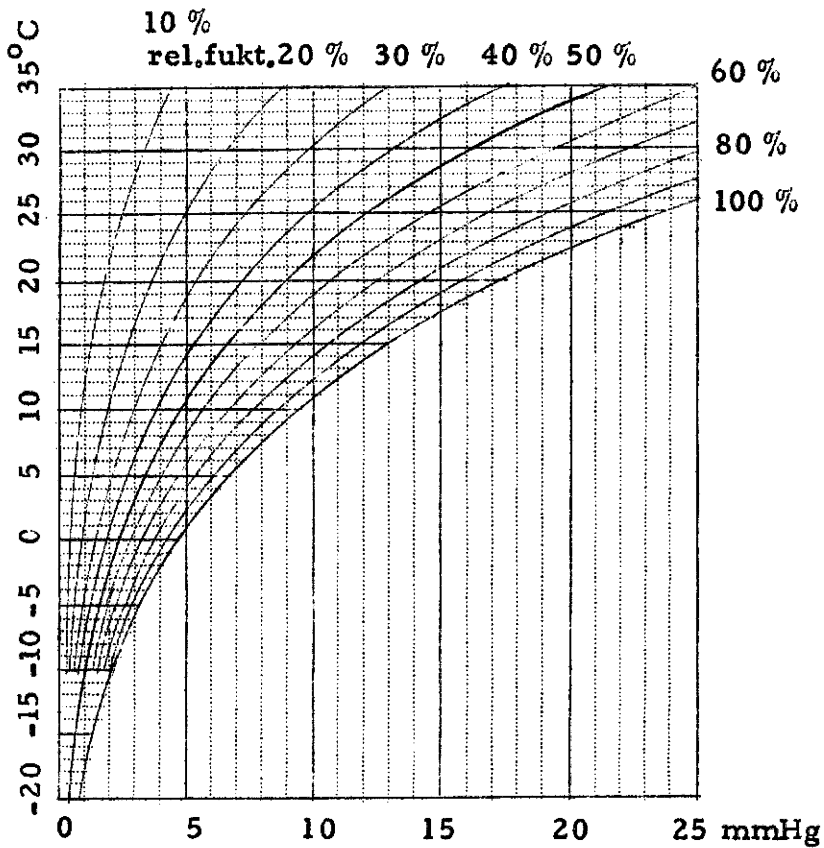


Fig. 3.1.  
Molliere-diagram for  
fuktig luft

Tabell 3.1. Vanndampens metningstrykk ved forskjellige temperaturer ved barometertrykk 760 mm Hg

$t$ °C	$p$ mm Hg	$t$ °C	$p$ mm Hg	$t$ °C	$p$ mm Hg
- 25	0,48	- 5	3,01	15	12,8
- 24	0,53	- 4	3,28	16	13,6
- 23	0,58	- 3	3,57	17	14,5
- 22	0,64	- 2	3,88	18	15,5
- 21	0,71	- 1	4,22	19	16,5
- 20	0,78	+ 0	4,58	20	17,5
- 19	0,85	1	4,93	21	18,7
- 18	0,94	2	5,29	22	19,8
- 17	1,03	3	5,69	23	21,1
- 16	1,13	4	6,10	24	22,4
- 15	1,24	5	6,54	25	23,8
- 14	1,36	6	7,01	26	25,2
- 13	1,49	7	7,51	27	26,7
- 12	1,63	8	8,05	28	28,3
- 11	1,78	9	8,61	29	30,0
- 10	1,95	10	9,21	30	31,8
- 9	2,13	11	9,84	31	33,7
- 8	2,33	12	10,5	32	35,7
- 7	2,54	13	11,2	33	37,7
- 6	2,77	14	12,0	34	39,9

### Beregning av overflatekondens.

På grunn av varmeovergangsmotstanden vil innsiden av en yttervegg ha noe lavere temperatur enn luften i rommet. Hvis veggflaten blir kaldere enn luftens doggpunkt, vil fuktighet kondenseres på flaten. Vi har tidligere satt opp ligningen for temperaturfallet for et sjikt med en viss varmegjennomgangsmotstand, nemlig

$$t_1 - t_2 = m_1 k (t_i - t_u) \quad \text{og da er}$$

$$t_i - t_v = m_1 k (t_i - t_u)$$

hvor  $t_v$  = veggens overflatetemperatur, °C.

Vi vil beregne hvilken  $k$ -verdi en konstruksjon må ha for at det ikke skal bli overflatekondens, løser vi ligningen m. h. p.  $k$ , og vi får

$$k \leq \frac{t_i - t_d}{m_1 (t_i - t_u)}$$

hvor  $t_d$  er duggpunkttemperaturen for luften inne i rommet.

Hvis vi har en konstruksjon med mindre god isolasjonsevne f. eks. et vindu, og vi ønsker å vite ved hvilken temperatur ute det vil være fare for overflatekondens eller isdannelse på vinduet, kan vi løse (3.1.) m. h. p.  $t_u$ , og vi får

$$t_u = t_i - \frac{t_i - t_v}{k m_1}$$

Vil vi undersøke kondensfare, setter vi  $t_v = t_d$ , og vil vi undersøke når det blir rim på vinduet, setter vi  $t_v = 0$  °C.

### Fuktbinding til porøse materialer, fuktlikevekt.

Materialer som kommer i kontakt med vann eller vanndamp vil ta opp større eller mindre vannmengder. I materialene vil vannet bindes kjemisk, fysikals<sup>k</sup> og mekanisk. Kjemisk bundet vann, f. eks. krystallvann, er så sterkt fastholdt at det er uten interesse for fuktvandring. Fysikalsk og mekanisk bundet vann forekommer i materialenes mikro- og makroporer og på materialoverflater. Og storparten av vannet er så løst bundet at det lett kan forskyves i materialene

Et materiale som er i fuktig luft, vil ta opp fuktighet (sorpsjon) eller avgir fuktighet (desorpsjon), avhengig av luftens relative fuktighet og materialets fuktinnhold. Det vil etter en tid innstille seg likevektsfuktighet ved en konstant relativ fuktighet. Fuktisotermer illustrerer likevektsfukt for vedkommende materialer ved forskjellig relativ fuktighet.

Likevektsfuktigheten ved sorpsjon (oppfukting) er som regel lavere enn ved desorpsjon (avfukting). Dette fenomen kalles hysteresese og har sammenheng med fuktbindingen i materialet. Fig. 3.2. Blant annet antar en at ved sorpsjon fylles kapillærene ved adsorpsjon på poreveggene, mens desorpsjon delvis skjer ved fordunstning fra menisker. Andre teorier går ut på at det skyldes adsorberte luftmolekyler, spesielle poreformer som holder på vannet eller at likevekt ennå ikke er oppnådd.

### Dampdiffusjon

Når det er en forskjell i vanndampens partialtrykk på de to sider av et materialsjikt, vil vanndamp diffundere fra den siden med høyest vanndamptrykk til den med det laveste. Den diffunderte vanndampmengde avhenger av forskjellen i vanndamptrykk, materialsjiktets tykkelse og materialets gjennomslippelighet for vanndamp. Da vanndampens partialtrykk som regel er størst på den varme side av en konstruksjon, vil vanndampdiffusjonen foregå fra den varme mot den kalde side. For en-dimensjonal diffusjon under stasjonære betingelser kan vanndampgjennomgangen i et materialsjikt bestemmes på tilsvarende måte som en varmestrøm ved formelen

$$G = F \frac{D}{d} (P_1 - P_2)$$

hvor

$G$  = diffundert vanndampmengde (g/h)

$F$  = flatens areal ( $m^2$ )

$D$  = materialets dampdiffusjonstall, permeabilitet, ( $\frac{g \text{ cm}}{m^2 \text{ h mmHg}}$ )

$P_1$  og  $P_2$  er vanndampens partialtrykk på de to sider av materialsjiktet (mm Hg)

$d$  = materialsjiktets tykkelse (cm)

Forholdet er imidlertid mere komplisert enn ved varmegjennomgang. Dampdiffusjonstallet for et materiale er ikke konstant, men avhenger av temperatur, materialet fuktighetsinnhold, dvs. den relative fuktighet over materialene. Fig. 3.3 viser i prinsippet hvordan dampgjennomgangstallet for en vanlig bygningspapp avhenger av den relative fuktighet. Dampgjennomgangen øker til det mangedobbelte når den relative fuktighet nærmer seg 100 %. Det antas at dette fenomenen skyldes at fuktigheten ikke bare transporteres i dampform gjennom materialets porer, men også delvis på andre måter.

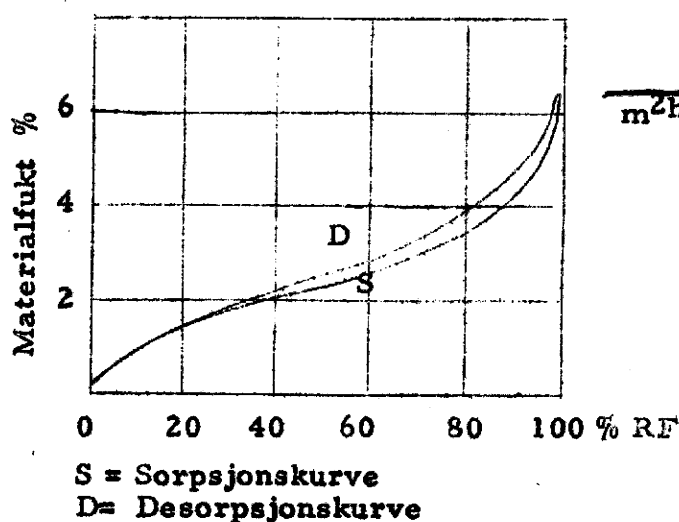


Fig. 3.2. Fuktisotermer.

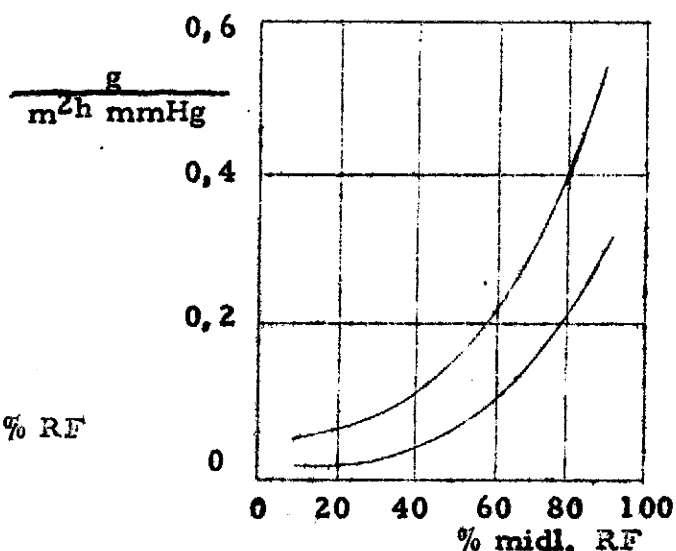


Fig. 3.3. Dampgjennomgangstall for impregnert papp ved forskjellig relativ fuktighet. (Babbit).

Dampdiffusjonstallene er bestemt ved en og samme temperatur på de to sider av materialsjiktet. Ved en temperaturdifferans over materialet vil det opptre termodiffusjon på grunn av forskjellig molekylvekt hos de forskjellige gassarter i luften. Vanndamp har lavere molekylvekt enn surstoff og kvelstoff, og vanndamp vil diffundere mot den varme side og surstoff og kvelstoff mot den kalde side. Termodiffusjonen vil ofte motvirke vanlig dampdiffusjon, og den kan bli av stor betydning ved store temperaturgradienter i høyporøse materialer.

Da den relative fuktighet vil variere gjennom materialet, vil fuktinnholdet bli forskjellig i ulike sjikt, og for mange materialer vil dette kunne gi årsak til kapillartransport som kan gå i samme eller motsatt retning som dampdiffusjonen.

Forskjell i lufttrykk på de to sider av konstruksjonen kan påvirke fuktighetsvandringen. Undertrykk inne vil som regel motvirke vanndampdiffusjonen, mens overtrykk inne kan derimot forsterke fuktighetsvandringen og gi øket fare for oppsamling av kondensfuktighet i konstruksjonen.

Dampdiffusjonstallet for et materialsjikt med en bestemt tykkelse kalles ofte dampgjennomgangstallet, og vi har

$$k_d = \frac{D}{d}$$

hvor

$$k_d = \text{dampgjennomgangstallet, permeance, } \left( \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{ h mm Hg}} \right)$$

Vi kan også bruke begrepet dampgjennomgangstall for å betegne gjennomslippeligheten for vanndamp for en konstruksjon med flere sjikt.

Den inverse verdi av dampgjennomgangstallet er diffusjonsmotstanden, og vi har

$$m_d = \frac{1}{k_d} = \frac{d}{D}$$

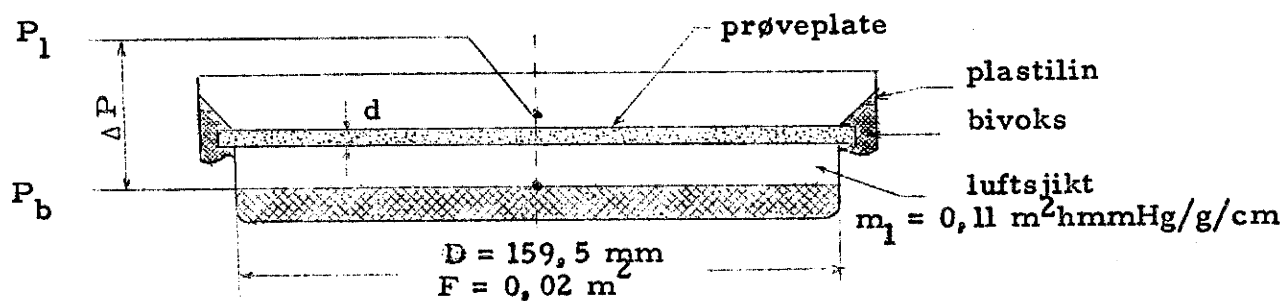
hvor

$$m_d = \text{diffusjonsmotstand eller spesifikk dampmotstand,} \\ \left( \frac{\text{m}^2 \text{ h mm Hg}}{\text{g}} \right)$$

For en konstruksjon sammensatt av flere sjikt kan vi summere diffusjonsmotstanden for de forskjellige sjikt, og vi regner at damptrykkfallet er proporsjonalt med diffusjonsmotstanden for det enkelte sjikt. Derved har vi en mulighet til å undersøke om det er fare for kondens inne i en konstruksjon ved at vi kan beregne temperaturfall, metningstrykk og damptrykk i de enkelte sjikt. Så lenge damptrykket er lavere enn metningstrykket vil det ikke forekomme kondens.

For å kunne utføre slike beregninger må vi ha kjennskap til bygningsmaterialets gjennomslippelighet for vanndamp. Dette blir som regel undersøkt ved den såkalte boksmetode. En bestemt tykkelse av et materiale blir forseglet som lokk på en metallboks med et tørremiddel (en desikant) med en kjent relativ fuktighet inne i

boksen. Fig. 3.4. Boksen plasseres så i et rom med kjent relativ fuktighet. På grunnlag av vektforandring av boksen, prøveflatens størrelse, prøvetiden og damptrykkdifferansen for de to sider av prøvestykket, kan bli beregnet materialets dampdiffusjonstall, tabell 3.2



C.  $\text{Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  - krystaller og mettet oppløsning.

Fig. 3.4. Boks for måling av dampdiffusjonstall.

Tabell 3.2. Dampdiffusjonstall, permeabilitet, for bygningsmaterialer.

Materiale	Romvekt $\text{kg/m}^3$	Dampdiffusjonstall
		$\frac{\text{g cm}}{\text{m}^2 \text{ h mm Hg}}$
Luft		10
Betong	2 300	0,1 - 0,5
C-mørtel	2 000	0,1 - 0,5
KC-mørtel	1 800	0,3 - 0,8
K-mørtel	1 700	0,7 - 1,0
Gassbetong	400 - 650	0,7 - 2,0
Lettklinkerbetong	500 - 700	1,0 - 2,0
Betongstein	2 000	0,5 - 1,0
Teglstein	1 200 - 1 800	0,5 - 2,0
Gran og furu	500	0,05 - 0,15
Treullsementplater	250 - 500	3,0 - 5,0
Mineralull	15 - 200	4,0 - 6,0
Ekspandert polystyren	20	0,1 - 0,3

Et dampdiffusjonstall målt for en bestemt tykkelse av et materiale av homogen struktur kan ikke uten videre omregnes til andre tykkelser av materialet. For materialer vil gjennomslippligheten være avhengig av fuktfordelingen, alt etter de damptrykk og temperaturer som anvendes. På ikke hygroskopiske materialer vil fukttransporten være mere entydig bestemt av partialtrykkdifferansen.

Diffusjonsmotstanden, tabell 3.3, gir et godt uttrykk for fuktgjennomgangen i tynne materialer som plater, papp etc. Diffusjonstett asfaltbelagt papp og plastfolie er materialer vi kan betegne som dampsperrsjikt.

Tabell 3.3. Diffusjonsmotstand for plater, papp, folier og golvbelegg,  
 $\frac{\text{m}^2 \text{ h mm Hg}}{\text{g}}$

	Flatevekt kg/m <sup>2</sup>	Tykkelse mm	Diffusjonsmotstand $\frac{\text{m}^2 \text{ h mm Hg}}{\text{g}}$
Trefiberplate, porøs	3,7	12,5	0,5 - 1,0
" hard	3,2	3,5	2 - 5
Gipsplate	7,5	9,5	ca 2
Asbestsementplate	16	8,0	ca 4
Sponplate	8,5	13,0	5 - 10
Forhudningspapp, asfaltimpregnert	0,6	ca 1,0	2 - 30
Diffusjonstett asfaltbelagt papp	0,8	ca 1,0	150 - 500
Cellulosepapp	0,3-0,5	ca 1,0	0,2 - 0,4
Plastfolie, polyetylen	0,1	0,1	200 - 1000
" "	0,04	0,04	100 - 250
Linoleum			ca 100
Vinyl-fliser			ca 10000



I et nyere arbeid fra Norges byggforskningsinstitutt er publisert data for dampdiffusjon ved forskjellig relativ fuktighet over prøvestykket. I tabell 3.4 er gitt dampdiffusjonstall for en del materialer.

Tabell 3.4. Dampdiffusjonstall, permeabilitet, ved forskjellig relativ fuktighet,  $\frac{\text{g cm}}{\text{m}^2 \text{ h mm Hg}}$   
(Omregnet fra Tveit, NBI rapport 45, 1966)

	kg/ m <sup>3</sup>	Relativ fuktighet, %				
		10	30	50	70	90
Betong	2100	0,04	0,04	0,05	0,07	0,10
C-mørtel	2060	0,23	0,26			0,46
KC-mørtel	1930	0,28	0,31			0,52
K-mørtel	1860	0,56	0,58			0,78
Gassbetong	460	1,8	1,9	2,2	2,6	3,0
"	510	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2
Teglstein	1720	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
"	1840	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Gran $\perp$ fibre	410		0,04	0,08	0,16	0,82
" $\neq$ fibre	450	1,2	3,4	4,1	4,4	4,5
Furu	530		0,03	0,05	0,08	0,48
Karbamid skum	14,3	2,7	4,1	5,4	5,4	4,8
Ekspandert polystyren	17,2	0,20	0,34	0,38	0,38	0,30
Steinull matte	100	5-8	5-8	5-8	5-8	5-8

Som en ser er dampdiffusjonen sterkt avhengig av relativ fuktighet på hygroskopiske materialer som trevirke, mens den for teglstein og mineralull er uavhengig av den relative fuktigheten.

Tabell 3.5 inneholder data for diffusjonsmotstand for papp og plater med forskjellig relativ fuktighet, og som det framgår, avtar diffusjonsmotstanden sterkt ved økende relativ fuktighet for alle disse materialer.

Tabell 3. 5. Diffusjonsmotstand for materialer ved forskjellig relativ fuktighet,  $\frac{\text{m}^2 \text{ h mm Hg}}{\text{g}}$   
(Omregnet fra Tveit, NBI rapport 45, 1966)

	kg/ m <sup>3</sup>	d mm	Relativ fuktighet, %				
			10	30	50	70	90
Cellulosepapp	600	0,5	0,16	0,14	0,11	0,09	0,05
Asfaltimpregnet papp	920	0,65	71	37	24	10	1,8
Sponplate	560	11,6	5,0	4,5	4,0	3,4	2,4
Trefiberplate, porøs	215	11,0	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3
Trefiberplate, panelpl.	610	12,1	2,2	2,1	2,0	1,8	1,4
Trefiberplate, hard	870	3,4	2,8	2,5	2,3	2,0	0,8
Trefiberplate, porøs, asfaltimpregnert	280	10,8	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6
Trefiberplate, hard, oljeherdet	1040	2,8	20	14	10	6,8	3,7
Cement celluloseplate	1600	4,7	3,5	2,7	2,0	1,7	1,3

I klimalaboratoriet ved Institutt for bygningsteknikk er det arbeidet spesielt med fuktvandring for konstruksjoner i rom med høy luftfuktighet, spesielt med henblikk på husdyrrrom. Ved dette arbeid er det også utført målinger av fuktgjennomgang for maling og papp ved forskjellige fuktighetsforhold. Et utdrag av disse data er gitt i tabell 3. 6. Det er god overensstemmelse mellom dataene for papp i tabell 3, 5 og 3, 6. For malinger avtar også diffusjonsmotstanden meget sterkt ved økende relativ fuktighet, og med våt flate som tilsvarende flater med kondensfuktighet, er diffusjonsmotstanden meget liten for de fleste malinger. Når det er kondensfuktighet på flaten har antagelig malingen sin vesentligste oppgave i å hindre kapillær oppsugning av fuktighet i veggmaterialet bak malingen.

Tabell 3. 6. Diffusjonsmotstand for maling og papp ved forskjellige fuktighetsforhold,  $\frac{m^2 \text{ h mm Hg}}{g}$

(Fra Inst. for bygn. teknikk, melding nr. 16 og 33)

Materiale	Relativ fuktighet %		Våt
	ca. 60	ca. 90	
<u>Malinger, 2 strøk på KC-mørtelplate</u>			
Pliolite, blank (nr. 1)	57	14	0,4
Epoxy-ester, blank (nr. 4)	130	27	0,4
Klorkausjuk, blank (nr. 7)	124	16	0,6
Butadien, styren - latex (nr. 2)	12	2,0	0,05
PVAc-latex (nr. 11)	6	0,5	0,15
Alkyd, blank (nr. 16)	69	5,9	2,4
Epoxy, to-komponent (nr. 5)	79	13	0,7
<u>Papp</u>			
Asfaltimpregnert forhudningspapp 600 g/m <sup>2</sup>	11,9	0,8	0,6
Asfaltimpregnert forhudningspapp 600 g/m <sup>2</sup>	17,7	1,2	1,3
"Isbjørn" forhudningspapp	0,14	0,20	0,09

Eksempel på beregning av fuktvandring og kondensasjon i en bygningskonstruksjon.

En skallmur av tegl (A-søttering) med 2 cm KC-puss innvendig er isolert med 10 cm mineralull i hulrommet. Inneklimaet har temperatur 15°C og RF = 85 %, og ute er det - 15°C og RF = 85 %. Vi har at

$$m = \frac{d}{\lambda} \quad \text{og} \quad \Delta t = m \frac{t_i - t_u}{\text{sum } m} = m \frac{30}{3,21} = m \cdot 9,33$$

$$\text{og at } m_d = \frac{d}{D} \quad \text{og} \quad \Delta p = m_d \frac{p_i - p_u}{\text{sum } m_d} = m_d \frac{9,7}{21} = m_d \cdot 0,46$$

	d cm	$\lambda$	m	$\Delta t$ °C	t °C	D	$m_d$	$\Delta p$	p	$P_m$	RF %
$M_u$			0,05	0,5	-15,0				1,2	1,4	85
Tegl	12	0,5	0,24	2,2	-14,5	1,5	8	3,7	1,2	1,5	80
Min. ull	10	0,04	2,50	23,3	-12,3	5,0	2	0,9	4,9	1,8	kond.
Tegl	12	0,5	0,24	2,2	11,0	1,5	8	3,7	5,8	9,8	59
KC-puss	2	0,8	0,03	0,3	13,2	0,7	3	1,4	9,5	11,3	85
$m_i$			0,15	1,5	13,5				10,9	11,7	93
					15,0				10,9	12,8	85
Cum			3,21	30,0			21	9,7			

På innsiden av den utvendige teglvange ligger beregnet  $d$  mp-trykk over metningstrykket, og følgelig er det kondens i veggen. Damptrykket kan i virkeligheten ikke ligge over metningstrykket, og den virkelige damptrykk-kurve har sitt utgangspunkt i kondenssjiktet som er på innsiden av ytre teglvange. Damptrykkfallet fra inneluften til kondenssjiktet er da lik  $10,9 - 1,8 = 9,1$  mm Hg og samlet diffusjonsmotstand innenfra til kondenssjiktet er  $21 - 8 = 13$ .

For beregning av den virkelige damptrykk-kurve ved kondens har vi

$$\Delta p = m_d \frac{9,1}{13} = m_d \cdot 0,7 \text{ mm Hg}$$

Skal vi kunne hindre kondens må vi øke veggens diffusjonsmotstand innenfor kondenssjiktet med f. eks. en damptett maling på veggens innside. Forholdet mellom total nødvendig diffusjonsmotstand og totalt damptrykkfall er lik forholdet mellom diffusjonsmotstanden utenfor kondenssjiktet og damptrykkfallet over de samme sjikt.

$$\text{Vi har } \frac{\text{Nødv. } m_d}{P_i - P_u} = \frac{m_d}{\Delta p} \text{ og følgelig er}$$

$$\text{Nødv. } m_d = \frac{m_d}{\Delta p} (P_i - P_u) = \frac{8}{0,6} \cdot 9,7 = 129$$

Dampsperrsjiktet må i vårt eksempel ha en diffusjonsmotstand

$$m_d = 129 - 21 = 108 \text{ m}^2 \text{ h mm Hg/g}$$

Vi kan da beregne de virkelige damptrykk-kurvene med og uten kondens.

$$\text{Uten kondens er } \Delta p = m_d \frac{9,7}{129} = m_d \cdot 0,075$$

	Med kondens					Uten kondens				
	$m_d$	$\Delta p$	P	$P_m$	RF	$m_d$	$\Delta p$	P	$P_m$	RF
$m_u$			1,2	1,4	85			1,2	1,4	85
Tegl			1,2	1,5	80	8	0,6	1,2	1,5	80
Min. ull	2	1,4	1,8	1,8	100	2	0,2	1,8	1,8	100
Tegl	8	5,6	3,2	9,8	33	8	0,6	2,0	9,8	21
KC-puss	3	2,1	8,8	11,3	78	3	0,2	2,6	11,3	23
Dampsperre			10,9	11,7	93	108	8,1	2,8	11,7	24
$m_i$			10,9	12,8	85			10,9	11,7	92
			10,9	12,8	85			10,9	12,8	85
Sum	13	9,1				129	9,7			

For å illustrere hvordan temperatur og damptrykket er i vårt eksempel er temperatur og damptrykkgradientene tegnet inn i fig. 3. 5.

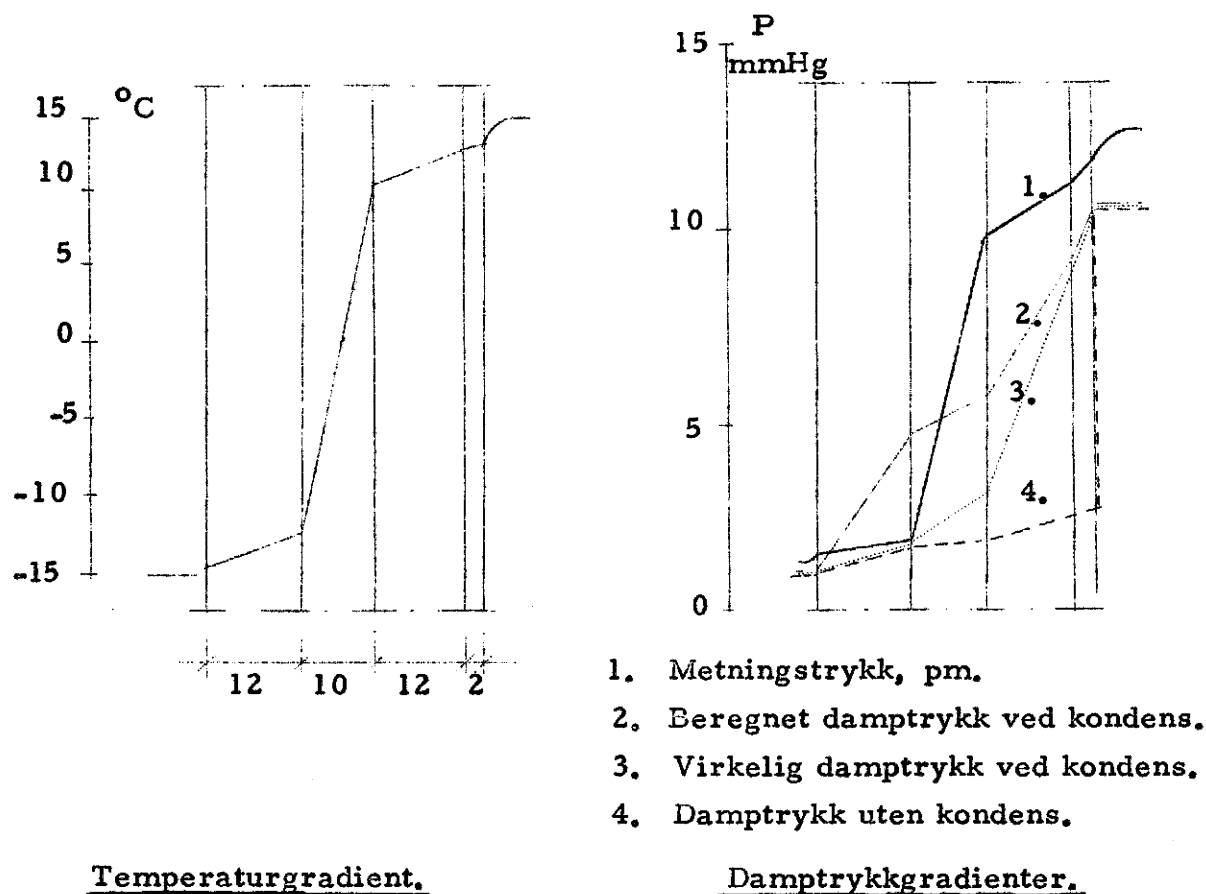


Fig. 3.5. Temperatur- og damptrykkgradienter for skallmur.

Avstanden mellom metningstrykk og damptrykk gir uttrykk for den relative fuktighet i vedkommende sjikt. Vi har sterkt tiltakende relativ fuktighet utover i isolasjonssjiktet, og hvis isolasjonsmaterialet har kapillærsugende egenskaper, må vi regne med en innoverrettet kapillær fukttransport. Over den indre teglvange og pusslaget er det lav relativ fuktighet, og dette er særlig markert når veggen har en innvendig dampsperre. Den gjennomsnittlige relative fuktighet over den damptette maling er her  $(92 + 24) / 2 = 58 \%$ . Ifølge tabell 3.6 vil to strøk av en blank klorkautsjukmaling gi tilstrekkelig dampsperre.

Beregninger av denne type har imidlertid bare begrenset gyldighet. Kapillærsugning og magasinering av eventuell kondensfuktighet <sup>kan</sup> innebærer at fuktvandringen ikke medfører større ulemper. Termodiffusjonen kan ofte motvirke vanlig diffusjon. Forskjeller i lufttrykk på konstruksjonenes side <sup>kan</sup> påvirke fuktvandringen i stor grad. Konveksjon i konstruksjonene parallelt med flatene kan påvirke fukttransporten. Beregningene forutsetter stasjonære forhold som sjelden forekommer i yttervegger. Omkring fryse- og kjølerom er forholdene ofte nesten stasjonære.

### Kapillærsugning.

Når et porøst materiale kommer i kontakt med vann, begynner en vannoppsuging i materialets porer, kapillærsugning eller kapillærsorpsjon. Hvis vi betrakter vannoppsuging i kapillærrør vil vi se at stighøyden er liten i rør med stor kapillærradius og øker med avtakende radius. Jo tynnere røret er desto større blir sugeshøyden, og desto mindre blir stighastigheten.

I homogene materialer vil vann transporteres kapillært fra et sjikt med høyt fuktinnhold til et med lavere. Kapillærsugning vil finne sted i et hygroskopisk materiale selv om det ikke er helt mettet med fuktighet. I en konstruksjon med en damptrykkgradient vil den relative fuktighet som regel bli meget høg ytterst i veggen, og vi vil der få høyere fuktinnhold i veggmaterialet. Det kan da bli kapillær transport av fuktighet mot veggens varme side som går i motsatt retning av dampdiffusjonen. Hvis det er overflatekondens

på innsiden av en vegg av et kapillærsugende materiale, vil vi kunne få en kapillærtransport som går i samme retning som dampdiffusjonen.

Har vi en sammensatt konstruksjon av kapillærsugende materialer, har materialets sugekraft betydning for transporten av fuktighet. Tynne kapillarer har større sugekraft enn tykke, og små kapillarer kan derfor suge vann fra større. For eksempel en grovporet puss på et finporet veggmateriale vil raskt kunne suge opp regn som treffer pussen, og fuktigheten vil suges videre inn i det finporete veggmaterialet. Uttørringen må imidlertid skje ved dampdiffusjon gjennom pussen da denne ikke vil kunne suge vann i væskefase fra det finporete veggmateriale, og dette vil kunne forsinke uttørringen av veggen.

I motsetning til de fleste andre bygningsmaterialer har mineralull ingen evne til å transportere vann kapillært. Det foreligger ennå lite tallmateriale som kan være til hjelp for beregning av den kapillære vanntransport i bygningskonstruksjoner.

### Slagregn.

Slagregn er betegnelsen på den del av nedbøren som treffer vertikale flater. Vi kan måle den regnmengde som treffer en flateenhet av en vegg på tilsvarende måte som måling av vertikal nedbør, fig. 3.6. Slagregnmengde kan også beregnes tilnærmet på grunnlag av vindstyrke, vindretning og nedbørmengde. Fig. 3.7 viser et slagregnkart over Norge med verdier for gjennomsnittlige årsmengder fra den verste værretningen. Som en ser har kysten av Vestlandet de største slagregnmengdene. Slagregnskadene finner vi imidlertid ikke alltid der vi har de største årsmidlene. En stor slagregnintensitet i løpet av korte perioder på bare noen timer kan gi store skader. Det foreligger ennå bare få målinger av slagregnintensitet.

På bygninger vil vannet fra slagregn flyte nedover veggflaten og etterhvert danne en vannfilm. På høye hus med glatte veggflater vil vannmengden på veggen være mange ganger større ved foten enn ved toppen. Når veggen samtidig er utsatt for et over-

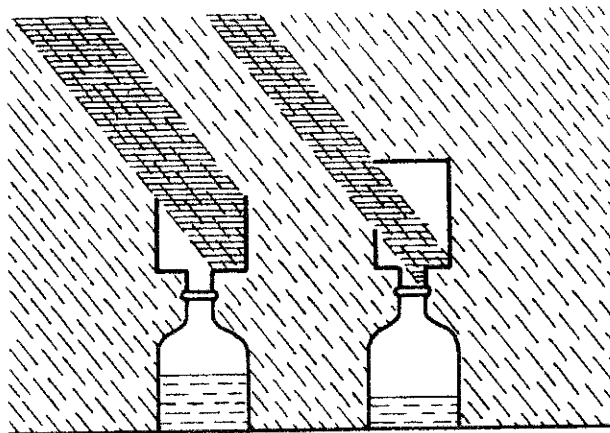


Fig. 3.6. Prinsipp for måling av vertikal nedbør og slagregn.

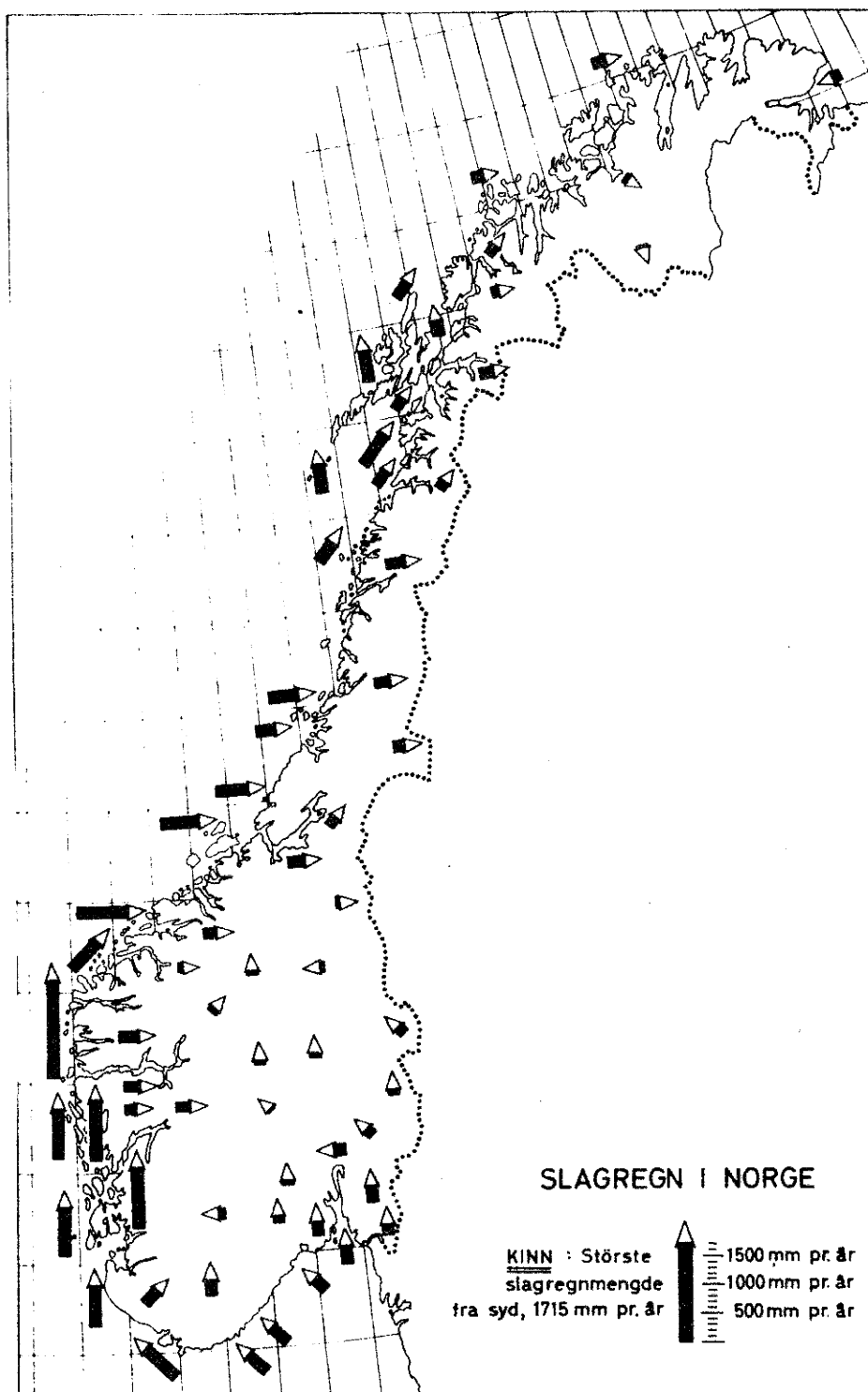


Fig. 3.7. Størrelse og retning av årlige slagregnmengder i Norge.



trykk på grunn av vind, vil vannet kunne bli presset inn gjennom fuger og sprekker.

Luftens uttørrende evne og eventuell varmetilførsel innenfra gjennom veggene har også betydning for om det skal oppstå slagregnskader. Vegger som helt eller delvis består av porøse materialer vil suge opp en del vann ved hvert slagregnangrep. Dersom luften har liten uttørrende evne i oppholdsperiodene og dersom det ikke er noen varmetransport innenfra som vil kunne føre til fordampning av det akkumulerte vann, vil veggmaterialet kunne bli vannmettet, og det kan medføre fuktgjennomslag og frostskafer. Vegger i uoppvarmete og sjeldent oppvarmete hus og frittstående murverk er særlig utsatt for fuktgjennomslag og frostskafer. Med de godt isolerte skallmurer vi bruker i dag er det blitt øket fare for frostskafer på den ytre murvange da denne får langt mindre varmetilførsel innenfra enn en tradisjonell murvegg.

Vi må lage våre bygningskonstruksjoner slik at ikke fuger og sprekker gir vanngjennomslag og bruke fasadematerialer som har så liten vannopsuging av det oppsugete vann rekker å fordunste mellom slagregnanfallene.

#### Lekkasjer gjennom fuger og sprekker.

Norges byggforskningsinstitutt har nedlagt et stort arbeid for å undersøke årsakene til lekkasjer gjennom fuger og sprekker i bygningskonstruksjoner og for å finne metoder til å unngå slike lekkasjer. Vanngjennomgang kan skyldes kapillær sugning, tyngdekraft, vindtrykk o. a., og fig. 3.8 illustrerer disse ulike former for lekkasjer.

Kapillærsugning foregår gjennom porer og sprekker på under 0,5 mm, og blir sprekkenes svært fine vil transporthastigheten bli liten, fig. 3.8 a.

Tyngdekraften kan lede vann innover i konstruksjoner gjennom sprekker med over 0,5 mm bredde. Denne form for lekkasje er særlig farlig i hultmurer og massive vegger av hullstein, hullblokk og ved dårlig fylte mørtelfuger, fig. 3,8 b.

Regndråper kan ved store vindstyrker bli ført inn i store sprekker ved egenbevegelse. Forsøk tyder på at sprekkenes må være 4-5 mm for at dette skal få særlig betydning. Brede vertikale spalter

får ofte denne lekkasjeform, fig. 3.8 c.

Når det er lufttrykkfall over en sprekk og samtidig vann som flyter på veggen, vil lekkasjene kunne bli særlig store, og slike lekkasjer kan foregå gjennom sprekker av forskjellig størrelse, fig. 3.8 d.

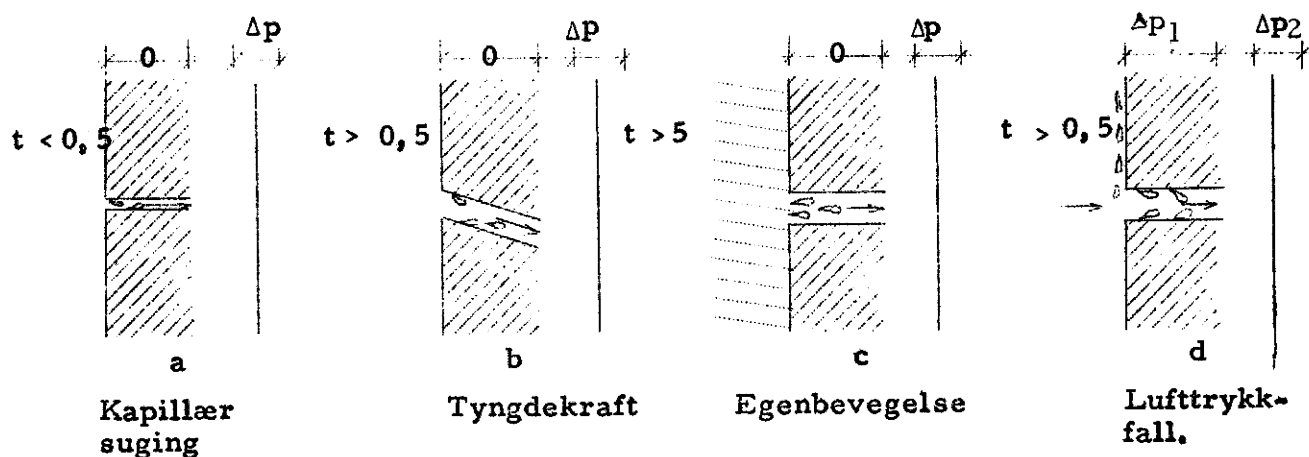


Fig. 8. Forskjellige årsaker til slagregnellekasje.

#### Tetting mot slagregn.

For tetting mot slagregn kan vi skille mellom to hovedprinsipper, ett-trinns og to-trinns tetting. Ved ett-trinnstetting må samme konstruksjonsdel være tett mot luftstrømning og vann. En massiv murvegg er basert på ett-trinns tetting, og det er særlig viktig at veggen er fri for sprekker og åpne fuger.

Ved to-trinns tetting er det et ytre luftet sjikt som tetter mot vann fra slagregn, og den vesentligste del av lufttrykkfallet foregår over et lufttett sjikt innenfor. I en bindingsverksvegg vil den utvendige panel ta imot slagregnet mens den utvendige papp sørger for vindtettingen, og for å hindre at vann når fram til pappen bør den utvendige panel være utlektet. Fig. 3. 9 viser andre eksempler på to-trinns tetting. To-trinnstetting gir større sikkerhet mot vanngjennomslag enn ett-trinns tetting, og der det er særlig stor slagregnintensitet, bør vi alltid bruke en eller annen form for to-trinns tetting.

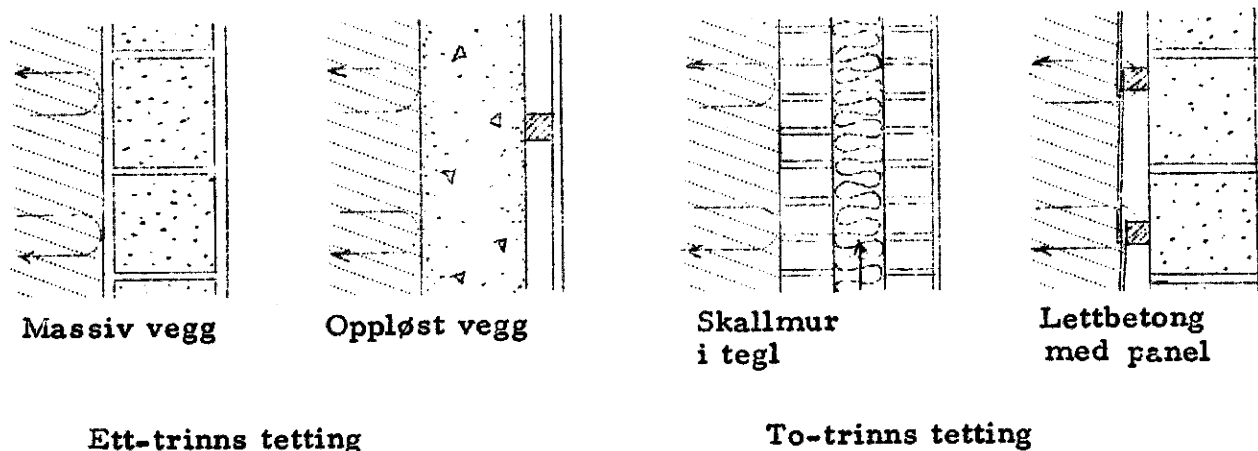


Fig. 9. Ett- og to-trinns tetting mot slagregn.

### Fugetetting.

Tetting av fuger mot gjennomgang av luft og vann er aktuelt i alle typer bygg, og under Del 2 har vi kort omtalt tetting av fuger omkring vinduer i bindingsverks hus. I prefabrikerte montasjebygg blir som regel antall fuger svært stort, og en må som regel bruke flere forskjellige fugetyper.

Fuger mellom betongdeler, rundt vinduer i murhus osv. må vi som regel tette med kittmasser, kittbånd eller tettelisten. Valg av materiale beror på fugens form og størrelse, fugebevegelser og fugekantenes jamnhet, klebevilkår o. l., og vi må ta hensyn til prisen og fugematerialets varighet.

En kittmasse må ikke sige ut av fugen, den må feste seg til fugekantene, ha evne til å følge bevegelse og holde seg elastisk eller plastisk i mange år. Thikol-baserte to-komponent fugekitt er meget gode, men er kostbare.

Tettingslister må kunne gi et varig trykk mot fugekantene, og de må være myke nok til å kunne føye seg etter eventuelle ujammheter. Som regel stiller tettingslister vesentlig større krav til jamne og jamnbreie fugekanter enn kitt. Bare de beste typer PVC-plast og neoprene-gummi har vist seg tilstrekkelig gode som materialer for tettingslister.

Kravet til fugene er at de er mest mulig jamnbreie, har glatte kanter, beskytter fugematerialet mot vær- og vindpåvirkning og tillater utskifting av fugematerialet.

#### Midler til å hindre eller redusere vannoppsuging.

En utvendig veggflate må lages så tett at en unngår vanngjennomslag og frostskafer, men den må også være så åpen at den tillater fordamping av fuktighet som vandrer gjennom veggen.

Utlektet, luftet trepanel, asbestsementplater, metallplater o.l. er ofte en utmerket løsning, og en oppnår to-trinns tetting. For vegger av gassbetong må en som regel bruke en slik panel i distrikt med stor slagregntensitet.

Puss er et godt tettemiddel mot slagregn for vegger av tegl eller betongstein. Fuget teglsteinmurverk er f. eks. ikke tilfredsstillende i strøk med store slagregnmengder som på Vestlandet. Der bør teglvegger utføres av hårdbrent tegl og med utvendig puss av mørtel KC 20/80. For å unngå svinnriss er det viktig at det brukes godt gradert sand slik at en kan få sterk og tett puss med minst mulig forbruk av bindemiddel.

Maling kan gi effektiv tetting av porøse pussflater o.l. På mur bør bare brukes meget dampåpen maling, f. eks. sementmaling.

Porøs teglstein og puss kan impregneres med vannavstøtende silicon-oppløsning uten at flatens utseende forandres nevneverdig. En slik behandling har ikke evne til å tette sprekker, og på flater med sprekker og dårlige fuger kan behandlingen få negativ virkning

da den ikke reduserer vanngjennomgangen særlig mye, men den vil kunne redusere kapillærtransporten av vann mot overflaten og dermed redusere uttørkingen. En siliconbehandling antas å ha en varighet på 5-10 år.

### Litteratur.

- Babbit, J. D.: The Physics of Condensation in Buildings. NRC Bull. No. 2. Ottawa 1952.
- Chang, S. C., Saskatoon, S. and Hutcheon, W. B.: Dependence of Water Vapor Permeability on Temperature and Humidity. NRC. Res. paper No. 21. Ottawa 1956.
- Finne, E.: Kondensering på grunn av luftgjennomgang i tak. NBI. Særtrykk nr. 84. Oslo 1964.
- Granholm, H.: Om vattengjennomslag i murade väggar med särskilt hänsyn till tegl som fasadmateriäl. Chalmers Tekn. Hgsk. Handl. nr. 195. Göteborg 1958.
- Græe, T. og Løken, K. A.: Fuktighetsgjennomgang i maling på pussunderlag. Inst. for bygningsteknikk. Melding nr. 33. Vollebekk 1964.
- Hoppestad, S.: Slagregn i Norge. NBI. Rapport nr. 13. Oslo 1955.
- Isaksen, T.: Fugeutforming og slagregngjennomgang. NBI. Særtrykk nr. 93. Oslo 1964.
- Latta, J. K. and Beach, R. K.: Vapor Diffusion and Condensation. NRC, DBR, Can. Build. Digest No. 57. Ottawa 1964.
- Svendsen, S. D.: Prinsipper for tetting mot vind og slagregn. NBI. Særtrykk nr. 71, s 5-15. Oslo 1962.
- Torp, A. og Græe, T.: Luftstrømningers betydning for fuktighetsvandring og kondensasjon i bindingsverkskonstruksjoner. Inst. for bygningsteknikk. Særtrykk nr. 42 og melding nr. 15. Vollebekk 1961.
- Torp, A. og Græe, T.: Fuktighetsvandring i bindingsverksvegger ved forskjellig temperatur på kald side av veggen. Inst. for bygningsteknikk. Særtrykk nr. 46 og melding nr. 16. Vollebekk 1962.

- Torp, A. og Græe, T.: Fuktighetsvandring i bindingsverksvegger med forskjellig varmeisolasjonsevne. Inst. for bygningsteknikk. Særtrykk nr. 64. Vollebekk 1963.
- Tveit, A.: Fukt og fukttransport i porøse materialer. NBI. Rapport nr. 39. Oslo 1964.
- Tveit, A.: Measurement of Moisture Sorption and Moisture Permeability of Porous Materials. NBI. Rapport nr. 45. Oslo 1966.

#### Del 4. LYDISCLERING.

Den ytre fysiske årsak til hørselsinntrykk er luftsvingninger i luften umiddelbart inntil øret. Trykksvingningene oppstår primært ved vibrasjoner i lydkilden og forplantes til øret ved bølgebevegelser i luften. Vårt øre kan oppfatte lydsvingninger med frekvenser fra 16 til 20 000 svingninger pr. sekund, (Hertz, Hz). Ørets følsomhet er størst i området fra 1000 Hz til 5000 Hz.

Når det gjelder lydisolering skiller vi mellom luftlyd, trinnlyd og konstruksjonslyd, fig. 4. 1. I det følgende skal vi behandle isolering mot luftlyd og trinnlyd.

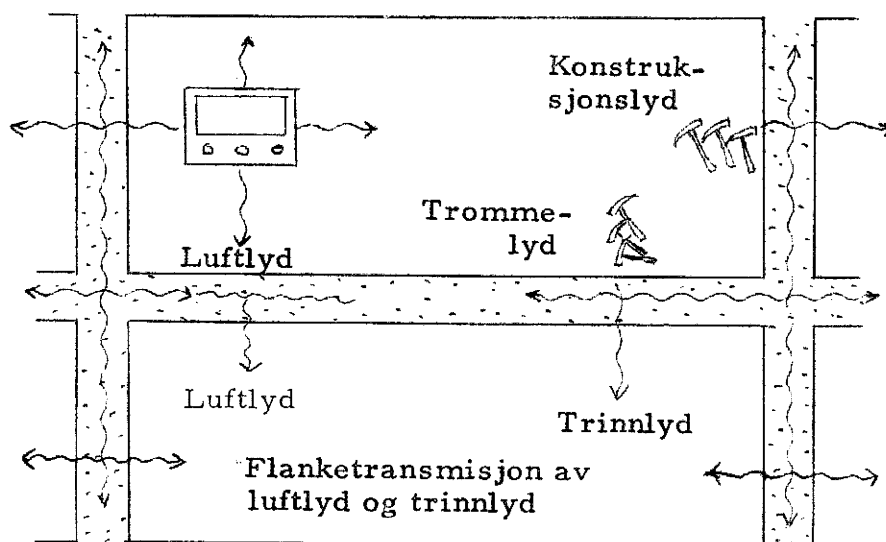


Fig. 4. 1. Forskjellige typer lyd i hus.

#### Betegnelser og måleenheter.

Lydtrykket,  $p$ , er det vekseltrykk som er overlagret luftens likevektstrykk i en lydbølge, og det angis i mikrobar.

Lydeffekt,  $P$ , er den energi lydkilden avgir pr. tidsenhet, og den angis i watt.

Lydintensitet,  $I$ , er den lydeffekt som passerer gjennom en flateenhet tvers på lydbølgens retning, og den angis i watt/cm<sup>2</sup> eller watt/m<sup>2</sup>.

Lydnivå, lydtrykknivå eller lydintensitetsnivå,  $L$ , er 10 ganger logaritmen til forholdet mellom lydintensiteten  $I$  og intensiteten hos

den svakeste lyd  $I_0$  som et normalt øre kan oppfatte, og det angis i decibel (dB).

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB}$$

hvor

$$I_0 = 10^{-16} \text{ watt/cm}^2$$

$I_0$  er nedre høregrænse, terskelverdien.

Lydstyrke eller hørenivå er lydnivået korrigert for ørets følsomhet, og det angis i phon. Phon-skalaen er definert slik at den faller sammen med lydnivåskalaen ved frekvensen 1000 Hz. På fig. 4.2 er tegnet opp phonkurver som viser forholdet mellom lydtryknivået for rene toner med samme hørenivå.

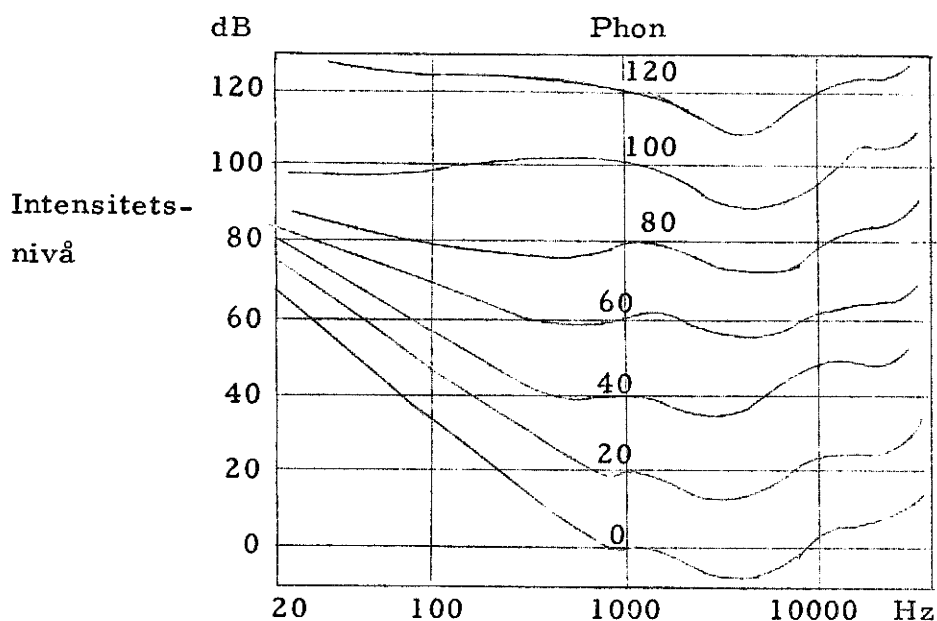


Fig. 4.2. Sammenhengen mellom hørestyrke målt i decibel og phon.



### Luftlydisolering.

#### Måling av luftlydisolasjon.

De lydisolerende egenskaper for skillevegger og etasjeskillelere kan bli bestemt ved laboratoriemålinger og ved målinger i hus. I laboratoriet blir senderrom og mottakerrom utført som elastisk opplagrete betongkonstruksjoner, og flanketransmisjonen blir praktisk talt eliminert. Målingene foretas ved 16 standardfrekvenser hver over 1/3 oktav i frekvensområdet 100 til 3200 Hz, og alle prøvebetingelser er standardisert. Ved hver frekvens måles reduksjonen i lydtryknivå mellom senderrommet og mottakerrommet og angis som luftlydreduksjonstallet R dB. Middelreduksjonstallet  $R_m$  dB er gjennomsnittet av måleresultatene ved de 16 standardfrekvenser og gir uttrykk for skillekonstruksjonens luftlydisolerende egenskaper.

Lydisolasjonen mellom to rom i et hus er ikke bare avhengig av skillekonstruksjonens egenskaper. Overføring av lyd gjennom tilstøtende konstruksjoner betegnes som flanketransmisjon, og når den er stor nedsettes lydisolasjonen. Etterklangstiden for et rom er fastsatt til den tid som går fra en lydkilde i rommet plutselig avbrytes til lydtryknivået er sunket 60 dB. Lang etterklangstid i mottakerrommet vil bidra til å heve lydtryknivået. Forholdet mellom skillekonstruksjonens areal og mottakerrommets volum vil påvirke lydoverføringen i gunstig retning når arealet er lite i forhold til volumet.

Ved måling av lydtryknivådifferansen D dB mellom to rom vil få bestemt romisolasjonen for luftlyd ved en bestemt frekvens. Gjennomsnittet for måletallene ved 16 standardfrekvenser er middelromisoleringen  $D_m$  dB. Tallet  $D_m$  gir et uttrykk for lydisolasjonen mellom to rom, men det gir ikke noe bilde av frekvensfordelingen. Måleresultatene blir derfor satt opp i et diagram og sammenliknet med normkurver (fig. 4. 3). Normkurvene er fastlagt etter hørenivådiagrammet slik at isolasjonen virker like godt ved alle frekvenser. De nordiske normkurver betegnes med D-48, D-49, D-50 osv. etter desibelverdien ved frekvensen 400 Hz. I bygningsforskriftene er bestemt at målingene kan sies å tilfredsstillende en normkurve når avviket i ugunstig retning ikke

overstiger 1,0 desibel i gjennomsnitt for de 16 frekvenser.

Disse normkravene kombineres med middelromisoleringen  $D_m$  ved å innføre begrepet effektiv luftlydisolering  $LL_{eff}$  dB som er den laveste av de to verdiene:

1. Middelromisoleringen  $D_m$  dB
2. Normkurvetallet for høyeste normkurve som måleresultatet tilfredsstillter.

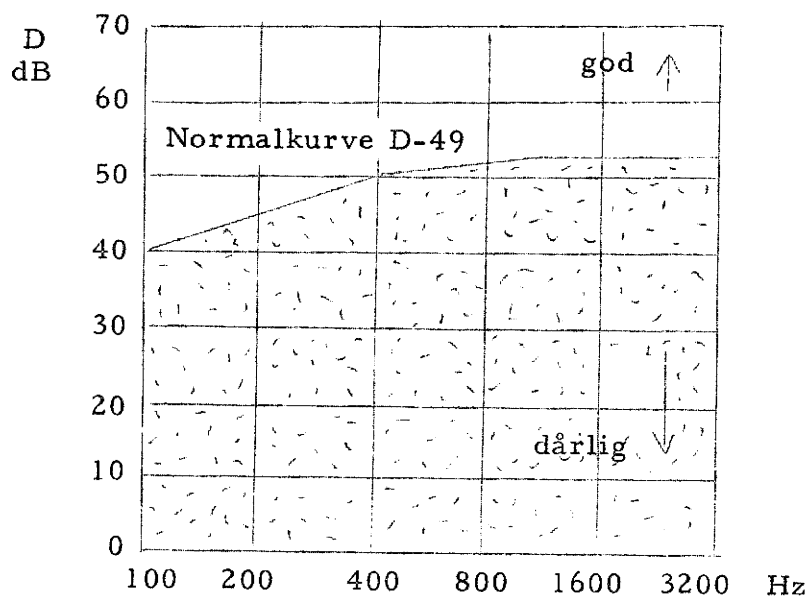


Fig. 4.3. Normkurve for luftlydisolering.

Den effektive luftlydisolering som oppnås for en skillekonstruksjon mellom to rom avhenger av konstruksjonens areal og flanketransmisjon og av mottakerrommets volum og etterklangstid. Måleresultatene blir derfor korrigert til å gjelde et "normalrom"

hvor: Skillekonstruksjonens areal  $S_o = 10 \text{ m}^2$   
 Flanketransmisjonen  $F_o = \text{"normal"}$   
 Mottakerrommets volum  $V_o = 50 \text{ m}^3$   
 - " - etterklangstid  $T_o = 0,5 \text{ sek.}$

Det korrigerte måleresultat betegnes som konstruksjonens luftlydtall.

Tabell 4. 1. Lydnivå for ulike typer støy.

Lydtype	Lydnivå decibel, dB
Øvre smertegrense	120 - 130
Presslufthammer i verksted	110 - 120
Sterkeste orkestermusikk	100 - 110
Høye skrik	90 - 100
Meget sterk radio	80 - 90
Radio, kraftig tale	70 - 80
Alminnelig tale	60 - 70
Lavmælt tale	50 - 60
Meget svak radio	40 - 50
Alminnelig hvisking	30 - 40
Nedre høre grense	0

Luftlyd i hus.

Støy som forekommer i hus vil ofte ha lydtryknivå av den størrelsesorden vi finner i tabell 4. 1. Et rom er nesten aldri helt lyd tomt, og den lyd som vanlig forekommer kalles rommets bakgrunnsstøy. Lyd som er 10 til 20 phon lavere enn lydnivået i rommet vil ikke oppfattes av øret. Den lyd som trenger inn i et rom utenfra eller fra tilstøtende rom bør være dempet ned til 10 til 20 dB under bakgrunnsstøyen i rommet. Bakgrunnsstøy i forskjellige typer rom og den tillatelige forstyrrelse som lyd annetsteds fra bør være redusert til, er angitt i tabell 4. 2.

Tabell 4. 2. Bakgrunnsstøy og tillatelig forstyrrelse for ulike typer av rom.

Bakgrunnsstøy: jevn lyd i rommet når dette er i bruk		Tillatelig forstyrrelse: lyd annetsteds fra må være redusert til
60 - 90 dB	Vanlige fabrikker	45 - 70 dB
60 - 75 dB	Kontor med skrivemaskin	45 - 60 dB
50 - 60 dB	Kontor med stille arbeid	35 - 45 dB
50 - 55 dB	Møterom, rettssal, lydfilmkino	35 - 40 dB
45 - 55 dB	Dagligstue, skolerom, auditorium	30 - 40 dB
40 - 45 dB	Soverom, teater, konsertsal	25 - 30 dB
35 - 40 dB	Radiostudio, lydfilmstudio	20 - 25 dB

Ønskelig romisolering  $D$  mellom rom blir bestemt av lydtryknivået i tilgrensende rom og av bakgrunnsstøyen i rommet når det er i bruk.

Eksempel:

Nabos dagligstue, middels sterk radio	80 dB
Eget soverom (stille strøk), tillatelig forstyrrelse	<u>25 dB</u>
Ønskelig romisolering $D$ mellom disse rom	55 dB

Bygningsforskriftene krever en romisolering på minst  $D_m = 49$  dB mellom rom i forskjellige boliger og mellom trapperom, andre fellesrom og rom i bolig. I rekkehus og andre sammenbygde småhus skal  $D_m$  være minst 52 dB mellom rom i forskjellige boliger.

Skal vi oppnå en tilsiktet romisolering  $D_m$  mellom to rom vil kravet til skillekonstruksjonens luftlydtall LL dB være avhengig av skillekonstruksjonens areal, flanketransmisjonen og rommets volum og etterklangstid. Fig. 4.4 illustrerer hvordan romdybde og takhøyde virker inn på kravet til luftlydtall LL dB når en vil oppnå en bestemt romisolering på  $D_m = 50$  dB.

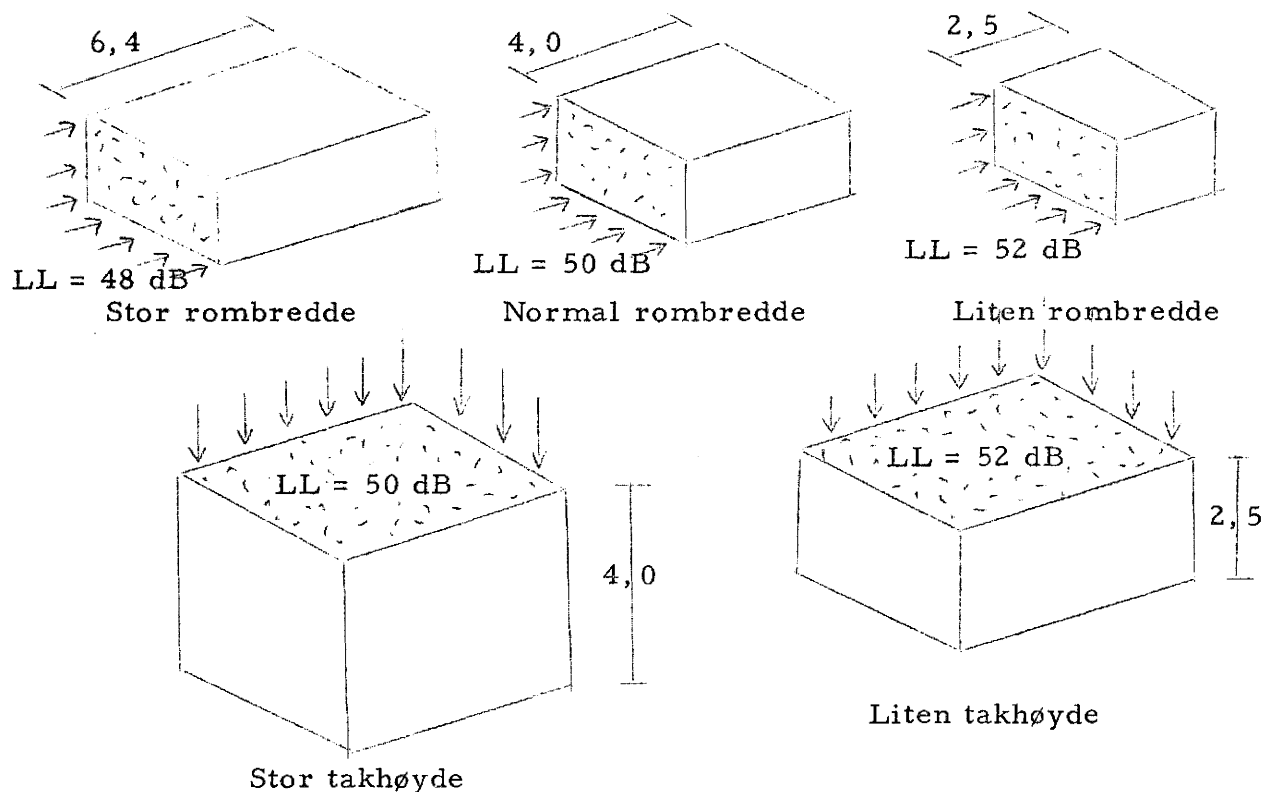


Fig. 4.4. Krav til luftlydtall LL for vegger og dekker for å oppnå en romisolering  $D_m = 50$  dB.

Luftlydisolerende konstruksjoner.

For isolering mot luftlyd skiller en mellom enkelkonstruksjoner, konstruksjoner av porøse materialer, konstruksjoner med strålingsminskende kledning og dobbelkonstruksjoner.

For enkelkonstruksjoner vil luftlydreduksjonstallet være avhengig av vekten og vil øke med 4 til 6 dB når flatevekten fordobles. Tabell 4.3 angir middelreduksjonstall  $R_m$  for enkelkonstruksjoner avhengig av flatevekten.

Tabell 4.3. Middelreduksjonstallet,  $R_m$ , for enkelkonstruksjoner avhengig av flatevekten.

Vekt, kg/m <sup>2</sup>	$R_m$ , dB	Vekt, kg/m <sup>2</sup>	$R_m$ , dB
3	20	100	40
6	24	200	44
12	28	400	50
25	32	800	56
50	36	1600	62

Fig. 4.5 viser de luftlydisolerende egenskaper hos tre enkelvegger ved forskjellige frekvenser. Lettbetongveggene, særlig den tynneste, er lite egnet som lydvegger.

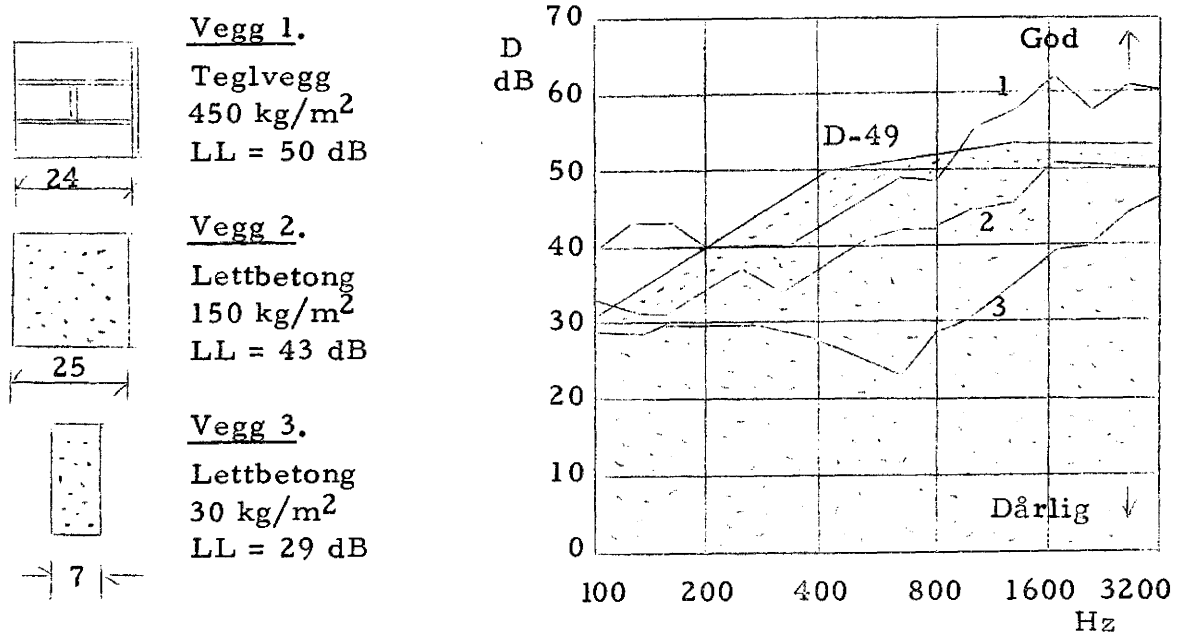


Fig. 4.5. Luftlydtall for massive enkelvegger.

I en vegg av porøse materialer vil luftlyd forplante seg direkte gjennom porene, og reduksjonstallet blir dårligere enn veggens vekt skulle tilsi. Et lydisolerende skille kan imidlertid utføres utelukkende av et porøst materiale hvis tykkelsen er tilstrekkelig, og nedenfor er angitt de luftlydisolerende egenskaper for mineralull med forskjellig volumvekt.

	Luftlydisolering pr. cm	Nødv. tykkelse for å oppnå 50 dB
Mineralull, 150 kg/m <sup>3</sup>	ca. 2 dB	ca. 25 cm
Mineralull, 50 kg/m <sup>3</sup>	ca. 1 dB	ca. 50 cm

En strålingsminskende kledning er en tynn, tung og bøyeelastisk plate. En 10 mm gipsplate eller en 5 mm sementasbestplate er eksempler på gunstige strålingsminskende kledninger. Strålingsminskende plate kan bli brukt som eneste kledning på begge sider av en tyngre konstruksjon. Det har vist seg at en strålingsminskende

kledning gir mindre godt resultat på en tung konstruksjon enn på en lettere, og på en tung, stiv konstruksjon vil det lønne seg å sette en slik kledning bare på en side.

En ren dobbelkonstruksjon består av to veggskall eller to dekker som ikke noe sted berører hverandre. I prinsippet vil lydbølgene sette den ene side i svingninger, derved oppstår svakere lydbølger i mellomrommet som setter den andre delen i svakere svingninger. Lette dobbelvegger med stor flateavstand gir meget god luftlydisolering i forhold til vekten. Tunge og tykke dobbelvegger vil som oftest ikke gi bedre resultat enn en enkelvegg med samme vekt. Middels tunge dobbelvegger blir bedre når den ene del kantisoleres.

I dobbelvegger med lett platekledning er dempende materiale i mellomrommet nødvendig for å hindre lydsvingninger i luftsjiktets lengderetning. En matte kan eventuelt festes på den ene veggside. Sammen med lette kledninger vil en tykkere mineralullmatte gi et ekstra bidrag til isoleringen. Matten bør i så fall være minst 10 cm tykk og forholdsvis tung, og den kan øke veggens reduksjonstall med ca. 1 dB for hver 5 cm av mattens tykkelse. I tyngre dobbelvegger har en matte liten eller ingen dempende virkning.

Tabell 4.4. Luftlydtall, LL for endel veggkonstruksjoner.

Veggkonstruksjon	Vekt kg/m <sup>2</sup>	Luftlydtall, LL dB
30 cm betong, sparklet på begge sider	700	56
21 cm betong, " " " "	490	53
15 cm betong, " " " "	350	50
1½-stein tegl B, pusset " " "	700	54
1-stein tegl B, " " " "	480	51
½-stein tegl B, " " " "	270	46
½-stein tegl, 10 mm gipspl., 8 cm avstand med 20 mm matte på en side	270	52
2 stk. 10 mm gipspl., 20 mm matte, 18 cm avstand	20	50
2 stk. 10 mm gipspl., 100 mm matte, 18 cm avstand	28	51
2 stk. (25 mm treullsementpl. + 15 mm puss), 8 cm avstand	60	50

### Dekker.

Det som er sagt om vegger gjelder også for dekker. Et massivdekke med golvbelegg som i alt veier  $430 \text{ kg/m}^2$  vil gi tilstrekkelig luftlydisolering mellom leiligheter, fig. 4.7, golv 1.

Flytende overgolv som egentlig anlegges for å forbedre trinnlydisoleringen gir også et tillegg til luftlydisoleringen selv om dekket ikke er noen ren dobbelkonstruksjon. En flytende betongplate på matte kan i praksis forbedre luftlydisoleringen med ca. 5 dB. Et flytende tregolv med mellomlag av matte eller porøse brikker gir også en forbedring på ca. 5 dB, fig. 4.7, golv 2.

### Trebjelkelag.

Et trebjelkelag med golvbord og himling med eller uten stubbegolv har liten egenvekt og gir dårlig luftlydisolering. Stubbegolv med fylling forbedrer lydisoleringen med bare et par decibel. Men vi kan forbedre konstruksjonen ved å bruke et strålingsminskende undertak som ikke har stiv kontakt med bjelkene, f. eks. en gipsplate. Dette kan gi en forbedring av middelreduksjonstallet på 10 til 15 dB, fig. 4.8, golv 5.

Flytende overgolv med mellomlegg av matte gir ikke tilfredsstillende lydisolering, fig. 4.8, golv 3. Underkledning på separate himlingsbjelker og med mellomlegg av matte gir god luftlydisolering, fig. 4.8, golv 4.

### Åpninger i vegg eller dekke.

En åpning hvor lydbølgene kan passere fritt gjennom svekker den lydisolerende evne betydelig. Tabell 4.5 angir de resulterende reduksjonstall for konstruksjoner med åpninger av forskjellig størrelse.



Tabell 4.5. Resulterende reduksjonstall for konstruksjoner med åpninger av forskjellig størrelse.

Åpningens størrelse i forhold til hele veggen	Reduksjonstall for vegger uten åpninger				Åpningens størrelsesorden, f. eks.
	30 dB	40 dB	50 dB	60 dB	
0,001 %	30 dB	40 dB	47 dB	50 dB	nøkkelhull
0,01 %	30 "	37 "	40 "	40 "	
0,1 %	27 "	30 "	30 "	30 "	lufteventil
1 %	20 "	20 "	20 "	20 "	
10 %	10 "	10 "	10 "	10 "	åpent vindu
20 %	7 "	7 "	7 "	7 "	
30 %	5 "	5 "	5 "	5 "	åpne dører
Resulterende reduksjonstall $R_s$					

#### Vegg med dør eller vindu.

En flate sammensatt av deler med forskjellig reduksjonstall vil få et resulterende reduksjonstall for hele flaten som stort sett er bestemt av reduksjonstallet for den svakest lydisolerende del med et lite tillegg. Tabell 4.6.

Tabell 4.6. Beregning av resulterende reduksjonstall  $R_s$  for en sammensatt konstruksjon.

Beste del	Dårligste del	Tillegg til den dårligste del, dB
95 %	5 %	13 (8)
90 %	10 %	10 (7)
80 %	20 %	7 (5)
70 %	30 %	5 (4)
50 %	50 %	3
20 %	80 %	1

Tallene i parentes brukes når forskjellen mellom flatene bare er 10 dB

Som regel vil dører og vinduer utgjøre de flatedeler som har dårligste reduksjonstall, og i tabell 4.7 og 4.8 er angitt middelreduksjonstall i dB for henholdsvis dører og vinduer.

Tabell 4.7. Middelreduksjonstall for dører, dB.

	Enkel dør	Dobbel dør
	dB	dB
Tung dør med flere sjikt og spesiell lukking og falsutforming	44	60
Dør med flere sjikt, spesiell lukking og falsutforming	38	50
Vanlig dør, 35 kg/m <sup>2</sup> , tetningslist	30	36
Vanlig dør, 35 kg/m <sup>2</sup>	27	33
Vanlig dør, 25 kg/m <sup>2</sup>	25	31
Vanlig dør, 15 kg/m <sup>2</sup>	22	28

Tabell 4.8. Middelreduksjonstall for vinduer, dB.

	Enkel glassrute	Dobbelt glass i avstand			
		2 cm	5 cm	10 cm	15 cm
	dB	dB	dB	dB	dB
8 mm glass	29	30	34	36	37
4 mm glass	27	28	32	35	36
2 mm glass	25	26	28	32	34

### Trinnlydisolering.

#### Trinnlyd.

Lyd som oppstår når vi går på et golv, flytter møbler eller slipper ned ting kalles trommelyd i det rom der lyden oppstår og trinnlyd i rommet under dekket. Trinnlyden oppstår i første rekke ved at dekket direkte settes i svingninger, og det er derfor ikke realistisk å angi lydisoleringen ved differansen mellom lydtrykket i sender- og mottakerrommet. Ved måling av trinnlydisolering plasseres et standardisert bankeapparat på dekket. Det fremkaller kraftig støy, og lydtrykknivået blir målt i det underliggende mottakerrom. Et lavt lydtrykknivå her angir god trinnlydisolering. Trinnlydnivåene måles ved 16 standardfrekvenser mellom 100 og 3200 Hz, og resultatet tegnes opp som en trinnlydkurve.

Middel-trinnlydnivået MTL dB (målt i hus) er gjennomsnittet av trinnlydnivåene  $L_T$  for de 10 frekvenser fra 200 til 1600 Hz.

Middeltrinnlydisoleringen MTI dB settes lik  $105 \text{ dB} - \text{MTL dB}$ . En stigende tallverdi her betyr bedre trinnlydisolering.

Cgså for trinnlyd er utarbeidet nordiske normkurver. Fig. 4.6. Normkurven T-50 svarer til bygningsforskriftenes krav til etasjeskillere mellom leiligheter. De forskjellige normkurver løper parallelt og T-48, T-46, T-44 osv. angir stadig dårligere trinnlydisolering. Målingene kan sies å tilfredsstille en normkurve når avviket i ugunstig retning er høyst 1,0 dB i gjennomsnitt for de 16 frekvenser. Denne kurveverdi betegnes som den effektive trinnlydisolering  $TT_{\text{eff}}$  dB mellom de to rom.

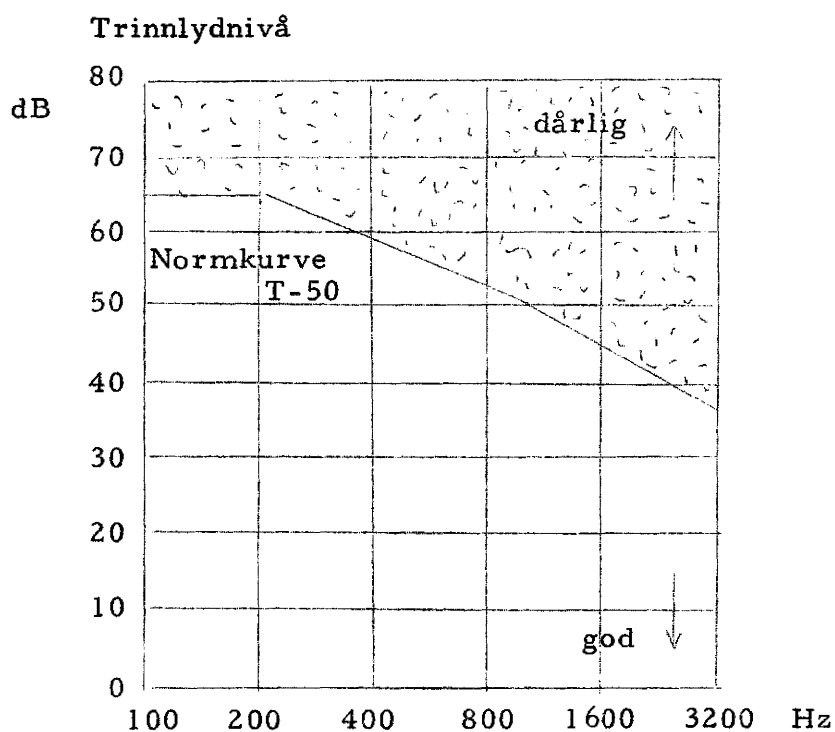


Fig. 4.6. Trinnlydnormkurve T-50.

På tilsvarende måte som for luftlyd vil den oppnådde lyd-isolering ved måling av trinnlyd avhenge av flanketransmisjonen og forhold ved mottakerrommet. Vi kan korrigere måleresultatet til å gjelde for følgende "normale" betingelser:

Mottakerrommets takhøyde	$H_0 = 2,5 \text{ m}$
- " - etterklangstid	$T_0 = 0,5 \text{ sek.}$
Flanketransmisjonen	$F_0 = \text{"normal"}$

Resultatet betegnes da som konstruksjonens trinnlydtall TT dB.

Et rådekkets trinnlydisolering kan forbedres ved forskjellige typer golvbelegg og overgolv. Ved måling av slike forbedringer angis trinnlydforbedringen L dB, som differansen i trinnlydnivå med og uten belegget. Middeltrinnlydforbedringen MTF dB er middel-tallet av trinnlydforbedringen L for de 10 måleområder med frekvenser fra 200 til 1600 Hz.

#### Trinnlydisolerende konstruksjoner.

Den trinnlydisolerende virkning av et dekke er avhengig av egenskapene hos rådekket, overgolvet og en eventuell underkledning.

Massive betongdekker kan ikke gjøres tilstrekkelig trinnlydisolerende bare ved å øke vekten av rådekket. Dette skyldes bl. a. at ved tunge, stive dekker vil flanketransmisjonen via veggene bli meget stor. Et betongdekke bør være pusset på undersiden, og av hensyn til trinnlydisoleringen bør dekket ha golvbelegg og eventuelt et flytende overgolv.

Massive gassbetongdekker gir dårlig trinnlydisolering spesielt ved lave frekvenser, og dekkene kan en vanskelig få effektivt forbedret ved hjelp av golvbelegg og underkledning.

Strålingsminskende underkledning er særlig effektivt for trebjelkelag, og den har mindre virkning under et tungt dekke.

Golvbelegg på rådekket kan gi vesentlig økning av trinnlydisoleringen, og de myke belegg har størst virkning. Men de myke belegg vil ofte ha ulemper ved liten motstand mot merking av stolbein, tunge møbler, skoheler o.l.. De nye vinylfiltbelegg vil antakelig stille seg gunstig med hensyn til trinnlydisolerende egenskaper.

Flytende overgolv gir den beste trinnlydisolerende forbedring av et massivt rådekke.

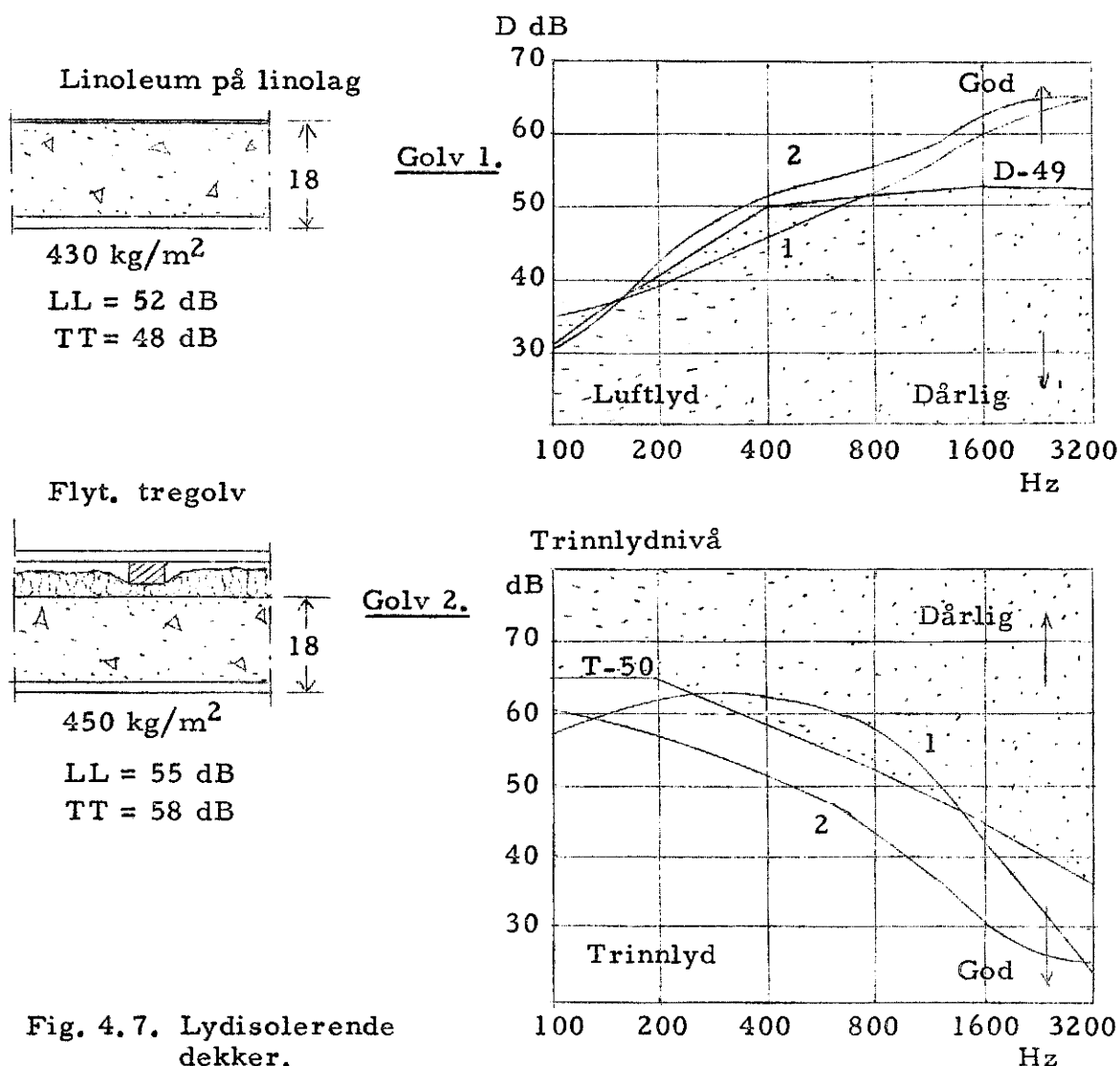


Fig. 4.7. Lydisolerende dekker.

Vanlige trebjelkelag har dårlige luftlyd- og trinnlydisolerende egenskaper, og spesielt er de dårlige ved lave frekvenser. Bass-toner og dype stemmer slipper lett igjennom, og trinn på golvet gir en dump lyd. Lydsvingningene ledes fra golvbordene gjennom bjelkene til underkledningen, og det er viktig å få avbrudt den direkte sammenhengen mellom overgolv og underkledning. Dette kan tenkes oppnådd med en eller flere av følgende forbedringer: Myke golvbelegg, flytende overgolv på matte, dempende materiale i hulrommet, stubbegolv belastet med fyllmasse, strålingsdempet underpanel belastet med fyllmasse, underkledning på himlingsbjelker og strålingsminskende underkledning sammen med matte.

Et golvbelegg kan gi et mindre tilskudd når det gjelder trinnlydisolasjon. Et flytende tregolv hvilende på golvbjelkene med et mellomlag av matte (fig. 4.8 golv 3) gir ikke tilstrekkelig trinnlydisolasjon, og resultatet svekkes etter en del års forløp. Dempende materiale i hulrommet, f. eks. mineralullmatte, vil forbedre luftlydisoleringen noe, men ikke trinnlydisoleringen. Stubbegolv med eller uten fyllmasse har liten eller ingen virkning. Underpanel belastet med fyllmasse vil gi noe forbedret luftlyd- og trinnlydisolering ved lave frekvenser, men ikke ved de høye. Underkledning på separate himlingsbjelker gir god isolering mot luftlyd (fig. 4.8 golv 4), men er ikke tilfredsstillende trinnlydisolerende. Hvis himlingsbjelkene ligger opp på grunnmur uavhengig av bindingsverket slik at flanketransmisjonen blir liten, vil resultatet bli bedre når det gjelder trinnlyd. En strålingsminskende underkledning f. eks. en 10 mm gipsplate, gir god virkning om den blir festet direkte til spikerslag under bjelkelaget, og det er viktig at spikerslagene plasseres direkte under hovedbjelkene (fig. 4.8 golv 5).

Et bjelkelag som tilfredsstillter kravene både til luftlyd- og trinnlydisolering er vist på fig. 4.8, golv 5. Det består av tregolv med golvbelegg, hulrom fylt med dempende materiale, en belastet underpanel, mineralullmatte festet under panelet med spikerslag (lekter) og en strålingsminskende underkledning i form av 10 mm gipsplate festet til spikerslagene.

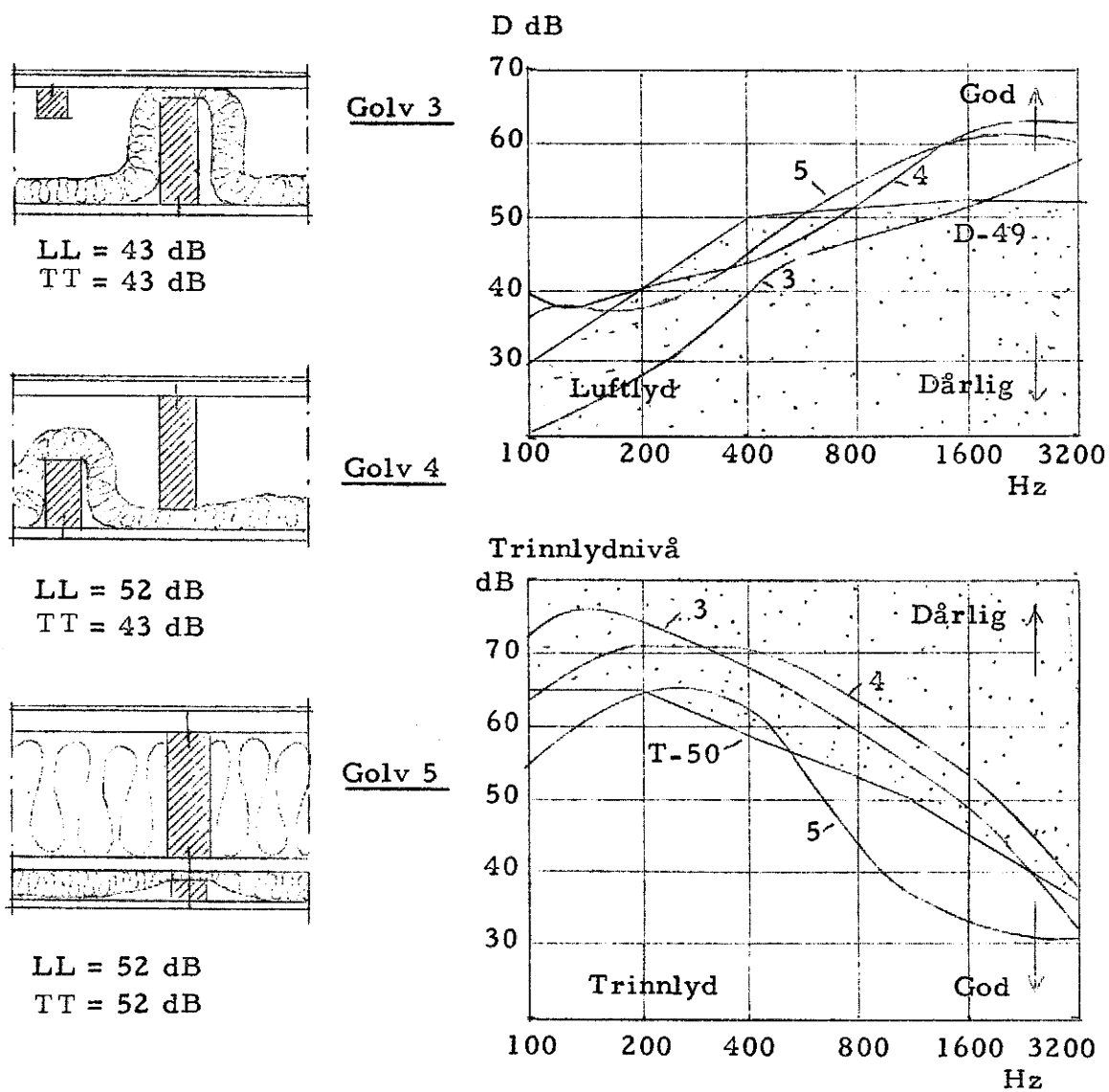


Fig. 4.8. Lydisolerende trebjelkelag.

## Romakustikk.

### Akustisk regulering.

Akustisk regulering vil si å tilpasse de akustiske forhold best mulig til rommets formål. Det går særlig ut på å regulere rommets etterklangstid, og det er mest aktuelt i foredragssaler, konsertsaler osv.

Etterklangstiden er som før nevnt fastsatt til den tid som går fra det øyeblikk en lydkilde i rommet avbrytes og til lydtryknivået er sunket 60 dB. Den er bestemt av rommets volum og av hva slags materialer det er i rommets begrensingsflater og inventar. Større volum gir større etterklangstid. Hårde materialer som absorberer lite lyd gir lang etterklangstid, f. eks. betong absorberer bare 2 % av lyden. Etterklangstiden kan beregnes med Sabines formel:

$$T = 0,16 \frac{V}{A}$$

hvor  $T$  = etterklangstiden i sekunder

$V$  = romvolumet i  $m^3$

$A$  = samlet lydabsorpsjon av alle flater,  $m^2$ -Sabin

$A = a_m \cdot S_o = \sum (a \cdot S)$

$S_o$  = overflate i  $m^2$  for alle flater i rommet

$a_m$  = middelabsorpsjonskoeffisienten for flatene i rommet

Sabines formel gir tilfredsstillende resultat når den midlere absorpsjonskoeffisient er mindre enn 0,20 (20 %).

Etterklangstiden må beregnes for forskjellige frekvenser, og i alminnelighet bør den være noenlunde lik for alle frekvenser. En viss heving av etterklangstiden for frekvenser under 200 Hz anbefales ofte.

### Lyddemping.

For å skape gode akustiske forhold kan det ofte være aktuelt å redusere uunngåelig støy til det minst mulige i f. eks. fabrikker, kontorer og korridorer. Når det gjelder støy skiller vi mellom direkte lyd og reflekslyd.

Direktelyden er lyd direkte fra lydkilden, og den avtar med økende avstand fra lydkilden. Etterklanglyden, reflekslyden, er



nesten konstant for hele rommet, og den blir mindre ved kortere etterklangstid.

I et lukket rom kan en dempe støy ved å redusere selv lydkilden, ved å avskjerme lydkilden dvs. redusere direktelyden, og ved akustisk demping av rommet med lydabsorberende materialer, dvs. reduksjon av reflekslyden. I et rom med sterkt lydreflekterende flater vil selv en liten reduksjon i etterklangstiden ofte betinge en merkbar forbedring.

Tabell 4.9. Lydabsorberende materialer. Absorpsjonskoeffisienten  $a$ .

Materiale, konstruksjon	Frekvens Hz		
	250	1000	4000
Teglvegg, pusset	0,02	0,04	0,05
Betong, pusset og upusset	0,01	0,02	0,03
Steinull, 50 mm, intet hulrom	0,53	0,78	0,77
Treullsementplater, 25 mm, 25 mm hulrom	0,15	0,55	0,59
Trefiberplater, porøse	0,30	0,45	0,45
Gipsplate	0,20	0,25	0,30
Perforert porøs trefiberplate, 25 mm	0,22	0,53	0,51
Golvteppe, axminstertype	0,14	0,33	0,82
5 mm kryssfiner, 50 mm matte, 50 mm hulrom	0,18	0,10	0,11
78-hulltegl på kant, 25 mm matte, 50 mm hulrom	0,77	0,27	0,35

Litteratur.

- Berg, R. og Høy, E.: Målinger av luftlydisolasjon i bolighus.  
NBI, Rapport nr. 22, Oslo 1956.
- Berg, R. og Høy, E.: Målinger av bankelyd i bolighus.  
NBI, Rapport nr. 23, Oslo 1956.
- Brandt, O. och Åberg, S.: Luft- och stegljudisolering hos bjälklag.  
Byggforskningen. Rapport 14/65. Stockholm 1965.
- Ingemansson, S.: Luft- och stegljudisolering, en sammanfattning  
av de viktigaste teorierna och deras tillämp-  
ning. Byggforskningen. Rapport 1/66.  
Stockholm 1966.
- Jørgen, G. Ø. og Løchstøer, W.: Lydisolering og litt om akustikk.  
NBI. Håndbok nr. 9, 222 s. Oslo 1960.
- Jørgen, G. Ø.: Some Reflections on Impact Sound Insulation  
of Floors. NBI. Rapport nr. 42. Oslo 1965.
- Jørgen, G. Ø.: Praktisk veiledning om lydisolering i bygninger  
NBI. Håndbok nr. 21, Oslo 1970.