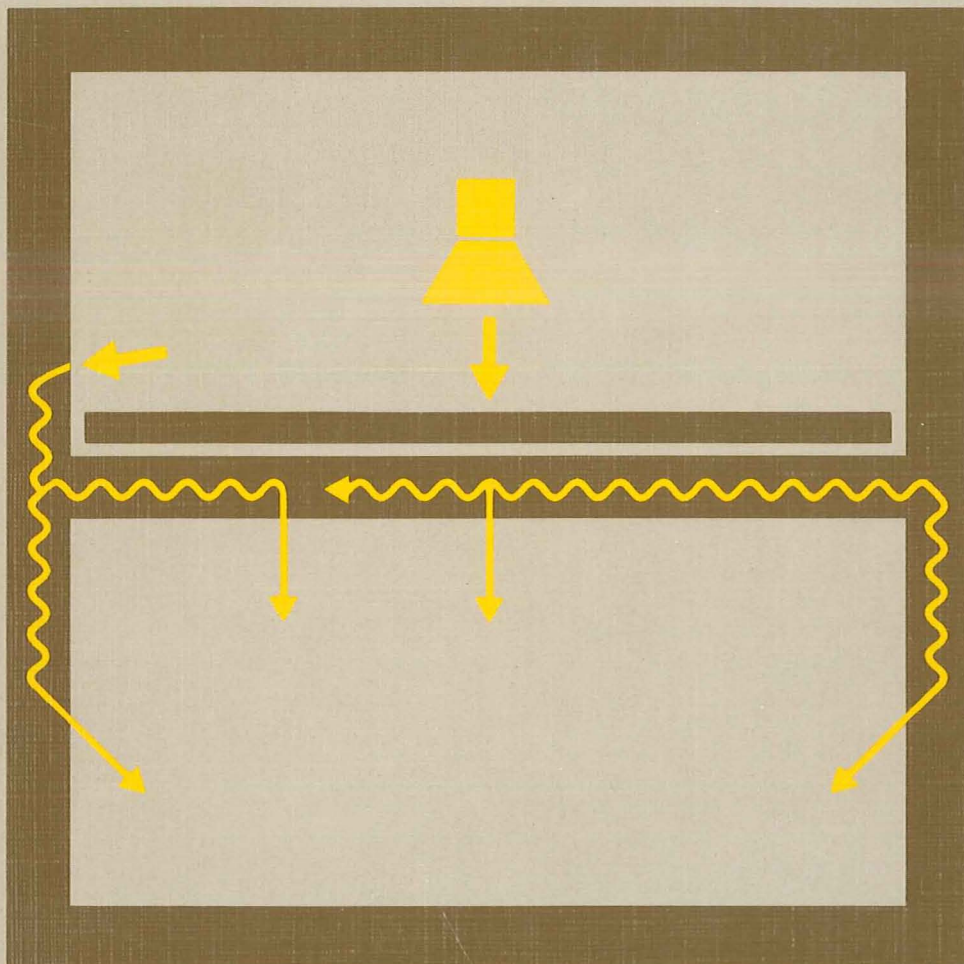


# Bygningsakustik

TEORI OG PRAKSIS



SBI-ANVISNING 166 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1989





# BYGNINGSKUSTIK

TEORI OG PRAKSIS

JØRGEN KRISTENSEN

JENS HOLGER RINDEL

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

- 6 JUNI 2006



SBI-ANVISNING 166 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1989

**SBI-anvisninger** er egne eller andres forskningsresultater bearbejdet til praktiske vejledninger til brug ved planlægning, udførelse og drift af bygninger og bebyggelser samt ved undervisning.

**SBI-publikationer.** Statens Byggeforskningsinstituts publikationer udgives i følgende serier: Anvisninger, Rapporter, Meddelelser, Byplanlægning, Landbrugsbyggeri og Beton. Salg sker gennem boghandelen eller direkte fra SBI. Instituttets årsberetning og publikationsliste er gratis og kan rekvireres fra SBI.

**SBI-abonnement.** Instituttets publikationer kan også fås ved at tegne et abonnement. Det sikrer samtidig løbende orientering om alle nye udgivelser. Information om abonnementsernes omfang og vilkår fås hos SBI.

ISBN 87-563-0736-5.

ISSN 0106-6757.

Pris: Kr. 323,00 inkl. 22 pct. moms.

Oplag: 2.000.

Tryk: Dyva Bogtryk, Glostrup.

Tegninger: Børge Holmen, Annette Juul Muusfeldt og Helle Vestergaard.

Omslag: Henning Holmsted.

Grafisk tilrettelægning: John Petersen.

Statens Byggeforskningsinstitut,

Postboks 119, 2970 Hørsholm.

Telefon 42 86 55 33.

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen:

*SBI-anvisning 166: Bygningsakustik. Teori og praksis. 1989.*

## Indhold

<i>Forord</i> .....	10
<i>Symboler</i> .....	12
Specielle tegn, 15	
<b>Første del: Teori</b> .....	17
<i>Kapitel 1: Grundlæggende akustiske begreber og størrelser</i> .....	18
Lyd, svingninger og bølger .....	18
Frekvensinterval, båndbredde og centerfrekvens, 22	
Harmoniske svingninger, matematisk beskrivelse, reel og kompleks notation, 22	
Rumakustiske begreber .....	25
Bygningsakustiske begreber .....	26
<i>Kapitel 2: Massive plader</i> .....	31
Bøjningsbølger .....	31
Koincidens og kritisk frekvens, 32	
Tykke plader, 35	
Egensvingninger, 36	
Tabsfaktor, 39	
Lydudstråling .....	42
Strålingsfaktor og tabsfaktor ved stråling, 42	
Lydudstråling fra egensvingninger, 42	
Kraftpåvirkning af en plade, 50	
Tvungne bøjningsbølger, 51	
Luftlydisolation .....	56
Masseloven, 56	
Vægimpedans, 57	
Tvungen transmission, 59	
Resonant transmission, 60	
Samlet transmission – beregningsmodel, 61	
Trinlydniveau .....	64
Punktexcitering af en plade, 64	
Trinlydniveau for massive dæk, 65	



Trinlyddæmpende gulvbelægninger, 66	
Sammenhæng mellem $R$ og $L_n$ , 69	
Inhomogene plader .....	70
Orthotrope plader, 70	
Sandwich-plader, 72	
<b>Kapitel 3: Dobbeltkonstruktioner</b> .....	80
Transmission via hulrum .....	80
Vinkelret lydindfald, 81	
Resonansfrekvens, 81	
Stående bølger i hulrum, 83	
Beregning for diffust lydindfald, 83	
Svagt dæmpet hulrum, 85	
Transmission via lydbroer .....	87
Punktforbindelser, 88	
Linieforbindelser, 90	
Randforbindelser, 92	
Resonant lydudstråling, 93	
Elastiske forbindelser, 94	
Koblingsfaktor, 95	
Sammenfatning, 97	
Svømmende gulve .....	99
Trinlyddæmpning, 100	
Fladelejrede gulve, 102	
Dynamisk stivhed af belastet mineraluld, 103	
Resonant reagerende gulve, 105	
Lokalt reagerende gulve, 107	
Punktlejrede gulve, 109	
Virkning af lydbroer, 110	
Sammenfatning, 110	
<b>Anden del: Måling, vurdering og beregning af lydisolations</b>	113
<b>Kapitel 4: Måling og vurdering af lydisolations</b> .....	114
Målemetoder .....	114
Luftlydisolation mellem rum, 114	
Luftlydisolation mellem det fri og et rum med ydervæg, 117	
Trinlydniveau, 118	
Efterklangstid, 119	
Knudepunktsdæmpning, 120	
Strålingsfaktor, 120	

Vurderingsmetoder .....	121
Luftlydisolation, 121	
Trinlydniveau, 122	
Efterklangstid, 123	
<b>Kapitel 5: Beregning af lydisolations i bygninger</b> .....	124
Luftlydisolation .....	124
Flankereduksionsstal, 124	
Knudepunktsdæmpning, 125	
Reciprocitetsmetode, 126	
Trinlydniveau .....	127
Trinlydniveau for en transmissionsvej, 127	
Reciprocitetsmetode, 129	
Samlet trinlydniveau, 129	
Knudepunktsdæmpning .....	129
Transmissionskoefficient, 130	
Andre bølgetyper, 133	
Beregning af randtab, 133	
<b>Tredje del: Lydisolation i praksis</b> .....	135
<b>Kapitel 6: Fundamenter, dæk og vægge</b> .....	136
Fundamenter og terrændæk .....	136
Støbte dæk .....	137
Træetageadskillelser .....	138
Støbte og murede vægge .....	139
Enkeltvægge af beton, letbeton og mursten, 141	
Dobbeltvægge af beton, letbeton og mursten, 144	
Skeletvægge .....	144
Skeletvægstyper, 144	
Skeletkonstruktioner, 145	
Tilslutningsfuger, 145	
Mineraluldsindlæg, 145	
Pladebeklædninger, 147	
Specielle flanketransmissionsforhold i ydervægge .....	147
Samlinger mellem vægge, fundamenter og dæk .....	148
Fundamenter, 149	
Terrændæk, 150	
Etagedæk, 150	
Tagdæk, 155	
Træetageadskillelser, 156	

Tagkonstruktioner af træ, 157	
Lette ydervægge, 159	
Tunge ydervægge, 165	
Indvendige vægge, 170	
Søjler, 173	
<b>Kapitel 7: Gulve, forsatsbeklædninger, forsatsvægge og underlofter</b>	<b>175</b>
Gulvbelægnings på dæk	175
Tynde gulvbelægnings	177
Svømmende gulve	177
Underlag for svømmende gulve, 177	
Svømmende trægulve på strøer på betondæk, 178	
Svømmende trægulve på strøer på træetageadskillelser, 182	
Svømmende træ- eller gipspladegulve, 182	
Svømmende betongulve, 183	
Forsatsbeklædninger, forsatsvægge og underlofter	186
Forsatsbeklædninger, 187	
Forsatsvægge, 187	
Underlofter, 187	
Samlinger	189
Gulve, 189	
Forsatsbeklædninger og forsatsvægge, 192	
Underlofter, 192	
<b>Kapitel 8: Døre og vinduer</b>	<b>194</b>
Døre	194
Dørpladers lydisolering, 194	
Tæthed mellem dørplader og dørkarme, 196	
Karmfuger, 196	
Tilpasning mellem karmhuller og dørhuller, 197	
Døre uden underkarmstykke, 198	
Dobbeldøre, 199	
Lydsluser, 199	
Entredøre med brevåbninger, 200	
Døre og vinduer i fælles karmpartier, 200	
Vinduer	200
Vinduesraders lydisolering, 200	
Tæthed mellem vinduesrader og -rammer eller -karme, 202	
Tæthed mellem vinduesrammer og -karme, 202	
Karmfuger, 203	
Dobbeltvinduer, 205	

<b>Kapitel 9: Installationers indvirkning på lydisolering</b>	<b>206</b>
Rørgennemføringer	206
El-anlæg	206
Centralvarmeanlæg	209
Ventilationsanlæg	210

<b>Litteratur og stikord</b>	<b>215</b>
<i>Litteratur</i>	217
Artikler og bøger	217
Normer og standarder	219
DS (Dansk Standard), 219	
IEC (International Electrotechnical Commission), 219	
ISO (International Organization for Standardization), 219	
NORDTEST (nordiske målemetoder), 220	
DIN (Deutsche Industrie Norm, tysk standard), 220	
<i>Stikordsregister</i>	221

# Forord

Bygningsakustik er den del af lydlæren, der omfatter lydens udbredelse i og gennem bygningsdele. Udviklingen inden for dette område er i hovedsagen sket i dette århundrede. Men allerede i forrige århundrede vidste man, at tunge, murede vægge giver god lydisolation, og at lerindskud i træbjælkelag – foruden at forsinke gennembrænding af etageadskillelsen – også reducerer lyd gennemgangen mellem etagerne.

I 1911 forsvarede Richard Berger en doktorafhandling »Über die Schalldurchlässigkeit« ved den Kongelige Tekniske Højskole i München og lagde efter manges mening grunden til faget bygningsakustik. Den meget anvendte *masselov* tilskrives således Berger og betegnes i ældre tysk litteratur ofte som Bergers lov. I de følgende år udviklede faget sig fra at være en tumleplads for autodidakter med ofte særegne meninger om lydens fysik til at være et fag baseret på et videnskabeligt grundlag. Men først med udviklingen af akustisk måleudstyr baseret på svagstrømsteknik blev det muligt at foretage objektive bygningsakustiske målinger uden for laboratorier. Denne udvikling havde stor fremgang lige før anden verdenskrig, og førte til, at der i de følgende år i de fleste europæiske lande blev udgivet lærebøger i akustik. I Danmark udkom som de mest kendte »Lille akustik. Bygningsakustik for arkitekter« og »Lærebog i bygningsakustik for ingeniører«, begge af dr.techn. Fritz Ingerslev, daværende lektor, senere professor ved Danmarks Tekniske Højskole. Sidstnævnte bog blev benyttet som lærebog i bygningsakustik fra udgivelsen i 1949 til først i 1970'erne.

Senere har udviklingen medført behov for en ajourført samlet fremstilling af bygningsakustikken, både som teoretisk disciplin og som middel i byggepraksis til at opnå de bedst mulige lydforhold for bygningernes brugere.

Den hermed foreliggende anvisning om bygningsakustik er resultatet af et samarbejde med lektor, lic.techn. Jens Holger Rindel, Laboratoriet for Akustik på Danmarks Tekniske Højskole, og den teoretiske fremstilling er i et vist omfang baseret på forelæsningsnoter til faget Bygnings- og rumakustik. Flere afsnit er dog helt nye. Den byggetekniske del omfatter hovedindholdet i 12 SBI-lydpjecer, udgivet 1970–79, dog suppleret betydeligt og omordnet som håndbogsstof.

Under udarbejdelsen af manuskriptet til anvisningen har rådgivende civilingeniør Arnt Erik Wiuff givet værdifulde kommentarer til det byggetekniske stof, og civilingeniør Erling Sandermann Olsen, SBI, til det teoretiske stof. Arkitekt Filip Wanning, SBI, har bistået med redaktionel bearbejdning af manuskriptets tekst og figurer.

Den samlede fremstilling af bygningsakustikken i teori og praksis gør anvisningen anvendelig som lærebog for de videregående tekniske uddannelser. Med den omfattende samling af eksempler på lydteknisk korrekte konstruktioner kan anvisningen desuden være til nytte som håndbog for arkitekter, ingeniører og andre teknikere, der forestår projektering og udførelse af byggeri, eller som arbejder med udvikling af konstruktioner og komponenter af høj lydteknisk kvalitet.

Statens Byggeforskningsinstitut  
Byggeriets Akustiske Målestation (BAM), august 1989  
Jørgen Kristensen

Den byggetekniske del af denne anvisning, kapitlerne 6–9, er også udgivet særskilt som SBI-anvisning 167: Lydisolation i praksis.

# Symboler

Listen omfatter hovedsymboler. Desuden anvendes varianter med andre indices end de angivne. Symboler, der kun anvendes et enkelt sted, er beskrevet, hvor de anvendes.

$A$	ækvivalent absorptionsareal, $m^2$
$A$	amplitdefaktor
$A_0$	referenceareal = $10 m^2$
$B$	bøjningsstivhed per breddeenhed, Nm
$D$	niveaudifferens, dB
$D_{ij}$	knudepunktsdæmpning, dB
$E$	energi, J
$E$	elasticitetsmodul, Pa
$F$	kraft, N
$F_0$	kraft i exciteringspunkt, N
$G$	forskydningsmodul, Pa
$K$	normeret vægimpedans
$K_c$	koincidenstal (materialekonstant), m Hz
$L_a$	accelerationsniveau, dB <i>re</i> $10^{-6} m/s^2$
$L_p$	lydtrykniveau, dB <i>re</i> $10 \mu Pa$
$L_1$	lydtrykniveau i senderum, dB
$L_2$	lydtrykniveau i modtagerum, dB
$L_\ell$	længde af linieforbindelser, m
$L_n$	trinlydniveau, dB <i>re</i> $20 \mu Pa$
$L_{nw}$	vægtet trinlydniveau, dB
$\Delta L$	trinlyddæmpning, dB
$L_r$	længde af randforbindelser, m
$L_v$	hastighedsniveau, dB <i>re</i> $10^{-9} m/s$
$N_p$	antal punktforbindelser
$\Delta N$	antal egenfrekvenser
$P_a$	lydeffekt, W

$R$	reduktionstal, dB
$R_0$	reduktionstal efter masselov, dB
$R_{ij}$	flankerreduktionstal, flade $i$ til $j$ , dB
$R_r$	reduktionstal for resonant transmission, dB
$R_t$	reduktionstal for tvungen transmission, dB
$R_w$	vægtet reduktionstal, dB
$\Delta R_h$	korrektion for tyk plade, dB
$\Delta R_m$	korrektion for lydbroer, dB
$S$	areal, $m^2$
$S_h$	exciteringsareal, $m^2$
$T$	efterklangstid, s
$U$	omkreds, m
$V$	volumen, $m^3$
$Y$	mekanisk admittans, m/sN
$Y_0$	punktadmittans, m/sN
$Z$	mekanisk impedans, Ns/m
$Z_0$	punktimpedans, Ns/m
$Z_b$	impedans af lydbro, Ns/m eller Ns/m <sup>2</sup>
$Z_d$	impedans af elastisk gulvunderlag, Ns/m eller Pa s/m
$Z_h$	impedans af hammer, Ns/m
$Z_\ell$	linieimpedans, Ns/m <sup>2</sup>
$Z_r$	linieimpedans langs pladerand, Ns/m <sup>2</sup>
$Z_v$	vægimpedans, Pa s/m

$a$	acceleration, $m/s^2$
$a$	karakteristisk pladedimension, m
$b$	centerafstand for linielydbroer, m
$c$	lydhastighed i luft, m/s
$c_B$	hastighed af frie bøjningsbølger, m/s
$c_m$	hastighed af kompressionsbølge i elastisk materiale, m/s
$c_s$	hastighed af forskydningsbølger, m/s
$d$	hulrumsdybde, m
$e$	grundtal for den naturlige lotaritme = 2,718 ···
$e$	centerafstand for punktllydbroer, m
$f$	frekvens, Hz
$\Delta f$	frekvensinterval, Hz
$f_c$	kritisk frekvens, Hz
$f_{c\theta}$	koincidensfrekvens, Hz
$f_d$	knækfrekvens for hulrum, Hz
$f_{dil}$	dilatationsresonansfrekvens, Hz
$f_h$	grænsefrekvens for tykke plader, Hz

$f_k$	knækfrekvens for lydbro, Hz
$f_{mn}$	egenfrekvens i plade, Hz
$f_{11}$	laveste egenfrekvens i plade, Hz
$f_0$	resonansfrekvens, Hz
$f_s$	slagfrekvens af bankemaskine = 10 Hz
$g$	tyngdeacceleration = 9,81 m/s <sup>2</sup>
$h$	pladetykkelse, m
$h$	faldhøjde af hamre = 0,040 m
$h_t$	tykkelse af gulvbelægning, m
$i$	naturligt tal, flade nummer
$j$	naturligt tal, flade nummer
$j$	imaginær enhed = $\sqrt{-1}$
$k$	vinkelbølgetal, m <sup>-1</sup>
$k_d$	dynamisk stivhed, N/m
$k_d'$	dynamisk stivhed per længdeenhed, N/m <sup>2</sup>
$k_d''$	dynamisk stivhed per arealenhed, N/m <sup>3</sup>
$k_a''$	dynamisk stivhed af luftlag, N/m <sup>3</sup>
$k_m''$	dynamisk stivhed af gulvunderlag, N/m <sup>3</sup>
$l$	længde, m
$l_x$	pladedimension, m
$l_y$	pladedimension, m
$m$	naturligt tal
$m$	masse per arealenhed, kg/m <sup>2</sup>
$m_h$	masse af hamre = 0,500 kg
$n$	naturligt tal
$n$	impedansforhold
$p$	lydtryk, Pa
$p_0$	referencelydtryk = 20 $\mu$ Pa
$q$	porøsitet
$re$	med reference til
$t$	tid, s
$t$	temperatur, °C
$v$	hastighed af pladesvingninger, m/s
$v_0$	hastighed i exciteringspunkt, m/s
$x$	koordinat, m
$y$	koordinat, m
$z$	koordinat, m
$\Delta z$	statisk nedbøjning, m

$A$	logaritmisk dekrement
$\alpha$	absorptionskoefficient
$\beta$	formfaktor
$\gamma$	vinkel, rad
$\gamma$	koblingsfaktor for elastisk forbindelse
$\delta$	dæmpningskoefficient, s <sup>-1</sup>
$\zeta$	udsving af pladesvingninger, m
$\eta$	tabsfaktor
$\eta_{eq}$	ækvivalent tabsfaktor for 1/3 oktavbånd
$\theta$	indfaldsvinkel, rad
$\kappa$	faktor for randbetingelse
$\kappa$	faktor for resonant lydudstråling
$\lambda$	bølgelængde, m
$\lambda_B$	bøjningsbølgelængde, m
$\mu$	Poissons forhold
$\pi$	3,14 ···
$\rho$	densitet af luft, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_m$	densitet af materiale (ikke luft), kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	stålingsfaktor, egensvingninger
$\sigma_\theta$	strålingsfaktor, tvungne bøjningsbølger
$\sigma_d$	strålingsfaktor, diffust lydindfald
$\tau$	transmissionskoefficient
$\phi$	fasevinkel, rad
$\psi$	faktor
$\psi_{mn}$	formfaktor for egensvingning
$\omega$	vinkelfrekvens, rad/s (indekser som for $f$ )

### Specielle tegn

—	middelværdi
~	effektivværdi
^	amplitudeværdi
	numerisk værdi
< >	middelværdi over flade eller rum
Re{ }	realdel af komplekst tal
Im{ }	imaginærdel af komplekst tal
≧	meget større end
≦	meget mindre end

## Teori

*I bogens første kapitel defineres akustikkens begreber, termer og symboler, dog ikke udtømmende, men alene som hjælp til læsere, der ikke har betydningerne present. Derefter behandles lydets udbredelse i massive plader og dobbeltkonstruktioner samt lydisolations og trinlydniveau ud fra teoretiske synspunkter. Forståelsen af disse afsnit forudsætter god fysisk indsigt hos læseren, da der er lagt vægt på dels at gøre rede for de mekanismer, der styrer lydets transmission gennem og udstråling fra bygningsdele, dels at opstille en beregningsmodel for lydisolations, alt så vidt muligt med inddragelse af den nyeste viden. Den almindelige brug af edb har gjort det relevant visse steder at medtage formeludtryk, der ikke egner sig til simple overslagsberegninger, men derimod til en mulig større beregningsmodel for lydisolations.*

# Grundlæggende akustiske begreber og størrelser

I dette kapitel behandles de grundlæggende begreber i akustikken, svingninger i elastisk materiale, og de forhold, der har betydning for måling, udbredelse og beskrivelse af lydølger. Specielt omtales de definitioner, der har tilknytning til bygningsakustikken.

## Lyd, svingninger og bølger

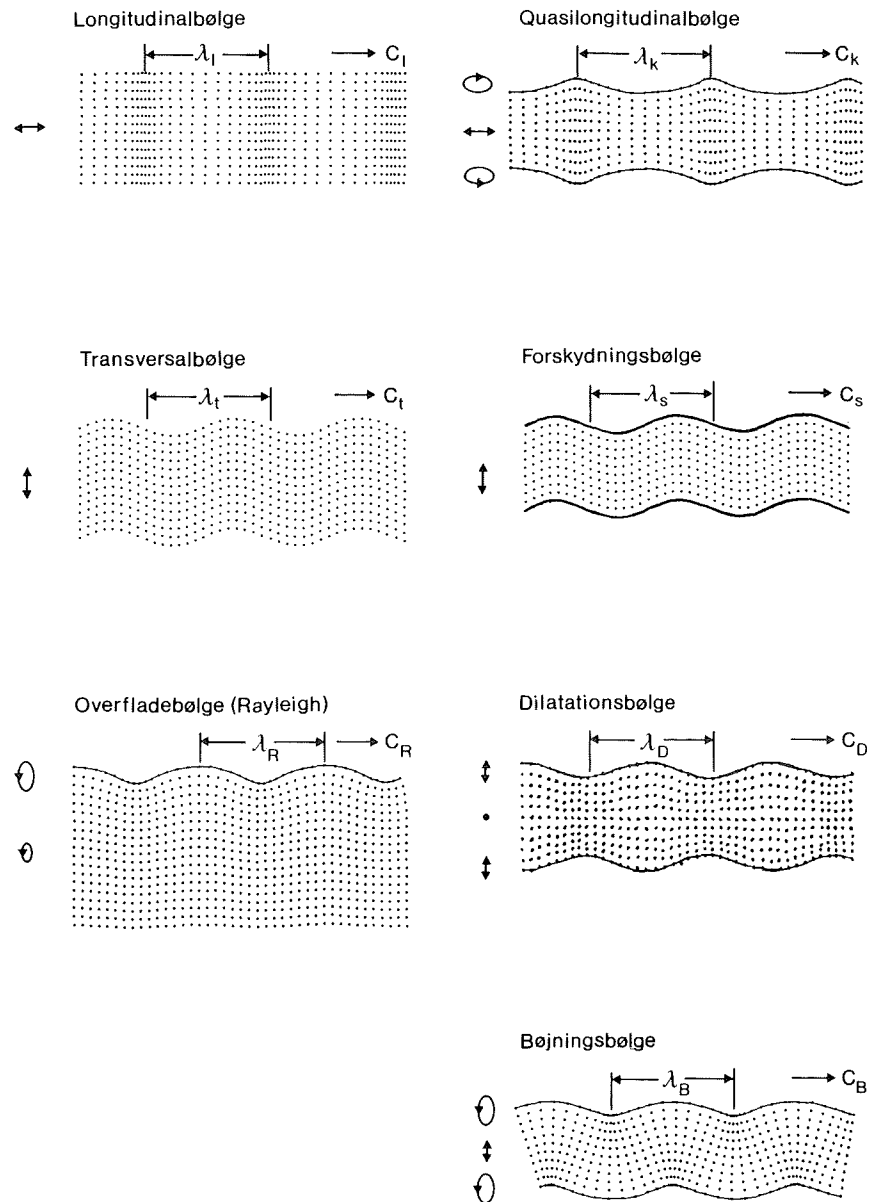
Lyd er betegnelsen for hørbare svingninger, der opstår og udbreder sig i et elastisk medium, såsom gas, væske eller fast stof, når mediets molekyler ved en kraftpåvirkning bringes til at udføre svingninger omkring en ligevægtstilstand. Lyd, der udbreder sig i luft, kaldes for *luftlyd*.

Udbredelseshastigheden for svingningerne er konstant og karakteristisk for det pågældende medium. I gasser og væsker forekommer kun én svingningstype. I fast stof kan der på grund af sammenhængskraften forekomme flere svingningstyper. Svingningernes udbredelse sker som *bølger*.

I gasser og væsker forekommer kun *kompansionsbølger*, dvs. bølger eller svingninger, hvor udbredelsesretningen er parallel med molekylernes udsvingsretning. Specielt kaldes bølger, hvor *bølgefronterne* overalt er plane og parallelle for *plane bølger*.

I faste stoffer forekommer to hovedsvingningstyper, longitudinal- og transversalsvingninger, hvor udbredelsesretningen er henholdsvis parallel med og vinkelret på molekylernes udsvingsretning. Hertil kommer i udstrakte legemer, overfladebølger. I legemer med begrænset udstrækning i én eller to retninger forekommer quasilongitudinale bølger, *bøjningsbølger* med flere, se figur 1.1. I begrænsede legemer af luft eller faste stoffer kan opstå såkaldte *stående bølger*, hvis afstanden mellem to plane begrænsningsflader er multipla af halve bølgelængder.

Svingningerne kan afhængigt af materialeegenskaber være svagt dæmpet, således at udbredelsesdæmpningen er uden betydning eller stærkt dæmpet, således at der sker et betydeligt tab af energi under svingningernes udbredelse. Energitalet giver sig udslag i, at udsvingenes maksimale størrelse, amplituden, aftager. Tabet kan udtrykkes ved den naturlige logaritme til forholdet



Figur 1.1. Eksempler på svingnings- eller bølgetyper i udstrakte medier (til venstre) og i plader eller stænger (til højre).

mellem to på hinanden følgende udsving, der kaldes det logaritmiske dekrement  $\Delta$ .

Periodetiden for én svingning kaldes  $T$ .

Antallet af svingninger per sekund kaldes svingningens *frekvens*  $f$  og måles i hertz.

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{Hz}) \quad (1.1)$$

Den vejlængde, som en bølge udbreder sig i periodetiden  $T$ , kaldes for *bølgelængden*  $\lambda$ .

Udbredelsehastigheden  $c$  er lig med antallet af svingninger per sekund gange den per svingning tilbagelagte vejlængde

$$c = \lambda f \quad (\text{m/s}) \quad (1.2)$$

I gasser og væsker er lydhastigheden

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (\text{m/s}) \quad (1.3)$$

hvor  $K$  er *kompresionsmodulet* og  $\rho$  mediets densitet.

I luft (standardatmosfære) er *lydhastigheden* og *densiteten*

$$c = 331,29 \sqrt{\frac{T_0 + t}{T_0}} \quad (\text{m/s}) \quad (1.4)$$

$$\rho = 1,2929 \cdot \frac{T_0}{T_0 + t} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1.5)$$

hvor  $t$  er temperaturen i °C og  $T_0 = 273,15$  °K.

I faste stoffer er lydhastigheden for *longitudinalbølger*

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho_m(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (\text{m/s}) \quad (1.6)$$

hvor  $E$  er *elasticitetsmodulet*, og  $\mu$  er *Poissons forhold*. På grund af tværkontraktionen vil kompressionsbølger i plader eller stænger ikke være rene longitudinalbølger, men de vil ledsages af en svagere transversal bevægelse. Et punkt på overfladen vil derfor udføre en ellipseformet bevægelse som vist i figur 1.1. Lydhastigheden for en sådan *quasilongitudinal bølge* er i plader

$$c_{k, pl} = \sqrt{\frac{E}{\rho_m(1-\mu^2)}} \quad (\text{m/s}) \quad (1.7)$$

mens den i stænger er

$$c_{k, st} = \sqrt{\frac{E}{\rho_m}} \quad (\text{m/s}) \quad (1.8)$$

I sidste tilfælde forudsættes, at tværdimensionerne er små i forhold til bølgelængden.

Poissons forhold er for de fleste materialer mellem 0,25 og 0,5. Nogle eksempler er gengivet i tabel 1.1.

Tabel 1.1. Poissons forhold  $\mu$  for nogle materialer.

Glas	0,24
Jern	0,27
Nikkel	0,30
Tin	0,31
Stål	0,33
Aluminium	0,34
Kobber	0,34
Bly	0,45
Beton	0,1-0,25

*Transversalbølger* kan forekomme i udstrakte faste stoffer og i plader i form af en *forskydningsbølge*, der har udbredelsehastigheden

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho_m}} = \sqrt{\frac{E}{\rho_m 2(1+\mu)}} \quad (\text{m/s}) \quad (1.9)$$

hvor  $G$  er *forskydningsmodulet*. *Dilatationsbølgen*, som også er vist i figur 1.1, er ligeledes en transversalbølge i en plade, men dilatationsbølgen er symmetrisk omkring pladens midterplan.

Rayleighbølger er et eksempel på en *overfladebølge*, idet svingningsamplituden er størst ved overfladen og aftager dybere ind i materialet. Udbredelsehastigheden er lidt mindre end for transversalbølger, omkring en faktor 0,93 for metaller.

For *bøjningsbølger*, der er den vigtigste type i bygningsakustik, er udbredelsehastigheden

$$c_B = \sqrt{2\pi f} \sqrt[4]{\frac{B}{m}} \quad (\text{m/s}) \quad (1.10)$$

hvor  $B$  er bøjningsstivheden per breddeenhed og  $m$  er massen per arealenhed. *Bøjningsstivheden* er defineret for en plade eller stav som produktet mellem et bøjningsmoment og den deraf følgende krumningsradius.



## Frekvensinterval, båndbredde og centerfrekvens

Ved måling af lyd benyttes i vid udstrækning filtrering i begrænsede frekvensintervaller. *Båndbredden*  $\Delta f$  er betegnelsen for differencen mellem et *frekvensinterval*s øvre og nedre grænsefrekvens

$$\Delta f = f_{\theta} - f_n \quad (\text{Hz}) \quad (1.11)$$

En *oktav* er betegnelsen for en båndbredde, hvor forholdet mellem øvre og nedre frekvens  $f_{\theta}/f_n = 2$ . For  $1/2$  *oktav* og  $1/n$  *oktav* er forholdet  $f_{\theta}/f_n$  henholdsvis  $\sqrt[3]{2}$  og  $\sqrt[n]{2}$ . En *centerfrekvens* er den geometriske middelværdi af øvre og nedre frekvens

$$f_{center} = \sqrt{f_n f_{\theta}} \quad (\text{Hz}) \quad (1.12)$$

I DS/ISO 266 er 1000 Hz valgt som basisfrekvens for normerede målefrequenser i stedet for frekvensen  $2^{10} = 1024$  Hz. Derfor er den eksakte værdi for frekvensforholdet i  $1/2$  *oktav*

$$\frac{f_{\theta}}{f_n} = \sqrt[10]{10} \approx 1,2589 \quad (1.13)$$

En *relativ båndbredde* er forholdet mellem en båndbredde og dens centerfrekvens

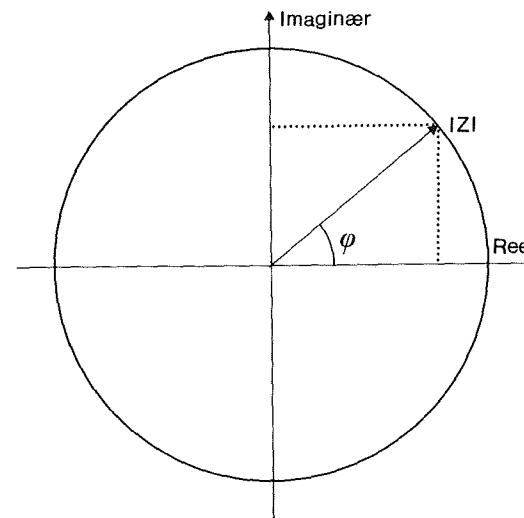
$$\frac{\Delta f}{f_{center}} = \sqrt{\frac{f_{\theta}}{f_n}} - \sqrt{\frac{f_n}{f_{\theta}}} \quad (1.14)$$

For et oktavfilter er den relative båndbredde ca. 0,71 og for et  $1/2$  *oktav* filter ca. 0,23.

## Harmoniske svingninger, matematisk beskrivelse, reel og kompleks notation

Molekyleres udsving fra deres ligevægtsstilling er i de fleste lydsvingninger så små, at de med god tilnærmelse udføres som *harmoniske svingninger*. Størrelser som lydtryk, hastighed, kraft og udsving kan opløses i harmoniske svingninger og de kan beskrives matematisk ved hjælp af både reelle og komplekse talstørrelser.

Hvis alle reelle tal tænkes at udgøre en uendelig ret linie, så udgør alle komplekse tal en plan med uendelig udstrækning. Planen bestemmes f.eks. af den reelle og den imaginære talakse, se figur 1.2. Det bemærkes, at her benyttes den imaginære enhed  $j = \sqrt{-1}$ . I mange fysikbøger benyttes  $i = \sqrt{-1}$ , der ikke umiddelbart kan erstatte  $j$ , hvilket i princippet kan henføres til, at der



Figur 1.2. Afbildning af et komplekst tal i en kompleks plan.

anvendes forskellig definition af tidsfaktoren, se nedenfor. En harmonisk varierende størrelses tidsfunktion kan i det reelle talområde udtrykkes ved en sinusfunktion

$$y = \hat{y} \sin(\omega t + \phi) \quad (1.15)$$

og i det komplekse talområde ved en cirkelbevægelse

$$Z = |Z| e^{j(\omega t + \phi)} = |Z| (\cos(\omega t + \phi) + j \sin(\omega t + \phi)) \quad (1.16)$$

hvor  $Z$  er et komplekst tal, der således kan opfattes enten som modulus, hvis størrelse er den numeriske værdi af det komplekse tal  $Z$ , og argumentet, der angiver vinkeldrejningen  $\omega t$  og fasevinklen  $\phi$ , eller som summen af en realdel ( $|Z| \cos(\omega t + \phi)$ ) og en imaginærdel  $j(|Z| \sin(\omega t + \phi))$ .

I både den reelle og den komplekse notation udtrykker

$\hat{y}$ eller $ Z $	amplituden
$\omega$	vinkelfrekvensen
$t$	tiden
$\phi$	en fasevinkel

Imidlertid er der ved en svingnings udbredelse tale om både en tidsfunktion og en stedfunktion. En fremadskridende bølge kan matematisk beskrives ved

$$Z = |Z| e^{j(\omega t - kx)} = |Z| e^{j\omega t} e^{-jkx} \quad (1.17)$$

idet fasevinklen  $\phi$  er sat til nul. Den tidligere nævnte forskel mellem de imaginære enheder  $i$  og  $j$  fremgår af tidsfaktoren, som enten er  $e^{j\omega t}$  eller  $e^{-i\omega t}$ . Den første med enheden  $j$  anvendes almindeligvis i akustikken.

Vinkelfrekvensen  $\omega$  udtrykker fasens ændringshastighed i radianer per sekund

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (\text{s}^{-1}) \quad (1.18)$$

Vinkelbølgetallet  $k$  udtrykker fasens ændring i udbredelsesretningen i radianer per meter

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (1.19)$$

Lydtrykket er lufttrykkets øjeblikkelige afvigelse fra barometertrykket forårsaget af en lydbølge. Da lydtrykket veksler mellem positive og negative værdier bruges ofte effektivværdien  $\bar{p}$ , som er kvadratroden af middelværdien af den kvadrerede øjebliksværdi over et givet tidsinterval, RMS (Root mean square).

$$\bar{p} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} p^2 dt} \quad (\text{Pa}) \quad (1.20)$$

For harmoniske svingninger er *effektivværdien*:

$$\bar{p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{p} \quad (\text{Pa}) \quad (1.21)$$

hvor  $\hat{p}$  er amplitudeværdien.

Lydtryk kan excitere eller påvirke et legeme. Inden for akustikken anvendes ordet *excitering* i betydning påvirkning af et system, således at der opstår svingninger eller lyd. F.eks. kan et rum exciteres af luftlydkilder eller af vibrationskilder på rummets overflade.

Lydtrykket angives ikke direkte, men i forhold til et referencelydtryk. Hertil benyttes enheden bel, der er logaritmen med grundtallet 10 til forholdet mellem to energistørrelser. Normalt benyttes enheden *decibel*, dB, der er en tiendedel bel

$$10 \log \left( \frac{E_1}{E_0} \right) = \text{antal dB} \quad (1.22)$$

Feltstørrelser som lydtryk, hastighed og acceleration skal kvadreres inden logaritmen tages, fordi de først ved kvadrering bliver relaterede til energistørrelser.

Absolutte størrelser kan udtrykkes som et niveau i dB i forhold til en standardiseret referenceværdi. *Lydtrykniveauet* er niveauet i decibel af kvadratet på lydtrykkets effektivværdi over en standardiseret referenceværdi:

$$L_p = 10 \log \left( \frac{\bar{p}^2}{p_0^2} \right) = 20 \log \left( \frac{\bar{p}}{p_0} \right) \quad (\text{dB re } 20 \mu \text{ Pa}) \quad (1.23)$$

hvor  $p_0 = 20 \mu \text{ Pa}$  er referencelydtrykket. Dette svarer omtrent til den svagest hørlige lyd for det menneskelige øre.

*Lydenergi* er lydens samlede kinetiske og potentielle energi. Enhed joule, J.

*Lyd effekt* er lydenergi per tidsenhed gennem en given flade. En kildes lydeffekt er den samlede udstrålede lydenergi per tidsenhed. Enhed watt, W.

*Lydintensitet* er lydeffekt per arealenhed. Enhed watt per  $\text{m}^2$ ,  $\text{W}/\text{m}^2$ .

*Accelerationsniveau* er niveauet i decibel af kvadratet på svingningernes acceleration over en standardiseret referenceværdi:

$$L_a = 10 \log \left( \frac{\bar{a}^2}{a_0^2} \right) = 20 \log \left( \frac{\bar{a}}{a_0} \right) \quad (\text{dB re } 10^{-6} \text{ m/s}^2) \quad (1.24)$$

hvor  $a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$  er referenceaccelerationen.  $L_a$  bruges især ved måling af vibrationer og svingninger i faste stoffer.

*Hastighedsniveau* er niveauet i decibel af kvadratet på svingningernes hastighed over en standardiseret referenceværdi:

$$L_v = 10 \log \left( \frac{\bar{v}^2}{v_0^2} \right) = 20 \log \left( \frac{\bar{v}}{v_0} \right) \quad (\text{dB re } 10^{-9} \text{ m/s}) \quad (1.25)$$

hvor  $v_0 = 10^{-9} \text{ m/s}$  er referencehastigheden.

For en plade bestemmes ofte middelhastighedskvadratet  $\langle \bar{v}^2 \rangle$  for hele pladen ved midling i tid og sted over hele pladearealet.

## Rumakustiske begreber

Nogle få rumakustiske begreber er også nødvendige i bygningsakustikken. Der er her kun medtaget de absolut nødvendige, for yderligere information henvises til lærebøger i rumakustik.

*Lydfelt* er betegnelsen for rumlig tilstedeværelse af lydbølger, blandt disse udgør stående bølger en særlig gruppe, der har væsentlig betydning i bygningsakustik.

*Diffust lydfelt* er et lydfelt i et rum, hvor energitætheden overalt er den samme, hvor lyden udbreder sig ligeligt i alle retninger og hvor alle faseforskelle er lige sandsynlige.

$$\begin{aligned}
 R &= 10 \log \frac{\langle \bar{p}_1^2 \rangle S}{\langle \bar{p}_2^2 \rangle A_2} \\
 &= 10 \log \left( \frac{p_{11}^2 + \dots + p_{1n}^2}{n p_0^2} \right) - 10 \log \left( \frac{p_{21}^2 + \dots + p_{2n}^2}{n p_0^2} \right) + 10 \log \frac{S}{A_2} \\
 &= L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A_2} \quad (\text{dB})
 \end{aligned} \tag{1.32}$$

hvor  $L_1$  og  $L_2$  er middellydtrykkniveauerne i henholdsvis senderum og modtagerum, og  $n$  er antal målepositioner. Formel (1.32) danner grundlag for måling af reduktionstal, både i laboratorium og i bygninger. Dog bruges betegnelsen tilsyneladende reduktionstal med symbolet  $R'$  i bygninger, fordi resultatet influeres af flanketransmission og eventuelle utætheder.

*Trinlydniveauet*  $L_n$  er et mål for lydtransmissionen til et rum, når gulvet i et andet rum påvirkes med en standardiseret bankemaskine.

$$L_n = L_2 + 10 \log \frac{A_2}{A_0} \quad (\text{dB}) \tag{1.33}$$

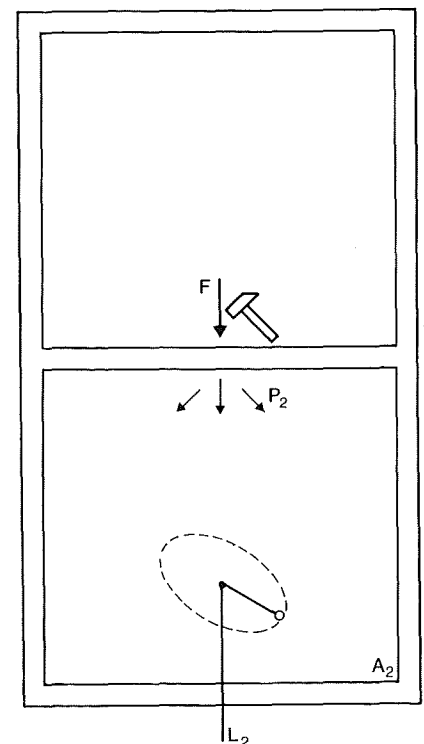
hvor  $L_2$  er middellydtrykkniveauet i dB re  $20 \mu \text{ Pa}$  i modtagerummet,  $A_2$  er modtagerummets ækvivalente lydabsorptionsareal, og  $A_0 = 10 \text{ m}^2$  er et referenceareal. (Se figur 1.4).

Til brug for teoretiske beregninger kan (1.33) omskrives, idet lydfeltet i modtagerummet antages at være diffust:

$$\begin{aligned}
 L_n &= 10 \log \frac{\langle \bar{p}^2 \rangle A_2}{p_0^2 A_0} \\
 &= 10 \log \frac{4 \rho c P_2}{p_0^2 A_0}
 \end{aligned} \tag{1.34}$$

hvor  $\langle \bar{p}^2 \rangle$  er middellydtrykkvadratet i modtagerum og  $P_2$  er den udstrålede lydeffekt til modtagerummet. Formel (1.33) danner grundlag for måling af trinlydniveau, både i laboratorium og i bygninger. Dog bruges symbolet  $L'_n$  i bygninger, fordi resultatet influeres af flanketransmission.

*Bankemaskinen* er standardiseret i DS/ISO 140 og anvendes til måling af trinlydniveau. Bankemaskinen indeholder fem ens stålhamre med massen  $m_h = 500 \text{ g}$ . Hamrene leverer en kraft svarende til et frit fald på  $h = 40 \text{ mm}$  med ti slag per sekund, dvs. med en slagfrekvens  $f_s = 10 \text{ Hz}$ . Ved en sådan periodisk impulsecitering af et hårdt underlag fås frekvenskomponenter for hver 10 Hz. Middelkraftkvadratet i et frekvensbånd  $\Delta f \gg 10 \text{ Hz}$  kan vises at blive (se f.eks. Ver & Holmer, 1971, p. 334):



Figur 1.4. Trinlydtransmission gennem en etageadskillelse.  $F$  er kraftpåvirkningen fra den standardiserede bankemaskine, og  $L_2$  er middellydtrykkniveauet i modtagerummet (rum 2).  $A_2$  er modtagerummets ækvivalente lydabsorptionsareal.

$$\begin{aligned}
 \bar{F}^2 &= 4 g m_h^2 h f_s \Delta f \\
 &= 3,9 \Delta f \quad (\text{N}^2)
 \end{aligned} \tag{1.35}$$

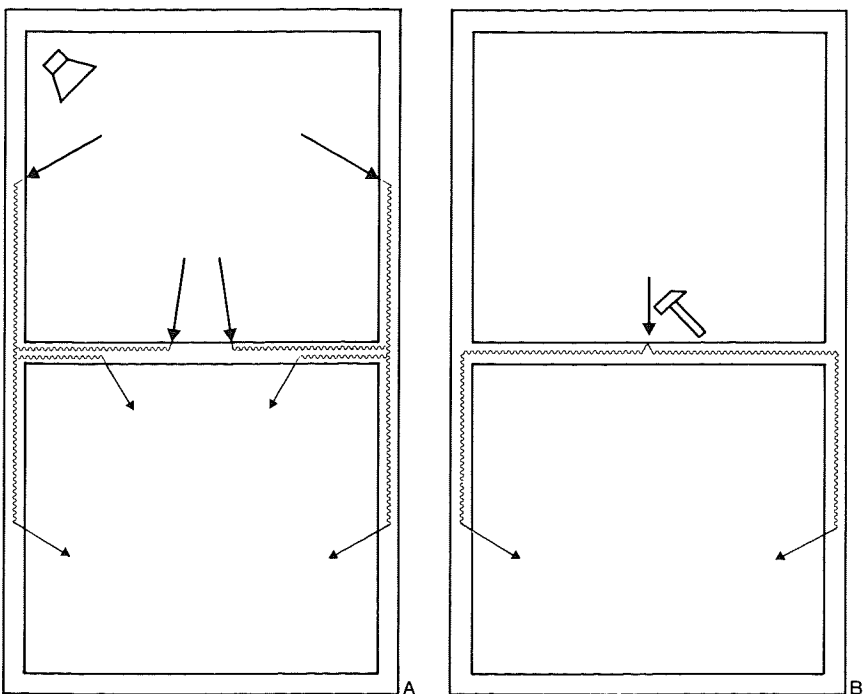
med indsættelse af bankemaskinens data samt tyngdeaccelerationen  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ . For  $\frac{1}{3}$  oktaver med den relative båndbredde 0,23 bliver bankemaskinens middelkraftkvadrat:

$$\bar{F}^2 \approx 0,91 f \quad (\text{N}^2) \tag{1.36}$$

hvor  $f$  er centerfrekvensen i Hz.

*Trinlyddæmpningen*  $\Delta L$  er et mål for en gulvbelægnings eller en konstruktions evne til at dæmpe trinlyd. Den defineres som reduktionen af trinlydniveauet for en etageadskillelse uden og med den trinlyddæmpende foranstaltning:

$$\Delta L = L_{n,uden} - L_{n,med} \quad (\text{dB}) \tag{1.37}$$



Figur 1.5. Flanketransmission ved luftlydtransmission (A) og ved trinlydtransmission (B).

*Flanketransmission* mellem rum er betegnelsen for lydtransmission via flankerende bygningskonstruktioner, se figur 1.5. Sammen med transmission via utætheder og via kanaler og lignende er flanketransmission den vigtigste årsag til, at lydisolering for en konstruktion i bygninger tilsyneladende er en del dårligere end for samme konstruktion under laboratorieforhold.

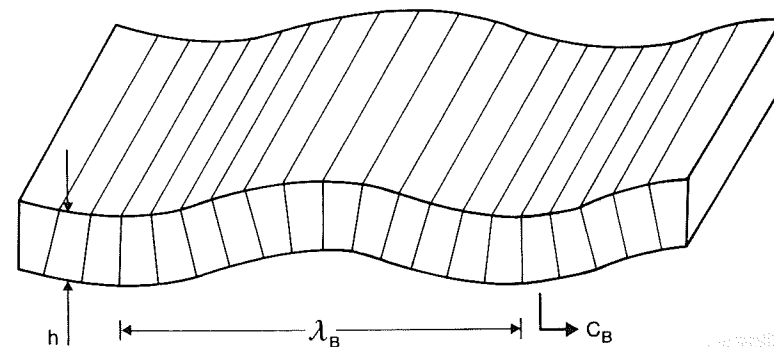
## KAPITEL 2

### Massive plader

I dette kapitel behandles det teoretiske grundlag for homogene, massive pladers lydisolering og lydudstråling ved mekanisk påvirkning. Ved hjælp af materialedata er det muligt at beregne værdier af reduktionstal og trinlydniveau, der svarer til dem, som kan opnås under laboratorieforhold, hvor flanketransmission er uden betydning for måleresultatet. I afsnittet om inhomogene plader omtales mere specielle konstruktioner, herunder plader med forskellige bøjningsstivheder i to akseretninger.

#### Bøjningsbølger

*Bøjningsbølger* i tynde, homogene plader medfører vekslende deformationer af pladerne, se figur 2.1. En bøjningsbølge frembringer små indbyrdes drejninger ( $\phi$ ) i alle pladetværsnit og dermed parallelle bøjninger af pladen i lydets udbredelsesretning. Bøjningsbølger har stor betydning i forbindelse med lydbølger i luft, idet bevægelser i en plade vinkelret på pladens plan kan frembringe lydbølger i luft og omvendt.



Figur 2.1. Pladeudsnit med tykkelsen  $h$  påvirket af en bøjningsbølge med en bølglængde  $\lambda_B$  og bølgehastigheden  $c_B$ .

Udbredelsehastigheden  $c_B$ , der f.eks. kan være en bølgetops hastighed hen over pladen, er givet ved

$$c_B = \sqrt{2 \pi f} \sqrt[4]{\frac{B}{m}} \quad (2.1)$$

hvor  $f$  er frekvensen,  $m$  pladens masse per arealenhed og  $B$  bøjningsstivheden per breddeenhed

$$B = \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{h^3}{12} \quad (2.2)$$

hvor  $E$  er materialets elasticitetsmodul,  $\mu$  er Poissons forhold, og  $h$  er pladetykkelsen.

Af (2.1) og (2.2) ses, at udbredelsehastigheden øges med pladematerialets stivhed, pladens tykkelse og frekvensen, se figur 2.2.

### Koincidens og kritisk frekvens

For en homogen plade af et givet materiale og med en given tykkelse vil der være én frekvens, hvor bøjningsbølgerne udbreder sig med netop samme hastighed som lyd i luft, dvs. hvor  $c_B = c = 344$  m/s, se figur 2.2. Denne frekvens kaldes pladens kritiske frekvens  $f_c$ . Ved indsætning af  $c$  og  $f_c$  i (2.1) fås

$$f_c = \frac{c^2}{2 \pi} \sqrt{\frac{m}{B}} \quad (2.3)$$

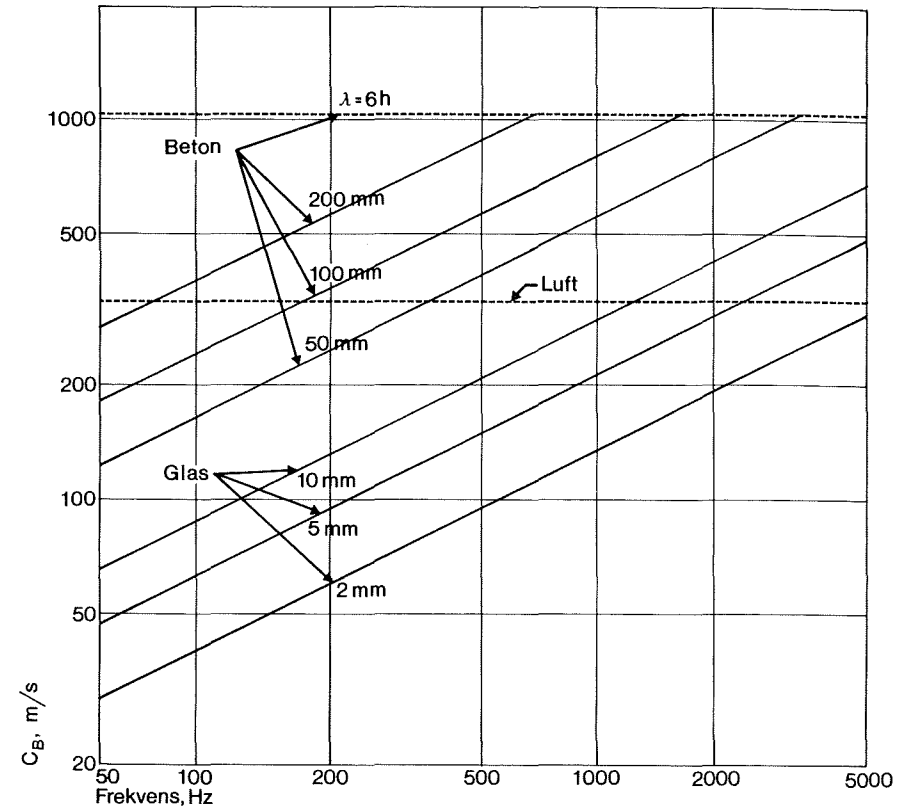
Den kritiske frekvens kan også udtrykkes ved

$$f_c = \frac{K_c}{h} \quad (2.4)$$

hvor  $K_c$  er en materialekonstant, som her er kaldt *koincidenstallet*, og  $h$  pladetykkelsen. Den kritiske frekvens er af afgørende betydning for samspillet mellem pladesvingninger og luftlyd, idet energivandringen mellem plade og luft sker særlig let ved frekvenser større end den kritiske frekvens. Idet  $c$  er lyd hastigheden i luft, kan forholdet  $c_B^2/c^2$  udledes af (2.1) og (2.3), hvorefter

$$c_B = c \sqrt{\frac{f}{f_c}} \quad (2.5)$$

For  $f > f_c$  er  $c_B > c$ , hvilket medfører mulighed for sammenfald mellem udbredelsehastigheden  $c_B$  i plade og fasehastigheden, sporhastigheden,  $c/\sin \theta$  i luft langs pladens overflade.



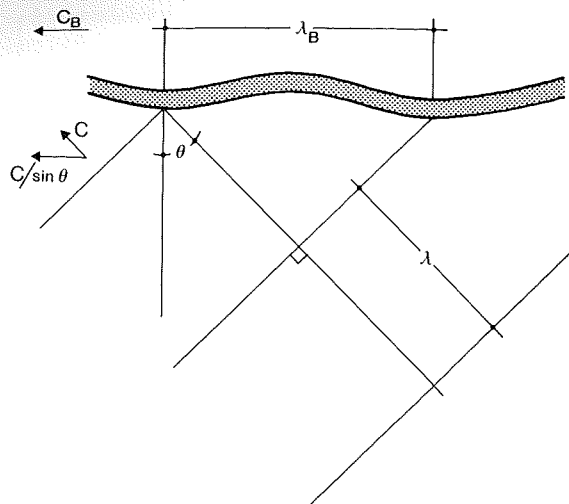
Figur 2.2. Udbredelsehastigheden  $c_B$  af bøjningsbølger i homogene plader af beton og glas som funktion af lydets frekvens og med pladetykkelser  $h$  mindre end  $1/6$  af bølgelængden  $\lambda_B$ .

Dette sammenfald, koincidens, sker ved den såkaldte *koincidensfrekvens*  $f_{c\theta}$ , der afhænger af bøjningsbølgens hastighed og vinklen mellem indfaldsretning og pladenormal,  $\theta$ , se figur 2.3. For  $c_B = c/\sin \theta$  fås koincidensfrekvensen

$$f_{c\theta} = \frac{f_c}{\sin^2 \theta} \quad (2.6)$$

Den kritiske frekvens er altså den lavest mulige koincidensfrekvens og kaldes derfor også grænsefrekvensen for koincidens.

For  $f < f_c$  kan der ikke opstå sammenfald mellem pladesvingninger og



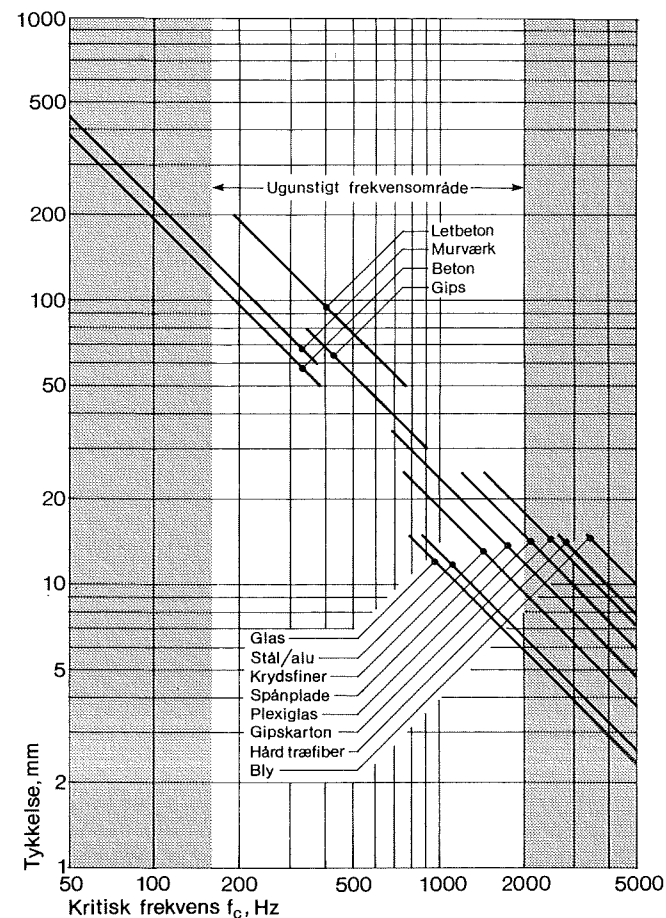
Figur 2.3. Koincidens mellem bøjningsbølge i plade og lydbølge i luft ved sammenfallende udbredelseshastigheder langs pladen.

luftlyd, hvilket betyder en væsentlig nedsættelse af den overførte svingningsenergi, som naturligvis er fordelagtigt for opnåelse af god lydisolation. Det er derfor en god grundregel at anvende sådanne pladetykkelser, at den kritiske frekvens er størst mulig eller i det mindste at den ikke falder midt i det bygningsakustiske frekvensområde. Som vist i figur 2.4 bør intervallet 160–2000 Hz undgås.

For en homogen plade kan den kritiske frekvens bestemmes tilnærmet ved en enkel metode, hvor pladen lægges vandret simpelt understøttet på to bukke i afstanden  $l$ . På grund af tyngdeaccelerationen,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  fås en nedbøjning  $\Delta z$ , som hænger af forholdet mellem masse og bøjningsstivhed. Den kritiske frekvens kan derefter beregnes, som anført af (Cremer & Heckl, 1967, p. 458)

$$f_c = \frac{c^2}{2 \pi l^2} \sqrt{\frac{76,8 \Delta z}{g}} \quad (2.7)$$

Bygningsmaterialer, især af træ, er ikke altid isotrope, og kan have forskellig bøjningsstivhed i to akseretninger vinkelret på hinanden. I materialer af træ, eksempelvis brædder, kan der ofte bestemmes to forskellige kritiske frekvenser for retningerne parallelt med og vinkelret på træets årer. Konsekvenserne heraf vil blive nærmere omtalt i afsnittet om inhomogene plader.



Figur 2.4. Den kritiske frekvens  $f_c$  eller grænsefrekvensen for koincidens i massive plader som funktion af pladetykkelsen med pladematerialet som parameter. I praksis bør  $f_c$  ligge uden for det ugunstige frekvensområde.

### Tykke plader

Bøjningsbølger forudsætter tynde plader. Formlerne (2.1) og (2.5) for udbredelseshastigheden  $c_B$  er korrekte inden for 10 procents nøjagtighed, når  $\lambda_B > 6 h$ . Indsættes  $\lambda_B = 6 h$  og  $f = f_h$  i (2.5) i udtrykket  $c_B = \lambda_B f$  kan dette omskrives til en øvre grænsefrekvens, som kan skrives med (2.4)

$$f_h = \frac{1}{f_c} \left( \frac{c}{6 h} \right)^2 = f_c \left( \frac{c}{6 K_c} \right)^2 \quad (2.8)$$

For beton er denne grænsefrekvens  $9f_c$ , som det også ses på figur 2.2. For glas og stål fås ca.  $20f_c$ , medens tegl giver  $6f_c$ , og letbeton kun  $3,2f_c$ . Det betyder, at lydtransmissionen gennem tykke plader af tegl og letbeton ikke kan foregå som rene bøjningsbølger ved høje frekvenser, men må ske som en kombination af flere bølgetyper heriblandt forskydningsbølger, se figur 1.1.

Udbredelsen af bøjningsbølger i tykke plader ved høje frekvenser sker lidt langsommere end givet ved (2.1) og (2.5). Dette udtrykkes af (Cremer & Heckl, 1967, p. 112) ved, at den effektive kritiske frekvens  $f_c^*$  bliver lidt større end  $f_c$ . Udtrykket simplificeres ved indsættelse af (2.8)

$$\begin{aligned} \frac{f_c^*}{f_c} &= 7,35 \frac{h^2 f_c}{c^2} + \sqrt{\left(7,35 \frac{h^2 f_c}{c^2}\right)^2 + 1} \\ &= \frac{f}{5f_h} + \sqrt{\left(\frac{f}{5f_h}\right)^2 + 1} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Dette udtryk vil senere blive brugt til at bestemme en særlig korrektion for lydtransmission gennem tykke plader.

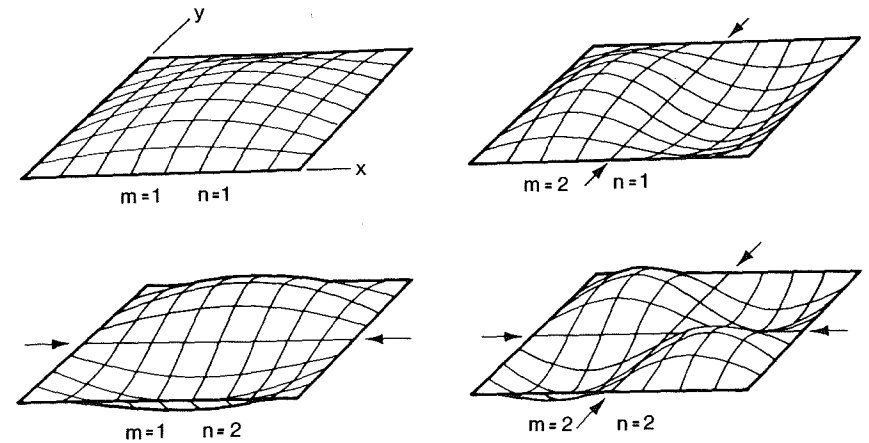
### Egensvingninger

En tynd plade vil kunne udføre egensvingninger, dvs. svingninger i form af såkaldte frie bøjningsbølger, som langsomt dør ud efter ophør af en ydre påvirkning. (Langsomt vil sige, at egensvingningerne eksisterer længe i forhold til svingningernes periodetid, se (1.1)). Ved pladens rand kan bøjningsbølgerne reflekteres, og ved gentagne refleksioner opbygges et bestemt svingningsmønster, som er karakteristisk for den pågældende egensvingning. Betragtes en rektangulær plade med dimensionerne  $\ell_x$  og  $\ell_y$ , og er pladen simpelt understøttet langs randen, kan amplituden af udsvinget  $\zeta$  i punktet  $(x, y)$  matematisk udtrykkes ved

$$\begin{aligned} \hat{\zeta}(x, y) &= A \sin\left(m\pi \frac{x}{\ell_x}\right) \sin\left(n\pi \frac{y}{\ell_y}\right) \\ &= A \cdot \psi_{mn}(x, y) \end{aligned} \quad (2.10)$$

hvor  $m$  og  $n$  er hele positive tal, som angiver antallet af halve bølgelængder langs  $x$ - og  $y$ -aksen,  $A$  er en amplitudedefaktor og  $\psi_{mn}$  er en formfaktor. Egensvingsformerne  $\psi_{11}$ ,  $\psi_{12}$ ,  $\psi_{21}$  og  $\psi_{22}$  er illustreret i figur 2.5.

For de viste svingningsformer ses, at antallet af knudelinier parallelt med  $x$ -aksen er  $(m-1)$ , og tilsvarende  $(n-1)$  parallelt med  $y$ -aksen. Egensvingningerne er betinget af, at der kan eksistere en fri bøjningsbølge, hvis bølgelængde og udbredelsesretning netop passer således, at bølgen afsætter et helt antal



Figur 2.5. Fire egensvingninger i en rektangulær tynd plade, der er simpelt understøttet langs randen. Knudelinierne, der udgøres af punkter, som ikke forskydes i planen eller i forhold til denne, er mærket med pile. Efter (Morse & Ingard, 1968).

halve bølgelængder  $m$  og  $n$  langs hver af de to pladekanter  $\ell_x$  og  $\ell_y$ , se figur 2.6.

Den tilhørende egenfrekvens er bestemt af:

$$f_{mn} = \frac{c^2}{4f_c} \left[ \left(\frac{m}{\ell_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{\ell_y}\right)^2 \right] \quad (2.11)$$

Den vigtigste af disse egenfrekvenser er den laveste, der fås for  $m=n=1$ ,

$$f_{11} = \frac{c^2}{4f_c} \left[ \frac{1}{\ell_x^2} + \frac{1}{\ell_y^2} \right] \quad (2.12)$$

hvor  $f_c$  er pladens kritiske frekvens, der indgår på grund af sammenhængen i (2.5).

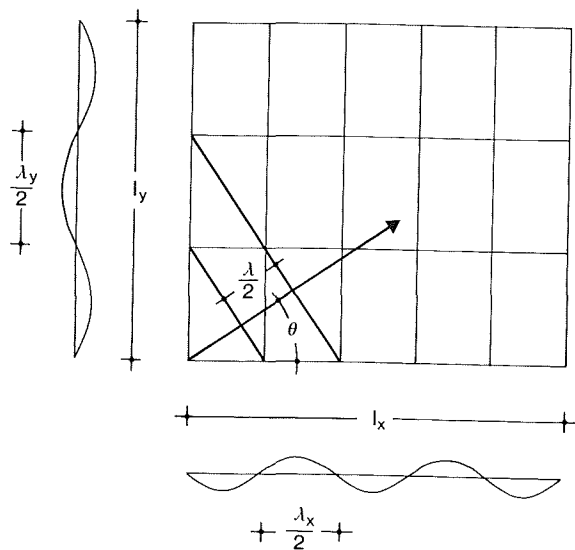
Dersom pladen ikke er simpelt understøttet langs randen, men fast indspændt, bliver egenfrekvenserne lidt højere.

For højere frekvenser vil det gennemsnitlige antal egenfrekvenser  $\Delta N$  inden for et frekvensbånd  $\Delta f$  være tilnærmet bestemt af:

$$\Delta N = \frac{\pi S f_c}{c^2} \Delta f \quad (2.13)$$

hvor  $S$  er pladens areal.

I  $\frac{1}{3}$  oktav bånd, hvor  $\Delta f = 0,23 f$ , vil antallet af egenfrekvenser vokse proportionalt med centerfrekvensen,  $f = f_{center}$ , se (1.12).



Figur 2.6. 2-dimensional egensvingning i en simpelt understøttet, rektangulær plade, her vist for  $(m,n) = (5,3)$ .

Tabel 2.1. Eksempler på beregnet gennemsnitligt antal egenfrekvenser i  $\frac{1}{2}$  oktav bånd omkring 100 Hz og 500 Hz for en glasrude og en betonplade.

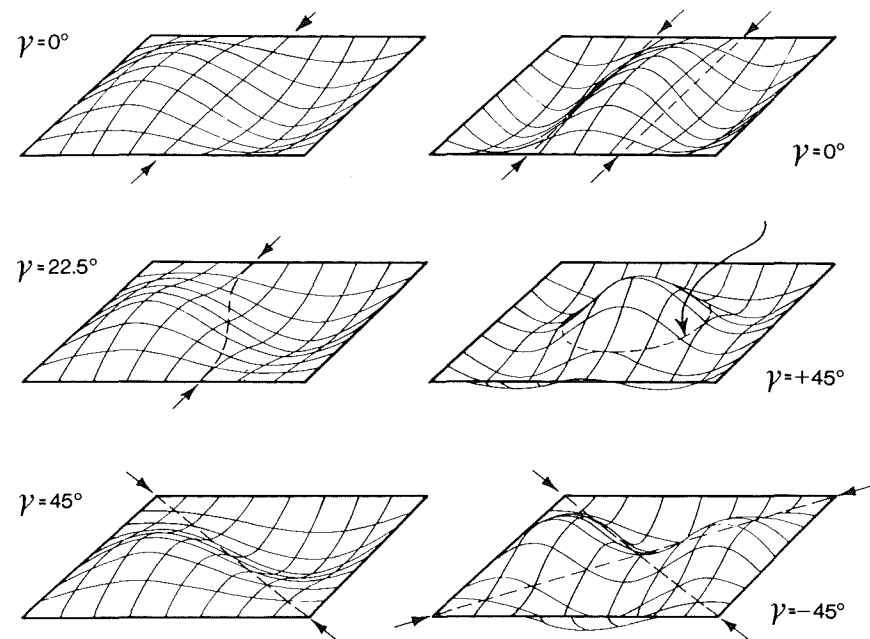
	Dimension m <sup>2</sup>	$f_c$ Hz	$f_{11}$ Hz	$\Delta N$ i $\frac{1}{2}$ oktav	
				100 Hz	500 Hz
4 mm glasplade	1,2 × 1,3	3250	11,7	3	15
180 mm betonplade	2,5 × 4,0	106	62,3	0,65	3

I tabel 2.1 ses eksempler på beregnede antal egenfrekvenser for to forskellige plader. For betonpladen er egenfrekvenserne meget spredte, først omkring 500 Hz er der sandsynlighed for tre eller flere egenfrekvenser inden for en  $\frac{1}{2}$  oktav.

Dersom en rektangulær plade har kantlængder, der danner simple forhold af  $m$  og  $n$ , vil en del af egenfrekvenserne være sammenfaldende, hvorved der kan dannes særlige egensvingningsformer. Betragtes en kvadratisk plade er  $f_{mn} = f_{nm}$ , selv om  $n \neq m$ . I dette tilfælde kan der dannes uendelig mange forskellige svingningsformer alt efter styrkeforholdet mellem de to sammenfaldende egensvingninger. Analogt med (2.10) fås amplituden af udsvinget

$$\hat{\zeta} = A (\psi_{mn} \cos \gamma + \psi_{nm} \sin \gamma) \quad (2.14)$$

hvor  $\psi_{mn}$  er formfaktoren fra (2.10) og hvor  $\gamma$  kan antage vilkårlige værdier.



Figur 2.7. Eksempler på sammenfaldende egensvingninger i en tynd, kvadratisk plade. Til venstre for  $f_{12} = f_{21}$  og til højre for  $f_{13} = f_{31}$ . Knudelinierne er markeret med pile. Efter (Morse & Ingard, 1968).

I figur 2.7 ses nogle eksempler. Når  $\gamma$  er konstant, er egensvingningerne stående bølger, som kan karakteriseres med knudelinier. Men  $\gamma$  kan også afhænge af tiden,  $\gamma = 2\pi f_{mn} t$ , hvorved egensvingningen ændrer form med tiden og altså ikke er en stående bølge. Der kan i øvrigt henvises til (Morse & Ingard, 1968, p. 206).

### Tabsfaktor

Egensvingninger, som ikke får tilført energi, vil efterhånden dø ud. I et givet punkt  $(x, y)$  kan den dæmpede egensvingnings udsving  $\zeta$  skrives på formen

$$\zeta = \hat{\zeta}_0 \cdot e^{-\delta t} \cos(2\pi f_{mn} t) \quad (2.15)$$

hvor  $\hat{\zeta}_0$  er amplituden til tiden  $t = 0$ , og  $\delta$  er dæmpningskoefficienten, der er lig med det logaritmiske dekrement divideret med periodetiden.



Energitabet ved svingninger i en plade beskrives ofte ved tabsfaktoren  $\eta$ , givet ved:

$$\eta = \frac{P_d}{\omega E_{mek}} = \frac{P_d}{2 \pi f m S \langle \bar{v}^2 \rangle} \quad (2.16)$$

hvor  $P_d$  er den afgivne energi per tidsenhed (effekt), og  $E_{mek}$  er den samlede energi af svingningerne, der igen kan udtrykkes ved hastighedens kvadrat midlet over hele fladen gange pladens masse  $mS$ .

Tabsfaktoren kan i praksis bestemmes ved at måle *efterklangstiden*  $T$  i en plade på lignende måde som efterklangstiden i et rum. (Efterklangstiden defineres som tiden svarende til et fald i svingningsenergien på 60 dB eller til  $10^{-6}$  af begyndelsesenergien).

Tabsfaktoren  $\eta$  er sammenknyttet med dæmpningskoefficienten  $\delta$  ved følgende relation, der kan omskrives til en sammenhæng med efterklangstiden  $T$

$$\eta = \frac{\delta}{\pi f} = \frac{3 \ln 10}{\pi f T} \approx \frac{2,20}{f T} \quad (2.17)$$

idet  $f$  er den tilhørende egenfrekvens, eller - hvis flere nærliggende egenfrekvenser exciteres samtidig - centerfrekvensen i det frekvensbånd, hvori der måles.

Tabsfaktoren for en række materialer er anført i tabel 2.2, der også indeholder andre relevante materialedata. Imidlertid vil der også være energitab ved randene og på grund af lydudstråling til den omgivende luft. De to sidstnævnte bidrag, som omtales i det følgende, er ofte større end de indre tab i materialet. Den tabsfaktor, der kan måles som beskrevet ovenfor, er den totale tabsfaktor

$$\eta = \eta_{int} + \eta_{rand} + \eta_{str} \quad (2.18)$$

*Randtabene* for en plade med arealet  $S$  og koincidensfrekvensen  $f_c$  kan ifølge (Craik, 1981) beskrives ved

$$\eta_{rand} = \frac{c \sum_i \ell_i \alpha_i}{\pi^2 S \sqrt{ff_c}} \approx \frac{c U \alpha}{\pi^2 S \sqrt{ff_c}} = \frac{\lambda_B U \alpha}{\pi^2 S} \quad (2.19)$$

hvor  $\ell_i$  og  $\alpha_i$  er kantlængder og tilhørende *absorptionskoefficienter*. Lidt forenklet indsættes omkredsen  $U$  og en middelabsorptionskoefficient  $\alpha$ , hvorom det vides, at den ligger i intervallet  $0 < \alpha \leq 0,3$ . Det fremgår af udtrykket, at randtabene aftager med øget frekvens, og at de er omvendt proportionale med pladearealet. Med tilstrækkeligt kendskab til de omgivende bygningsdele, er det muligt at beregne randtabene efter en metode, som vil blive beskrevet i kapitel 5. Ofte vil en forenklet beregning dog være fuldt tilstrække-

Tabel 2.2. *Materialedata for nogle bygningsmaterialer. Referencer: (Cremer & Heckl, 1967), (Fasold & Sonntag, 1978) og (Bodlund, 1980).*

Materiale	$\rho_m$ 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	$E$ 10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup>	$K_c$ m · Hz	$\eta_{int}$ 10 <sup>-3</sup>
Beton	2,3	26	19	5-20
Letbeton	1,3	3,8	38	10-15
Gasbeton	0,6	2	38	15
Tegl	1,6-1,9	14-24	18-26	10
Gips	1,2	7	27	6
Gipskartonplade	0,84	2,2-3,0	32-40	11-22
Glas	2,5	60	12	0,6-2
Stål	7,8	210	13	0,02-0,3
Bly	11,3	17	50	50-300
Aluminium	2,7	72	13	0-1
Kobber	8,9	125	17	2
Messing	8,5	95	19	0,2-1
Plexiglas	1,15	5,6	30	20-40
Hård træfiberplade	0,55	1,1-1,7	36-45	25
Blød træfiberplade	0,22	0,1-0,6	39-95	30
Spånplade	0,6-0,7	4,6	24	10-30
Fyrretræ (≠ fibre)	0,5	9,8	14	10
Fyrretræ (⊥ fibre)	0,5	0,2	100	10
Krydsfiner 1/4" (3 lag)				
≠ fibre i yderlag	0,6	7,1	19	28
⊥ fibre i yderlag	0,6	1,2	45	28
Krydsfiner 1/2" (5 lag)				
≠ fibre i yderlag	0,6	6,2	20	28
⊥ fibre i yderlag	0,6	2,3	32	28
Polypropylen	1,1	3	38	100
Hård PVC-skum	0,04-0,06	0,01-0,03	90-130	30-60
Foamglas	0,13-0,16	1,3-1,6	21	100

lig. På grundlag af målinger på ca. 100 vægge og dæk af tegl, beton og letbeton har (Craik, 1981) fundet, at en brugbar og meget enkel tilnærmelse for disse konstruktioner er

$$\eta_{rand} = \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (2.20)$$

hvor  $f$  er frekvensen i Hz. Herefter kan middelabsorptionskoefficienten  $\alpha$  i (2.19) beregnes at være  $\approx 0,2$ .

## Lyddudstråling

Vibrationer i en flade, f.eks. i form af bøjningsbølger, frembringer trykvariationer i den omgivende luft. Under visse omstændigheder, afhængig af svingningsform og frekvens, vil der kunne dannes en lydbølge, hvorved fladen siges at udstråle lyd.

### Strålingsfaktor og tabsfaktor ved stråling

En simpel lydkilde i form af et meget stort, stift stempel, der udfører harmoniske svingninger med den effektive hastighed  $\bar{v}$ , udstråler lydeffekten  $\rho c \cdot S \cdot \bar{v}^2$ , hvor  $S$  er fladens areal. Dette er den reference, der lægges til grund for strålingsfaktoren  $\sigma$ , som karakteriserer en svingende flades effektivitet med hensyn til lydudstråling. Kaldes den udstrålede lydeffekt  $P_a$ , er *strålingsfaktoren* defineret ved

$$\sigma = \frac{P_a}{\rho c S \langle \bar{v}^2 \rangle} \quad (2.21)$$

hvor  $\langle \rangle$  betegner middelværdien over hele fladen  $S$ .

Det skal bemærkes, at strålingsfaktoren henfører til lydudstrålingen fra en overflade. For en plade er strålingsfaktoren et mål for den udstrålede effekt fra den ene side. Den udstrålede effekt fra begge sider vil være dobbelt så stor.

Indsættes den samlede udstrålede lydeffekt, der er 2 gange  $P_a$  fra (2.21), i stedet for  $P_d$  i (2.16) fås udtrykket for *tabsfaktoren*,  $\eta_{str}$ , ved lydudstråling

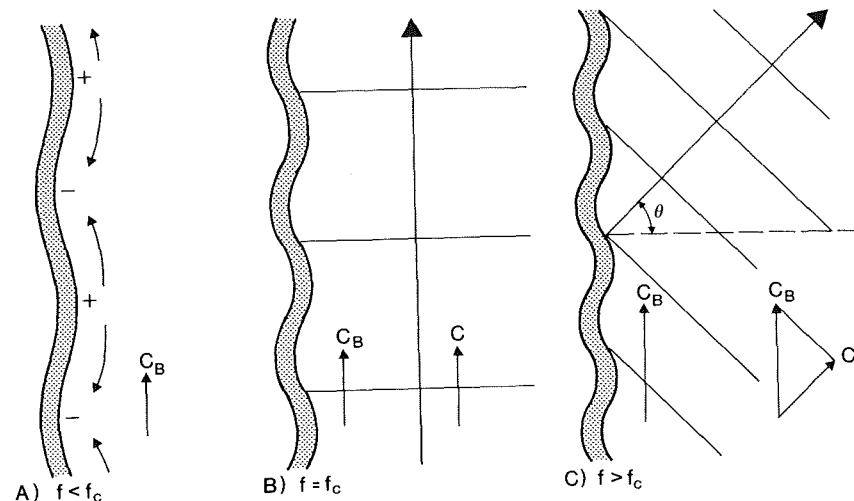
$$\eta_{str} = \frac{\rho c \sigma}{\pi f m} \quad (2.22)$$

hvor  $m$  er pladens masse per arealenhed.

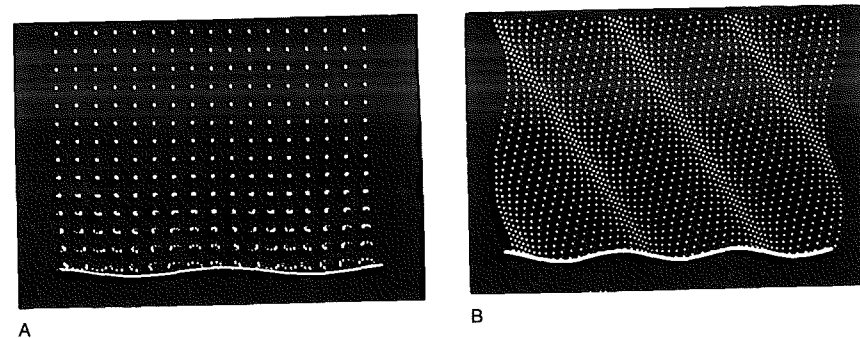
### Lyddudstråling fra egensvingninger

Egensvingninger i en plade er opbygget af frie bøjningsbølger. Som vist i figur 2.8 udstråles der lyd fra en plade, når luftlydens frekvens er større end eller lig med pladens kritiske frekvens, fordi udbredeshastigheden af bøjningsbølgen da er tilstrækkelig stor. Under den kritiske frekvens bliver trykvariationerne ved pladens overflade hurtigt elimineret på grund af den større lydhaastighed i luften.

Luftpartiklernes bevægelse under og over den kritiske frekvens er illustreret i figur 2.9.



Figur 2.8. Frie bøjningsbølger i en plade kan udstråle lyd til luften, når  $c_B \geq c$ , dvs. ved frekvenser større end eller lig med den kritiske frekvens. Udstrålingsretningen  $\theta$  er vinklen i forhold til pladens normal. Ved lavere frekvenser (A) udlignes de af pladen frembragte forskelle i lydtryk gennem luften.

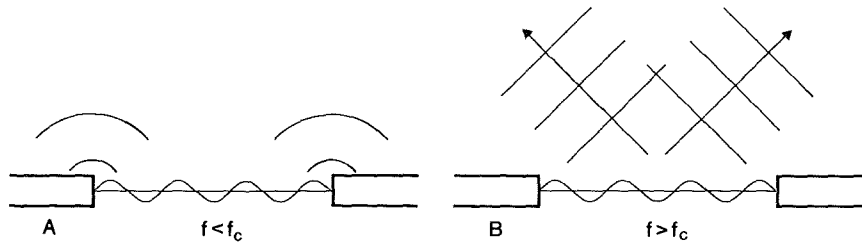


Figur 2.9. Partikelbevægelse ved lydudstråling fra frie bøjningsbølger i en uendelig plade. Udbredelsesretningen er mod højre, (A) under den kritiske frekvens og (B) over. ( $c_B = 1,17 c$ ). Efter (Heckl & Heckl, 1976). Gengivet med tilladelse fra forfatter og VDI-Verlag, Düsseldorf.

Udstrålingsvinkel  $\theta$  i forhold til pladens normal er givet ved

$$\sin \theta = \frac{c}{c_B} = \sqrt{\frac{f_c}{f}} \quad (2.23)$$

som forudsætter, at  $f \geq f_c$ . Ved lavere frekvenser er udstrålingen ikke retningsbestemt, figur 2.8 A.



Figur 2.10. Lydudstråling fra stående bølger i en tynd plade omgivet af en stor, ubevægelig plade. Udstrålingen er kun vist fra den ene side af pladen.

- A.  $f < f_c$   
 B.  $f > f_c$

Pladesvingninger i form af stående bøjningsbølger, egensvingninger, viser samme udstrålingsforhold som frie bøjningsbølger bare med den forskel, at over den kritiske frekvens sker lydudstrålingen symmetrisk i to retninger, som begge danner vinklen  $\theta$  med pladens normal. Se figur 2.10.

Mens lydudstråling for frekvenser over den kritiske frekvens sker fra hele fladen, er det kun randene og hjørnerne, der er effektive for lydudstrålingen under den kritiske frekvens, som illustreret for en ikke indspændt plade i figur 2.11. Egensvingningerne kan forekomme i tre former: Hjørnesvingninger, kantsvingninger og fladesvingninger.

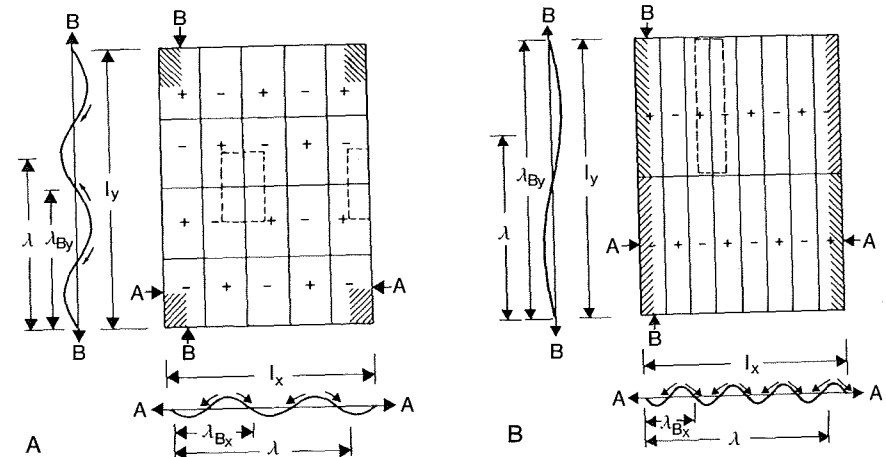
Ved hjørnesvingningerne er bølgelængden i luften større end bøjningsbølgelængderne i pladen, og derfor sker der ikke nogen effektiv lydudstråling fra den centrale del af pladen ganske som for frie bøjningsbølger i en stor plade, når  $f < f_c$ . Kun i de fire hjørner finder udfasningen ikke sted, og der udstråles lyd fra disse felter.

Ved kantsvingningerne, hvor kun en af bøjningsbølgelængderne er mindre end bølgelængden i luft, opnås en større udstrålende flade langs to af pladens kanter.

Ved frekvenser over den kritiske frekvens er bøjningsbølgelængden større end bølgelængden i luft, og i dette tilfælde opnås en effektiv lydudstråling fra hele den svingende flade.

Af ovenstående kvalitative betragtninger fremgår, at for frekvenser under den kritiske frekvens er udstrålingsforholdene ret komplicerede, fordi den udstrålede effekt ikke kun afhænger af pladesvingningernes middelhastighed, men i høj grad af de forekommende svingningsformer. Principielt kan strålingsfaktoren beregnes for en given svingningsform, som det f.eks. er gjort af (Heckl, 1977) for en række tilfælde.

Ved enhver svingningspåvirkning af en plade overføres en del af energien til en eller flere egensvingninger, hvis frekvens ligger i nærheden af påvirk-



Figur 2.11. Eksempler på egensvingninger i en simpelt understøttet plade. Efter (Ver & Holmer, 1971).

- A. Hjørnesvingning  $(m,n) = (5,4)$ .  
 B. Kantsvingning  $(m,n) = (8,2)$ .

ningsfrekvensen. Ofte sker påvirkningen i et frekvensbånd, og der vil derfor normalt anslås et større antal egensvingninger med hver sit udstrålingsforhold.

Det tilnærmede forløb af strålingsfaktoren med frekvensen er skitseret i figur 2.12 for en simpelt understøttet plade. Som det fremgår af figuren, kan der skelnes mellem fire frekvensområder. Bortset fra det laveste frekvensområde er det forudsat, at egenfrekvenstætheden er stor, og at alle egenfrekvenser er repræsenteret med samme energi.

(1) Under den laveste egenfrekvens for pladen  $f < f_{11}$  er lydudstrålingen omtrent som fra et lille, stift stempel, dvs. proportional med arealet og med frekvensen i anden potens

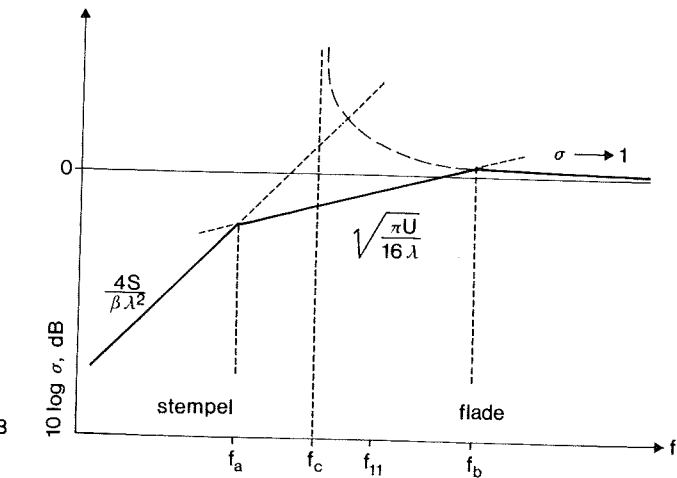
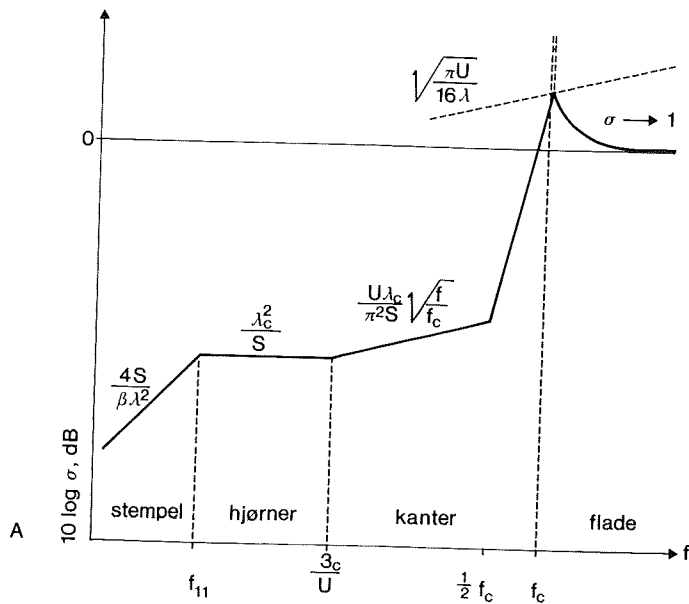
$$\sigma \approx \frac{4 S f^2}{c^2 \beta} \quad (2.24)$$

hvor  $\beta$  er en formfaktor

$$\beta = \frac{1}{2} \left( \frac{l_x}{l_y} + \frac{l_y}{l_x} \right) \quad (2.25)$$

For en kvadratisk plade er  $\beta = 1$ .

Det er forudsat, at  $f_{11} \ll f_c$ , således at bølgelængden i pladen er meget mindre end bølgelængden i luft.



Figur 2.12. Strålingsfaktorens afhængighed af frekvens for egensvingninger i en simpelt understøttet rektangulær plade med areal  $S$  og omkreds  $U$ . I de anførte formler er bølgelængderne  $\lambda = c/f$  og  $\lambda_c = c/f_c$ .  
 A. Gælder for  $f_{11} < \frac{1}{2} f_c$ , dvs. relativt tynde eller store plader.  
 B. Gælder for  $f_{11} > \frac{1}{2} f_c$ , dvs. relativt tykke eller små plader.

(2) Hjørnesvingninger er bestemmende i frekvensområdet  $f_{11} < f < 3c/U$ , hvor  $U = 2(l_x + l_y)$  er pladens omkreds. Strålingsfaktoren vil groft kunne anslås til:

$$\sigma \approx \frac{c^2}{S f_c^2} \quad (2.26)$$

dvs. frekvensuafhængig og omvendt proportional med arealet. Det sidstnævnte kan forklares ved, at for hjørnesvingninger er den udstrålede lyd-effekt ikke afhængig af det samlede pladeareal, men kun af de aktive hjørnearealer.

(3) Kantsvingninger er dominerende i frekvensområdet  $3c/U < f < f_c/2$ , selv om der også eksisterer hjørnesvingninger i dette frekvensområde. Strålingsfaktoren kan tilnærmet bestemmes af:

$$\sigma \approx \frac{U c}{\pi^2 S f_c} \sqrt{\frac{f}{f_c}} \quad (2.27)$$

hvor  $U$  er pladens omkreds. Strålingsfaktoren vokser svagt med frekvensen, indtil i nærheden af den kritiske frekvens, hvor strålingsfaktoren vokser meget hurtigt, idet stadig større arealer af pladen bidrager effektivt til lydudstrålingen. Strålingsfaktoren er proportional med omkredsen, når udstrålingen sker fra kantsvingninger. Som maksimal strålingsfaktor fås for  $f = f_c$  (Cremer og Heckl, 1967, p. 468)

$$\sigma_{max} \approx \sqrt{\frac{\pi f U}{16 c}} \quad (2.28)$$

I frekvensområdet  $\frac{1}{2} f_c < f < f_c$  kan som en rimelig tilnærmelse interpoleres som vist i figur 2.12 A.

(4) Fladesvingninger giver effektiv lydudstråling ved frekvenser omkring og over den kritiske frekvens. For  $f < f_c$  fås

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{f_c}{f}}} \quad (2.29)$$

der hurtigt nærmer sig 1 for  $f \gg f_c$ . Udtrykket gælder ikke tæt ved den kritiske frekvens, hvor den maksimale strålingsfaktor er givet ved (2.28), og hvoraf det ses, at lydudstrålingen begrænses af pladens omkreds.

Ovenstående formler for strålingsfaktoren er let tillempede efter mere fuldstændige formeludtryk udledt af (Maidanik, 1962 og 1975). Men også disse er baseret på de samme forudsætninger med hensyn til egenfrekvenstæthed, som i praktisk forekommende tilfælde ofte ikke er opfyldt. Under alle omstændigheder må beregninger af strålingsfaktoren for egensvingninger under en plades kritiske frekvens anses for orienterende og af overslagsmæssig karakter.

Massive bygningsdele af tegl og beton kan ofte være så tykke og stive, at  $f_{11} > \frac{1}{2} f_c$  hvorved frekvensområderne med kant- og hjørnesvingninger forsvinder, og stempelområdet går direkte over i fladeområdet. I sådanne tilfælde bliver  $\sigma_{max}$  (2.28) bestemmende i et betydeligt frekvensområde, som vist i figur 2.12 B. Det bemærkes, at den maksimale værdi af strålingsfaktoren i dette tilfælde optræder noget over den kritiske frekvens, nemlig ved:

$$f_b = f_c + 5c/U \quad (2.30)$$

Dette er den frekvens, hvor (2.28) og (2.29) giver samme strålingsfaktor. Ved frekvenser under  $f_b$  har pladen simpelt hen ikke tilstrækkelig størrelse til at kunne udstråle lyd effektivt, selv om frekvensen er over pladens kritiske frekvens.

I figur 2.12 B er vist en overgangsfrekvens  $f_a$ , som lader sig beregne ved at sætte (2.24) lig (2.28), hvilket under anvendelse af (2.12) fører til

$$f_a = \sqrt[3]{\frac{\pi U}{64 c} (f_{11} f_c)^2} \quad (2.31)$$

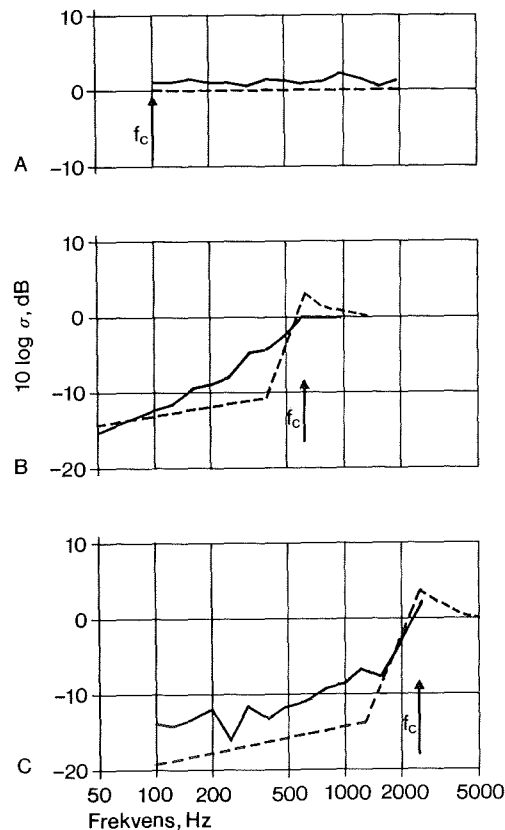
F.eks. fås for en 180 mm betonvæg på 2,5 m × 4 m (se tabel 2.1)  $f_a = 43$  Hz ( $\sigma = 0,57$ ) og  $f_b = 238$  Hz ( $\sigma = 1,33$ ), dvs. et ret betydeligt overgangsområde mellem  $f_a$  og  $f_b$ .

Dersom en plade ikke er simpelt understøttet, men fast indspændt langs randen, øges  $f_{11}$  med en faktor  $\sqrt{2}$  og mellem  $f_{11}$  og  $f_c$  øges  $\sigma$  med en faktor 2.

Mere generelt kan der i (2.26) og (2.27) indsættes en faktor  $\kappa$  og i (2.11)  $\sqrt{\kappa}$ , hvor  $\kappa = 1$  for simpel understøtning og  $\kappa = 2$  for fast indspænding. For de fleste bygningskonstruktioner vil der dog opnås brugbare beregningsresultater ved at antage simpel understøtning.

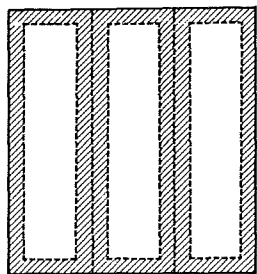
Hos (Rindel, 1979 a) findes en introduktion til Rayleighs metode til beregning af lydudstråling fra en flade med en vilkårlig svingningsform. Metoden forudsætter kendskab til vibrations hastigheden som funktion af stedet på den vibrerende flade.

I figur 2.13 er vist eksempler på målte og beregnede strålingsfaktorer for tre forskellige vægge. Bemærk, at gipspladevæggen var afstivet med 4 stolper.



Figur 2.13. Strålingsfaktorer for tre forskellige vægge målt i  $\frac{1}{2}$  oktavnåbånd ved punkt-excitering. De stiplede kurver er beregnet af (2.27) og (2.29).  
 A. 240 mm muret væg  $S = 12 \text{ m}^2$ .  
 B. 70 mm letbetonvæg  $S = 2 \cdot 2 \text{ m}^2$ .  
 C. 13 mm gipspladebeklædt træskeletvæg.  
 $S = 2 \cdot 2 \text{ m}^2$  med stolper per 0,4 m.  
 Efter (Cremer & Heckl, 1967, figur VI.18).

Herved forøges området, som bidrager til kantsvingningernes lydudstråling svarende omtrent til to gange afstivningernes samlede længde, se figur 2.14. Dette kan der tages hensyn til ved at bestemme  $S$  og  $U$  som areal og omkreds af det enkelte afstivede felt, og derefter beregne strålingsfaktoren på dette grundlag. I eksemplet figur 2.13 C fås ca. 5 dB højere stålingsfaktor end for den tilsvarende plade uden afstivninger.



Figur 2.14. Lydudstråling fra en plade med afstivninger for  $f < f_c$ . Kun de skraverede områder vil udstråle lyd.

### Kraftpåvirkning af en plade

Hvis en stor plade påvirkes af en harmonisk varierende enkelt kraft,  $F$ , vil der opstå frie bøjningsbølger, som udbreder sig væk fra exciteringspunktet. Over den kritiske frekvens udstråles der lyd fra hele pladen, og strålingsfaktoren er givet ved (2.29) eller  $\sigma \approx 1$ .

Under den kritiske frekvens elimineres trykvariationerne ved pladens overflade, se figur 2.8, og der sker derfor ingen udstråling bortset fra langs randene samt fra et område omkring exciteringspunktet, se figur 2.15.

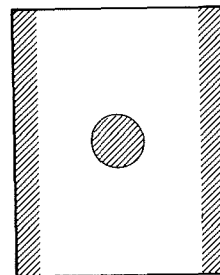
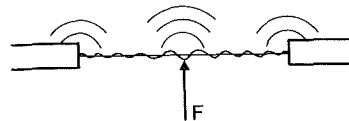
Dersom kraften virker på en lille cirkulær flade med arealet  $S_h$  bliver den udstrålede lydeffekt fra denne flade ifølge (Cremer & Heckl, 1967, p. 471):

$$P_n \approx \rho c \bar{v}_0^2 \frac{8 c^2}{\pi^3 f_c^2} \left( 1 + \frac{4}{c} \sqrt{\frac{1}{\pi} S_h f f_c} \right)^4 \quad (2.32)$$

hvor  $\bar{v}_0$  er effektivværdien af hastigheden i exciteringspunktet. I dette tilfælde er det ikke hensigtsmæssigt at beskrive lydudstrålingen ved en strålingsfaktor, fordi den udstrålede effekt er uafhængig af pladens areal, som principielt kan være uendeligt.

Tilsvarende kan det vises, at når en plade påvirkes af en harmonisk kraft langs en linie med længden  $\ell$ , bliver den udstrålede lydeffekt

$$P_n \approx \rho c \bar{v}_0^2 \frac{2 \ell c}{\pi f_c} \quad (2.33)$$



Figur 2.15. Lydudstråling for  $f < f_c$  fra en plade, der påvirkes af en kraft i et punkt. Kun de skraverede områder vil udstråle lyd.

For at markere, at der er tale om en *nærfeltsudstråling*, er der benyttet et indeks  $n$  i (2.32) og (2.33). Den samlede lydeffekt, der udstråles fra pladen, fås ved hertil at lægge den udstrålede effekt  $P_r$  fra pladens egensvingninger, den såkaldte resonante udstråling, som kan udtrykkes med strålingsfaktoren  $\sigma$ , se (2.21).

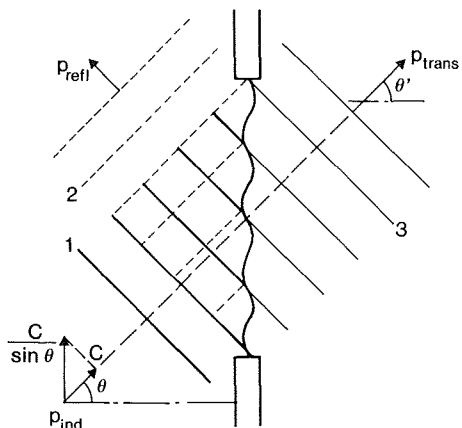
$$P = P_n + P_r = P_n + \rho c \langle \bar{v}^2 \rangle S \sigma \quad (2.34)$$

Her er  $\langle \bar{v}^2 \rangle$  hastighedskvadratet midlet over pladearealet  $S$  med undtagelse af et mindre område omkring exciteringspunktet eller -linien. Spørgsmålet om, hvor kraftigt egensvingningerne exciteres ved en kraftpåvirkning er behandlet i afsnittet: Trinlydniveau.

### Tvungne bøjningsbølger

Dersom en plan lydølge rammer en plade, påtrykkes denne en bøjningsbølge, hvis bølgelængde og udbredelsehastighed er tvunget til at følge den påtrykkende bølges spor hen over pladen. Kaldes lydets indfaldsvinkel  $\theta$ , bliver bøjningsbølgens udbredelsehastighed følgende

$$c_B = \frac{c}{\sin \theta} \quad (2.35)$$



Figur 2.16. Tvungen fremadskridende bøjningsbølge i en plade.

- Indfaldsvinkel  $\theta$  og udstrålingsvinkel  $\theta'$ .
1. Bølgefronter for indfaldende luftlyd.
  2. Bølgefronter for reflekteret luftlyd.
  3. Bølgefronter for transmitteret luftlyd.

Som vist i figur 2.16 vil den fremadskridende bøjningsbølge udstråle lyd i retningen  $\theta'$  fra begge sider af pladen. På den ene side vil den indstrålede bølge interferere med den reflekterede lydbølge, og på den anden side af pladen giver udstrålingen anledning til en transmitteret lydeffekt,  $P_{trans}$ . Denne effekt kan karakteriseres ved en strålingsfaktor, som her betegnes  $\sigma_\theta$ , hvorved det markeres, at den gælder for en tvungen bøjningsbølge frembragt af luftlyd under indfaldsvinklen  $\theta$ .

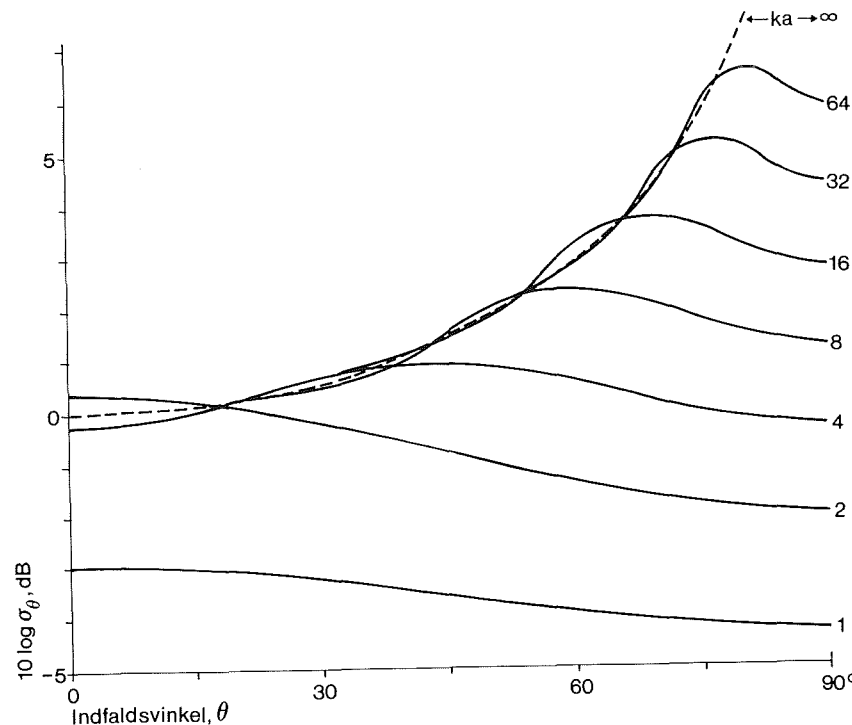
Strålingsfaktoren  $\sigma_\theta$  er beregnet af (Sato, 1973) for en kvadratisk plade med frit bevægelige rande, og resultatet kan afbildes som funktion af indfaldsvinklen  $\theta$ , som vist i figur 2.17.

Som parameter er her benyttet

$$ka \approx \frac{2\pi f}{c} \cdot \frac{1}{2} \sqrt{S} \quad (2.36)$$

hvor  $k$  er vinkelbølgetallet, og  $a$  er den halve sidelængde af den kvadratiske plade. Diagrammet gælder med god tilnærmelse også for rektangulære plader med arealet  $S$ . For meget store plader og høje frekvenser fås som grænseværdi

$$\sigma_\theta \rightarrow \frac{1}{\cos \theta} \quad \text{for } ka \rightarrow \infty \quad (2.37)$$



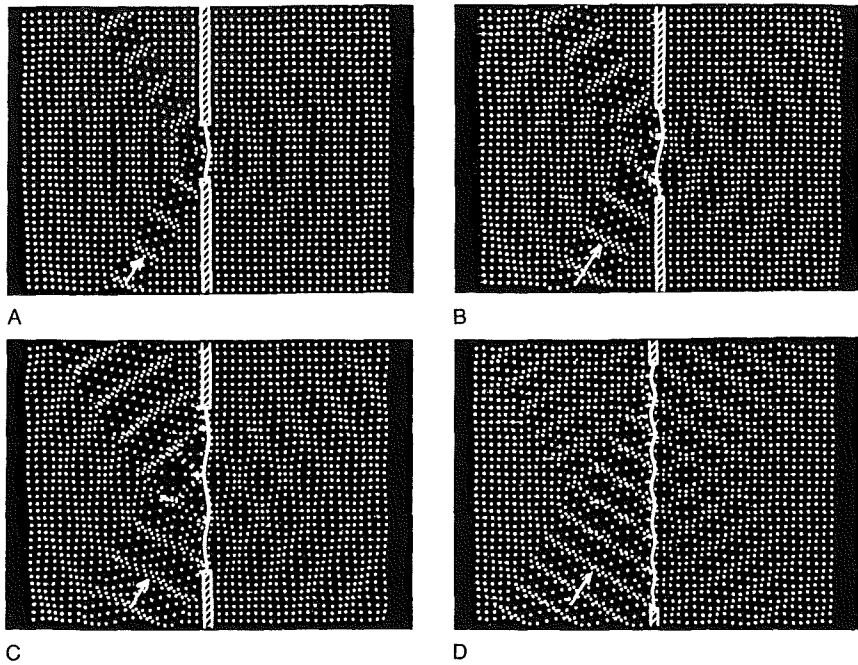
Figur 2.17. Strålingsfaktoren  $\sigma_\theta$  som funktion af indfaldsvinklen  $\theta$  for tvungne bøjningsbølger i en kvadratisk plade med sidelængden  $2a$  og med  $ka$  som parameter. Efter (Sato, 1973).

Når pladens dimensioner er af samme størrelsesorden som lydens bølglængde, eller når indfaldsvinklen  $\theta$  er nær  $90^\circ$  svarende til næsten strejfende lydindfald, vil der ske en afbøjning af den transmitterede lydbølge. Den nye udstrålingsvinkel  $\theta'$  vil kunne bestemmes af

$$\cos \theta' = \frac{1}{\sigma_\theta} \quad \text{for } \sigma_\theta > 1 \quad (2.38)$$

Denne afbøjningseffekt er anskueliggjort ved nogle eksempler i figur 2.18. For små værdier af  $ka$  bliver  $\sigma_\theta \leq 1$ , dvs. at udstrålingsvinklen ikke kan defineres. I praksis betyder det, at lydudstrålingen ikke er retningsbestemt, men sker ligeligt i alle retninger.

I bygningsakustisk sammenhæng er det af særlig interesse at bestemme strålingsfaktoren, når det indfaldende lydfelt er diffust. Kaldes denne  $\sigma_d$  fås

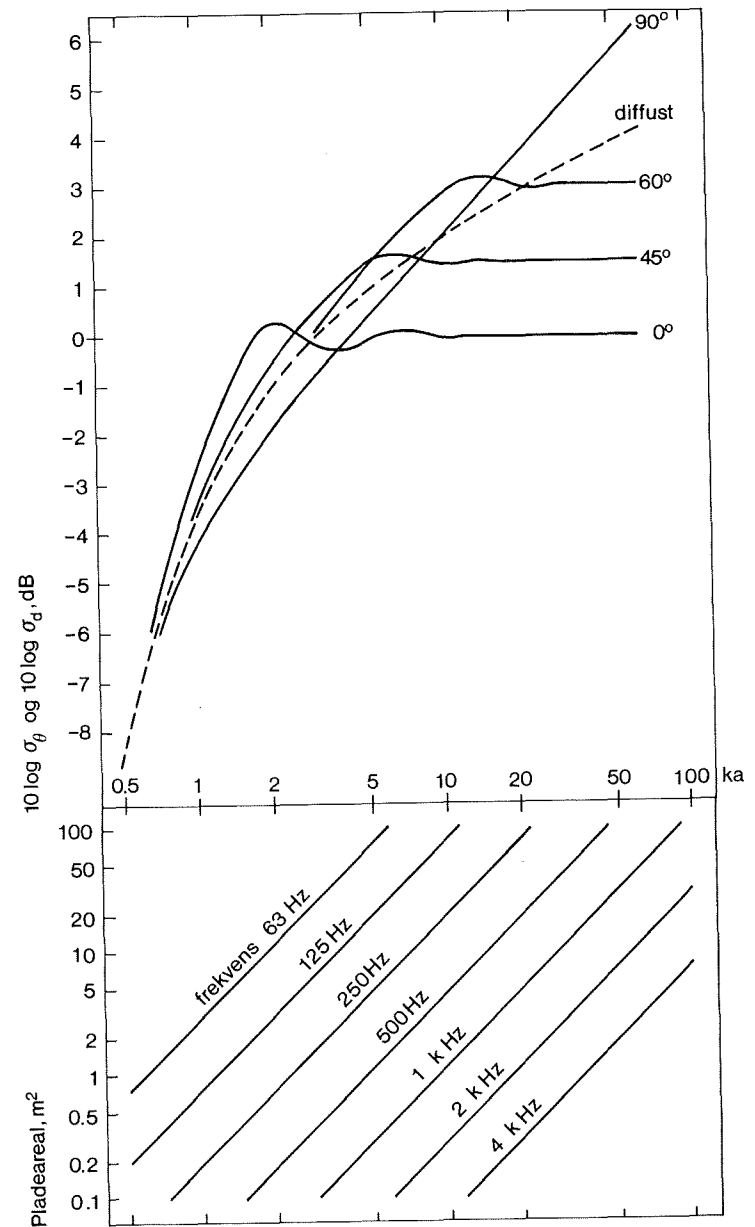


Figur 2.18. Billeder af to-dimensional lydtransmission gennem plader med forskellig udstrækning i forhold til bølgelængden, mindst i A og størst i D. I alle tilfælde exciteres pladen af en plan lydbølge fra nederste venstre hjørne. Ud over en tvungen bøjningsbølge genereres der også egensvingninger, som udstråler bølgefronter symmetrisk omkring pladens lodrette symmetriplan. Efter (Heckl, 1981). Gengivet med tilladelse fra forfatter og Academic Press Inc. Ltd, London.

$$\sigma_d = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_\theta \sin \theta d\theta \quad (2.39)$$

$$\approx \frac{1}{2} \left( 0,20 + \ln \left( 2 \pi \frac{f}{c} \sqrt{S} \right) \right)$$

Et mere fuldstændigt udtryk er udledt af (Sewell, 1970), men det her anførte forenklede udtryk er fuldt tilstrækkeligt for de fleste anvendelser. Bemærk, at for meget små arealer og lave frekvenser ( $f \sqrt{S} < 55 \text{ Hz m}$ ) bør (2.24) anvendes i stedet. I figur 2.19 er  $\sigma_d$  optegnet sammen med nogle eksempler på  $\sigma_\theta$  som funktion af  $ka$ , der igen afhænger af frekvens og pladeareal, som det fremgår af figurens nederste del.



Figur 2.19. Strålingsfaktoren for tvungne bøjningsbølger,  $\sigma_d$  for diffust lydindfald og  $\sigma_\theta$  for plant lydfelt med forskellige indfaldsvinkler afbildet som funktion af  $ka$ , der i diagrammets nederste halvdel kan bestemmes ud fra areal og frekvens. Kurverne gælder for en kvadratisk plade, men vil med tilnærmelse kunne anvendes også for rektangulære plader.



For tvungne bøjningsbølger gælder det, at hele den svingende plade bidrager til lydudstrålingen. Der vil derfor ikke være nogen nævneværdig indvirkning af eventuelle afstivninger eller lignende opdelinger i mindre delplader, så længe disse er sammenhængende.

Ved pladens rand reflekteres de tvungne bøjningsbølger, hvorefter de vil udbrede sig i pladen som frie bøjningsbølger. Efter gentagne refleksioner kan der opbygges egensvingninger med egenfrekvenser, der er tæt ved frekvensen af den exciterende lydbølge. Den samlede lydeffekt,  $P$ , der udstråles fra en plade fås derfor som summen af lydeffekterne af henholdsvis den tvungne og den resonante udstråling,  $P_t$  og  $P_r$ :

$$P = P_t + P_r = \rho c S (\langle \tilde{v}_t^2 \rangle \sigma_d + \langle \tilde{v}_r^2 \rangle \sigma) \quad (2.40)$$

Mens strålingsfaktorerne  $\sigma_d$  og  $\sigma$  er behandlet, vil spørgsmålet om størrelsen af svingningshastighederne  $v_t$  og  $v_r$ , henholdsvis tvungne og resonante, blive behandlet i det følgende afsnit.

## Luftlydisolation

Massive pladers luftlydisolation er vanskelig at beskrive på overskuelig og samtidig eksakt måde. Dels er der tale om en kombination af to forskellige transmissionsmekanismer, den tvungne og den resonante, dels er der tale om en ret kompliceret afhængighed af lydets indfaldsretning. Det sidste vil blive forbigået her, fordi det er forholdene ved diffust lydindfald, som primært har betydning i bygninger; men særligt interesserede kan henvises til (Rindel, 1975).

Af hensyn til overskueligheden vil der blive lagt vægt på at præsentere resultaterne af den foreliggende viden, medens udledelser og uddybende betragtninger må søges i relevante lærebøger eller fagbøger om emnet, eksempelvis (Cremer & Heckl, 1967) eller (Fahy, 1985).

## Masseloven

Masseloven udtrykker en plades luftlydisolation i afhængighed af dens masse per arealenhed. Der betragtes en meget stor, homogen plade med masse  $m$  per arealenhed, idet der ses bort fra egensvingninger i pladen. Pladen exciteres af en vinkelret indfaldende, plan lydbølge ved en frekvens  $f \ll f_c$ , således at der kan ses bort fra pladens bøjningsstivhed. Under disse idealiserede betingelser bliver pladens reduktionstal  $R_0$ , hvor kun  $m$  og  $f$  er variable, og  $R_0$  derfor yderligere kan forenkles med henholdsvis  $1 \text{ kg/m}^2$  og  $100 \text{ Hz}$  som referenceværdier.

$$\begin{aligned} R_0 &= 20 \log \frac{\pi f m}{\rho c} \\ &= 20 \log \frac{m}{1 \text{ kg m}^{-2}} + 20 \log \frac{f}{100 \text{ Hz}} - 2 \text{ dB} \end{aligned} \quad (2.41)$$

Denne simple sammenhæng mellem reduktionstal, masse per arealenhed og frekvens kaldes masseloven, og den danner basis for alle de følgende betragtninger over luftlydisolationen. Det er karakteristisk, at  $R_0$  øges med 6 dB hver gang  $m$  eller  $f$  fordobles.

## Vægimpedans

Den modstand en væg eller plade yder mod at blive sat i svingninger af en indfaldende lydbølge kaldes vægimpedansen  $Z_v$  eller transmissionsimpedansen.  $Z_v$  defineres som forholdet mellem trykdifferensen  $\Delta p$  over pladen og hastigheden  $v$  af pladens svingninger.

$$Z_v = \frac{\Delta p}{v} \quad (2.42)$$

Når  $\Delta p$  og  $v$  ikke er i fase, bliver  $Z_v$  et komplekst tal, hvilket er det almindelige.

I figur 2.20 er vist en plade,  $S$ , der er påvirket af luftlyd og simpelt understøttet langs randen, samt et hertil svarende mekanisk system bestående af en masse  $mS$ , en fjederkonstant  $k_d$  og et led  $r$ , der udtrykker energitabet.

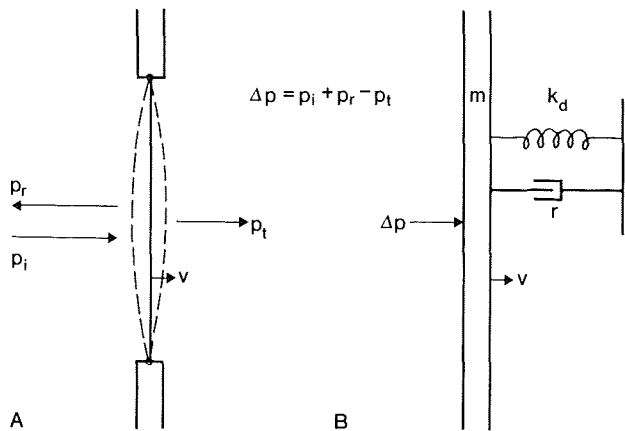
Ved en grov tilnærmelse afpasses fjederkonstanten således, at systemets frekvens svarer til pladens første egenfrekvens:

$$\omega_{11} = 2 \pi f_{11} = \sqrt{\frac{k_d}{mS}} = \sqrt{\frac{k_d''}{m}} \quad (2.43)$$

Den mekaniske impedans for systemet i figur 2.20 B og dermed vægimpedansen bliver:

$$\begin{aligned} Z_v &= j \left( \omega m - \frac{k_d''}{\omega} \right) + r \\ &= j \omega m \left( 1 - \left( \frac{\omega_{11}}{\omega} \right)^2 \right) + \eta \omega_{11} m \end{aligned} \quad (2.44)$$

hvor  $\eta$  er tabsfaktoren, som her antages at indeholde alle forekommende tab, dvs. både indre tab, randtab og strålingstab, se (2.18). (I faglitteraturen er det



Figur 2.20. Mekanisk analogi til excitering med luftlyd.  
 A. Luftlydexcitert af en plade, hvor  $p_i$ ,  $p_r$  og  $p_t$  er henholdsvis indfaldende, reflekteret og transmitteret lydølge,  $\Delta p$  trykdifferens over pladen og  $v$  pladens hastighed.  
 B. En mekanisk analogi til A, hvor  $k_d$  er en tabsfri fjeder og  $r$  et dæmpningsled.

almindeligt, at  $\eta$  ikke omfatter strålingstab, og  $Z_v$  kaldes så transmissionsimpedans).

Vægimpedansen (2.42) kan bruges til at finde hastigheden  $v_t$  af de tvungne svingninger i en plade i afhængighed af lydtrykket  $p_i$  i senderummet foran pladen:

$$\langle \tilde{v}_t^2 \rangle \approx \frac{2 \langle \tilde{p}_1^2 \rangle}{|Z_v|^2} \quad (2.45)$$

Indsættes (2.44) for  $Z_v$  fås:

$$\langle \tilde{v}_t^2 \rangle \approx \frac{2 \langle \tilde{p}_1^2 \rangle}{(\omega m)^2 \left[ \left( 1 - \left( \frac{\omega_{11}}{\omega} \right)^2 \right)^2 + \eta^2 \right]} \quad (2.46)$$

Dette udtryk har et udpræget resonant frekvensforløb, idet hastigheden vokser til et maksimum ved den laveste egenfrekvens, hvor kun tabsfaktoren sætter en begrænsning. Bortset fra området omkring resonansfrekvensen har tabsfaktoren normalt ingen betydning. (Af samme grund er det unødvendigt at gange  $\eta$  med faktoren  $\omega_{11}/\omega$ ).

På tilsvarende måde kan en mekanisk analogi illustrere forholdene ved den kritiske frekvens, idet fjederkonstanten  $k_d$  i dette tilfælde afhænger af pladens bøjningsstivhed  $B$ , af frekvensen og af lydets indfaldsvinkel  $\theta$ :

$$Z_v = j \left( \omega m - \frac{B}{\omega} \left( \frac{\omega}{c} \sin \theta \right)^4 \right) + \eta \omega m \quad (2.47)$$

For diffust lydindfald fås med rimelig tilnærmelse:

$$Z_v \approx j \omega m \left( 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \right) + \eta \omega m \quad (2.48)$$

hvor  $\omega_c = 2 \pi f_c$  er vinkelfrekvensen ved den kritiske frekvens.

Et samlet, mere generelt formeludtryk for vægimpedansen fås ved at kombinere (2.44) og (2.48) og forudsætte, at  $f_{11} \ll f_c$ .

$$Z_v = j 2 \pi f m \left( 1 - \left( \frac{f_{11}}{f} \right)^2 \right) \left( 1 - \left( \frac{f}{f_c} \right)^2 \right) + \eta 2 \pi f m \quad (2.49)$$

### Tvungen transmission

Ved tvungen transmission forstås lydtransmission, der alene skyldes de tvungne bøjningsbølger, som frembringes i en plade ved en indfaldende lydølges trykpåvirkninger.

Reduktionstallet  $R_t$  for tvungen transmission alene kan findes ved hjælp af (2.49). Den udstrålede eller transmitterede lydeffekt  $P_{2t}$  er

$$P_{2t} = \langle \tilde{v}_t^2 \rangle \rho c S \sigma_d \quad (2.50)$$

hvor  $\sigma_d$  er strålingsfaktoren for tvungne bøjningsbølger (2.39). Af (1.30) og (2.45) fås

$$\begin{aligned} R_t &= 10 \log \frac{\langle \tilde{p}_1^2 \rangle S}{4 \rho c P_{2t}} \\ &= 20 \log \left| \frac{Z_v}{2 \rho c} \right| - 10 \log (2 \sigma_d) \end{aligned} \quad (2.51)$$

Indsættes heri (2.49), fås ved hjælp af (2.41) som generelt udtryk:

$$R_t = R_0 - 10 \log 2 \sigma_d + 10 \log \left[ \left( 1 - \left( \frac{f_{11}}{f} \right)^2 \right)^2 \left( 1 - \left( \frac{f}{f_c} \right)^2 \right)^2 + \eta_{eq}^2 \right] \quad (2.52)$$

For tabsfaktoren er her benyttet betegnelsen  $\eta_{eq}$ , og det bemærkes, at den kun har betydning omkring  $f = f_{11}$  og  $f = f_c$ , idet tabsfaktoren bestemmer hvor meget reduktionstallet aftager ved disse frekvenser. Imidlertid er disse dyk i frekvensforløbet ofte meget snævert afgrænsede, og ved den almindelige opdeling i  $1/3$  oktavniveauer, er dykkene ikke nær så dybe. Det kan vises, at for  $1/3$  oktavniveauer kan den ækvivalente tabsfaktor  $\eta_{eq}$  bestemmes som

$$\eta_{eq} = \sqrt{\eta^2 + 0,1 \eta} \quad (2.53)$$

hvor  $\eta$  er den totale tabsfaktor givet ved (2.18).

Frekvensforløbet af reduktionstallet udviser to markante dyk ved henholdsvis  $f_{11}$  og  $f_c$ . Herved opdeles frekvensområdet i tre: Et nedre stivhedsområde, hvor pladen svinger som en stiv membran, et mellemområde, der følger masseloven, og et øvre stivhedsområde styret af bøjningsstivheden. I de tre områder fås tilnærmet:

$$R_t \approx R_0 - 10 \log(2 \sigma_d) + 40 \log \frac{f_{11}}{f} \quad (f < f_{11}) \quad (2.54)$$

$$R_t \approx R_0 - 10 \log(2 \sigma_d) \quad (f_{11} < f < f_c) \quad (2.55)$$

$$R_t \approx R_0 - 10 \log(2 \sigma_d) + 40 \log \frac{f}{f_c} \quad (f > f_c) \quad (2.56)$$

Sædvanligvis har frekvensområdet i (2.55) størst betydning i praksis. Det nedre stivhedsområde ligger typisk under 10–50 Hz og dermed uden for det bygningsakustiske frekvensområde. Det øvre stivhedsområde er fuldstændig domineret af den resonante transmission, som omtales i det følgende.

### Resonant transmission

Ved enhver påvirkning af en plade også med luftlyd vil der exciteres egen-svingninger, der udstråler lyd som beskrevet i afsnittet om lydudstråling. Denne virkning kaldes resonant transmission, og den udstrålede lydeffekt betegnes  $P_r$ .

Den resonante transmission lader sig ikke som den tvungne beskrive ved en vægimpedans, men ved hjælp af reciprocitetsbetragtninger (Cremer & Heckl, 1967, p. 489) eller statistisk energianalyse (Rindel, 1980), hvorfra der kan findes en simpel relation mellem hastigheden af egen-svingningerne og pladens strålingsfaktor  $\sigma$  for egen-svingninger omkring en given frekvens

$$\langle \tilde{v}_r^2 \rangle \approx \frac{\langle \tilde{p}_1^2 \rangle}{(\omega m)^2} \cdot \frac{\pi \sigma \omega_c}{2 \eta \omega} \quad (2.57)$$

hvor  $p_1$  er lydtrykket i senderummet. Den resonant udstrålede lydeffekt er givet ved (2.21)

$$P_{2r} = \langle \tilde{v}_r^2 \rangle \rho c S \sigma \quad (2.58)$$

Reduktionstallet for resonant transmission alene,  $R_r$ , kan findes ved ind-sættelse i (1.30) og brug af (2.41)

$$R_r = 10 \log \frac{\langle \tilde{p}_1^2 \rangle S}{4 \rho c P_{2r}} = R_0 - 10 \log \frac{\pi \sigma^2 f_c}{2 \eta f} \quad (2.59)$$

Her spiller strålingsfaktoren  $\sigma$  en afgørende rolle, og der henvises til figur 2.12, hvor frekvensafhængigheden er illustreret. For mange bygningskon-struktioner, især af tynde plader, vil den resonante transmission være uden betydning ved frekvenser under den kritiske frekvens, men dominerende ved frekvenser over den kritiske frekvens, hvor  $\sigma \approx 1$ .

Det bemærkes, at den resonante transmission afhænger direkte af tabsfak-toren,  $\eta$ , der bestemmer, hvor kraftigt egen-svingningerne exciteres.

### Samlet transmission – beregningsmodel

Reduktionstallet for en plade kan beskrives ved at sammenlægge den tvungne og den resonante transmission

$$R = 10 \log \frac{P_1}{P_{2t} + P_{2r}} = -10 \log [10^{-R_t/10} + 10^{-R_r/10}] \quad (2.60)$$

Heri kan nu indsættes henholdsvis (2.52) og (2.59) for at få et generelt ud-tryk for reduktionstallet under forudsætning af  $f_{11} \ll f_c$

$$R = R_0 - 10 \log \left[ \frac{2 \sigma_d}{\left(1 - \left(\frac{f_{11}}{f}\right)^2\right)^2 \left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right)^2 + \eta_{eq}^2} + \frac{\pi \sigma^2 f_c^*}{2 \eta f} \right] \quad (2.61)$$

hvor

$R_0$  er reduktionstallet for vinkelret lydindfald, masseloven (2.41)

$f_{11}$  er laveste egenfrekvens (2.12)

$f_c$  er den kritiske frekvens (2.3)

$f_c^*$  er  $f_c$  korrigeret for tykke plader (2.9)

$\eta$  er den samlede tabsfaktor (2.18)

$\eta_{eq}$  er den ækvivalente tabsfaktor for  $\frac{1}{3}$  oktav ved resonansdyk (2.53)

$\sigma_d$  er strålingsfaktoren for tvungne bøjningsbølger (2.39)

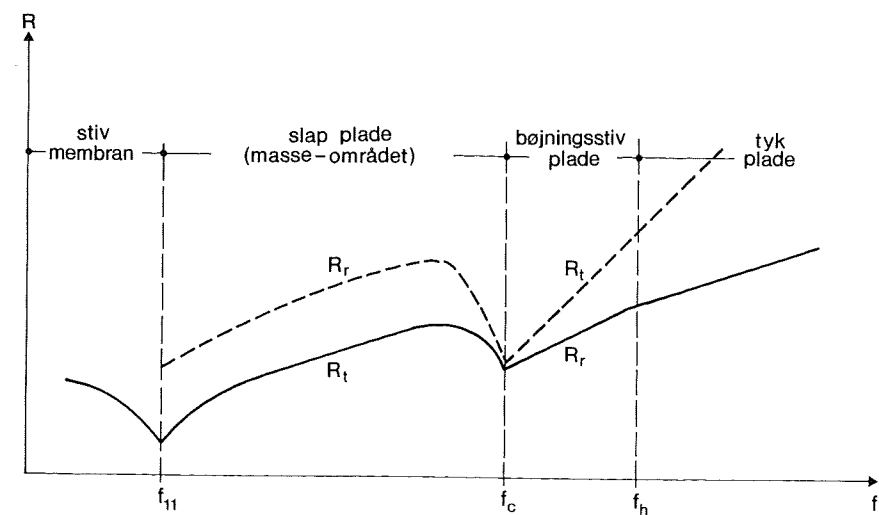
$\sigma$  er strålingsfaktoren for egen-svingninger (2.24)–(2.29)

I figur 2.21 er vist det principielle frekvensforløb af reduktionstallet efter (2.61). Til de fleste anvendelser er det dog fuldt tilstrækkeligt at bruge følgen-de, forenkledte udtryk

$$R \approx R_0 - 10 \log(2 \sigma_d) + 20 \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) \quad (f < f_c) \quad (2.62)$$

$$R \approx R_0 + 10 \log \eta + 10 \log \frac{f}{f_c} - \Delta R_h - 2 \text{ dB} \quad (f \geq f_c) \quad (2.63)$$

hvor (2.39) giver



Figur 2.21. Principielt frekvensforløb af reduktionstallet for en massiv, homogen plade,  $R_r$  og  $R_t$ , henviser henholdsvis til tvungen og resonant transmission. De punkterede kurveafsnit er normalt af sekundær betydning for den samlede lydtransmission.

$$10 \log (2 \sigma_d) = 10 \log \left[ 0,20 + \ln \left( \frac{2 \pi}{c} f \sqrt{S} \right) \right] \quad (2.64)$$

$$\approx 5 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB} \quad (S \geq 10 \text{ m}^2)$$

Korrektionen  $\Delta R_h$  for meget tykke plader fås af (2.9):

$$\Delta R_h = 10 \log \frac{f_c^*}{f_c} = 10 \log \left[ \frac{f}{5 f_h} + \sqrt{\left( \frac{f}{5 f_h} \right)^2 + 1} \right] \quad (2.65)$$

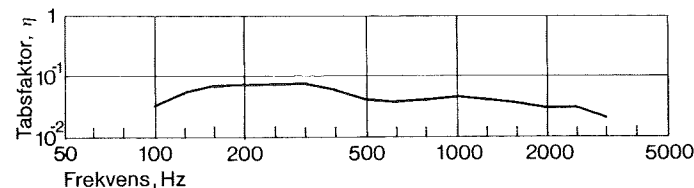
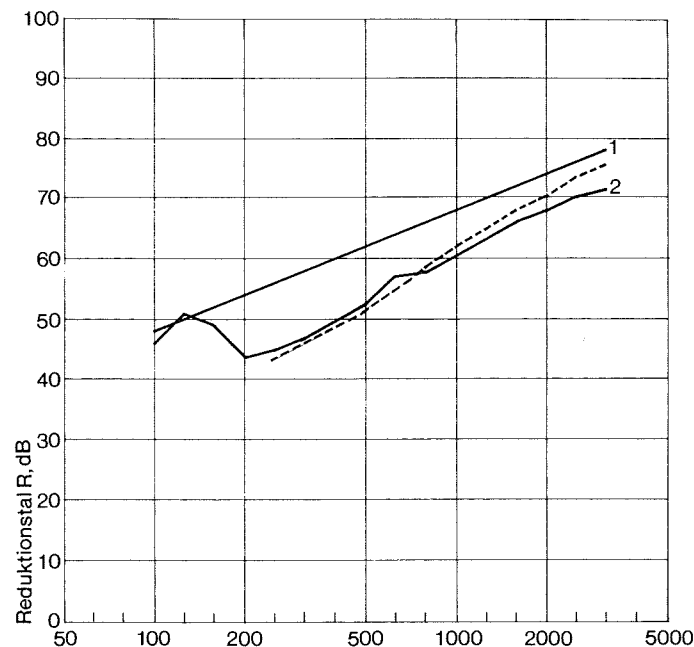
Frekvensen  $f_h$  er givet ved (2.8)

$$f_h = \frac{1}{f_c} \left( \frac{c}{6 h} \right)^2 \quad (2.66)$$

hvor  $c$  er lydhastigheden og  $h$  er pladetykkelsen. For  $f < f_h$  er  $\Delta R_h \approx 0$  dB.

I figur 2.22 ses et eksempel på målt reduktionstal og tabsfaktor for en konstruktion, hvor resonant lydtransmission er dominerende.

Med hensyn til frekvensområdet ( $f < f_c$ ) bemærkes, at der kan være tilfælde, hvor den resonante transmission er af samme størrelsesorden som den tvungne transmission. Det kan navnlig dreje sig om afstivede plader, hvor ud-



Figur 2.22. Målt reduktionstal  $R$  og tabsfaktor  $\eta$  for en 220 mm teglstensvæg, med 15 mm gipspuds på begge sider,  $l_x \cdot l_y = 4 \text{ m} \cdot 2,5 \text{ m}$ , massen  $480 \text{ kg/m}^2$ ,  $f_c$  ca. 72 Hz,  $f_b = 200 \text{ Hz}$  (2.30),  $f_{11}$  ca. 90 Hz (2.12) og  $f_h = 730 \text{ Hz}$  (2.66). Den stiplede kurve er beregnet af (2.63), dog uden korrektion  $\Delta R_h$  for tykkelse. Når der korrigeres for tykkelse, falder kurven ved høje frekvenser sammen med måleresultatet. Efter (Josse & Lamure, 1964). Kurve 1 er masseloven og kurve 2 det målte reduktionstal.

strålingen fra egensvingningerne er særlig stor. Som retningslinie haves, at hvis tabsfaktoren er

$$\eta < \frac{1}{20} \left( \frac{U c}{S f_c} \right)^2 \quad (2.67)$$

vil den resonante transmission kunne have betydning under den kritiske frekvens, idet  $R_r - R_t < 10$  dB. I så fald kan enten benyttes det generelle udtryk (2.61) eller den resonante transmission kan med tilnærmelse beregnes af

$$R_r \approx R_0 + 10 \log \eta + 20 \log \frac{S f_c}{U c} + 18 \text{ dB} \quad (2.68)$$

som gælder for  $f < \frac{1}{2} f_c$ , idet (2.27) er indsat i (2.59). Med den tvungne transmission bestemt af (2.62) fås endelig reduktionstallet ved sammenlægning efter (2.60).

### Trinlydniveau

De trinlydniveauer, der kan opnås med homogene, massive plader, kan beskrives ud fra kendskab til lydudstrålingen fra punktexciterede plader, som er omtalt i afsnittet om lydudstråling. Imidlertid vil der næsten altid være behov for supplerende, trinlyddæmpende foranstaltninger i form af bløde gulvbelægninger, svømmende gulve eller elastisk oplagte gulvkonstruktioner, der må betragtes som dobbeltkonstruktioner. Kun massive dæk og bløde gulvbelægninger vil blive omtalt i dette kapitel.

#### Punktexcitering af en plade

Sammenhængen mellem en kraftpåvirkning  $F$  i et punkt og hastigheden  $v_0$  i samme punkt kaldes *punktimpedansen*  $Z_0$ . For en homogen plade, hvis tykkelse er mindre end en sjettedel af bøjningsbølgelængden, er middelværdien af punktimpedansen

$$Z_0 = \frac{F}{v_0} = 8 \sqrt{m B} = \frac{4 c^2 m}{\pi f_c} \quad (2.69)$$

hvor  $m$  er pladens masse per arealenhed,  $B$  er bøjningsstivheden og  $f_c$  den kritiske frekvens. I et givet punkt af pladen vil der optræde afvigelser fra punktimpedansens middelværdi, som afhænger af punktets placering i forhold til svingningsmønstrene for pladens egensvingninger.

Den effekt, der tilføres pladen ved kraftpåvirkningen, kan bestemmes ved hjælp af punktimpedansen.

Generelt bliver effekten:

$$P_i = \bar{F}^2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{Z_0} \right\} = \frac{\bar{F}^2 \pi f_c}{4 c^2 m} \quad (2.70)$$

Ved energibalance er den tilførte effekt  $P_i$  lig med den effekt  $P_d$ , der går tabt ved indre tab, randtab og strålingstab, og som kan udtrykkes ved den samlede tabsfaktor  $\eta$  (2.16):

$$P_d = 2 \pi f m S \langle \tilde{v}_r^2 \rangle \eta \quad (2.71)$$

Idet  $P_i = P_d$  bestemmes forholdet mellem kraftpåvirkningen og den gennemsnitlige hastighed, som skyldes excitering af pladens egensvingninger:

$$\frac{\bar{F}^2}{\langle \tilde{v}_r^2 \rangle} = 8 S m^2 c^2 \eta \frac{f}{f_c} \quad (2.72)$$

Ved indsættelse i (2.34) kan kraftpåvirkningen  $F$  sammenkædes med den i modtagerummet udsårede lydeffekt  $P_2$ :

$$P_2 = \frac{\bar{F}^2 \rho}{2 \pi m^2 c} + \frac{\bar{F}^2 \rho \sigma f_c}{8 m^2 c \eta f} \quad (2.73)$$

hvor første led skyldes nærfeltsudstrålingen og andet led er det resonante bidrag, som skyldes egensvingningerne i pladen. I første led er der set bort fra arealet af bankemaskinens hamre, hvilket for massive dæk normalt vil være en acceptabel tilnærmelse.

#### Trinlydniveau for massive dæk

For massive dæk kan trinlydniveauet bestemmes ud fra (1.34) ved indsættelse af den udsårede effekt (2.73):

$$L_n = 10 \log \left[ \frac{4 \rho^2 \bar{F}^2}{p_0^2 A_0 m^2} \left( \frac{1}{2 \pi} + \frac{\sigma f_c}{8 \eta f} \right) \right] \quad (2.74)$$

Heri indsættes talkonstanter samt kvadratet for den standardiserede bankemaskines kraftpåvirkning per  $\frac{1}{3}$  oktav (1.36), hvorefter trinlydniveauet per  $\frac{1}{3}$  oktav bliver:

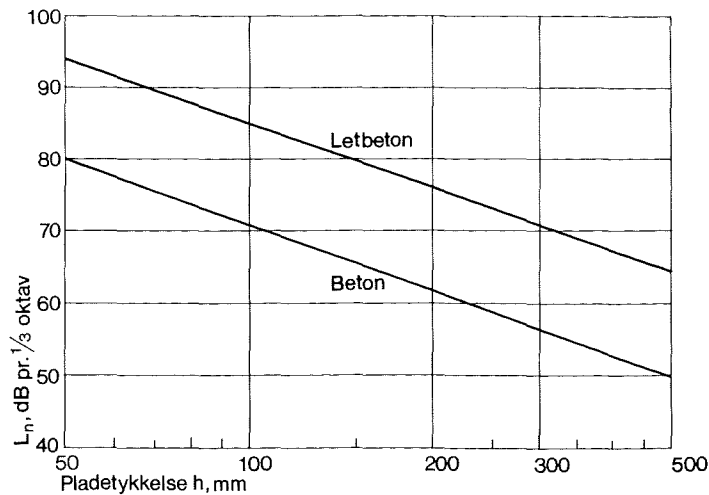
$$L_n \approx 82 - 10 \log \left( m^2 \frac{\eta}{f_c} \right) + 10 \log \left( \frac{4 \eta f}{\pi f_c} + \sigma \right) \quad (2.75)$$

hvor  $m$  skal indsættes i  $\text{kg/m}^2$  og  $f$  og  $f_c$  i Hz. Sidste led indeholder dels nærfeltets bidrag, dels strålingsfaktoren for egensvingningerne. Når tabsfaktoren  $\eta$  er lille, er nærfeltets bidrag ofte ubetydeligt. For massive dæk med lav kritisk frekvens og  $f > f_c$  fås, idet  $\sigma \approx 1$ , følgende tilnærmelse for trinlydniveauet:

$$L_n \approx 82 - 10 \log \left( m^2 \frac{\eta}{f_c} \right) \quad (2.76)$$

Ved hjælp af (2.4) fås for et givet materiale, idet  $m = \rho_m \cdot h$ :

$$L_n \approx 82 - 10 \log \left( \frac{\rho_m^2 \eta}{K_c} \right) - 30 \log h \quad (2.77)$$



Figur 2.23. Tilnærmet trinlydniveau for massive dæk af beton ( $2300 \text{ kg/m}^3$ ) og porebeton ( $600 \text{ kg/m}^3$ ) gældende for strålingsfaktor  $\sigma = 1$  og tabsfaktor  $\eta = 0,05$ .

Trinlydniveauet  $L_n$  aftager 9 dB per fordobling af pladetykkelsen. Til brug for grove overslag er denne sammenhæng vist for beton og letbeton i figur 2.23. Det er dog ikke realistisk at anvende så tykke plader, at trinlydniveauet bliver acceptabelt for beboelsesrum, uden yderligere trinlyddæpende foranstaltninger. For  $f > f_c$  er  $L_n$  frekvensuafhængig (2.76), når der kan ses bort fra nærfeltet og fra tabsfaktorens frekvensafhængighed.

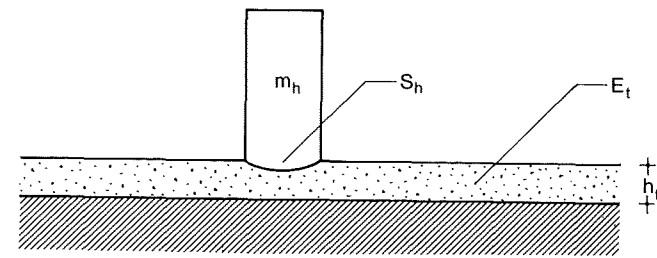
For meget tykke plader, dvs. for  $f > f_h$  (2.66), fås en korrektion lige som (2.65), svarende til at  $f_c$  erstattes med  $f_c^*$ .

### Trinlyddæpende gulvbelægninger

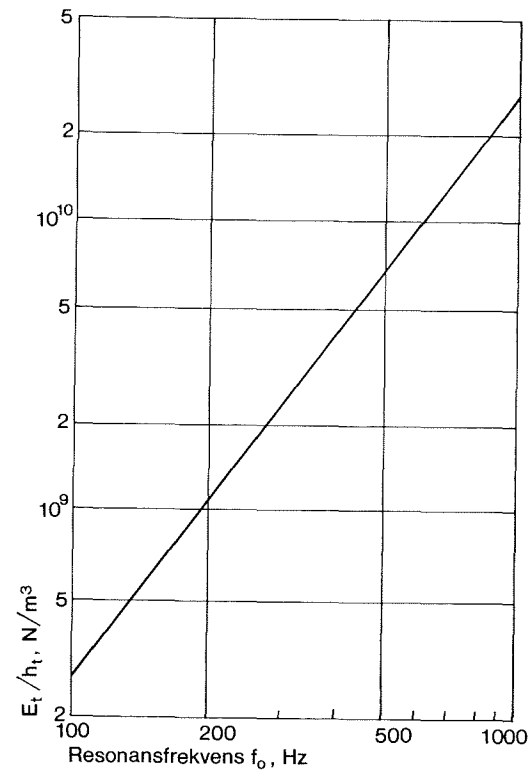
Med gulvbelægninger af tæppe eller andre tynde belægninger, f.eks. linoleum med bløde underlag, opnås en reduktion af hamrenes kraftpåvirkning af dækket ved, at hastigheden gradvis aftager fra maksimum ved overfladen til nul ved en passende nedtrykning i gulvbelægningen, hvorefter hammeren igen presses op til overfladen. Dette forløb svarer til en halv svingningsperiode for et masse-fjeder-system, hvor fjederkonstanten er bestemt af gulvbelægningens elasticitetsmodul  $E_t$ , dens tykkelse  $h_t$ , samt det påvirkede areal  $S_h$ , se figur 2.24.

Kaldes hammerens masse  $m_h$ , kan systemets resonansfrekvens bestemmes af:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S_h E_t}{m_h h_t}} \quad (2.78)$$

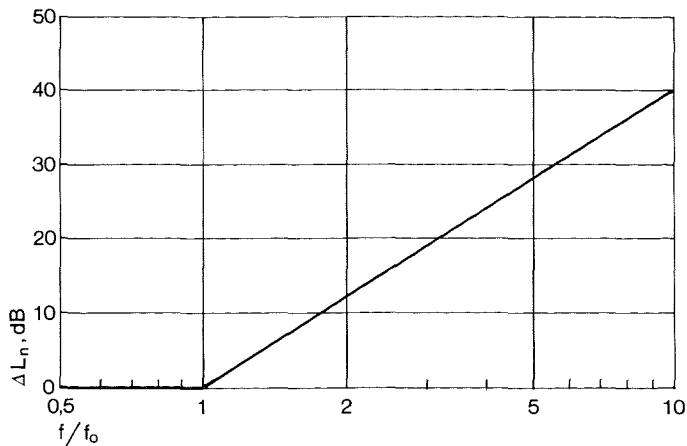


Figur 2.24. Trinlyddæpende gulvbelægning med tykkelse  $h_t$  og elasticitetsmodul  $E_t$ . Bankemaskinens hamre har massen  $m_h = 500 \text{ g}$  og arealet  $S_h \approx 700 \text{ mm}^2$ .

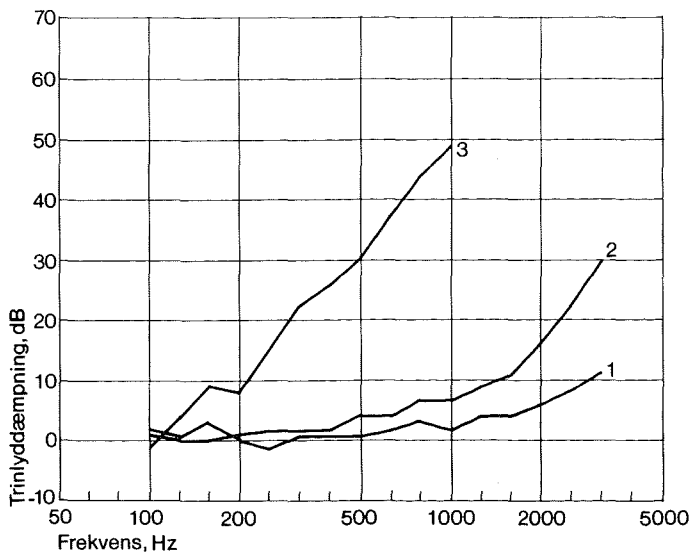


Figur 2.25. Diagram til bestemmelse af  $f_0$  for bløde gulvbelægninger med tykkelse  $h_t$  og elasticitetsmodul  $E_t$ .

For den standardiserede bankemaskine er  $m_h = 0,500 \text{ kg}$  og  $S_h = 7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ . Diagrammet i figur 2.25 viser sammenhængen mellem  $f_0$  og en gulvbelægningens elastiske egenskaber. For mange elastiske materialer er det dynamiske elasticitetsmodul dog ca. dobbelt så stort som det statisk bestemte elasticitetsmodul.



Figur 2.26. Trinlyddæmpningens frekvensforløb for bløde gulvbelægningsmateriale. Knækfrekvensen  $f_0$  kan bestemmes af figur 2.25.



Figur 2.27. Eksempler på trinlyddæmpning for gulvbelægningsmateriale. 1. Tynd linoleum. 2. Vinyl på filt. 3. Tykt, blødt tæppe.

Kendes frekvensen  $f_0$  og er  $f > f_0$ , så kan trinlyddæmpningen  $\Delta L$  overslagsmæssigt bestemmes som vist af (Ver, 1971):

$$\Delta L = L_{n,uden} - L_{n,med} \approx 40 \log \frac{f}{f_0} \quad (2.79)$$

For  $f \leq f_0$  er  $\Delta L \approx 0$ . Trinlyddæmpningens principielle frekvensforløb er illustreret i figur 2.26. Det bør tilstræbes, at  $f_0$  er så lav som muligt og helst under 90 Hz. I figur 2.27 ses eksempler på tynde gulvbelægningsmateriale trinlyddæmpning.

### Sammenhæng mellem $R$ og $L_n$

For massive plader er der en sammenhæng mellem luftlydisolation og trinlyddæmpning, og denne sammenhæng er særlig enkel for frekvenser over den kritiske frekvens ( $f > f_c$ ) og for plader med ringe dæmpning, hvor trinlyddæmpningen er givet ved (2.76) med korrektion for eventuel trinlyddæmpende gulvbelægning:

$$L_n = 82 - 10 \log \left( m^2 \frac{\eta}{f_c} \right) - \Delta L \quad (2.80)$$

Det tilsvarende reduktionstal  $R$  er uanset gulvbelægning givet ved (2.63), hvori indsættes  $R_0$  fra (2.41) og det forudsættes  $f < f_h$  (2.66) dvs.  $\Delta R_h \approx 0$  dB.

$$\begin{aligned} R &= R_0 + 10 \log \left( \frac{\eta f}{f_c} \right) - 2 \\ &= 10 \log \left( \frac{m^2 \eta f^3}{f_c} \right) - 44 \end{aligned} \quad (2.81)$$

Ved sammenlægning af  $R$  og  $L_n$  fås nu umiddelbart:

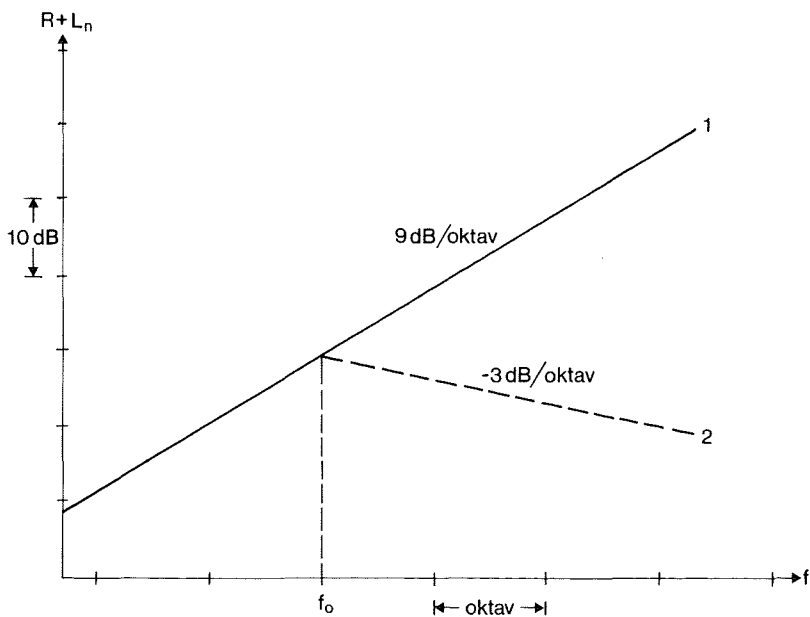
$$R + L_n = 38 + 30 \log f - \Delta L \quad (2.82)$$

For hårde gulve eller for  $f < f_0$ , hvor resonansfrekvensen  $f_0$  karakteriserer gulvbelægningen (2.78), fås, idet  $\Delta L \approx 0$ :

$$R + L_n = 38 + 30 \log f \quad (2.83)$$

Med trinlyddæmpning fås ved hjælp af (2.79) for  $f > f_0$ :

$$R + L_n = 38 + 30 \log f_0 - 10 \log \frac{f}{f_0} \quad (2.84)$$



Figur 2.28. Principielt forløb af  $R + L_n$  for massive plader over den kritiske frekvens  $f_c$ . Resonansfrekvensen  $f_0$  karakteriserer en eventuelt trinlyddæmpende gulvbelægning.

1. Uden gulvbelægning.
2. Med gulvbelægning.

Sammenhængen er illustreret i figur 2.28. Under  $f_0$  eller for hårde gulve fås en sumkurve, der vokser 9 dB/oktav. Med trinlyddæmpende gulvbelægning knækker kurven ved  $f_0$  og fortsætter ved højere frekvenser med den negative hældning  $-3$  dB/oktav.

Denne simple sammenhæng kan bl.a. udnyttes til kontrol af måleresultater. En manglende overensstemmelse kan skyldes utætheder eller flanketransmission via væggene i senderummet, altså forhold som alene påvirker luftlydisolationen.

Det skal bemærkes, at under den kritiske frekvens for pladen er der ikke den samme simple sammenhæng mellem  $R$  og  $L_n$ .

## Inhomogene plader

### Orthotrope plader

Mange bygningsmaterialer er orthotrope, dvs. at de har forskellige egenskaber i forskellige akseretninger i modsætning til isotrope plader, der har sam-

me egenskaber i forskellige akseretninger. I mange træbaserede pladematerialer er bøjningsstivheden størst parallelt med træets årer, se tabel 2.2. Et andet eksempel på orthotrope plader er *korrugerede metalplader*, hvor et trapezformet eller bølgeformet profil medfører meget stor forskel på bøjningsstivheden i de to akseretninger.

Som vist af (Heckl, 1960) kan der i mange af de resultater, der kendes fra isotrope plader, med god tilnærmelse indsættes en geometrisk middelværdi af de to bøjningsstivheder  $B_x$  og  $B_y$ :

$$B_{xy} = \sqrt{B_x B_y} \quad (2.85)$$

Dette gælder f.eks. punktimpedansen (2.69).

For lydisolationen er den vigtigste forskel mellem isotrope og orthotrope plader, at sidstnævnte har to forskellige kritiske frekvenser, svarende til lydudbredelse i retningen med henholdsvis den største eller den mindste bøjningsstivhed. Kaldes disse to retninger  $x$  og  $y$ , fås analogt med (2.3) og (2.4):

$$f_{cx} = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B_x}} \quad (2.86)$$

$$f_{cx} = \frac{K_{cx}}{h} \quad (2.87)$$

hvor  $f_{cx}$  er den kritiske frekvens i retningen med størst bøjningsstivhed. Tilsvarende findes den anden kritiske frekvens,  $f_{cy}$ . Som følge af (2.85) kan den kritiske frekvens i mange sammenhænge erstattes med:

$$f_c \rightarrow f_{cxy} = \sqrt{f_{cx} f_{cy}} \quad (2.88)$$

Dette må dog ikke gøres ukritisk. For eksempel fås for den laveste egenfrekvens i stedet for (2.12):

$$f_{11} = \frac{c^2}{4} \left[ \frac{1}{f_{cx} \ell_x^2} + \frac{1}{f_{cy} \ell_y^2} \right] \quad (2.89)$$

De to forskellige kritiske frekvenser medfører risiko for to dyk i lydisolationen og en forholdsvis ringe lydisolation i mellemområdet, hvor lydudstråling fra egensvingningerne begynder at gøre sig kraftigt gældende. Efter (Heckl, 1960) kan strålingsfaktoren i frekvensområdet  $f_{cx} < f < f_{cy}$  bestemmes af:

$$\sigma \approx \frac{1}{\pi^2} \sqrt{\frac{f_{cx}}{f_{cy}}} \left( \ln \frac{4f}{f_{cx}} \right)^2 \quad (2.90)$$



Der kan herefter beregnes et tilnærmet reduktionstal af den generelle formel (2.61), idet opspaltningen i to kritiske frekvenser kan ske ved en simpel modifikation af bidraget fra den tvungne transmission:

$$\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right)^2 \rightarrow \left(1 - \left(\frac{f}{f_{cx}}\right)^2\right) \left(1 - \left(\frac{f}{f_{cy}}\right)^2\right) \quad (2.91)$$

Over den laveste kritiske frekvens  $f_{cx}$ , vil den resonante transmission normalt være dominerende, og reduktionstallet bestemmes ved at indsætte (2.90) og (2.88) i (2.59).

$$R \approx R_0 - 10 \log \left[ \frac{1}{2 \pi^3 \eta} \cdot \frac{f_{cx}}{f} \sqrt{\frac{f_{cx}}{f_{cy}}} \left( \ln \frac{4f}{f_{cx}} \right)^4 \right] \quad (f_{cx} < f < f_{cy}) \quad (2.92)$$

$$R \approx R_0 - 10 \log \frac{\pi f_{cy}}{2 \eta f} \quad (f > f_{cy}) \quad (2.93)$$

For nogle orthotrope plader er intervallet mellem  $f_{cx}$  og  $f_{cy}$  så lille, at det virker som ét koindensdyk, der breder sig over et større frekvensområde end det kendes fra isotrope plader. Andre orthotrope plader kan have et meget stort interval mellem de kritiske frekvenser, f.eks. har korrugerede plader kritiske frekvenser fra under 200 Hz til over 20 kHz.

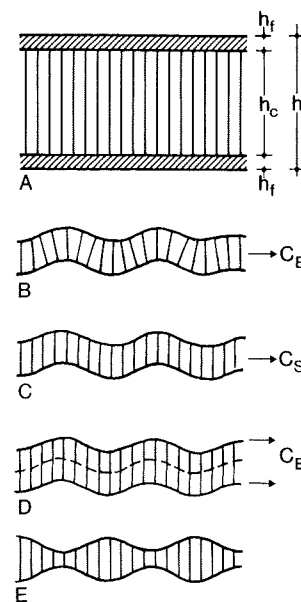
### Sandwich-plader

Ved sandwich-konstruktioner forstås i det følgende plader opbygget af to tynde skiver forbundet med et let kernemateriale. Sådanne konstruktioner kan kombinere stor statisk stivhed med ringe vægt, hvilket især har ført til anvendelser i fly og skibe. Princippet kendes også fra bygningsmaterialer, f.eks. de såkaldte nul-energi-elementer, hvor skiverne er krydsfiner og kernen kantstillet mineraluld med fiberretning vinkelret på pladerne. Andre kernematerialer kan være skumplast eller »honeycomb«-skelet, hvilket ligner vokstavler fra en bikube, men er opbygget af metalfolie, papir eller plastic.

I figur 2.29 er vist en sandwich-plade og nogle af de bølgetyper, der optræder ved lydtransmission gennem sandwich-plader. Foreløbig ses der bort fra dilatationsbølgen, dvs. kernematerialet betragtes som en ideel afstandsholder mellem de to yderskiver.

Væsentligt for sandwich-plader er, at der optræder *forskydningsbølger*, hvis udbredelseshastighed er:

$$c_s = \sqrt{\frac{G h}{m}} \quad (2.94)$$



Figur 2.29. Sandwichplade med typiske bølgetyper.  
A. Tværsnit.  
B. Bøjningsbølge.  
C. Forskydningsbølge.  
D. Bøjningsbølger i yderskiverne.  
E. Dilatationssvingninger med elastisk kerne.

hvor  $G$  er forskydningsmodulet,  $h$  den totale pladetykkelse og  $m$  den samlede masse per arealenhed. Forskydningsmodulet bestemmes af kernematerialets elasticitetsmodul  $E_c$ :

$$G = \frac{E_c}{2(1 + \mu)} \quad (2.95)$$

I forskydningsbølgen sker der ingen udvidelse eller sammentrækning af yderskiverne, og forskydningerne i kernematerialet sker vinkelret på udbredelsesretningen, se figur 2.29 C. Den rene bøjningsbølge er til sammenligning illustreret i figur 2.29 B. Dennes udbredelseshastighed  $c_B$  bestemmes af (2.1), idet massen per arealenhed er:

$$m = m_c + 2 m_f = \rho_c h_c + 2 \rho_f h_f \quad (2.96)$$

Bøjningsstivheden findes af (Ver & Holmer, 1971, p. 313):

$$B = \frac{1}{2} E_f h_f (h_f + h_c)^2 \quad (2.97)$$

idet index  $c$  refererer til kernematerialet og index  $f$  til yderskiverne, som her antages at være ens. Det forudsættes, at kernematerialet kun virker som afstandsholder for yderskiverne.

Endelig kan der optræde bøjningsbølger i hver af yderskiverne, se figur 2.29 C. Udbredelsehastigheden  $c_{Bf}$  bestemmes af (2.1), idet bøjningsstivheden findes af (2.2), men halvdelen af kernematerialet medregnes i massen af skiven:

$$c_{Bf} = \sqrt{2\pi f} \sqrt[4]{\frac{B_f}{m_f + \frac{1}{2} m_c}} \quad (2.98)$$

De beskrevne bølgetyper vil ikke optræde rendyrket hver for sig, men der sker en glidende overgang som funktion af frekvensen. Den effektive bøjningsbølgehastighed  $c_{B,eff}$  skal opfylde en 6. grads ligning, der er opstillet af (Kurtze & Watters, 1959) og som gælder for et kernemateriale, der virker som en ideel afstandsholder mellem to ens yderskiver:

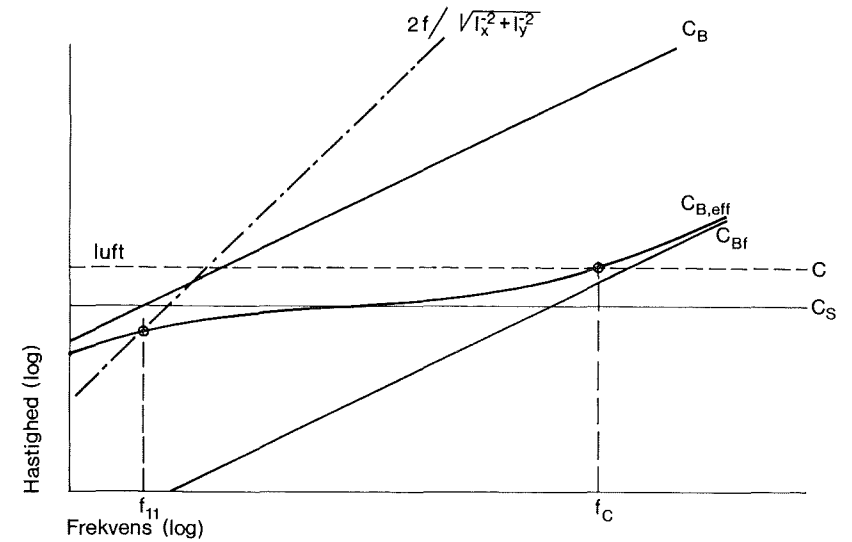
$$\left(\frac{c_s}{c_B}\right)^4 c_{B,eff}^6 + c_s^2 c_{B,eff}^4 - c_s^4 c_{B,eff}^2 - c_{Bf}^4 c_s^2 = 0 \quad (2.99)$$

For  $c_B \gg c_{Bf}$  fører en nærmere analyse af ligningen til den effektive bøjningsbølgehastighed:

$$c_{B,eff} \approx \left(\frac{1}{c_B^3} + \frac{1}{c_s^3 + c_{Bf}^3}\right)^{-1/3} \quad (2.100)$$

Betydningen af  $c_{B,eff}$  diskuteres på grundlag af illustrationen i figur 2.30. Det ses, at  $c_{B,eff}$  vokser med frekvensen på en relativt kompliceret måde. Ved lave frekvenser følges asymptoten for rene bøjningsbølger,  $c_{B,eff} \rightarrow c_B$ , som vokser med  $\sqrt{f}$ . Ved lidt højere frekvenser får svingningerne nærmest karakter af forskydningsbølger, og  $c_{B,eff}$  vokser kun ganske langsomt med frekvensen. Ved høje frekvenser tiltager frekvensafhængigheden igen, idet  $c_{B,eff} \rightarrow c_{Bf}$ , svarende til, at bøjningsstivheden i yderskiverne bliver bestemmende.

Det skitserede forløb kan også beskrives ved, at bøjningsstivheden er stærkt frekvensafhængig, således at den meget store statiske bøjningsstivhed, som er en af sandwich-pladens fordele, kun gælder ved lave frekvenser, mens bøjningsstivheden ved høje frekvenser er langt mindre. Dette forhold medfører, at hovedparten af beregningsgrundlaget for lydtransmission må revideres, inden det kan anvendes for sandwich-plader. Nøglen hertil er den dynamiske bøjningsstivhed beskrevet ved den effektive bøjningsbølgehastighed i (2.100).



Figur 2.30. Principielt frekvensforløb af den effektive bøjningsbølgehastighed i en sandwichkonstruktion med inkompressibelt kernemateriale.  $c_B$  og  $c_{Bf}$  danner asymptoter mod henholdsvis lave og høje frekvenser. Overgangen bestemmes af forskydningsbølgerens hastighed  $c_s$ . Bestemmelse af laveste egenfrekvens  $f_{11}$  og kritisk frekvens  $f_c$  er vist.

Den kritiske frekvens  $f_c$ , der spiller så afgørende en rolle for lydtransmissionen, findes definitions-mæssigt, hvor  $c_{B,eff} = c_s$ , se figur 2.30.  $f_c$  vil således ligge et eller andet sted i intervallet mellem den lave kritiske frekvens, svarende til ren bøjning, og den høje kritiske frekvens for yderskiverne alene. Det afgørende for beliggenheden af  $f_c$  ses at være forskydningsbølgehastighedens størrelse i forhold til lydhastigheden i luft, altså  $c_s/c$ . Den lydteknisk bedste konstruktion opnås i princippet, når  $c_s \ll c$ , da dette giver en høj kritisk frekvens, og dermed mindst muligt bidrag fra den resonante transmission. I så fald vil reduktionstallet følge (2.62). Det kræver imidlertid et kernemateriale med et lille forskydningsmodul,  $G$ . Men i praksis vil  $G$  ofte være så stor, at  $c_s \approx c$  eller måske  $c_s \gg c$ . I dette tilfælde rykker den kritiske frekvens drastisk ned, og der kan optræde et meget bredt koincidensdyk, hvorved reduktionstallet bliver væsentligt lavere end efter masseloven.

Den frekvensafhængige bøjningsstivhed har også betydning for egenfrekvenserne, der ikke direkte kan beregnes af (2.11). Med simpelt understøttede rande er egenfrekvenserne betingede af:

$$\left(\frac{2}{\lambda_B}\right)^2 = \left(\frac{m}{\ell_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{\ell_y}\right)^2 \quad (2.101)$$

eller, idet  $\lambda_{B,eff} \cdot f = c_{B,eff}$

$$c_{B,eff} = \frac{2f_{mn}}{\sqrt{\left(\frac{m}{\ell_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{\ell_y}\right)^2}} \quad (2.102)$$

Idet frekvensafhængigheden af  $c_{B,eff}$  kendes fra (2.100), kan egenfrekvenserne i princippet bestemmes, som det er vist grafisk for den laveste egenfrekvens i figur 2.30.

Lydudstrålingen fra eigensvingninger beskrives med strålingsfaktoren  $\sigma$ , men de tidligere anførte formler (2.24–2.29) kan ikke umiddelbart anvendes for sandwich-plader. Den afgørende parameter for lydudstråling er forholdet mellem bøjningsbølgeløshastighed og lydhastighed i luft. Derfor består revisionen af formelapparatet simpelthen i at erstatte det anvendte frekvensforhold med et hastighedsforhold (som stadig er frekvensafhængigt):

$$\frac{f}{f_c} \rightarrow \left(\frac{c_{B,eff}}{c}\right)^2 \quad (2.103)$$

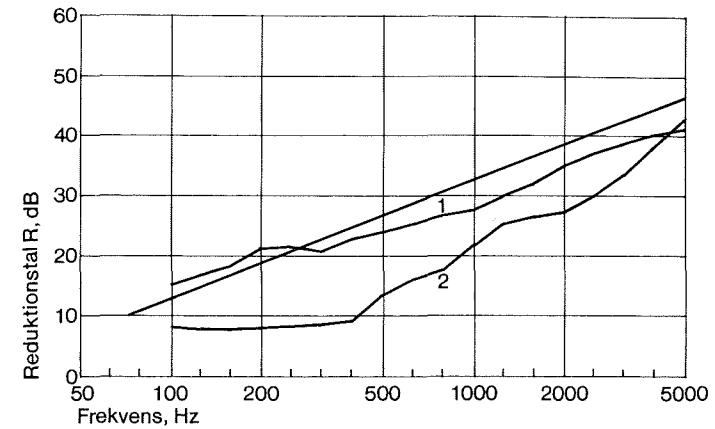
Dette fører eksempelvis til:

$$\sigma \approx \frac{U c_{B,eff}}{\pi^2 S f_c} \quad \left(\frac{3c}{U} < f < \frac{1}{2} f_c\right) \quad (2.104)$$

$$\sigma \approx \left(1 - \left(\frac{c}{c_{B,eff}}\right)^2\right)^{-1/2} \quad (f > f_c) \quad (2.105)$$

i stedet for (2.27) og (2.29). Det særlige, flade frekvensforløb af  $c_{B,eff}$  for sandwich-plader, se figur 2.30, kan medføre, at strålingsfaktoren ikke aftager så hurtigt mod lave frekvenser som for homogene plader. Den resonante transmission spiller derfor en større rolle for lydtransmissionen end tilfældet er for homogene plader.

Reduktionstallet (2.61) kan også danne grundlag for beregning af sandwichplader med de her beskrevne ændringer. Substitutionen (2.103) indføres både i det tvungne og i det resonante transmissionsbidrag. Begge bidrag skal medregnes under den kritiske frekvens, men for  $f > f_c$  er den resonante transmission bestemmende, og analogt med (2.63) fås med god tilnærmelse:



Figur 2.31. Målte reduktionstal for sandwich-plader med kerne af af honeycomb-skelet.

1. Med lavt forskydningsmodul,  $c_s < c$ ,  $f_c$  stor.

2. Med højt forskydningsmodul,  $c_s > c$ ,  $f_c$  lille.

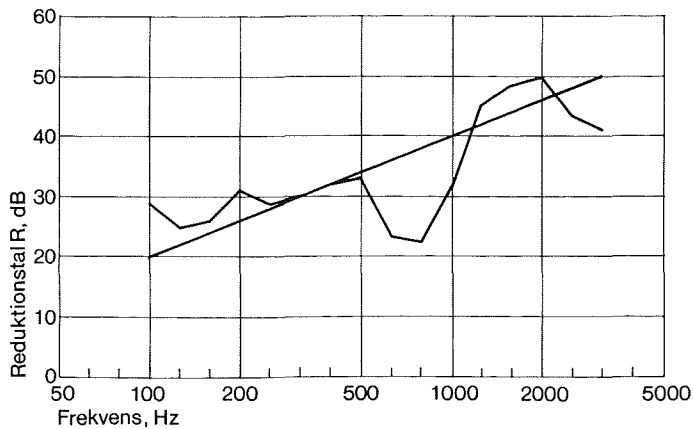
Til sammenligning er indtegnet reduktionstallet efter masseloven. Efter (Fahy, 1985, p. 196).

$$R = R_0 + 10 \log \eta + 10 \log \left[ \left(\frac{c_{B,eff}}{c}\right)^2 - 1 \right] - \Delta R_h - 2 \quad (f > f_c) \quad (2.106)$$

hvor korrektionen  $\Delta R_h$  dog ikke kan beregnes så enkelt som for homogene plader (2.65).  $\Delta R_h$  for sandwichplader er mellem 0 og 3 dB afhængig af hældningskoefficienten på frekvenskurven for  $c_{B,eff}$ , se figur 2.30.  $\Delta R_h$  er 0 dB for rene bøjningsbølger og 3 dB for rene forskydningsbølger.

Eksempler på måleresultater for sandwich-plader ses i figur 2.31. Det bedste resultat fås som forventet med lille forskydningsmodul, idet  $c_s < c$ , og  $f_c$  ligger over det målte frekvensområde. I eksemplet med den stivere kerne fås en lav værdi af  $f_c$ , og dermed væsentligt ringere lydisolering, der domineres af resonant transmission.

I figur 2.32 ses et eksempel på reduktionstallet for en sandwich-plade med kompressibel kerne af polyuretan-skum. I sådanne konstruktioner kan optræde såkaldt *dilatationsresonans*, idet plademasserne svinger med kernematerialet som mellemliggende fjeder, se figur 2.29 E. Dette er helt analogt til resonansfænomenet i dobbeltkonstruktioner, som behandles i næste kapitel.



Figur 2.32. Målte reduktionstal for en sandwich-plade af to lag 13 mm gipsplader med kerne af 55 mm polyuretanskum. Dilatationsresonansfrekvensen er omkring 730 Hz. Til sammenligning er indtegnet reduktionstallet efter masse-loven. Efter (Homb et al, 1983, p. 130).

Dilatationsresonansfrekvensen kan beregnes af (Ver & Holmer, 1971):

$$f_{dil} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4E_{ct}}{h_c(2m_f + m_c/3)}} \quad (2.107)$$

hvor  $E_{ct}$  er kernematerialets kompressionsmodul, som er givet ved:

$$E_{ct} = \frac{E_c}{3(1-2\mu)} \quad (2.108)$$

$E_c$  er kernematerialets elasticitetsmodul, og  $\mu$  er Poissons forhold. Det ses, at  $\mu$  har stor indflydelse på dilatations-resonansfrekvensen, som vokser mod uendelig, hvis  $\mu$  nærmer sig 0,5. Dette er f.eks. tilfældet med gummi. Nogle materialedata er samlet i tabel 2.3.

Tabel 2.3. Materialedata for mulige kernematerialer til sandwichkonstruktioner.  $E$  og  $G$  er kun oplyst for tryk og forskydning vinkelret på skiveplanen.

Materiale	$\rho_m$ kg/m <sup>3</sup>	$E$ 10 <sup>6</sup> N/m <sup>2</sup>	$G$ 10 <sup>6</sup> N/m <sup>2</sup>
Polyuretanskum	40	14	3
Polyuretanskum	100	30	18
Polystyrenskum	20	10	6
Polystyrenskum	160		20
Fenolskum	60	50	10
Siliconegummi			0,02
Naturgummi			1
Uretangummi			10
Honeycomb med skelet af:			
Papir	20		40
Plastic	30	100	20
Plastic	120	700	140
Aluminium	20		100
Aluminium	120	2000	500
Plader af mineraluld (fibre ≠ skiveplan)			
Stenuld	200	0,4-0,7	
Glasuld	120	0,3-0,5	9
Lamelplader af mineraluld (fibre ⊥ skiveplan)			
Glasuld	120	< 6,5	1,15
Glasuld	80	< 1,9	0,46
Glasuld	45	< 1,2	0,17

I sandwich-plader kan  $f_{dil}$  normalt ikke gøres tilstrækkelig lav til, at der kan opnås en positiv effekt af et kompressibelt materiale på lignende måde, som det kendes fra dobbeltkonstruktioner med lav resonansfrekvens. Kompressibilitet af kernematerialet er derfor en uønsket egenskab.

Det må konstateres, at masse-loven udgør en øvre grænse for den praktisk opnåelige lydisolering af sandwich-plader, og at selv små ændringer i kernematerialets egenskaber kan medføre drastiske forringelser af lydisoleringen.

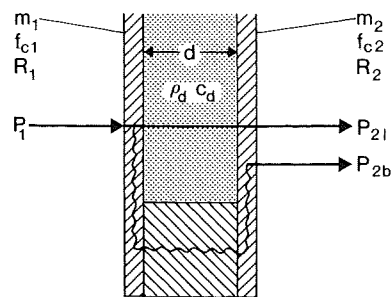
## Dobbeltkonstruktioner

I dette kapitel behandles det teoretiske grundlag for lydtransmission gennem dobbeltkonstruktioner. Sammen med det foregående kapitel kan der opstilles beregningsgrundlag for lydisolations af en række bygningskomponenter som f.eks. dobbeltvinduer, dobbeltvægskonstruktioner med eller uden mekaniske forbindelser. Endvidere behandles såvel trinlydniveau som luftlydisolation af lagdelte etageadskillelser, herunder forskellige former for svømmende gulve og nedhængte lofter. Vanskelighederne ved at beregne dobbeltkonstruktioners lydisolations er især knyttet til transmission gennem mekaniske forbindelser, herunder randkobling.

### Transmission via hulrum

En dobbeltkonstruktion kan bestå af to parallelle plader adskilt af et hulrum  $d$ , som indeholder et elastisk materiale med densiteten  $\rho_d$  og lydastigheden  $c_d$ . Ofte vil hulrummet være luftfyldt. Som vist i figur 3.1 kan lydtransmissionen foregå dels via hulrummet, dels via eventuelle mekaniske forbindelser, såkaldte *lydbroer*. Sidstnævnte transmissionsvej behandles i de følgende afsnit; her betragtes kun transmissionen via hulrummet.

De to plader karakteriseres ved deres masse per arealenhed  $m_1$  og  $m_2$ , deres kritiske frekvens  $f_{c1}$  og  $f_{c2}$ , samt deres reduktionstal  $R_1$  og  $R_2$  for pladerne hver for sig.



Figur 3.1. Lydtransmission gennem en dobbeltkonstruktion opdeles i et bidrag via hulrum, der ofte er luftfyldt, og et andet bidrag via lydbroer.

### Vinkelret lydindfald

Ved en vinkelret indfaldende plan lydbølge, vil pladerne ikke udføre bøjningsbølger, men hver for sig svinge med alle dele i fase. Ud fra bevægelsesligninger og kontinuitetsbetingelser fås følgende udtryk for reduktionstallet:

$$R = 10 \log \left[ (\cos(kd) - n(K_1 + K_2) \sin(kd))^2 + \left( \frac{1}{2} \left( n + \frac{1}{n} \right) \sin(kd) + (K_1 + K_2) \cos(kd) - 2nK_1K_2 \sin(kd) \right)^2 + \eta_0^2 \right] \quad (3.1)$$

hvor

$k = 2\pi f/c_d$  er vinkelbølgetallet

$d$  = hulrumdybden

$\eta_0$  = en tabsfaktor, som kun har betydning ved resonans

$n = \frac{\rho c}{\rho_d c_d}$  er impedansforholdet mellem luft og materiale i hulrum

$K_1 = \frac{\omega m_1}{2\rho c}$  er den normerede vægimpedans for plade 1

$K_2 = \frac{\omega m_2}{2\rho c}$  er den normerede vægimpedans for plade 2

Der er normalt ingen grund til at medtage alle de led, som (3.1) indeholder. For langt de fleste dobbeltkonstruktioner er kun to led af betydning:

$$R \approx 10 \log \left[ ((K_1 + K_2) \cos(kd) - 2nK_1K_2 \sin(kd))^2 + \eta_0^2 \right] \quad (3.2)$$

Heraf ses, at  $R$  vil få et minimum, hvis de to betydende led bliver numerisk lige store, hvilket sker for:

$$\operatorname{tg}(kd) = \operatorname{tg} \frac{\omega d}{c_d} = \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \cdot \frac{\rho_d c_d}{\omega} \quad (3.3)$$

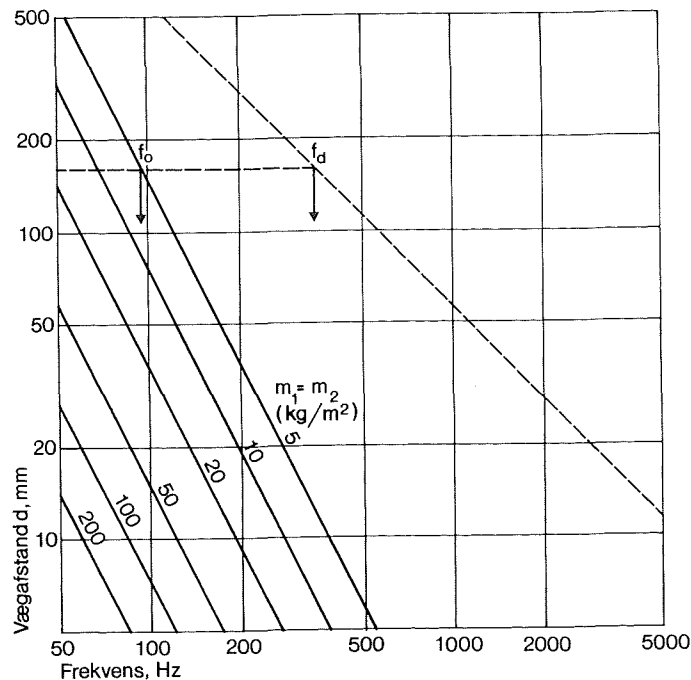
### Resonansfrekvens

Ved frekvenser, hvor bølgelængden er stor i forhold til dybden af hulrummet, er  $kd \ll 1$ , dvs. tangens kan sættes lig med argumentet, og en tilnærmet løsning til (3.3) bliver resonansfrekvensen:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_d c_d^2}{d} \left( \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (3.4)$$

Der er tale om en masse-fjeder-masse resonans, der skyldes fjedervirkningen af luften i hulrummet. Der sker ved resonansfrekvensen en ændring i lydtransmissionens karakter i forhold til enkeltvæggen, idet det først er ved frekvenser over resonansfrekvensen, at der rent lydmæssigt er tale om en dobbeltkonstruktion.

Diagrammet i figur 3.2 kan benyttes til at bestemme resonansfrekvensen for en symmetrisk dobbeltkonstruktion med luftfyldt hulrum.



Figur 3.2. Resonansfrekvens  $f_0$  og knækfrekvens  $f_d$  som funktion af vægafstand for en symmetrisk dobbeltvæg med luftfyldt hulrum. Hver af de to delvægges masse per arealenhed indgår som parameter ved bestemmelse af resonansfrekvensen.

Resonansfrekvensen for en let forsatsvæg opsat foran en tung væg kan findes ved kun at anvende den lette vægs masse per arealenhed og en vægafstand, der er dobbelt så stor som den virkelige.

### Stående bølger i hulrum

Ved højere frekvenser, hvor bølgelængden ikke er stor i forhold til dybden af hulrum, ophører luftens fjedervirkning. Dette sker omkring en knækfrekvens  $f_d$  svarende til  $k_d = 1$  eller  $d \approx \lambda/6$ :

$$f_d = \frac{c_d}{2\pi d} \quad (3.5)$$

Over denne frekvens findes egenfrekvenser, som også er løsninger til (3.3), idet  $\text{tg}(kd) \approx 0$ . Der er her tale om stående bølger i hulrummet vinkelret på de to plader, hvilket principielt giver en serie dyk i frekvenskurven for reduktionstallet. I praksis ses disse ikke, fordi lydindfaldet ikke kun sker vinkelret, men nærmest diffust. For  $f > f_d$  fås det maksimale reduktionstal ved at sætte  $\cos(kd) \approx 0$  og  $\sin(kd) \approx 1$  ved beregning af reduktionstal. Dette er en god tilnærmelse, når hulrummet er dæmpet med absorptionsmateriale.

### Beregning for diffust lydindfald

De tidligere angivne udtryk for dobbeltkonstruktioners reduktionstal (3.1) og (3.2) giver brugbare resultater ved indsættelse af de to pladers reduktionstal  $R_1$  og  $R_2$  enten beregnet som omtalt i kapitel 2 eller endnu bedre, som målte data ved diffust lydindfald. En form for effektiv, *normeret vægimpedans* for de to plader er

$$K_1 = 10^{R_1/20} \quad \text{og} \quad K_2 = 10^{R_2/20} \quad (3.6)$$

Til overslagsmæssige beregninger kan det være rimeligt at forenkle (3.2) afhængigt af de anførte frekvensområder. Dette gøres ved hjælp af (3.5) og (3.6), samt at  $\sin(kd) \approx kd$  for  $f < f_d$  og  $\sin(kd) \approx 1$  for  $f > f_d$ .

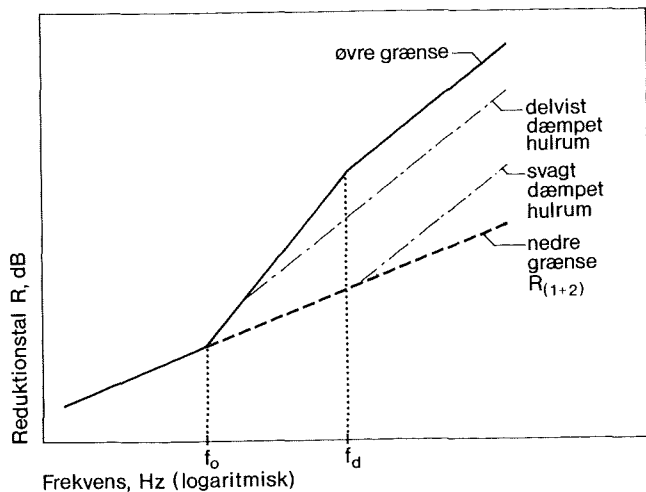
$$R_{(1+2)} = 20 \log(K_1 + K_2) \quad (f < f_0) \quad (3.7)$$

$$R \approx \begin{cases} R_1 + R_2 + 20 \log\left(2n \frac{f}{f_d}\right) & (f_0 < f \leq f_d) \end{cases} \quad (3.8)$$

$$R \approx \begin{cases} R_1 + R_2 + 20 \log(2n) & (f > f_d) \end{cases} \quad (3.9)$$

Dette forenklede frekvensforløb er illustreret i figur 3.3.

Der forudsættes absorptionsmateriale i mellemrummet, således at stående bølger dæmpes effektivt. Da der ikke regnes med lydbroer, er der tale om den maksimale opnåelige lydisolations for en ideel dobbeltkonstruktion.



Figur 3.3. Forenklet frekvensforløb af reduktionstal for dobbeltkonstruktion med dæmpet hulrum uden lydbroer. De tre kurveafsnit svarer til formel (3.7), (3.8) og (3.9), og angiver en øvre grænse for praktisk opnåelig lydisolations. Den punkterede forlængelse af det nederste kurveafsnit er tilsvarende en praktisk nedre grænse. Endelig er der stiple vist to eksempler på forløbet med to grader af dæmpet hulrum.

Dersom hulrummet indeholder atmosfærisk luft, dvs.  $n = 1$ , fås for  $f_0 < f \leq f_d$ :

$$R \approx R_1 + R_2 + 20 \log \left( \frac{f}{f_d} \right) + 6 \text{ dB} \quad (3.10)$$

$$R \approx R_{(1+2)} + 40 \log \left( \frac{f}{f_0} \right) \quad (3.11)$$

og for  $f > f_d$ :

$$R \approx R_1 + R_2 + 6 \text{ dB} \quad (3.12)$$

I (3.11) er udnyttet, at for lette plader hvor  $f \ll f_c$  kan der til overslag bruges en forenklet masselov for  $R_1$ ,  $R_2$  og  $R_{(1+2)}$ . Af (2.41), (2.55) og (2.64) fås eksempelvis for  $R_{(1+2)}$ :

$$R_{(1+2)} \approx 20 \log \left( \frac{m_1 + m_2}{1 \text{ kg m}^{-2}} \right) + 20 \log \left( \frac{f}{100 \text{ Hz}} \right) - 7 \text{ dB} \quad (3.13)$$

Kendes  $R_1$  og  $R_2$  fra målinger bør (3.7) dog foretrækkes i stedet for (3.13).

### Svagt dæmpet hulrum

Dobbeltkonstruktioner, hvis hulrum ikke er effektivt dæmpet med lydabsorberende materiale, vil give en lydisolations mellem øvre og nedre grænse i figur 3.3. Med svagere dæmpning opbygges der større lydtryk i hulrummet, hvilket fører til øget lydtransmission. I vindueskonstruktioner anvendes derfor undertiden en lydabsorberende beklædning af karmen, en såkaldt *karmabsorbent*, hele vejen rundt langs hulrummets perimeter. Reduktionstallet for en sådan konstruktion kan overslagsmæssigt bestemmes af:

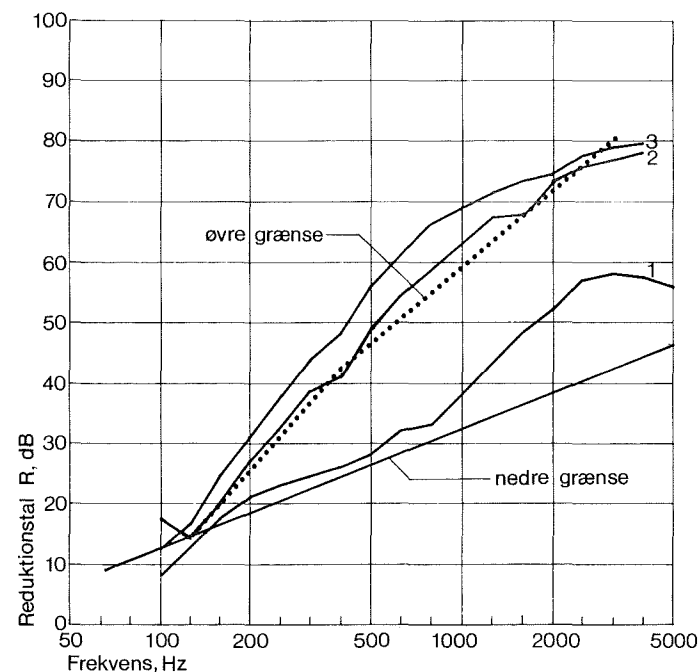
$$R \approx R_1 + R_2 + 10 \log \left( \alpha \frac{dU}{S} \right) \quad (3.14)$$

hvor  $\alpha$  er lydabsorptionskoefficient for karmbeklædningen i hulrummet

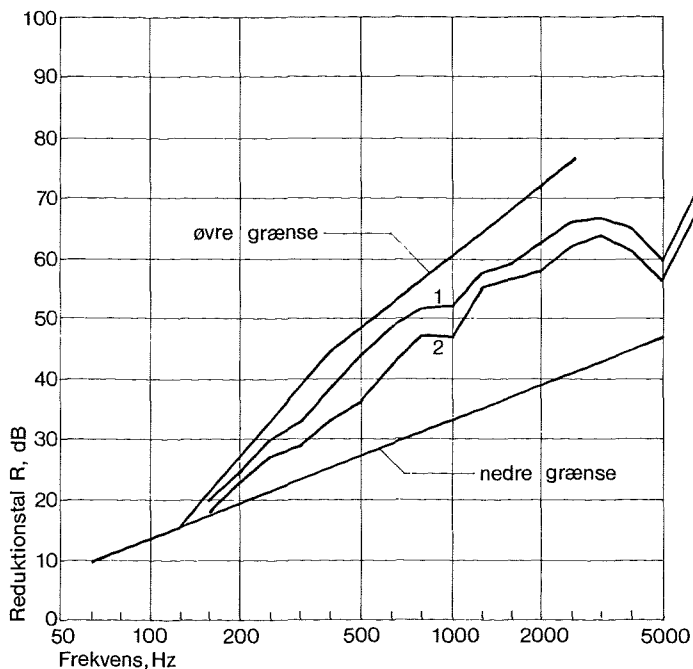
$d$  er hulrumsdybde = karmbredde

$U$  er omkreds = karmlængde

$S$  er pladeareal



Figur 3.4. Målte reduktionstal for dobbeltvæg af 6,4 mm og 3,2 mm hårde træfiberplader med 160 mm mellemrum uden lydbroer. Kurve 1 mellemrum udæmpet, kurve 2 og 3 mellemrum dæmpet med henholdsvis 50 mm glasuld og 100 mm glasuld. Desuden er indtegnet de overslagsmæssige øvre og nedre grænser fra figur 3.3, idet  $f_0 = 125 \text{ Hz}$  og  $f_d = 400 \text{ Hz}$ . Efter (Sharp, 1978).



Figur 3.5. Målte reduktionstal for samme dobbeltkonstruktion som i figur 3.4, men med karmabsorption af glasuld ( $48 \text{ kg/m}^3$ ) tykkelser henholdsvis 150 mm, kurve 1, og 50 mm, kurve 2. Efter (Sharp, 1978).

I hulrum uden egentlig karmabsorbent vil  $\alpha$  være meget lille. Hvis dybden af hulrummet er mindre end ca. 100 mm, vil der dog alligevel ske en vis absorption på grund af gnidning i det viskose grænselag langs den indvendige overflade af pladerne. På grundlag af empirisk bestemte værdier (Brekke, 1980) kan følgende sammenhæng opstilles:

$$\alpha \approx \begin{cases} 0,5 & \text{for } d \leq 20 \text{ mm} \\ \frac{10 \text{ mm}}{d} & \text{for } d > 20 \text{ mm} \end{cases} \quad (3.15)$$

Som det fremgår af figur 3.3, gælder kurven for det svagt dæmpede hulrum så længe den ligger i området mellem øvre og nedre grænse. I figur 3.4 ses eksempler på målte reduktionstal med og uden absorptionsmateriale i hulrum.

Tilsvarende resultater med karmabsorbent ses i figur 3.5.

## Transmission via lydbroer

Ved en lydbro forstås en mekanisk forbindelse, hvorigennem der overføres svingningsenergi mellem to i øvrigt adskilte plader i en dobbeltkonstruktion. Som illustreret i figur 3.1 udstråles dels en lydeffekt  $P_{2b}$ , der skyldes transmission via lydbroer, dels en lydeffekt  $P_{2f}$ , der skyldes transmission via hulrummet. Summen af den udstrålede lydeffekt indgår i konstruktionens reduktionstal.

$$R = 10 \log \left( \frac{P_1}{P_{2f} + P_{2b}} \right) = -10 \log [10^{-R_f/10} + 10^{-R_b/10}] \quad (3.16)$$

Her er  $R_f$  reduktionstallet for den tilsvarende konstruktion uden lydbroer, og  $R_b$  er reduktionstallet, når der alene medregnes transmission via lydbroer. Sidstnævnte størrelse kan udtrykkes ved reduktionstallet  $R_{(1+2)}$  (3.7) for en enkeltkonstruktion bestående af pladerne 1 og 2 samt en korrektion  $\Delta R_m$  for lydbroens type.

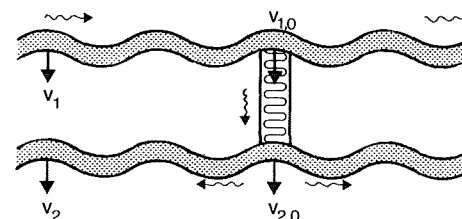
$$R_b = R_{(1+2)} + \Delta R_m \quad (3.17)$$

I det følgende vises, hvorledes  $\Delta R_m$  kan bestemmes for forskellige typer af lydbroer. Foreløbig antages de fuldstændig stive, således at hastighederne lokalt er de samme på hver side af lydbroen,  $v_{1,0} = v_{2,0}$ , se figur 3.6. Det antages endvidere, at lydbroernes masse er ubetydelig i forhold til den samlede konstruktions masse.

Som vist af (Sharp, 1978) er forholdet mellem middelhastigheden i plade 1 og den lokale hastighed ved lydbroen bestemt af de to pladers indgangsimpedanser (punkt- eller linieimpedanser)  $Z_1$  og  $Z_2$ :

$$\frac{\langle \bar{v}_1^2 \rangle}{\bar{v}_{2,0}^2} = \left| \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} \right|^2 \quad (3.18)$$

Dette udtrykker, at der er en reduceret bevægelse ved en lydbro på grund af pladernes gensidige påvirkning.



Figur 3.6. Transmission af bøjningsbølger fra plade 1 til plade 2 gennem en lydbro.



Sammenlignes middelhastighederne i plade 1 og i den ækvivalente enkeltkonstruktion, hvor plade 1 og 2 er slået sammen, må det gælde med rimelig tilnærmelse, at:

$$\frac{\langle \tilde{v}_{1+2}^2 \rangle}{\langle \tilde{v}_1^2 \rangle} \approx \left( \frac{m_1}{m_1 + m_2} \right)^2 \quad (3.19)$$

Idet strålingsfaktoren for den ækvivalente enkeltkonstruktion antages at være  $\sigma_{1+2} \approx 1$ , fås følgende udtryk for  $\Delta R_m$ :

$$\begin{aligned} \Delta R_m &= 10 \log \frac{\langle \tilde{v}_{1+2}^2 \rangle \rho c S}{P_{2b}} \\ &= 10 \log \left( \frac{\tilde{v}_{2,0}^2 \rho c S}{P_{2b}} \right) + 20 \log \left( \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot \left| \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} \right| \right) \end{aligned} \quad (3.20)$$

En videreudvikling af dette udtryk afhænger af lydbroens type.

### Punktforbindelser

Som beskrevet i kapitel 2 i afsnittet om lydudstråling vil punktexcitering af en plade give anledning til både en nærfeltsudstråling og en resonant udstråling, der skyldes egensvingningerne i plade 2. For enkeltheds skyld ses der i første omgang bort fra det resonante bidrag. Af (2.32) fås den udstrålede effekt fra  $N_p$  ens exciteringspunkter:

$$P_{2b} = N_p P_{2n} = \rho c v_{2,0}^2 \frac{8 c^2}{\pi^3 f_{c2}^2} N_p \quad (3.21)$$

Indsættes endvidere punktimpedanserne fra (2.69) i (3.20) fås:

$$\Delta R_{m,p} \approx 10 \log \left( \frac{S \pi^3 f_{c2}^2}{N_p 8 c^2} \right) + 20 \log \left( \frac{m_1 (m_1/f_{c1} + m_2/f_{c2})}{(m_1 + m_2) (m_1/f_{c1})} \right) \quad (3.22)$$

hvor sidste led med fordel kan kombineres med  $f_{c2}$  til en hjælpestørrelse  $f_{cp}$ , som er en kombination af de to pladers kritiske frekvenser gældende specielt for punktforbindelser:

$$f_{cp} = \frac{m_1 f_{c2} + m_2 f_{c1}}{m_1 + m_2} \quad (3.23)$$

hvorefter:

$$\Delta R_{m,p} \approx 10 \log \left( \frac{S \pi^3 f_{cp}^2}{N_p 8 c^2} \right) \quad (3.24)$$

En stor værdi af  $\Delta R_{m,p}$  kan opnås med en høj kritisk frekvens og med færrest muligt antal forbindelser per arealenhed. Placeres lydbroerne i et kvadratisk mønster med centerafstand  $e = \sqrt{S/N_p}$  kan (3.24) skrives:

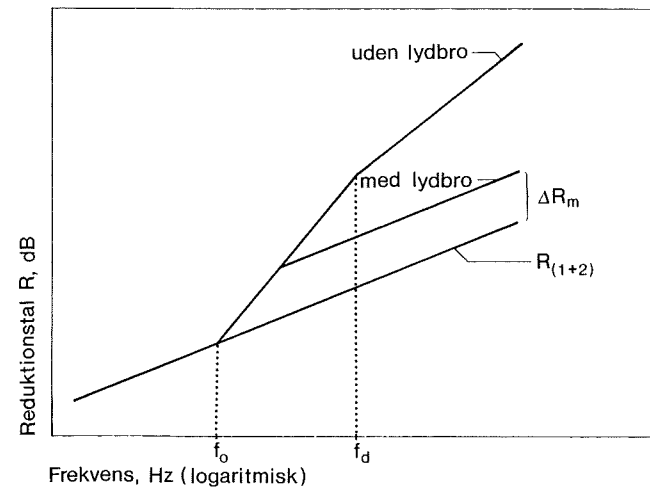
$$\Delta R_{m,p} \approx 20 \log (e \cdot f_{cp}) - 45 \text{ dB} \quad (3.25)$$

Af (3.23) ses, at for asymmetriske dobbeltkonstruktioner er den lette plades kritiske frekvens afgørende for størrelsen af  $f_{cp}$ . Transmissionsretningen er uden betydning.

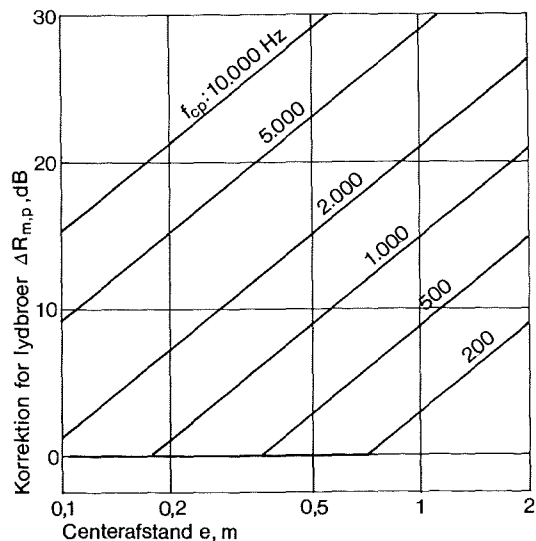
I figur 3.7 ses reduktionstallets principielle forløb for dobbeltkonstruktioner med lydbroer. Det er karakteristisk, at  $\Delta R_{m,p}$  er frekvensuafhængig, og reduktionstallet vil derfor forløbe parallelt med reduktionstallet for den tilsvarende enkeltkonstruktion, dvs. typisk med en hældning på 6 dB/oktav.  $R_{(1+2)}$  udgør samtidig nedre grænse for reduktionstallet, således at:

$$\Delta R_{m,p} \geq 0 \text{ dB} \quad (3.26)$$

I ovenstående udtryk for punktforbindelser er det en klar forudsætning, at frekvensen er mindre end den kritiske frekvens for den udstrålende plade. I modsat fald vil den resonante udstråling medføre, at  $\Delta R_{m,p} \approx 0 \text{ dB}$ .



Figur 3.7. Reduktionstallets principielle frekvensafhængighed for en dobbelt konstruktion med stive lydbroer.



Figur 3.8. Stive punktforbindelsers betydning for reduktionstallet. Forbindelsernes centerafstand er  $e$ , og  $f_{cp}$  kan normalt sættes lig med den kritiske frekvens for den letteste plade i dobbeltkonstruktionen.

Den enkle formel (3.25) er illustreret i figur 3.8. Fordelen ved at vælge en plade med høj kritisk frekvens er tydelig, hvis det i øvrigt er acceptabelt at anvende plader med meget ringe bøjningsstivhed.

### Linieforbindelser

Lydtransmission via linieforbindelser kan behandles helt analogt til punktforbindelser. I stedet for punktimpedansen anvendes for hver af pladerne *linieimpedansen* (Cremer & Heckl, 1967, p. 273), hvor udtrykket findes for en bjælke påvirket i et punkt

$$Z_l = 2(1 + j) m c L_l \sqrt{\frac{f}{f_c}} \quad (3.27)$$

hvor  $L_l$  betegner længden af linieforbindelsen. Den udstrålede lydeffekt bliver (Cremer & Heckl, 1967, p. 481):

$$P_{2b} \approx P_{2n} = \rho c \bar{v}_{2,0}^2 \frac{2c}{\pi f_{c2}} L_l \quad (3.28)$$

idet der ses bort fra det resonante bidrag. Ved indsættelse i (3.20) og med hjælpestørrelsen:

$$f_{cl} = \left[ \frac{m_1 \sqrt{f_{c2}} + m_2 \sqrt{f_{c1}}}{m_1 + m_2} \right]^2 \quad (3.29)$$

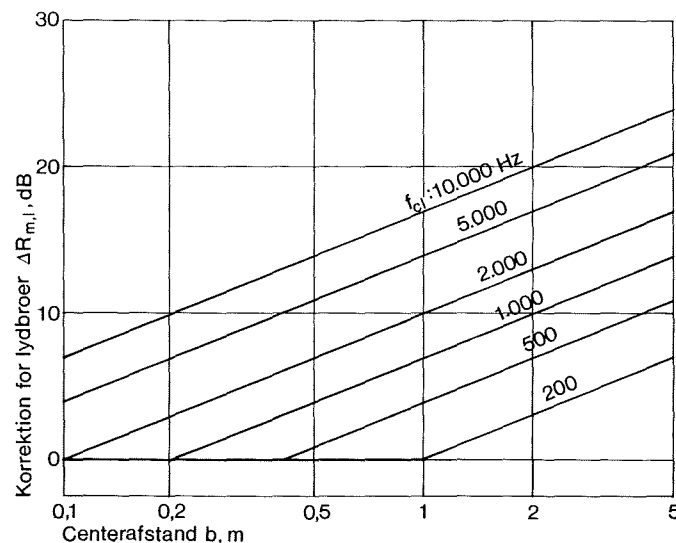
fås følgende resultat til beregning af lydtransmissionen gennem en stiv linieforbindelse:

$$\Delta R_{m,l} \approx 10 \log \left( \frac{S}{L_l} \frac{\pi f_{cl}}{2c} \right) \quad (3.30)$$

Placeres lydbrøerne som parallelle lægter med centerafstand  $b = S/L_l$  fås den enkle formel:

$$\Delta R_{m,l} \approx 10 \log (b f_{cl}) - 23 \text{ dB} \quad (3.31)$$

Ved sammenligning med resultatet (3.25) for punktforbindelser bemærkes en knap så kraftig afhængighed af den kritiske frekvens, nemlig 3 dB/oktav i stedet for 6 dB/oktav. Det er klart vanskeligere at opnå store værdier af  $\Delta R_m$  med linieforbindelser end med punktforbindelser, se figurerne 3.8 og 3.9.



Figur 3.9. Stive linieforbindelsers betydning for reduktionstallet. Forbindelsernes centerafstand er  $b$ , og  $f_{cl}$  kan normalt sættes lig med den kritiske frekvens for den letteste plade i dobbeltkonstruktionen.

## Randforbindelser

En særlig variant af linieformede lydbroer er forbindelser langs randen af en dobbeltkonstruktion. Linieimpedansen bliver en faktor 4 mindre (Cremer & Heckl, 1967, p. 273):

$$Z_r = \frac{1}{2} (1 + j) m c L_r \sqrt{\frac{f}{f_c}} \quad (3.32)$$

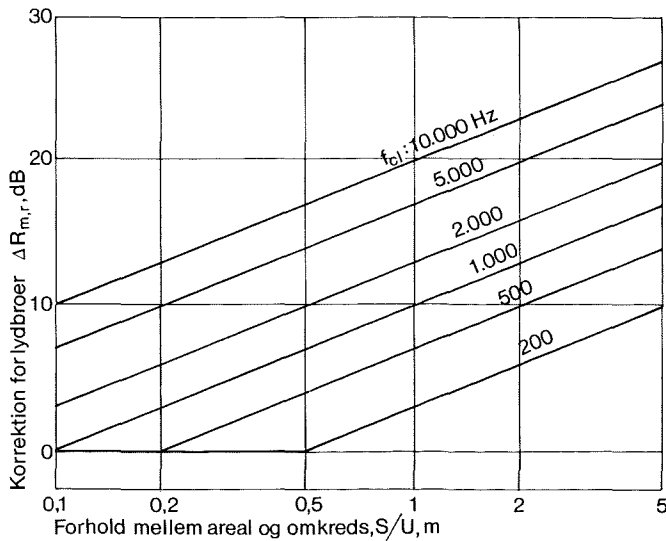
hvor  $L_r$  betegner længden af randforbindelsen. Den udstrålede lydeffekt bliver ud fra en stærkt forenklet betragtning halvt så stor som for en linieexcitering midt på pladen. Som i de tidligere behandlede tilfælde ses der indtil videre bort fra den resonante lydudstråling. Fra selve randexciteringen udstråles lydeffekten:

$$P_{2b} \approx P_{2n} = \rho c \bar{v}_{2,0}^2 \frac{c}{\pi f c_2} L_r \quad (3.33)$$

Heraf findes for en stiv randforbindelse:

$$\Delta R_{m,r} \approx 10 \log \left( \frac{S \pi f c_t}{L_r c} \right) \quad (3.34)$$

hvor  $f_{ct}$  er den tidligere indførte hjælpe størrelse (3.29). Resultatet for  $\Delta R_{m,r}$  adskiller sig med 3 dB fra en almindelig linieforbindelse med samme længde, se figur 3.10.



Figur 3.10. Stive randforbindelsers betydning for reduktionstallet. Ser pladearealet og  $U$  længden af randforbindelsen. I øvrigt som figur 3.9.

## Resonant lydudstråling

Den effekt, der tilføres plade 2, giver dels anledning til *nærfeltsudstråling* fra det påvirkede område med effekten  $P_{2n}$ , dels til opbygning af egensvingninger i pladen og dermed til resonant lydudstråling med effekten  $P_{2r}$ . Idet hastigheden i exciteringspunktet er  $v_{2,0}$ , og hastigheden af egensvingningerne er  $v_2$ , kan der opstilles følgende energibalace for plade 2:

$$P_{12} = \bar{v}_{2,0}^2 \operatorname{Re} \{Z_2\} = 2 \pi f m_2 S \langle \bar{v}_2^2 \rangle \eta_2 \quad (3.35)$$

hvor  $\eta_2$  er den totale tabsfaktor for plade 2.

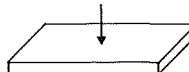
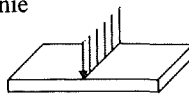

Den resonant udstrålede lydeffekt bliver:

$$P_{2r} = \langle \bar{v}_2^2 \rangle \rho c S \sigma_2 = \frac{\bar{v}_{2,0}^2 \operatorname{Re} \{Z_2\} \rho c \sigma_2}{2 \pi f m_2 \eta_2} \quad (3.36)$$

Nærfeltsudstrålingen afhænger af exciteringsmåden, som det fremgår af oversigten i tabel 3.1. For en punktformig lydbro fås jfr. (3.21):

$$P_{2n} = \rho c \bar{v}_{2,0}^2 \frac{8 c^2}{\pi^3 f c_2^2} \quad (3.37)$$

Tabel 3.1. Vigtige størrelser ved excitering af plade gennem punkt-, linie- eller randforbindelser.

Påvirkning	Impedans, $Z_0$	Admittans, $Y_0$	Lydudstråling fra nærfelt, $P_{2n}$	Faktor for total udstråling, $\kappa$
Punkt 	$\frac{4 c^2 m}{\pi f c}$	$\frac{\pi f c}{4 c^2 m}$	$\bar{v}_0^2 \rho c \frac{8 c^2}{\pi^3 f c_2^2} \cdot N_p$	$1 + \frac{\pi \sigma f c}{4 \eta f}$
antal $N_p$				
Linie 	$2(1 + j) m c L_t \sqrt{\frac{f}{f_c}}$	$\frac{1-j}{4 m c L_t} \sqrt{\frac{f_c}{f}}$	$\bar{v}_0^2 \rho c \frac{2 c}{\pi f c_2} \cdot L_t$	$1 + \frac{\sigma}{2 \eta} \sqrt{\frac{f_c}{f}}$
længde $L_t$				
Rand 	$\frac{1}{2} (1 + j) m c L_r \sqrt{\frac{f}{f_c}}$	$\frac{1-j}{m c L_r} \sqrt{\frac{f_c}{f}}$	$\bar{v}_0^2 \rho c \frac{c}{\pi f c_2} \cdot L_r$	$1 + \frac{\sigma}{4 \eta} \sqrt{\frac{f_c}{f}}$
længde $L_r$				

Den totale udstrålede lydeffekt for en enkelt punktformig lydbro bliver:

$$P_{2b} = P_{2n} + P_{2r} = P_{2n} \kappa_p \quad (3.38)$$

hvor  $\kappa_p$  indføres som en faktor for det resonante udstrålingsbidrag. For punktforbindelser fås:

$$\kappa_p = 1 + \frac{\pi \sigma_2 f_{c2}}{4 \eta_2 f} \quad (3.39)$$

Tilsvarende findes for linie- og randforbindelser:

$$\kappa_\ell = 1 + \frac{\sigma_2}{2 \eta_2} \sqrt{\frac{f_{c2}}{f}} \quad (3.40)$$

$$\kappa_r = 1 + \frac{\sigma_2}{4 \eta_2} \sqrt{\frac{f_{c2}}{f}} \quad (3.41)$$

Betydningen af den resonante lydudstråling vil være, at  $\Delta R_m$  reduceres, når frekvensen nærmer sig  $f_{c2}$  i takt med, at strålingsfaktoren vokser. For  $f > f_{c2}$  er  $\sigma_2 \approx 1$  og  $\kappa \gg 1$ , hvilket medfører, at  $\Delta R_m$  bliver forsvindende lille.

### Elastiske forbindelser

Der betragtes to plader forbundet med en *lydbro* som vist i figur 3.6. Den mekaniske forbindelse kan være punktformet eller linieformet, og den antages at være elastisk. Lydbroen karakteriseres ved den mekaniske impedans  $Z_b$ :

$$Z_b = \frac{F}{v_{1,0} - v_{2,0}} \approx \frac{k_d}{j\omega} \quad (3.42)$$

hvor  $F$  er kraften, hvormed lydbroen påvirker pladerne,  $v_{1,0}$  og  $v_{2,0}$  er de to pladers hastighed ud for lydbroen.  $Z_b$  vil primært afhænge af den *dynamiske stivhed*  $k_d$  af lydbroen, mens der ofte kan ses bort fra de indre tab. Dette gælder dog ikke for lydbroer af viskoelastiske materialer.

En bøjningsbølge, der udbreder sig i plade 1 med en hastighedsamplitude  $v_1$ , vil ud for lydbroen få en lidt reduceret hastighed  $v_{1,0}$ :

$$v_{1,0} = v_1 - Y_1 F \quad (3.43)$$

hvor  $Y_1$  er pladens *mekaniske admittans*, som er det reciprokke af impedansen  $Z_1$ .

I plade 2 bliver hastigheden ud for lydbroen  $v_{2,0}$  bestemt af denne plades admittans  $Y_2$ :

$$v_{2,0} = Y_2 F \quad (3.44)$$

En ny bøjningsbølge vil derefter genereres i plade 2.

Den effekt  $P_{12}$ , der overføres fra plade 1 til plade 2 kan bestemmes som vist af (Ver, 1971):

$$P_{12} = \langle \bar{v}_1^2 \rangle \frac{|Z_b|^2 Y_2}{1 + 2 \operatorname{Re}\{Z_b\} (Y_1 + Y_2) + |Z_b|^2 (Y_1 + Y_2)^2} \quad (3.45)$$

For en fuldstændig stiv lydbro fås:

$$P_{12} = \langle \bar{v}_1^2 \rangle \frac{Y_2}{(Y_1 + Y_2)^2} \quad \text{for } |Z_b| \rightarrow \infty \quad (3.46)$$

Virksomheden af en elastisk lydbro vil derfor kunne beskrives ved en koblingsfaktor  $\gamma$ , som er forholdet mellem overført effekt via henholdsvis elastisk og stiv lydbro:

$$\gamma = \frac{|Z_b|^2 (Y_1 + Y_2)^2}{1 + 2 \operatorname{Re}\{Z_b\} (Y_1 + Y_2) + |Z_b|^2 (Y_1 + Y_2)^2} \quad (3.47)$$

$$\gamma \approx \left( 1 + \left( \frac{2 \pi f}{k_d (Y_1 + Y_2)} \right)^2 \right)^{-1} \quad (3.48)$$

I sidste formel er der set bort fra de indre tab i lydbroen, idet (3.42) er indsat.

### Koblingsfaktor

I det følgende vises, hvorledes koblingsfaktoren  $\gamma$  kan bestemmes for tre typer af elastiske lydbroer, nemlig punkt-, linie- og randkobling. Der benyttes henholdsvis indeks  $p$ ,  $\ell$  og  $r$ .

Beregningerne baseres på formel (3.48), og der tages hensyn til lydbroens dynamiske stivhed, men ikke til de indre tab. Ved indsættelse af de i tabel 3.1 anførte admittanser findes, at koblingsfaktorerne kan skrives:

$$\gamma_p = \left( 1 + \left( \frac{f}{f_{kp}} \right)^2 \right)^{-1} \quad (3.49)$$

$$\gamma_\ell = \left( 1 + \left( \frac{f}{f_{k\ell}} \right)^3 \right)^{-1} \quad (3.50)$$

$$\gamma_r = \left( 1 + \left( \frac{f}{f_{kr}} \right)^3 \right)^{-1} \quad (3.51)$$

hvor der er indført nogle knækfrekvenser, under hvilke lydbroerne virker som stive forbindelser:

$$f_{kp} = k_{dp} \frac{f_{cp}}{8 c^2 m_m} \quad (3.52)$$

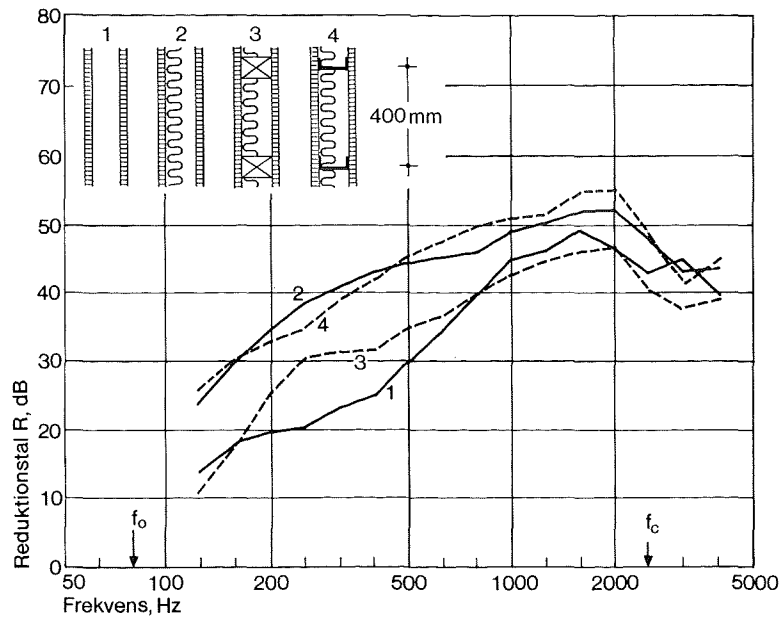
$$f_{kl} = \frac{1}{2} \left( k'_{dl} \frac{\sqrt{f_{cl}}}{2 \pi c m_m} \right)^{2/3} \quad (3.53)$$

$$f_{kr} = \frac{1}{2} \left( k'_{dr} \frac{2 \sqrt{f_{cl}}}{\pi c m_m} \right)^{2/3} \quad (3.54)$$

I disse udtryk er anvendt nogle hjælpestørrelser,  $f_{cp}$  (3.23),  $f_{cl}$  (3.29), samt  $m_m$ , der bestemmes af de to pladers masse per arealenhed

$$m_m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (3.55)$$

For linie- og randkobling betegner henholdsvis  $k'_{dl}$  og  $k'_{dr}$  dynamiske stivheder per længdeenhed.



Figur 3.11. Målte reduktionstal for dobbeltvæg af 13 mm gipsplader med 106 mm mellemrum.

1. Uden dæmpning af hulrum, de øvrige med 50 mm mineraluld i hulrum.
  2. Uden lydbrøer bortset fra randkobling.
  3. Med stive linieformede lydbrøer af trælægter per 400 mm.
  4. Med elastiske linieformede lydbrøer af stålprofiler per 400 mm.
- Efter (Northwood, 1970).

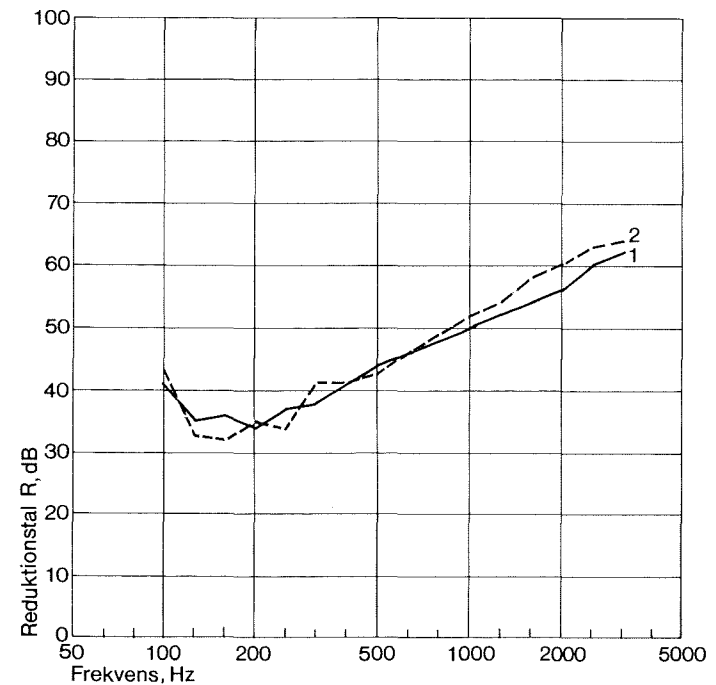
## Sammenfatning

De oven for indførte koblingsfaktorer og faktorer for resonant lydudstråling skal anvendes sammen med de respektive udtryk for udstrålet lydeffekt fra nærfelt ved stive lydbrøer. Bidrag fra forskellige typer af lydbrøer lader sig kombinere i et udtryk, hvori indgår såvel punkt-, linie- som randforbindelser:

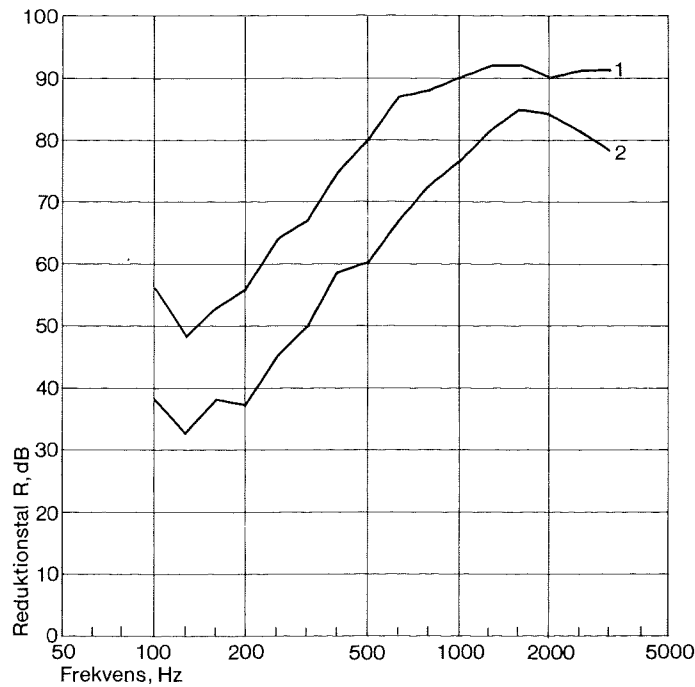
$$\Delta R_m = -10 \log \left[ \frac{8c^2}{S \pi^3 f_{cp}^2} N_p \gamma_p \kappa_p + \frac{2c}{S \pi f_{cl}} \left( L_l \gamma_l \kappa_l + \frac{1}{2} L_r \gamma_r \kappa_r \right) \right] \quad (3.56)$$

Når denne størrelse er bestemt, findes reduktionstallet ved indsættelse i (3.17) og (3.16).

I figur 3.11 ses eksempler på målte reduktionstal for lette dobbeltvægge med forskellige former for lydbrøer. Tilsyneladende er der i alle tilfælde tale om en randkobling, der begrænser reduktionstallet ved højere frekvenser.



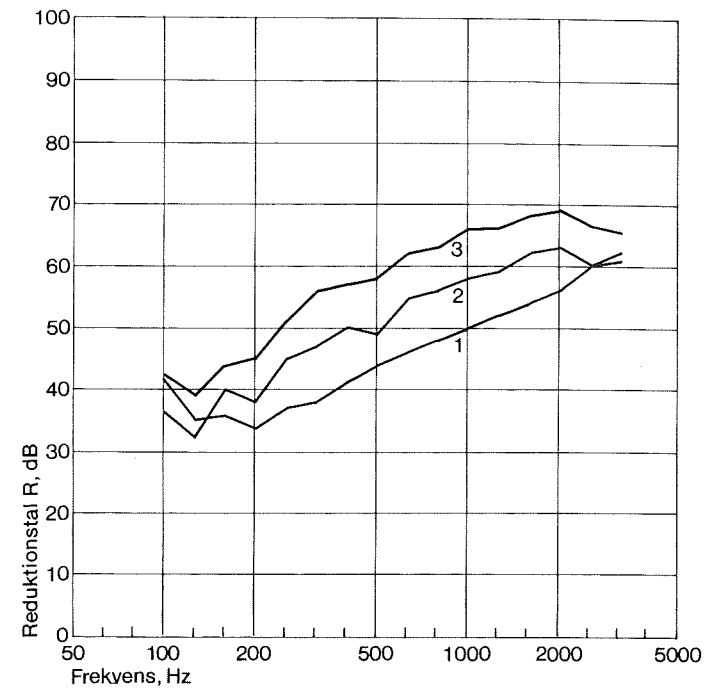
Figur 3.12. Reduktionstal for en enkeltvæg, kurve 1, og en dobbeltvæg, kurve 2, af Lecabeton. Dobbeltvæggen fungerer ikke på grund af randkobling, og for begge vægge er  $R_w = 48$  dB.  
Efter (Vigran, 1979).



Figur 3.13. Reduktionstal for en dobbeltvæg af Lecabeton med afbrudt randkobling. Kurve 1. Uden mekaniske forbindelser,  $R_w = 74$  dB. Kurve 2. Med ståltrådsbindere per 500 mm,  $R_w = 56$  dB. Efter (Vigran, 1979).

Tunge dobbeltkonstruktioner er særligt følsomme for lydbroer, fordi den kritiske frekvens typisk er ret lav, hvilket indebærer en betydelig resonant lydstråling. I figur 3.12 og 3.13 ses eksempler på betydningen af randkobling og punktformede lydbroer for dobbeltvægge af Lecabeton.

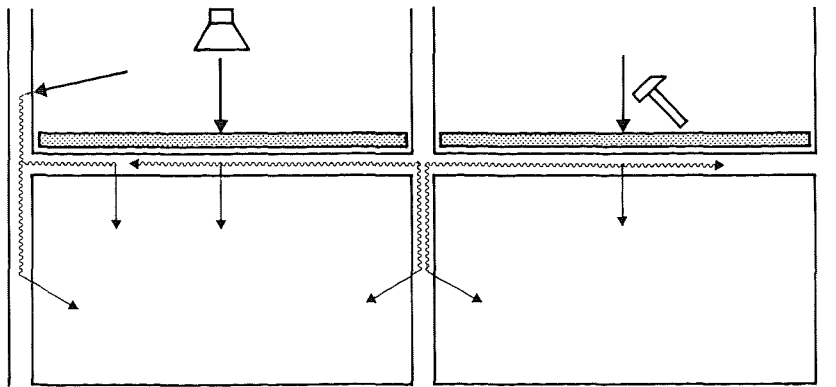
Endelig ses i figur 3.14 eksempler på anvendelse af forsatsvægge, dvs. en dobbeltkonstruktion af en tung massiv væg og en let pladebeklædning, der virker ved at reducere lydudstrålingen. I eksemplet giver tilstedeværelsen af linieformede lydbroer godt en halvering af forsatsvæggens virkning.



Figur 3.14. Reduktionstal for en væg af Lecabeton. Kurve 1. Uden forsatsvæg,  $R_w = 48$  dB. Kurve 2. Med forsatsvæg på trælægter fastgjort i væg,  $R_w = 54$  dB. Kurve 3. Med forsatsvæg på fritstående stålskelet,  $R_w = 61$  dB. Efter (Homb et al, 1983, p. 61).

## Svømmende gulve

En særlig type af dobbeltkonstruktioner er svømmende gulve, hvor elasticitet og udformning af de uundgåelige mekaniske forbindelser spiller en afgørende rolle for de lydisolerede egenskaber. Som illustreret i figur 3.15 bliver flanketransmissionen af luftlyd relativt større efter isolering med svømmende gulve. Det gælder ikke alene i bygninger, men også i laboratorier. Svømmende gulve giver i praksis større forbedring af trinlydniveauet end af reduktionstal-



Figur 3.15. Transmission af luftlyd og trinlyd gennem etageadskillelser med svømmende gulve. På grund af flanketransmission er forbedringen af luftlydisolationen ringere end forbedringen af trinlydniveaueet.

let, selv om virkningen principielt burde være omtrent den samme. I dette afsnit behandles primært forbedringen  $\Delta L$  af trinlydniveaueet. Luftlydisolationen for en etageadskillelse med svømmende gulv kan vurderes ved beregning af alle transmissionsveje som beskrevet i kapitel 5, idet det svømmende gulv betragtes som en forsatskonstruktion med  $\Delta R = \Delta L$  for de berørte transmissionsveje.

### Trinlyddæmpning

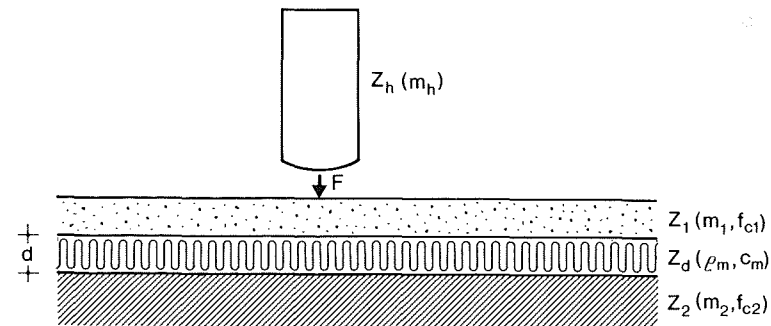
Påvirkning med den standardiserede *bankemaskine* som illustreret i figur 3.16 giver en veldefineret impuls. Imidlertid vil den effekt, der overføres til konstruktionen ikke alene afhænge af konstruktionens punktimpedans, men også i nogen grad af *hammerens impedans*. I stedet for (2.70) gælder således mere generelt, at den overførte effekt er:

$$P_i = \bar{F}^2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{Z_{0,1} + Z_h} \right\} \quad (3.57)$$

hvor  $Z_{0,1}$  er punktimpedansen af den svømmende gulvplade. Hammerens impedans  $Z_h$  er bestemt af dens masse  $m_h = 500$  g:

$$Z_h = j \omega m_h \quad (3.58)$$

Den overførte effekt reduceres ved høje frekvenser, hvor  $|Z_h| > |Z_{0,1}|$ , dvs. for frekvenser:



Figur 3.16. Svømmende gulv med påvirkning af en faldende masse. Hvert element karakteriseres med en mekanisk impedans, som afhænger af de anførte materialeparametre.

$$f > f_Z = \frac{2 c^2 m_1}{\pi^2 m_h f_{c1}} \quad (3.59)$$

idet punktimpedansen er indsat fra (2.69). For frekvenser større end  $f_Z$  fås et ekstra bidrag  $\Delta L_Z$  til trinlyddæmpningen på grund af hammerens impedans:

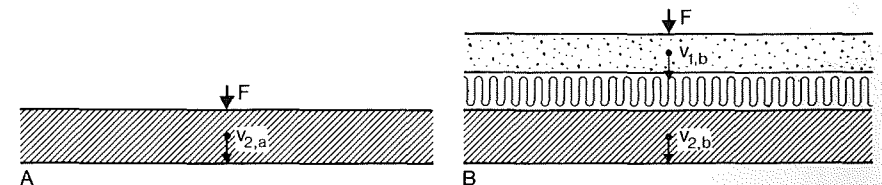
$$\Delta L_Z = 10 \log \left( 1 + \left( \frac{f}{f_Z} \right)^2 \right) \quad (3.60)$$

For  $f < f_Z$  er  $\Delta L_Z \approx 0$  dB. Dette bidrag har derfor kun betydning for lette gulve. For en 22 mm spånplade er  $f_Z = \text{ca. } 700$  Hz, og for en 12 mm spånplade kun ca. 200 Hz.

Ved laboratoriemåling af gulves trinlyddæmpning foreskriver målestándarden, DS/ISO 140/8, en jævnt fordelt belastning på 50 kg per  $\text{m}^2$ , hvilket formindsker problemet med hammerens impedans.

Trinlyddæmpningen af et svømmende gulv kan udtrykkes ved forholdet mellem hastighederne i dækket i de to situationer vist i figur 3.17 A og B:

$$\Delta L = 20 \log \frac{v_{2a}}{v_{2b}} \quad (3.61)$$



Figur 3.17. Kraftpåvirkning af dæk (A) og af svømmende gulv på samme dæk (B).

Ved hjælp af de mekaniske impedanser  $Z_1$  og  $Z_2$  for de to plader fås:

$$v_{2a} = \frac{F}{Z_2} \quad (3.62)$$

$$v_{1b} = \frac{F}{Z_1} \quad (3.63)$$

Den kraft  $F'$ , der overføres gennem det elastiske mellemlag, kan udtrykkes:

$$F' = Z_d (v_{1b} - v_{2b}) \approx Z_d v_{1b} \quad (3.64)$$

hvor  $Z_d$  betegner mellemlagets impedans. Det forudsættes, at  $v_{1b} \gg v_{2b}$ , hvilket betyder, at dækket skal være tungt i forhold til det svømmende gulv. Hastigheden frembragt i dækket af kraften  $F'$  bliver:

$$v_{2b} = \frac{F'}{Z_2} \approx v_{1b} \frac{Z_d}{Z_2} = \frac{F' Z_d}{Z_1 Z_2} \quad (3.65)$$

Ved indsættelse af de ovenstående udtryk i (3.61) fås trinlyddæmpningen:

$$\Delta L \approx 20 \log \left| \frac{Z_1}{Z_d} \right| \quad (3.66)$$

Til den videre analyse kræves nærmere kendskab til impedansen  $Z_d$  for det elastiske mellemlag, der typisk kan bestå af mineraluld. Desuden er det nødvendigt at skelne mellem mere eller mindre lokalt reagerende gulve, da det har betydning for den måde, hvorpå lyden udbreder sig gennem det elastiske mellemlag. Afhængigt heraf kan impedanserne i (3.66) opfattes enten som punktimpedanser eller som fladeimpedanser.

### Fladelejlrede gulve

Konstruktionen i figur 3.6 kan betragtes som en dobbeltkonstruktion, der karakteriseres ved en *resonansfrekvens*  $f_0$  analogt med (3.4).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k_d'' \left( \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (3.67)$$

hvor  $k_d''$  er hulrummets *dynamiske stivhed* per arealenhed. Denne er sammensat af et bidrag fra skeletstrukturen i det elastiske materiale og af et bidrag fra luften, hvis materialet er porøst

$$k_d'' = k_m'' + k_a'' = \frac{\rho_m c_m^2}{d} + \frac{\rho c^2}{qd} \quad (3.68)$$

hvor  $d$  er tykkelsen af det elastiske lag, og  $q$  er porøsiteten af materialet, dvs. forholdet mellem porevolumen og totalvolumen.  $\rho_m$  og  $c_m$  er materialets densitet og lydhastighed for longitudinalbølger.

Et elastisk materiale karakteriseres ved det *dynamiske elasticitetsmodul*  $\rho_m c_m^2$ , der er stivheden per arealenhed per tykkelsesenhed. Typiske værdier er anført i tabel 3.2. Bortset fra lette mineraluldsmåtter er luftens bidrag ofte af underordnet betydning.

Tabel 3.2. Eksempler på dynamisk elasticitetsmodul for materialer til svømmende gulve. (Delvis efter Vigran, 1979)

Materiale	Enhed: MN/m <sup>2</sup>
Luft	0,14
Mineraluld (50–160 kg/m <sup>3</sup> )	0,02–0,4
Kokosmätte	0,25–0,5
Polystyrenskum (10–20 kg/m <sup>3</sup> )	0,3–3
Træuldcementplade	6–17
Korkplade	10–30

Den dynamiske stivhed kan bestemmes eksperimentelt efter ISO 9052/1 eller DIN 52214 ved måling af resonansfrekvensen ved belastning med en kendt masse.

### Dynamisk stivhed af belastet mineraluld

I figur 3.18 er vist, hvorledes den dynamiske stivhed vokser med belastningen for nogle mineraluldsprodukter. Dette er ikke overraskende, da lydhastigheden for en kompressionsbølge i et elastisk materiale i almindelighed vokser med det statiske tryk i materialet. Hvis måleresultaterne korrigeres for luftens bidrag til stivheden fås med rimelig god tilnærmelse følgende empiriske sammenhæng:

$$k_m'' \approx \text{konstant} \cdot \sqrt{m_1} \quad (3.69)$$

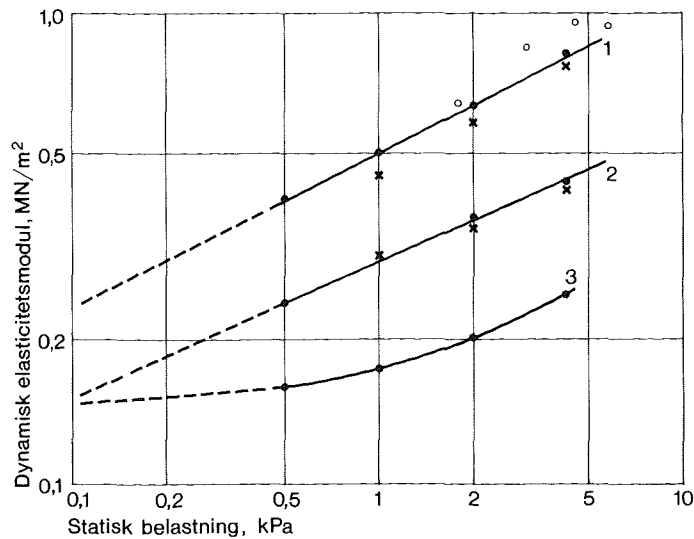
hvor  $m_1$  er den statiske belastning.

Da det stort set kun er lydhastigheden  $c_m$ , der kan ændre sig ved belastningen, fører dette til:

$$c_m \approx \text{konstant} \cdot \sqrt[4]{m_1} \quad (3.70)$$

for en given type mineraluld.





Figur 3.18. Dynamisk elasticitetsmodul som funktion af belastningen for mineraluld. Kurverne 1, 2 og 3 er regressionslinier for de tre typer mineraluld, der er beskrevet i tabel 3.3. De anførte punkter er målte værdier. I alle tilfælde indgår luftens bidrag til stivheden (ca.  $0,14 \text{ MN/m}^2$ ). (Efter Gudmundsson, 1984).

I tabel 3.3 er anført data for de samme tre typer mineraluld som i figur 3.18. Ved en særlig forsøgsopstilling er lyd hastighederne  $c_m$  målt, og de deraf beregnede dynamiske elasticitetsmoduler stemmer med kurverne i figur 3.18.

Tabel 3.3. Eksempler på tre forskellige typer mineraluld til svømmende gulve. De samme tre eksempler optræder i figur 3.18 og 3.21. Lyd hastigheden  $c_m$  i fiberstrukturen er målt ved belastninger på lidt under 1 kPa. Efter (Gudmundsson, 1984, p. 159).

Type	$\rho_m$ kg/m <sup>3</sup>	$c_m$ m/s	$\rho_m c_m^2$ MN/m <sup>2</sup>
1. Rockwool	160	49	0,38
2. Rockwool	100	35	0,12
3. Glasuld	50	22	0,02

Lyd hastigheden i mineraluld er ca. en tiendedel af lyd hastigheden i luft, hvilket har afgørende betydning for frekvensafhængigheden af den opnåelige trinlyddæmpning.

Lydudbredelse i et elastisk materiale som mineraluld vil være ledsaget af tab. Som vist af (Cremer & Heckl, 1967, p. 169) kan dette formuleres ved

hjælp af en kompleks lyd hastighed, hvis imaginærdel er bestemt af tabsfaktoren  $\eta$ :

$$\underline{c}_m = c_m \left( 1 + j \frac{\eta}{2} \right) \quad (3.71)$$

En række måleresultater af  $\eta$  er refereret af (Gudmundsson, 1984, p. 162), men der synes at herske stor usikkerhed om denne parameter. For Rockwool belastet med 1 kPa er målt  $\eta = 0,23-0,28$ . For større belastning er målt noget mindre tabsfaktorer ( $\eta = 0,10-0,15$  for belastning på 4-6 kPa).

For ikke at komplicere beskrivelsen yderligere antages i det følgende, at tabsfaktoren er så lille, at den ikke bidrager væsentligt til trinlyddæmpningen.

### Resonant reagerende gulve

Med et resonant reagerende gulv menes et gulv, hvor hele gulvfladen bidrager lige effektivt til overførsel af svingningsenergi ned gennem det elastiske mellemlag. Impedanserne i (3.66) skal i dette tilfælde opfattes som fladeimpedanser. Gulvets impedans er:

$$Z_1 = j \omega m_1 \quad (3.72)$$

hvor  $m_1$  er gulvets masse per arealenhed. For det elastiske mellemlag gælder:

$$Z_d = \frac{\rho_m c_m}{\sin \left( \frac{\omega}{c_m} d \right)} \quad (3.73)$$

hvor nævneren går mod nul ved frekvenser, hvor der kan forekomme stående bølger i mellemlaget. Analogt med (3.5) er det praktisk at indføre en knækfrekvens  $f_d$ :

$$f_d = \frac{c_m}{2 \pi d} \quad (3.74)$$

Ved lave frekvenser påvirkes fjedervirkningen ikke af stående bølger, og sin  $(\omega d/c_m) \approx \omega d/c_m$ . Ved frekvenser  $f > f_d$  kan forenklet, idet der er tale om en numerisk værdi, sættes  $\sin(\omega d/c_m) \approx 1$ , hvoraf fås:

$$|Z_d| = \begin{cases} \frac{\rho_m c_m^2}{\omega d} = \frac{k_m''}{\omega} & (f \leq f_d) \quad (3.75) \\ \rho_m c_m & (f > f_d) \quad (3.76) \end{cases}$$

Ved frekvenser under resonansfrekvensen  $f_0$  virker konstruktionen ikke som en dobbeltkonstruktion, og trinlyddæmpningen er normalt ubetydelig. Der kan dog være bidrag fra øget masse og tabsfaktor, se (2.77) for en massiv konstruktion. For svømmende gulve kan udtrykket (3.67) for *resonansfrekvensen* ofte forenkles, idet  $m_1 < m_2$  og  $k_m'' > k_a''$ :

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_m c_m^2}{m_1 d}} \quad (3.77)$$

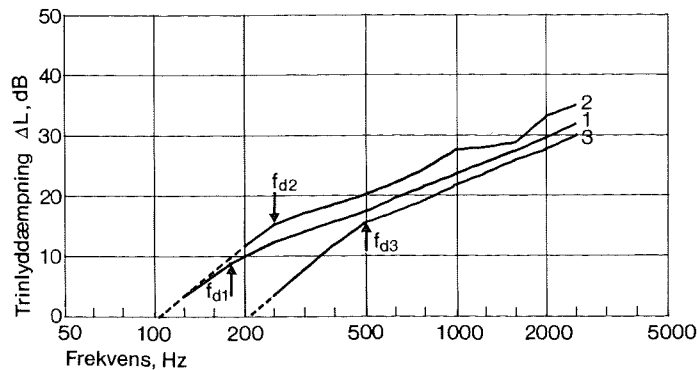
Trinlyddæmpningen i frekvensområdet  $f_0 < f \leq f_d$  findes ved indsættelse af (3.72) og (3.75) i (3.66):

$$\Delta L = 20 \log \frac{\omega^2 m_1 d}{\rho_m c_m^2} = 40 \log \frac{f}{f_0} \quad (f_0 < f \leq f_d) \quad (3.78)$$

Denne store frekvensafhængighed på 12 dB/oktav fortsætter dog kun til knækfrekvensen  $f_d$ , der ofte kun er lidt højere end  $f_0$  på grund af den lave lydshastighed i mellemlaget. For  $f > f_d$  fås ved indsættelse af (3.72) og (3.76) i (3.66):

$$\Delta L = 20 \log \frac{\omega m_1}{\rho_m c_m} = 40 \log \frac{f_d}{f_0} + 20 \log \frac{f}{f_d} \quad (f > f_d) \quad (3.79)$$

Frekvensafhængigheden er således reduceret til 6 dB/oktav.



Figur 3.19. Trinlyddæmpning for svømmende gulve med tre forskellige elastiske materialer. Alle kurver er gennemsnit af målinger på tre etageadskillelser, både tre måneder og et år efter ibrugtagning. Dækket består i alle tilfælde af 150 mm beton med 35 mm svømmende betongulv.

Kurve 1. 15 mm kunstharpiks-bundet mineraluld.

Kurve 2. 25 mm mineraluld.

Kurve 3. 15 mm polystyrenskumplade.

Ældre tyske målinger citeret fra (Kuhl, 1982).

I figur 3.19 ses eksempler på målte trinlyddæmpninger for resonant reagerende svømmende gulve af 35 mm beton med forskellige underlag, som giver forskellige resonansfrekvenser og knækfrekvenser. Kurverne følger meget nøje de to formler (3.78) og (3.79).

### Lokalt reagerende gulve

Med et lokalt reagerende gulv menes et gulv, hvor kraften fra bankemaskinens hamre hovedsagelig transmitteres til dækket gennem en begrænset del af konstruktionen i umiddelbar nærhed af kraftens exciteringspunkt. Forskellen på kraftoverførslen i resonant reagerende og lokalt reagerende gulve er illustreret i figur 3.20. I dette tilfælde skal impedanserne i (3.66) derfor opfattes som punktimpedanser.

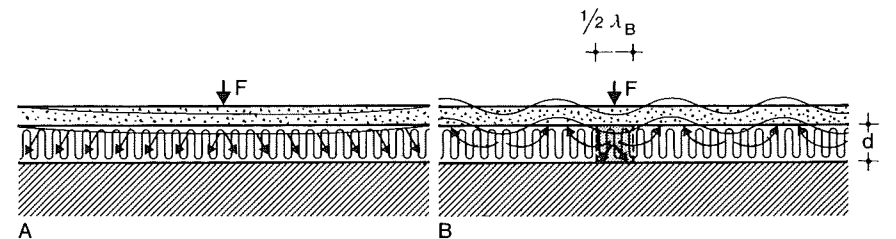
Gulvets punktimpedans er som i (2.69):

$$Z_{0,1} = \frac{4 c^2 m_1}{\pi f_{c1}} \quad (3.80)$$

Impedansen for et fjederelement bestående af det aktive udsnit af det elastiske mellemlag kan skrives:

$$\left| Z_{0,d} \right| = \frac{k_m}{\omega} \quad (3.81)$$

hvor  $k_m$  er den dynamiske stivhed af det aktive udsnit. Som vist af (Kuhl, 1982) er det rimeligt at antage, at det aktive udsnit i gulvpladen udgør en cylinder med diameter lig en halv bøjningsbølgelængde, se figur 3.20. Kaldes det tilsvarende aktive areal  $S_a$ , fås:



Figur 3.20. Principskitse af svømmende gulve med påvirkning af en punktkraft. Begge gulve er fladelejrrede.

A. Resonant reagerende gulv. Stor bøjningsbølgehastighed i gulvpladen medfører, at lydtransmissionen foregår over hele gulvfladen.

B. Lokalt reagerende gulv. Lille bøjningsbølgehastighed i gulvpladen medfører, at kun et mindre udsnit af det elastiske materiale bidrager til lydtransmissionen. Samme effekt opnås med en kraftigt dæmpet gulvplade.

$$k_m = k_m'' S_a = k_m'' \frac{\pi}{16} \lambda_{B1}^2 \quad (3.82)$$

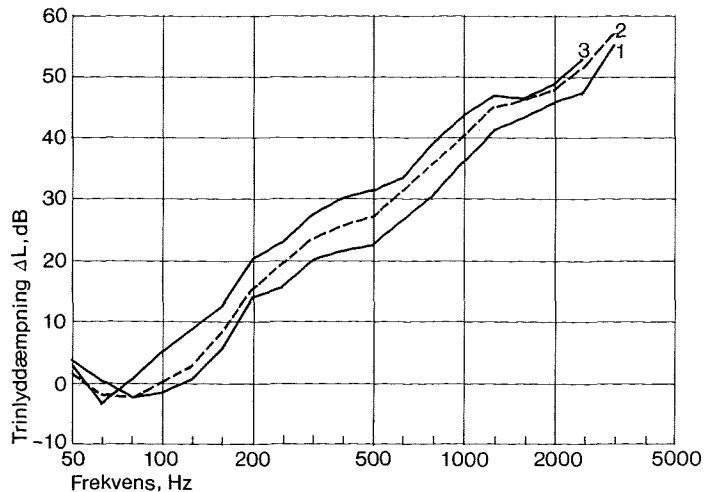
som ved hjælp af (3.68) og (2.5) omskrives til:

$$k_m = \frac{\rho_m c_m^2}{d} \cdot \frac{\pi c^2}{16 f f_{c1}} \quad (3.83)$$

Trinlyddæmpningen findes ved indsættelse i (3.66):

$$\begin{aligned} \Delta L &= 20 \log \left( \frac{128 m_1 d}{\pi \rho_m c_m^2} f^2 \right) \\ &\approx 40 \log \frac{f}{f_0} \quad (f > f_0) \end{aligned} \quad (3.84)$$

hvor  $f_0$  er resonansfrekvensen (3.77). Resultatet for lokalt reagerende gulve svarer altså nøje til det tidligere fundne for resonant reagerende gulve under knækfrekvensen, men der forekommer ingen knækfrekvens ved lokalt reagerende gulve. Hældningen af  $\Delta L$  på 12 dB/oktav fortsætter højt op i frekvensområdet, hvilket må tilskrives den oven for omtalte måde, hvorpå transmissionen foregår gennem det elastiske mellemlag. Det aktive areal indsnævres med voksende frekvens, hvorved stivheden bliver omvendt proportional med frekvensen, se (3.83).



Figur 3.21. Trinlyddæmpning målt for lokalt reagerende svømmende gulve af 22 mm spånplade udlagt på 50 mm mineraluld af tre forskellige typer. Kurverne refererer til materiale 1, 2 og 3 i tabel 3.3. Dækket er 160 mm beton. Efter (Gudmundsson, 1984).

Eksempler på målte trinlyddæmpninger for lokalt reagerende gulve ses i figur 3.21. De anvendte mineraluldstyper er de samme som i tabel 3.3. og figur 3.18. Kurverne stiger stort set med 12 dB/oktav svarende til formel (3.84).

### Punktlejrede gulve

Undertiden udføres svømmende gulve således, at golvpladen hviler på et antal jævnt fordelte elastiske brikker, se figur 3.22. Kaldes den dynamiske stivhed af hver brik  $k_{dp}$  og antallet  $N_p$ , bliver resonansfrekvensen for gulvet, idet der ses bort fra luftens bidrag til stivheden, og dækket antages at være tungere end gulvet:

$$f_0 = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{k_{dp} \cdot N_p}{m_1 S}} \quad (3.85)$$

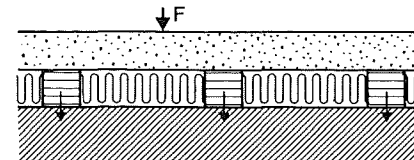
Trinlyddæmpningen af punktlejrede gulve, som antages resonant reagerende, er analyseret af (Ver, 1971). Idet indeks 1 og 2 som hidtil refererer til henholdsvis golvplade og dæk, fås:

$$\Delta L = 10 \log \left[ \frac{Z_{0,1}}{Z_{0,2}} + \frac{m_1 \eta_1}{m_2 \eta_2} + 2 \pi \eta_1 \frac{Z_{0,1}}{k_{dp}} \cdot \frac{f^3}{f_0^2} \right] \quad (3.86)$$

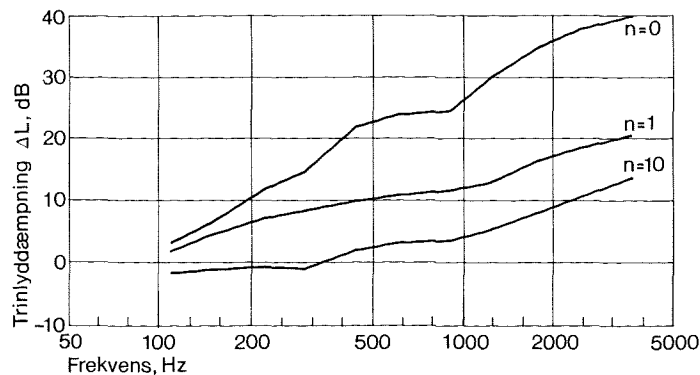
Over en vis frekvens bliver sidste led dominerende, og trinlyddæmpningen vokser med 9 dB/oktav, såfremt golvpladens tabsfaktor  $\eta_1$  og brikernes stivhed er frekvensuafhængig. Indsættes resonansfrekvensen (3.85) og punktimpedansen (3.80) fås som tilnærmelse ved højere frekvenser:

$$\Delta L \approx 10 \log \left[ \frac{32 \pi^2 c^2}{k_{dp}^2} \cdot \frac{S}{N_p} \cdot \frac{m_1^2 \eta_1}{f_{c1}} \cdot f^3 \right] \quad (3.87)$$

Især bemærkes betydningen af en stor tabsfaktor og en lav kritisk frekvens for golvpladen, der således bør være tyk og dæmpet.



Figur 3.22. Principskitse af punktlejret svømmende gulv. Kræfterne overføres til dækket gennem et antal små, elastiske brikker. Det øvrige hulrum dæmpes med en let mineraluldsmåtte.



Figur 3.23. Betydningen af lydbroer for svømmende betongulv. Lydbroerne bestod af gipscylindre på 30 mm i diameter og deres antal  $n$  er benyttet som parameter. (Gösele, 1964).

### Virkning af lydbroer

Som omtalt i afsnittet om transmission via lydbroer kan disse have afgørende betydning for luftlydisolationen af dobbeltkonstruktioner. Noget tilsvarende gælder for trinlyddæmpningen af svømmende gulve. I figur 3.23 ses eksempler på laboratoriemålinger for et svømmende betongulv, hvor der er skabt mekanisk kontakt til dækket med gipscylindre på 30 mm i diameter.

### Sammenfatning

De trinlyddæmpende egenskaber af svømmende gulve er i praksis så komplicerede, at det ikke er muligt med den foreliggende viden at opstille et generelt anvendeligt beregningsgrundlag. Den oversigt, der er givet i dette afsnit, er bl.a. baseret på nyere analyser af (Kuhl, 1982) og (Gudmundsson, 1984). Omfattende eksperimentelle undersøgelser af lette, svømmende gulve er rapporteret af (Austnes & Hveem, 1983).

En gulvkonstruktions trinlyddæmpning kan dels skyldes et svømmende gulv, dels en *gulvbelægning*, som omtalt i kapitel 2 i afsnittet om trinlydniveau, og disse to bidrag kan for tunge, massive dækkonstruktioner i mange tilfælde adderes, men derimod ikke for lette etageadskillelser

$$\Delta L \approx \Delta L_{\text{gulv}} + \Delta L_{\text{belæg}} \quad (3.88)$$

For svømmende gulve kan trinlyddæmpningen vokse med frekvensen på forskellige måder, afhængig af bl.a. konstruktionens type. I tabel 3.4 er givet en oversigt over såvel frekvensens som andre parametres indvirkning på trinlyddæmpningen. En forøgelse af gulvets tabsfaktor  $\eta_1$  kan medføre en æn-

dring fra resonant reagerende til lokalt reagerende med deraf følgende ændret frekvensafhængighed. Der findes eksempler på gulve, hvor denne overgang sker midt i frekvensforløbet. Et problem ved projektering af svømmende gulve er, at der ikke kendes noget klart kriterie for, hvornår et gulv er resonant reagerende, og hvornår det er lokalt reagerende.

Mens trinlyddæmpende gulvbelægnings i vid udstrækning er uafhængige af den underliggende konstruktion, gælder dette ikke for svømmende gulve. Som hovedregel må regnes med, at lettere dækkonstruktioner medfører ringere trinlyddæmpning for samme svømmende gulv.

Tabel 3.4. Oversigt over trinlyddæmpningens afhængighed af en række parametre for de omtalte typer af svømmende gulve. For de fladelejrede gulve er medregnet stivhedens afhængighed af belastningen som fundet for mineraluld (3.69), men luftens stivhed er ikke medregnet. En streg betyder ingen afhængighed. I alle tilfælde gælder:  $f > f_0$ .

Parameter	Type svømmende gulv			Punktlejret
	Resonant reagerende		Lokalt reagerende	
	$f < f_d$	$f > f_d$		
$f$	40 log	20 log	40 log	30 log
$d$	20 log	-	20 log	-
$\rho_m$	-20 log	-20 log	-20 log	-
$k_d$	-	-	-	-20 log
$N_p/S$	-	-	-	-10 log
$m_1$	10 log	15 log	10 log	20 log
$\eta_1$	-	-	-	10 log
$f_{c1}$	-	-	-	-10 log

## Måling, vurdering og beregning af lydisolation

*Måling og vurdering af lydisolation, f.eks. til påvisning af, om forskriftsmæssige krav til luftlydisolation og trinlydniveau er opfyldt, udføres normalt efter internationalt standardiserede metoder. Målemetoderne er udtryk for almindelig målepraksis i årene før standardernes udgivelsestidspunkt. Siden deres fremkomst er der sket en betydelig udvikling i den akustiske måleteknik, derfor er nogle af de i kapitel 4 anførte procedurer for måling af lydisolation mere omfattende end anført i gældende standarder.*

*I kapitel 5 om beregning af lydisolation er flanketransmission behandlet for flere transmissionsveje, og der er angivet beregningsgrundlag for såvel luftlydisolation som trinlydniveau. Ved anvendelse af en reprocitetsmetode er der opnået et formelgrundlag, der er egnet til forundersøgelse af bygningskonstruktioners lydisolation, og som i øvrigt indgår i et edb-program »CADBA« (Pedersen, 1986), der bl.a. er baseret på en hollandsk beregningsmodel.*

## Måling og vurdering af lydisolations

Måling af luftlydisolation og trinlydniveau kan ifølge DS/ISO/140 udføres per 1/3 oktav eller per oktav. Her er kun omtalt målinger per 1/3 oktav, idet disse er specificeret ifølge danske byggeforskrifter. Ved målingerne forudsættes, at lydfeltets diffusitet er tilstrækkelig, uden at dette eftervises.

### Målemetoder

#### Luftlydisolation mellem rum

Luftlydisolationen bestemmes ved måling i to rum, et senderum og et modtagerum. I senderummet udsendes et støjsignal fra en højttaler. Signalet kan være båndbegrænset hvid eller lyserød støj med større båndbredde end 1/3 oktav. *Hvid støj* har samme lydenergi ved alle frekvenser, medens *lyserød støj* har samme lydenergi per 1/3 oktav.

Lydtrykniveauet måles per 1/3 oktav i senderum og modtagerum med en mikrofon i mindst tre positioner i hvert rum.

Målemetoden er den samme for alle rum, men for at kunne sammenligne måleresultatet fra rum med forskellig størrelse og forskellig mængde af absorptionsmateriale er det nødvendigt at korrigere de målte lydtrykniveauer. Ved laboratoriemåling af luftlydisolation anbringes den bygningsdel, der skal måles, som adskillelse mellem to rum, der kan være udført sådan, at lydtransmission gennem de flankerende bygningsdele er uden betydning for måleresultatet. I andre tilfælde er der tilstræbt en bestemt flanketransmission mellem rummene, men det angives almindeligvis ikke, hvor stor flanketransmissionen er.

*Luftlydisolationen* kan udtrykkes ved reduktionstallet  $R$ , der i princippet forudsætter, at flanketransmissionen er nul. I praksis anvendes  $R$  som betegnelse for laboratoriemålinger med ubetydelig flanketransmission.

$$R = L_S - L_M + 10 \log \frac{S}{A} \quad (\text{dB}) \quad (4.1)$$

Ved laboratoriemåling med tilstræbt flanketransmission og ved måling i bygninger benyttes det samme udtryk for reduktionstal, men symbolet for reduktionstallet  $R$  mærkes med en apostrof, der angiver, at  $R'$  er et tilsyneladende reduktionstal. Denne betegnelse indikerer, at forudsætningen om at lydtransmissionen kun sker gennem den rumadskillende bygningsdel er forladt, og flanketransmission derfor kan have en væsentlig indvirkning på resultatet.

$$R' = L_S - L_M + 10 \log \frac{S}{A} \quad (\text{dB}) \quad (4.2)$$

I begge udtryk er  $L_S$  og  $L_M$  middellydtrykniveauet i henholdsvis senderum og modtagerum.

Tredje led er den nævnte korrektion, hvor  $S$  er arealet i  $\text{m}^2$  af bygningsdelen, der adskiller rummene, og  $A$  det ækvivalente lydabsorptionsareal i modtagerummet, ligeledes i  $\text{m}^2$ .

For rum med efterklangstid  $T$  i sekunder, volumen  $V$  i kubikmeter og absorptionsareal  $A$  i kvadratmeter er

$$T = \frac{0,16 V}{A} \quad (\text{s}) \quad (4.3)$$

Udtrykket, *Sabines formel*, gælder i princippet kun ved  $20^\circ\text{C}$ , ved andre temperaturer gælder (1.26) og (1.4).

Når efterklangstiden  $T$  i modtagerummet er målt, udregnes ved hjælp af (4.1), (4.2) og (4.3) reduktionstallet per 1/3 oktav ved de 16 standardiserede centerfrekvenser i frekvensområdet 100–3150 Hz.

Ved beregning indsættes arealet af den adskillende bygningsdel  $S$ , for en dør arealet af dørplade med tillæg af karm- og fugetykkelser. Når der måles lydisolations mellem rum, som ikke har nogen fælles bygningsdel, men f.eks. er adskilt af et mellemliggende rum, sættes  $S$  til  $10 \text{ m}^2$ .

Ved måling af reduktionstal foreskriver mange laboratorier, at der benyttes mindst to højttalerpositioner i senderummet, det vil sige, at måleproceduren består af mindst to målinger af reduktionstallet, og resultatet af målingen er middelværdien af resultaterne af de enkelte målinger.

I praksis udføres beregning af reduktionstallet ved at lydtrykniveauets middelværdi i henholdsvis senderum og modtagerum bestemmes for alle målingerne, også for korrektionerne bestemmes en middelværdi. En beregning af reduktionstallet ved frekvensen 500 Hz er vist som eksempel i tabel 4.1. For hver højttalerposition udregnes lydtrykniveauet i henholdsvis senderum og modtagerum ved en midling af lydtrykkenes energiværdier se (1.32), hvorefter middelværdien i et rum for alle højttalerpositioner findes ved addition af

Tabel 4.1. Eksempel på beregning af reduktionstallet ved 500 Hz mellem rum med fællesareal  $S = 10,7 \text{ m}^2$  og modtagerumsvolumen  $33 \text{ m}^3$ . Middelværdier af lydtrykniveauer med en højttalerposition adderes og midles på energibasis, dvs. ved addition og midling af de målte lydtryks kvadrater. Værdierne er omregnet fra dB-værdier til kvadrater af lineære værdier, der er adderet og midlet, hvorefter de igen er omregnet til dB-værdier. Forneden er vist, at beregning uden anvendelse af addition på energibasis, som den ofte udføres, fører til ukorrekte resultater.

Højttalerposition	Mikrofonposition	I senderum dB	Kvadrater på lydtryk <sup>1)</sup> dB	I modtagerum	Kvadrater på lydtryk	Efterklangstid T i sekunder	$\frac{S}{A} = \frac{10,7 \cdot T}{0,16 \cdot 33}$	Korrektion $R$ dB
1	1	96	$10^{9,6}$	$10^{2,5}$	$3,162 \cdot 10^2$	0,5		
2	2	99	$10^{9,9}$	$10^{3,2}$	$15,840 \cdot 10^2$	0,6		
3	3	93	$10^{9,3}$	$10^{2,8}$	$6,310 \cdot 10^2$	0,6		
Middelværdi omregnet til dB			$4,640 \cdot 10^9$ + 96,3 dB		$8,40 \cdot 10^2$ - 29,3 dB	0,57		+ 0,6
1	1	102	$1,585 \cdot 10^{10}$	33	$1,995 \cdot 10^3$	0,6		
2	2	99	$0,794 \cdot 10^{10}$	29	$0,794 \cdot 10^3$	0,5		
3	3	98	$0,631 \cdot 10^{10}$	34	$2,512 \cdot 10^3$	0,5		
Middelværdi omregnet til dB			$1,003 \cdot 10^{10}$ + 100,0 dB		$1,767 \cdot 10^3$ - 32,5 dB	0,53		+ 0,3
1	Middelværdi i dB	96,0		-28,3				$R_{500} = 67,7$
2	Middelværdi i dB	99,7		-32,0				+ 0,6
								+ 0,3
								$\gg R_{500} = 68,2 \ll$

<sup>1)</sup> På nær en faktor  $(20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa})^2$

lydtrykniveauet i dB for de enkelte højttalerpositioner og division med antal af højttalerpositioner.

Foruden reduktionstallet kan også *niveaudifferensen D* mellem lydtrykniveau i sende- og modtagerum og den standardiserede niveaudifferens  $D_{n,T}$  benyttes som mål for lydisolationen, hovedsagelig ved måling i bygninger. I praksis er efterklangstiden i møblerede beboelsesrum omkring 0,5 sekund, derfor benyttes denne værdi ofte som referenceværdi.

$$D = L_S - L_M \quad (\text{dB}) \quad (4.4)$$

$$D_{n,T} = L_S - L_M + 10 \log \frac{T}{0,5 \text{ s}} \quad (\text{dB}) \quad (4.5)$$

hvor  $L_S$  og  $L_M$  er som for (4.1) og (4.2) og  $T$  er efterklangstiden i modtagerummet.

Udtrykkene (4.4) og (4.5) indgår ikke i den nuværende danske byggelovgivning, men (4.5) er tidligere anvendt heri. I flere europæiske landes lovgivning anvendes (4.5) som grundlag for krav til luftlydisolation i bygninger.

### Luftlydisolation mellem det fri og et rum med ydervæg

Luftlydisolationen bestemmes ved måling af lydtrykniveau i det fri og i modtagerum, hertil kan benyttes to forskellige metoder.

*Metode 1:* Fra en højttaler anbragt på terræn med akse under en vinkel  $\theta$  med normalen i midtpunktet af måleobjektets (facadevæg, dør eller vindue) yderside udsendes et støjsignal som omtalt i afsnittet om luftlydisolation mellem rum.

Lydtrykniveauet måles per  $\frac{1}{3}$  oktav i modtagerummet i mindst tre mikrofonpositioner, mens det i frit felt måles i en position, der i forhold til højtaleren svarer til skæringspunktet mellem højttaleraksen og facaden. Det vil sige måling af det lydtrykniveau, der ville have været i positionen ved midten af måleobjektets yderside, hvis bygningen ikke havde været til stede. Målingen gentages med en ny højttalerposition. Differensen mellem middelværdierne af lydtrykniveauet i modtagerummet, beregnet som anført i tabel 4.1, og de målte frit felts værdier er et udtryk for luftlydisolationen, men for at kunne sammenligne måleresultater for rum med forskellig størrelse og lydabsorption, må der foretages en korrektion.

Luftlydisolationen udtrykkes ved reduktionstallet

$$R_\theta = L_1'' - L_M + 10 \log \frac{4 S \cos \theta}{A} \quad (\text{dB}) \quad (4.6)$$



hvor  $L'_1$  er lydtrykniveauet i frit felt ved ydersiden af facaden og  $L_M$  er lydtrykniveauet i modtagerummet. Tredje led er korrektionen, hvor  $S$  er måleobjektets areal i  $m^2$ ,  $A$  det ækvivalente lydabsorptionsareal i rummet, ligeledes i  $m^2$  og  $\theta$  vinklen mellem højtalerens akse og normalen til midtpunktet af måleobjektet, som regel  $45^\circ$ .

Når efterklangstiden er målt, udregnes ved hjælp af udtrykkene (4.3) og (4.6) reduktionstallene i de 16 standardiserede frekvensbånd for  $\frac{1}{3}$  oktaver i frekvensområdet 100–3150 Hz.

*Metode 2:* Signalkilden er trafikstøj, hvis energiækvivalente lydtrykniveau måles per  $\frac{1}{3}$  oktav i modtagerummet i mindst tre mikrofonpositioner og samtidig i det fri 2 m foran måleobjektet. I det ækvivalente lydtrykniveau er lydtrykkets kvadrat integralet af kvadratets øjebliksværdi i det benyttede måletidsrum. Differensen mellem det energiækvivalente lydtrykniveau uden for og i modtagerummet er et udtryk for luftlydisolationen, men der skal som i metode 1 korrigeres for modtagerummets størrelse og lydabsorption.

Luftlydisolationen udtrykkes ved reduktionstallet

$$R_{tr} = L_{eq,1} - L_{eq,M} + 10 \log \frac{S}{A} \quad (\text{dB}) \quad (4.7)$$

hvor  $L_{eq,1}$  er lydtrykniveauet i det fri og  $L_{eq,M}$  er lydtrykniveauet i modtagerummet. Tredje led er korrektionen, hvor  $S$  er måleobjektets areal i  $m^2$ , og  $A$  det ækvivalente lydabsorptionsareal i rummet, ligeledes i  $m^2$ .

Når efterklangstiden er målt udregnes ved hjælp af (4.3) og (4.7) reduktionstallene i de 16 standardiserede frekvensbånd for  $\frac{1}{3}$  oktaver i frekvensområdet 100–3150 Hz.

### Trinlydniveau

Støjniveauet fra en bankemaskine placeret på gulvet i et rum, senderummet, måles i et andet rum, modtagerummet, og kaldes for trinlydniveauet. *Bankemaskinen* udsender et næsten stationært signal ved, at 5 hamre à 500 g fra en højde af 40 mm med 0,1 sekunds mellemrum falder frit mod gulvet. Hamrenes slagflade er fremstillet af stål og er en del af en kugleflade med radius 500 mm. Det højeste lydtrykniveau fra bankemaskinen vil oftest forekomme i et direkte underliggende rum. Lydtrykniveauet kaldes for trinlydniveauet, skønt det ikke har megen lighed med den støj, der frembringes af fodtrin.

Trinlydniveauet måles i de 16 standardiserede frekvensbånd for  $\frac{1}{3}$  oktaver i frekvensområdet 100–3150 Hz, og der skal foretages korrektion for modtagerummets lydabsorption. Der benyttes mindst 3 positioner for bankemaskinen og mindst 3 mikrofonpositioner for hver position af bankemaskinen.

Middelværdien af lydtrykniveauet beregnes for hver bankemaskineposition ved midling af lydtrykkenes energiværdier, se (1.32), hvorefter middelværdien for alle bankemaskinepositioner findes ved addition af lydtrykniveauet i dB for de enkelte bankemaskinepositioner og division med antallet af bankemaskinepositioner. Dvs. samme fremgangsmåde, som er vist for højtalerpositioner i tabel 4.1.

Trinlydniveauet er ved måling i laboratorium

$$L_n = L_M + 10 \log \frac{A}{10 \text{ m}^2} \quad (\text{dB}) \quad (4.8)$$

og ved måling i bygning

$$L'_n = L_M + 10 \log \frac{A}{10 \text{ m}^2} \quad (\text{dB}) \quad (4.9)$$

eller

$$L'_{n,T} = L_M - 10 \log \frac{T}{0,5 \text{ s}} \quad (\text{dB}) \quad (4.10)$$

hvor

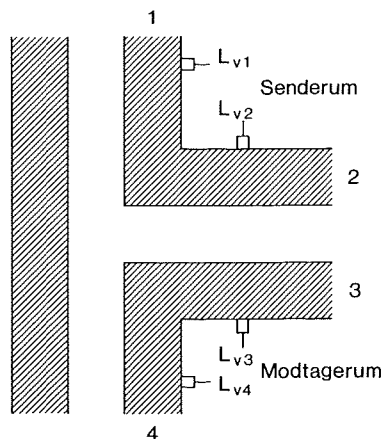
$L_M$  er lydtrykniveauet i modtagerummet, dB re  $20 \mu \text{ Pa}$ ,  
 $A$  er det ækvivalente lydabsorptionsareal i rummet i  $m^2$ , og  
 $T$  er efterklangstiden i sekunder, ligeledes i modtagerummet.

Når efterklangstiden er målt, kan  $L_n$  og  $L'_n$  beregnes ved hjælp af (4.3), (4.8) og (4.9). I øjeblikket indgår (4.10) ikke i dansk byggelovgivning, men er tidligere anvendt heri. I flere europæiske landes lovgivning anvendes (4.10) som grundlag for krav til trinlydniveauet i bygninger.

### Efterklangstid

Efterklangstiden i et rum bestemmes ved måling af lydtrykniveauets aftagen under en lyds hendøen i rummet. Fra en højtaler i rummet udsendes et signal med f.eks. lyserød støj og med en båndbredde større end  $\frac{1}{3}$  oktav. Lydtrykniveauet kan registreres som funktion af tiden på en niveauskriver, hvor det nedtegnes på papirstrimmel, der med konstant hastighed bevæges forbi en skrivestift. Når højtaleren afbrydes, aftager lydtrykniveauet, og der tegnes en hældende kurve på niveauskriveren. Efterklangstiden bestemmes af kurvens hældning. Målingen gentages for hver af de 16 standardiserede centerfrekvenser med mindst 3 mikrofonpositioner kombineret med mindst to højtalerpositioner. I digitale måleinstrumenter bestemmes efterklangskurvens hældning i reglen gennem en regressionsanalyse af de under efterklangstidsforløbet målte lydtrykniveauer.





Figur 4.1. Placeringen af accelerometre på den adskillende og den flankerende bygningsdel ved måling af knudepunktsdæmpning for tre transmissionsveje 1-4, 2-4 og 1-3.  $L_{v1}$  og  $L_{v2}$  betegner hastighedsniveauer målt i senderum og  $L_{v3}$  og  $L_{v4}$  hastighedsniveauer målt i modtagerum.

### Knudepunktsdæmpning

Ved knudepunktsdæmpning forstås lydens dæmpning ved transmission gennem samlinger mellem bygningsdele. Knudepunktsdæmpningen bestemmes ved måling i to rum med en fælles bygningsdel og en i begge rum flankerende bygningsdel. I det ene rum, senderummet, monteres en exciter på væg nr. 1 eller 2, se figur 4.1, og exciteren tilføres et signal med lyserød støj i en båndbredde større end  $\frac{1}{3}$  oktav. I både senderum og modtagerum måles med et accelerometer i mindst 5 punkter inden for den fjerdedel af de to bygningsdele, der ligger nærmest ved deres samling. I figur 4.1 er vist hvor accelerometre placeres for at måle transmissionsvejene 1-4, 2-4 og 1-3. Knudepunktsdæmpningen bestemmes ved

$$D_{ij} = L_{vi} - L_{vj} \quad (\text{dB}) \quad (4.11)$$

hvor  $L_{vi}$  og  $L_{vj}$  er middelværdierne af *hastighedsniveauer* målt på de to bygningsdele i henholdsvis senderum og modtagerum. Metoden er ikke standardiseret.

### Strålingsfaktor

Strålingsfaktoren for en plade er et udtryk for den udstrålede effekt fra pladens egensvingninger ved lydpåvirkning. Den bestemmes ved måling af hastighedsniveauet på pladen og lydtrykkniveauet i et rum, hvortil pladen udstråler lyd. Pladen påvirkes til bøjningssvingninger med en elektromekanisk svingningsgenerator, også kaldet en vibrationsexciter. Generatoren påvirkes med et frekvenssignal svarende til hvid eller lyserød støj i frekvensbånd, der er mindst  $\frac{1}{3}$  oktav. Den anbringes på pladen i mindst to positioner, og for hver af disse måles hastighedsniveauet på pladen med accelerometer i mindst 10 positioner og lydtrykkniveauet i rummet i mindst 3 mikronfonpositioner.

Strålingsfaktoren  $\sigma$  bestemmes af

$$10 \log \sigma = L_p - L_v - 10 \log \frac{S}{A} + 28 \quad (\text{dB}) \quad (4.12)$$

hvor  $L_p$  er middellydtrykkniveauet i modtagerummet, dB re  $20 \mu \text{ Pa}$ ,  
 $L_v$  middelhastighedsniveauet på pladen, dB re  $10^{-9} \text{ m/s}$ ,  
 $S$  pladens areal i  $\text{m}^2$  og  
 $A$  modtagerummets ækvivalente lydabsorptionsareal i  $\text{m}^2$ .

$A$  bestemmes af modtagerummets volumen og efterklangstid ved hjælp af (4.3). Metoden foreligger som Nordtest prøvningsmetode. (NT ACOU 033, 1980).

### Vurderingsmetoder

Vurderingsmetoder er fremgangsmåder, der fører frem til et enkelt tal som udtryk for den lydæssige egenskab.

Vurdering af luftlydisolation og trinlydniveau er standardiseret i ISO717 og i DS 2186 for 16 standardiserede frekvensbånd for  $\frac{1}{3}$  oktaver inden for frekvensområdet 100–3150 Hz. De målte værdier vægtes efter standardiserede vurderingskurver, og resultatet heraf ved 500 Hz er henholdsvis luftlydisolation og trinlydniveau udtrykt i enkle tal.

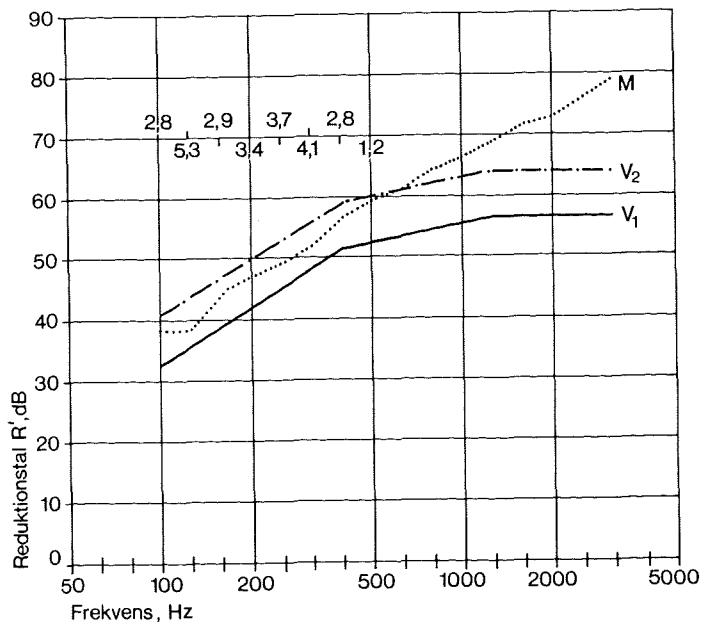
Vurderingsmetoder for knudepunktsdæmpning og strålingsfaktor findes endnu ikke.

### Luftlydisolation

Reduktionstal henholdsvis  $R$ ,  $R'$ ,  $R_\theta$ ,  $R_{tr}$  og niveaudifferenserne  $D$  eller  $D_{n,T}$  beregnes med 1 decimal for hver af de 16 standardiserede centerfrekvenser. De beregnede tal kaldes måleresultatet og indtegnes som kurven  $M$  i et diagram, figur 4.2.

I diagrammet indtegnes en standardiseret vurderingskurve  $V_1$  med ordinatværdien 52 dB ved 500 Hz. Denne kurve forskydes parallelt med ordinataksen i trin på højst 1 dB til den beliggenhed, hvor summen af ugunstige afvigelser fra kurven  $M$  er størst mulig, men ikke større end 32,0 dB. Ved ugunstige afvigelser forstås sådanne, hvor måleresultaterne ligger under den forskudte vurderingskurve  $V_2$ .

Den vægtede luftlydisolation er ordinatværdien af den forskudte vurderingskurve  $V_2$  ved frekvensen 500 Hz. Ugunstige afvigelser større end 8 dB skal anføres i målerapporten. Til de forskellige symboler for beregnede værdier af luftlydisolation tilføjes  $w$  som indeks for de vægtede værdier:  $R_w$ ,  $R'_w$ ,  $R_{\theta,w}$ ,  $R_{tr,w}$ ,  $D_w$  og  $D_{n,T,w}$ .



Figur 4.2. Eksempel på bestemmelse af den vægtede luftlydisolation  $R'_w$ . Kurve  $M$ , måleresultatet, angiver reduktionstal  $R'$  som funktion af frekvensen, beregnet med 1 decimal. Kurve  $V_1$  er en standardiseret vurderingskurve med ordinatværdien 52 dB ved frekvensen 500 Hz. Kurve  $V_2$  er vurderingskurven forskudt således, at summen af ugunstige afvigelser fra kurve  $M$  netop ikke overstiger 32,0 dB. Ordinativærdien af kurve  $V_2$  ved 500 Hz angiver den vægtede luftlydisolation  $R'_w$ , der i dette tilfælde er 60 dB.

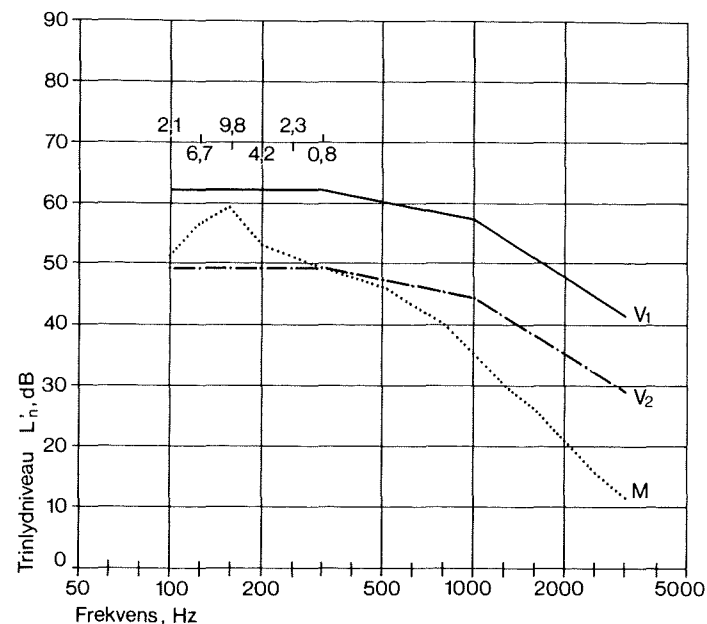
Tallene foroven i diagrammet angiver for de pågældende frekvenser ugunstige afvigelser med summen 26,2 dB. Hvis  $V_2$  forskydes endnu 1 dB op, bliver summen af afvigelserne 34,7 dB, altså over det tilladte maksimum, 32,0 dB.

### Trinlydniveau

Trinlydniveauet  $L_n$ ,  $L'_n$  eller  $L'_{n,T}$  beregnes med 1 decimal for hver af de 16 standardiserede  $\frac{1}{3}$  oktavniveauer. De beregnede tal kaldes måleresultatet og indtegnes som kurven  $M$  i et diagram, figur 4.3.

I diagrammet indtegnes en standardiseret vurderingskurve  $V_1$  med ordinatværdien 60 dB ved 500 Hz. Denne kurve forskydes parallelt med ordinataksen i trin på højst 1 dB til den beliggenhed, hvor summen af ugunstige afvigelser fra kurven  $M$  er størst mulig, men ikke større end 32,0 dB. Ved ugunstige afvigelser forstås sådanne, hvor måleresultaterne ligger over den forskudte vurderingskurve  $V_2$ .

Det vægtede trinlydniveau er ordinatværdien af den forskudte vurderingskurve  $V_2$  ved frekvensen 500 Hz. Ugunstige afvigelser større end 8 dB skal



Figur 4.3. Eksempel på bestemmelse af det vægtede trinlydniveau  $L'_{n,w}$ . Kurve  $M$ , måleresultatet, angiver trinlydniveauet  $L'_n$  som funktion af frekvensen, beregnet med 1 decimal. Kurve  $V_1$  er den standardiserede vurderingskurve, der har ordinatværdien 60 dB ved frekvensen 500 Hz. Kurve  $V_2$  er vurderingskurve forskudt således, at summen af ugunstige afvigelser fra kurve  $M$  netop ikke overstiger 32,0 dB. Ordinativærdien af kurve  $V_2$  ved 500 Hz angiver det vægtede trinlydniveau  $L'_{n,w}$ , der i dette tilfælde er 47 dB. Tallene foroven i diagrammet angiver for de pågældende frekvenser ugunstige afvigelser med summen 25,9 dB. Hvis  $V_2$  forskydes endnu 1 dB ned, bliver summen af afvigelserne 32,1 dB, altså over det tilladte maksimum 32,0 dB.

anføres i målerapporten. Til de forskellige symboler for beregnede værdier af trinlydniveauer tilføjes  $w$  som indeks for de vægtede værdier:  $L_{n,w}$ ,  $L'_{n,w}$  og  $L'_{n,T,w}$ .

### Efterklangstid

Vurdering af efterklangstiden  $T$  er ikke standardiseret. Vurderingsgrundlaget kan i nogle tilfælde være gennemsnitsværdier af efterklangstiden per  $\frac{1}{3}$  oktav eller per oktav inden for frekvensbåndene 125–2000 Hz eller 500–3150 Hz, i andre tilfælde benyttes efterklangstiden alene ved 500 Hz.

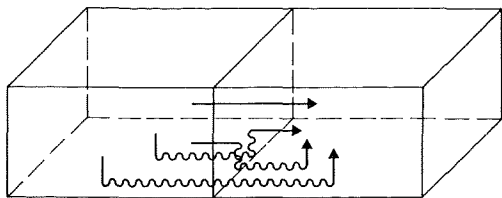
Efterklangstiden som funktion af frekvensen vurderes ofte ved, at måleresultatet skal ligge inden for tilladte maksimale afvigelser fra gennemsnitsværdien.

## Beregning af lydisolations i bygninger

Beregningsprogrammer for lydisolations har normalt den ulempe, at deres resultater er de maksimale værdier, der kan opnås under forhold med lydteknisk fuldkommen korrekt udførelse og ikke de i reglen væsentligt mindre værdier, som opnås i praksis. Alligevel er beregningsprogrammer et værdifuldt værktøj ved projektering af lydisolations.

### Luftlydisolation

I figur 5.1 er vist eksempler på transmissionsveje for luftlyd fra et rum til et naborum. For hvert sæt af flankerende flader vil der være tre flanketransmissionsveje, dvs. normalt 12 transmissionsveje foruden den direkte transmission.



Figur 5.1. Luftlydtransmission vandret. Transmissionsveje via én flankerende flade (gulv) og direkte gennem væggen.

### Flankereduktionstal

Hver transmissionsvej beskrives ved et flankereduktionstal,  $R_{ij}$ , svarende til transmissionen via senderummets flade  $i$  og modtagerummets flade  $j$ . Flankereduktionstallet er

$$R_{ij} = 10 \log \frac{P_{1,0}}{P_{2,ij}} \quad (5.1)$$

hvor  $P_{1,0}$  er den indfaldende lydeffekt på skillevægsarealet og  $P_{2,ij}$  er den udstrålede effekt til modtagerummet fra den pågældende transmissionsvej.

Under antagelse af diffust lydfelt i senderummet kan flankereduktionstallet skrives

$$R_{ij} = 10 \log \frac{\langle \bar{p}_1^2 \rangle S_0}{4 \rho c P_{2,ij}} \quad (5.2)$$

hvor  $\langle \bar{p}_1^2 \rangle$  er middellydtrykkvadratet i senderummet og  $S_0$  er arealet af skillefladen mellem rummene.

Det tilsyneladende reduktionstal  $R'$  bestemmes ved at summere de udstrålede lydeffekter fra samtlige mulige transmissionsveje

$$R' = 10 \log \frac{P_{1,0}}{\Sigma P_{2,ij}} = -10 \log \Sigma 10^{-R_{ij}/10} \quad (5.3)$$

### Knudepunktsdæmpning

Forskellen i hastighedsniveau på den exciterede plade  $i$  og den udstrålende plade  $j$  defineres som knudepunktsdæmpningen.

$$D_{ij} = 10 \log \frac{\langle \bar{v}_i^2 \rangle}{\langle \bar{v}_j^2 \rangle} \quad (5.4)$$

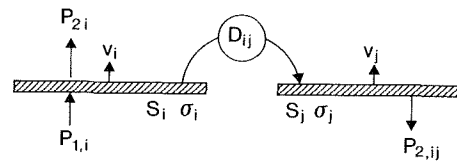
Bestemmelsen af knudepunktsdæmpningen vil blive nærmere omtalt senere i dette kapitel.

Hastighedsniveauet på den exciterede plade kan bestemmes tilnærmelsesvis med kendskab til reduktionstallet for plade  $i$  alene, se figur 5.2.

$$R_i = 10 \log \frac{\langle \bar{p}_1^2 \rangle S_i}{4 \rho c P_{2i}} \quad (5.5)$$

hvor

$$P_{2i} \approx \langle \bar{v}_i^2 \rangle \rho c S_i \sigma_i \quad (5.6)$$



Figur 5.2. Principskitse for flanketransmission fra plade  $i$  til plade  $j$  ved luftlydexcitering.  $D_{ij}$  er knudepunktsdæmpningen.

Den udstrålede effekt fra plade  $j$  er

$$P_{2,ij} = \langle \bar{v}_j^2 \rangle \rho c S_j \sigma_j \quad (5.7)$$

Ved hjælp af (5.4)–(5.7) kan flankereduktionstallet  $R_{ij}$  omskrives

$$R_{ij} = R_i + D_{ij} + 10 \log \frac{S_0}{S_j} + 10 \log \frac{\sigma_i}{\sigma_j} \quad (5.8)$$

Et højt flankereduktionstal kan opnås, når den exciterede plade har et højt reduktionstal, dvs. med tunge flankerende konstruktioner. En stor knudepunktsdæmpning eller en lille strålingsfaktor for den udstrålende flade kan også give et højt flankereduktionstal.

Dersom den exciterede plade er en let konstruktion med høj kritisk frekvens tenderer (5.6) mod at hastighedsniveauet overvurderes, især hvis  $\sigma_i \ll 1$ . En mere nøjagtig beregning kræver, at svingningerne i plade  $i$  opspaltes i tvungne og resonante svingninger, se (2.40), hvilket er en ret betydelig komplikation. Normalt vil det være tilstrækkeligt at vide, at beregningen i sådanne tilfælde er på den sikre side, dvs. giver for små flankereduktionstal.

### Reciprocitetsmetode

En forenkling af beregningsgrundlaget er mulig ved udnyttelse af det faktum, at lydtransmissionen er uafhængig af transmissionsretningen, således at

$$R_{ij} = R_{ji} = \frac{1}{2} (R_{ij} + R_{ji}) \quad (5.9)$$

som påvist af (Gerretsen, 1979). Herved forsvinder strålingsfaktorerne, og (5.8) ændres til

$$R_{ij} = \frac{1}{2} R_i + \frac{1}{2} R_j + D_{v,ij} + 10 \log \frac{S_0}{\sqrt{S_i S_j}} \quad (5.10)$$

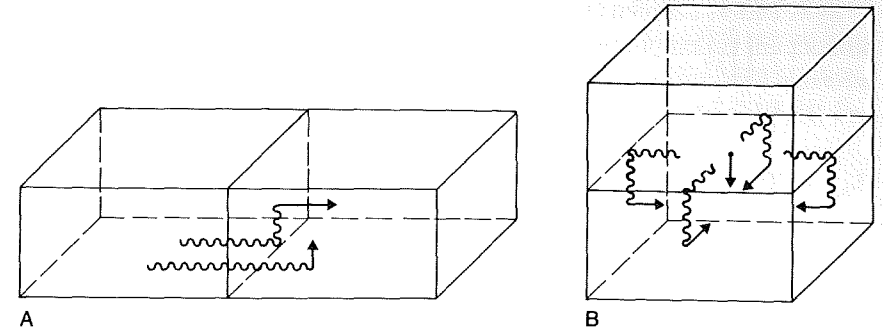
hvor

$$D_{v,ij} = \frac{1}{2} (D_{ij} + D_{ji}) \quad (5.11)$$

er knudepunktsdæmpningen midlet over begge udbredelsesretninger.

I tilfælde, hvor rummene ikke støder op til hinanden, og derfor ikke har nogen fælles adskillelse, sættes  $S_0 = 10 \text{ m}^2$ .

Ved dobbeltkonstruktioner refererer  $R_i$  og  $R_j$  til de plader eller delvægge, der exciteres henholdsvis udstråler lyd. Knudepunktsdæmpningen må bestemmes tilsvarende.



Figur 5.3. Trinlydstransmission med angivelse af transmissionsveje.

A. vandret.

B. lodret.

### Trinlydniveau

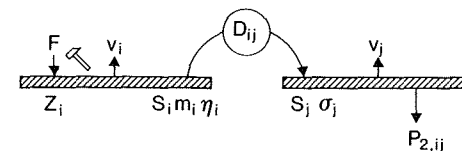
I figur 5.3 er vist eksempler på transmissionsveje for trinlyd såvel i vandret retning som i lodret retning. I vandret retning vil der normalt kun være to betydende transmissionsveje, mens der i lodret retning vil være en transmissionsvej for hver af de fire flankerende vægge, hvortil kommer den direkte transmission ned gennem etageadskillelsen.

### Trinlydniveau for en transmissionsvej

Transmissionen er illustreret i figur 5.4. Ved påvirkning med kraften  $F$  exciteres egensvingningerne i plade  $i$  til et middelhastighedskvadrat, som kan findes af (2.70)–(2.71)

$$\langle \bar{v}_i^2 \rangle = \frac{\bar{F}^2 \text{Re} \{Y_i\}}{2 \pi f \eta_i m_i S_i} \quad (5.12)$$

hvor  $\eta_i$ ,  $m_i$  og  $S_i$  er tabsfaktor, masse per arealenhed og areal af plade  $i$ , mens  $Y_i$  er pladens mekaniske punktdmittans, som er den reciprokke *punktimpedans*  $Y_i = 1/Z_i$ .



Figur 5.4. Principskitse for flanketransmission fra plade  $i$  til plade  $j$  ved excitering med en bankemaskine.  $D_{ij}$  er knudepunktsdæmpningen og  $Z_i$  er mekanisk punktimpedans.

Selve transmissionen af svingningsenergi fra plade  $i$  til plade  $j$  beskrives ved knudepunktsdæmpningen  $D_{ij}$  (5.4), og den udstrålede effekt  $P_{2,ij}$ . Trinlydniveauet for transmissionsvej  $i-j$  alene kan herefter bestemmes ved indsættelse i (1.34).

$$L_{n,ij} = 10 \log \frac{4 \rho c P_{2,ij}}{p_0^2 A_0} \quad (5.13)$$

$$= 10 \log \left( \frac{4 \rho^2 c^2 \langle \bar{v}_j^2 \rangle}{p_0^2 A_0 \langle \bar{v}_i^2 \rangle} \frac{\bar{F}^2 \operatorname{Re}\{Y_j\}}{2 \pi f \eta_i m_i} \frac{S_j \sigma_j}{S_i} \right)$$

For  $\frac{1}{3}$  oktav frekvensbånd fås ved indsættelse af kvadratet af den kraft bankemaskinens hamre frembringer (1.36) og øvrige talkonstanter

$$L_{n,ij} = 134 + 10 \log \frac{\operatorname{Re}\{Y_j\}}{\eta_i m_i} - D_{ij} + 10 \log \left( \frac{S_j}{S_i} \sigma_j \right) \quad (5.14)$$

For en hård og homogen plade vil middelværdien af  $\operatorname{Re}\{Y_j\}$  kunne bestemmes af (2.70). I tilfælde af en blød gulvbelægning må dennes trinlyddæmpning  $\Delta L_{belæg}$  yderligere fradrages

$$L_{n,ij} = 82 - 10 \log \left( m_i^2 \frac{\eta_i}{f_{ci}} \right) - D_{ij} + 10 \log \left( \frac{S_j}{S_i} \sigma_j \right) - \Delta L_{belæg} \quad (5.15)$$

Der kan her gøres kontrol ved at sætte  $i = j$ , hvorved  $D_{ij}$  udgår, og udtrykket svarer til (2.75) for en homogen, massiv plade, idet der dog ikke er medregnet nærfeltsudstrålingen.

For mere komplicerede etageadskillelser kan det være et problem at bestemme punktimpedansen. En beregningsmetode, hvor der tages hensyn til indvirkningen af de laveste egenfrekvenser i pladen, er beskrevet af (Breeuwer & Tukker, 1976). For en række hollandske etageadskillelser, heriblandt ribbedæk og plade-bjælke-systemer, findes målte admittanser hos (Gerretsen, 1986).

Knudepunktsdæmpningen antages at være den samme som ved flankereduktionstallet (5.8). Derfor kan en dobbelt beregning undgås ved at kombinere (5.8) med (5.15)

$$R_{ij} + L_{n,ij} = 82 + R_i - 10 \log \left( m_i^2 \frac{\eta_i}{f_{ci}} \right) + 10 \log \left( \frac{S_0}{S_i} \sigma_i \right) - \Delta L_{belæg} \quad (5.16)$$

Indeks  $i$  refererer til den gulvflade, som trinlydniveauet skal beregnes for. Hvis denne er en relativ tyk plade, således at  $f > f_{ci}$ , fås en væsentlig forenkling, idet  $R_i$  kan indsættes på tilsvarende måde som i (2.81)

$$R_{ij} + L_{n,ij} = 38 + 30 \log f + 10 \log \frac{S_0}{S_i} - \Delta L_{belæg} \quad (5.17)$$

Dette viser, at for den enkelte transmissionsvej gælder den samme simple sammenhæng mellem luftlydisolation og trinlydniveau, som tidligere er fundet for den massive dækplade i (2.82). Eneste forskel er arealkorrektionen, som skyldes, at flankereduktionstal altid refererer til skillevægsarealet  $S_0$ . Ved lodret transmission er  $S_0 = S_i$ .

### Reciprocitetsmetode

På samme måde som ved luftlydtransmissionen har (Gerretsen, 1986) anvendt en reciprocitetsbetragtning, hvorved strålingsfaktoren for plade  $j$  udgår. I stedet fordres kendskab til reduktionstallet for plade  $j$ , idet trinlydniveau for transmissionsvej  $i-j$  bestemmes af

$$L_{n,ij} = 86 + 15 \log f + 5 \log \frac{\operatorname{Re}\{Y_j\}}{\eta_i m_i} - \frac{1}{2} R_j - D_{v,ij} + 5 \log \frac{S_j}{S_i} \quad (5.18)$$

Knudepunktsdæmpningen  $D_{v,ij}$  er nu igen midlet over begge udbredelsesretninger. Analogt med (5.15) fås ved indsættelse af punktadmittansen for en homogen plade, eventuelt med blød gulvbelægning

$$L_{n,ij} = 60 + 15 \log f - 5 \log \left( m_i^2 \frac{\eta_i}{f_{ci}} \right) - \frac{1}{2} R_j - D_{v,ij} + 5 \log \frac{S_j}{S_i} - \Delta L_{belæg} \quad (5.19)$$

Ved denne metode indføres dog en fejl i tilfælde af, at plade  $j$  er en let konstruktion, hvis reduktionstal overvejende er bestemt af tvungen lydtransmission.

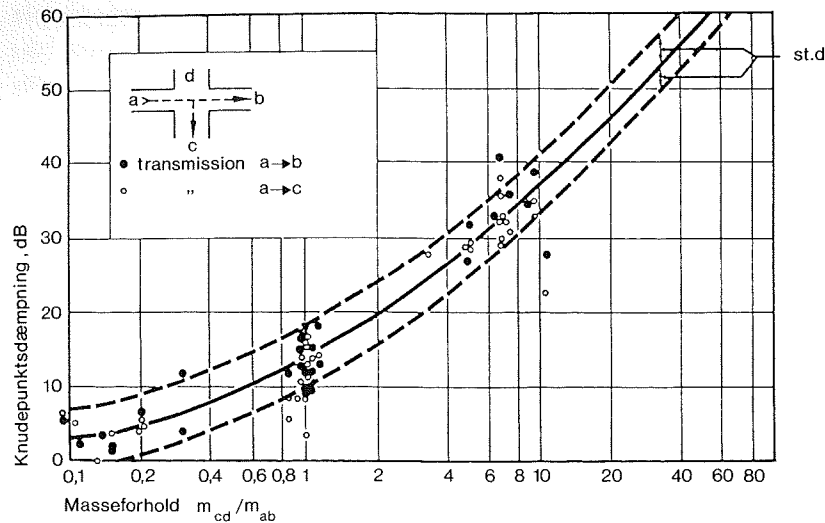
### Samlet trinlydniveau

Når trinlydniveauerne for hver enkelt transmissionsvej er bestemt, beregnes det samlede trinlydniveau ved addition af de udstrålede lydeffekter

$$L'_n = 10 \log \left( \sum 10^{L_{n,ij}/10} \right) \quad (5.20)$$

### Knudepunktsdæmpning

Et af de største problemer ved beregning af lyd isolation i bygninger er tilvejebringelse af data for knudepunktsdæmpninger mellem de aktuelle bygningsdele. For homogene massive plader findes dog et ret omfattende eksperimentelt erfaringsgrundlag, som de i figur 5.5 viste data for krydssamlinger.



Figur 5.5. Eksperimentelt bestemte knudepunktsdæmpninger for massive, homogene krydssamlinger afbildet som funktion af masseforholdet (plade c-d/plade a-b). Gennem målepunkterne er indtegnet en regressionslinje (—) og standardafvigelse (---). Efter (Gerretsen, 1979).

### Transmissionskoefficient

Der findes teoretiske oplysninger om lydtransmission mellem bygningsdele, men normalt på en lidt anden form, nemlig udtrykt som en transmissionskoefficient  $\tau_{ij}$ . Denne defineres som forholdet mellem transmitteret og indkommende bøjningsbølge-energi. Ved at opstille en energibalance for plade  $j$ , og antage at energien i plade  $i$  udbredes ligeligt i alle retninger (to-dimensionalt diffust bøjningsbølge-lydfelt) fås følgende sammenhæng

$$\begin{aligned}
 P_{ij} &= \frac{1}{\pi} m_i \langle \tilde{v}_i^2 \rangle 2 c_{Bi} l_{ij} \tau_{ij} \\
 &= 2 \pi f m_j \langle \tilde{v}_j^2 \rangle S_j \eta_j
 \end{aligned} \quad (5.21)$$

hvor  $c_{Bi}$  er fasehastigheden af bøjningsbølger i plade  $i$ ,  $l_{ij}$  er kantlængden, der forbinder de to plader,  $S_j$  er areal og  $\eta_j$  den totale tabsfaktor for plade  $j$ . Knudepunktsdæmpningen kan findes af

$$\begin{aligned}
 D_{ij} &= 10 \log \frac{\langle \tilde{v}_i^2 \rangle}{\langle \tilde{v}_j^2 \rangle} \\
 &= 10 \log \frac{1}{\tau_{ij}} + 10 \log \frac{m_j c_{Bj}}{m_i c_{Bi}} + 10 \log \alpha_j
 \end{aligned} \quad (5.22)$$

hvor sidste led er et udtryk for energitabene i plade  $j$

$$\alpha_j = \frac{\pi^2 f S_j}{c_{Bj} l_{ij}} \eta_j \quad (5.23)$$

Sidste led i (5.22) vil normalt kunne negligeres på grund af den ret store unøjagtighed, der i øvrigt forekommer. Ved hjælp af (2.5) kan (5.22) således skrives

$$D_{ij} \approx 10 \log \frac{1}{\tau_{ij}} + 10 \log \left( \frac{m_j}{m_i} \sqrt{\frac{f_{ci}}{f_{cj}}} \right) \quad (5.24)$$

For samme materiale i plade  $i$  og  $j$  kan sidste led yderligere forenkles til et forhold mellem pladetykkelser  $h_i$  og  $h_j$

$$D_{ij} \approx 10 \log \frac{1}{\tau_{ij}} + 15 \log \frac{h_j}{h_i} \quad (5.25)$$

I figur 5.6 og 5.7 er gengivet transmissionskoefficienter for nogle forskellige typer af samlinger. Disse er krydssamlinger og samlinger mellem tre eller to plader. Med den i figur 5.8 anvendte nummerering består hjørnesamlingen kun af plade 1 og plade 2, mens T-samlingen enten mangler plade 3 eller plade 4.

Som abscisse i figur 5.6 og 5.7 er anvendt forholdet

$$\psi = \frac{m_2 f_{c1}}{m_1 f_{c2}} \quad (5.26)$$

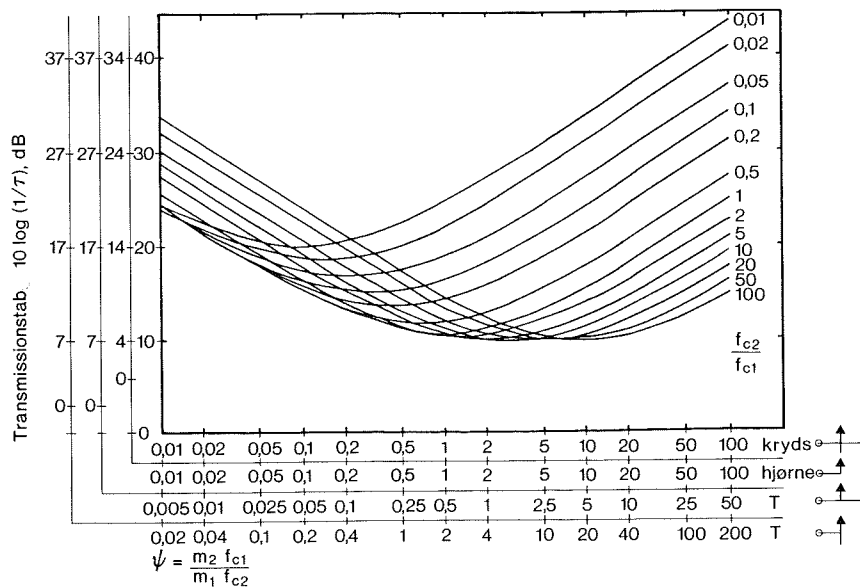
hvor  $m$  er masse per arealenhed og  $f_c$  kritisk frekvens. I kryds- og T-samlinger er det forudsat, at plade 3 er lig plade 1, og plade 4 er lig plade 2.

For samme materiale bliver  $\psi$  kun afhængig af pladetykkelserne  $h_1$  og  $h_2$

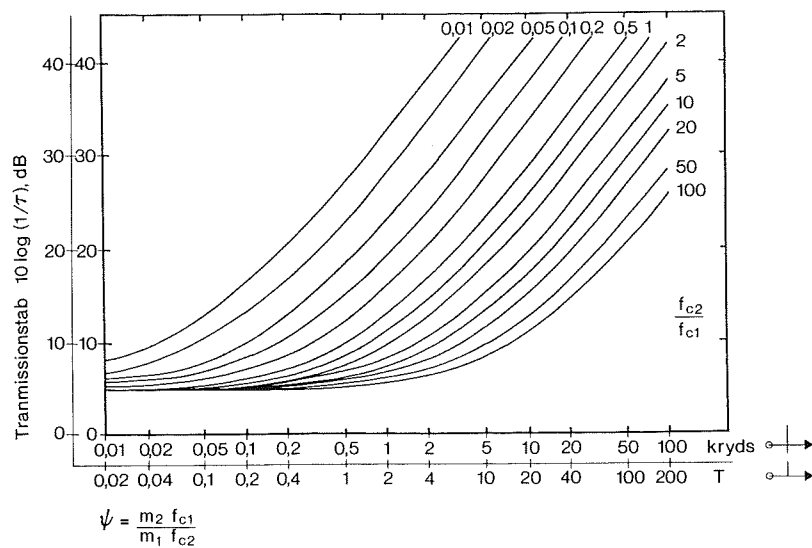
$$\psi = \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^2 \quad (5.27)$$

Tilsvarende bliver parameteren i de to diagrammer

$$\frac{f_{c2}}{f_{c1}} = \frac{h_1}{h_2} \quad (5.28)$$



Figur 5.6. Teoretisk bestemte transmissionskoefficienter fra plade 1 til plade 2 ( $\tau_{12}$ ) for fire forskellige typer af knudepunkter. Efter (Craik, 1981).



Figur 5.7. Teoretisk bestemte transmissionskoefficienter fra plade 1 til plade 3 ( $\tau_{13}$ ) for en krydssamling og en T-samling. Efter (Craik, 1981).

## Andre bølgetyper

Ud over bøjningsbølger vil også andre bølgetyper, f.eks. longitudinalbølger kunne indgå i lydtransmissionen i bygninger, men selve lydudstrålingen vil altid ske fra transversalbølger. Det er imidlertid ikke muligt at inddrage andre bølgetyper på en rimeligt enkel måde, hvilket bl.a. skyldes, at bølgelængderne typisk er store i forhold til bygningsdelenes dimensioner, se (de Vries et al., 1981).

## Beregning af randtab

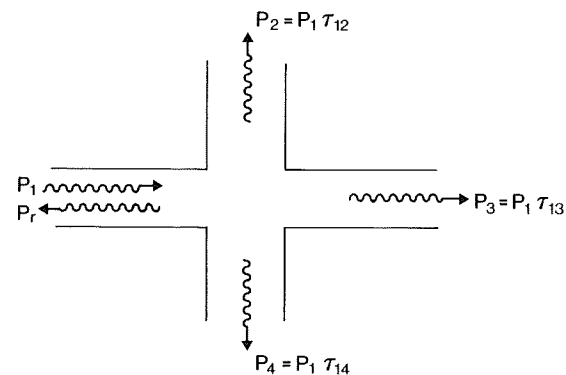
Som vist på skitsen figur 5.8 vil den indkommende bøjningsbølgeeffekt dels transmitteres og dels reflekteres ved et knudepunkt.

Absorptionskoefficienten kan derfor beregnes ved at summere transmissionskoefficienterne

$$\alpha = \frac{P_2 + P_3 + P_4}{P_1} = \tau_{12} + \tau_{13} + \tau_{14} \quad (5.29)$$

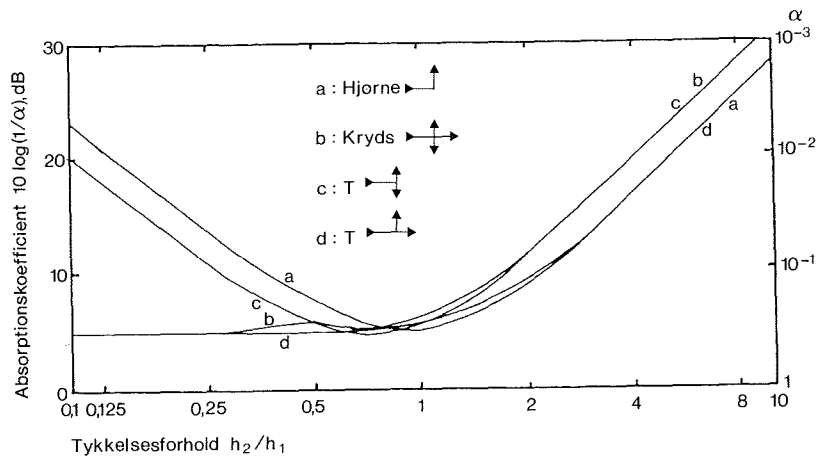
Dette er gjort for de simple typer af knudepunkter, og resultatet er afbildet i figur 5.9. Hvis tykkelsesforholdet ikke afviger for meget fra 1, ses at  $\alpha \approx 0,2-0,3$ .

Absorptionskoefficienten kan indgå i en samlet beregning af randtabene i en plade ved hjælp af den tidligere angivne formel (2.19), idet der summeres over alle pladens kanter.



Figur 5.8. Krydssamling med angivelse af den indkommende bøjningsbølgeeffekt  $P_1$  og dens fordeling i de tilstødende plader.





Figur 5.9. Diagram til bestemmelse af absorptionskoefficienten for bøjningsbølge ved randen under forudsætning af samme plademateriale. Knudepunktstypen er parameter og tykkelsesforholdet  $h_2/h_1$  abscisse, idet  $h_2$  refererer til den eller de tværgående plader. Efter (Craik, 1981).

## TREDJE DEL

### Lydisolation i praksis

En lydteknisk korrekt udførelse af bygningsdele med alle tilhørende samlinger er en betingelse for at opnå den størst mulige lydisolation i forhold til den teoretisk tilsigtede eller maksimalt opnåelige isolation.

Den resulterende lydisolation af bygningsdele som dæk og vægge – og dermed den samlede lydisolation af rum – er meget ofte ringere end den isolation, der under de givne forhold og med de anvendte materialer og konstruktioner burde være opnået. Årsagerne hertil kan – foruden almindeligt byggesjusk – dels være lydteknisk utilstrækkelig detailprojektering, dels at tilsyneladende betydningsløse fejl ved udførelsen af især samlinger mellem bygningsdele har medført øget lydtransmission og hermed reduceret lydisolation.

Denne del af bogen indeholder – til brug for arkitekter, ingeniører og andre teknikere, der forestår projektering og udførelse af byggeri – vejledninger om, hvorledes de væsentligste bygningsdele som fundamenter, dæk, vægge, gulve, lofter, døre og vinduer med tilhørende samlinger bør udføres for, under forskellige forudsætninger, at give den tilsigtede eller størst mulige lydisolation. Desuden omtales hvilke hensyn, der bør tages ved udførelsen af almindelige bygningsinstallationer for at modvirke forringelse af den opnåelige lydisolation.



## Fundamenter, dæk og vægge

Fundamenter har normalt større tykkelse end dæk og vægge. Flanketransmission gennem fundamenter er derfor forholdsvis mindre end gennem dæk og vægge og i praksis uden betydning for dæk og vægges lydisolations, når denne er mindre end 50 dB.

Etageadskillelser med støbte dæk fungerer i de fleste bygninger som enkeltkonstruktioner ofte med gulve virkende som forsatskonstruktioner. Derfor omtales de lydtekniske forhold for dæk her og for gulve i afsnittet om forsatskonstruktioner. Traditionelle træetageadskillelser virker i praksis som enkeltkonstruktioner.

Bærende og ikke-bærende vægge er lydteknisk set kun forskellige med hensyn til deres samlinger med tilstødende bygningsdele. Dobbelt ydervægge og dobbelte indervægge med massive bøjningsstive enkeltvægge adskiller sig derimod fra hinanden ved, at ydervæggene normalt har bindere mellem for- og bagvæg, mens indervæggene ikke har. Ikke-bærende vægge kan udføres som pladebeklædte vægge med enkelt eller dobbelt skelet. Afhængig af væggenes konstruktion og materiale og forudsat korrekt udførelse kan der med enkeltvægge opnås lydisolations fra 30 dB til knap 50 dB og med dobbeltvægge indtil ca. 65

dB. Større lydisolations kan kun opnås med særlige konstruktioner.

### Fundamenter og terrændæk

Fundamenter overfører lasten fra en bygning til jord i frostfri dybde. Terminologien *terrændæk* benyttes her generelt for *dæk på jord*, uanset om dækket ligger i terrænhøjde eller er et kælderdek. Fundamenters tykkelse er normalt større end de understøttede vægges, og fundamentmaterialets densitet er i reglen større end eller lige så stor som væggenes. Desuden er fundamenter i de fleste tilfælde omgivet af jord, der virker som en medsvingende tung masse, hvortil der afledes lydenergi. Lydtransmission gennem fundamenter er derfor almindeligvis uden betydning for enkeltkonstruktioners luftlydisolation mellem naborum, men normalt ikke for dobbeltkonstruktioners luftlydisolation eller for isolation mod bygningslyd.

Transmission af *bygningsslyd* gennem fundamenterne kan reduceres ved hjælp af *adskillelsesfuger* med passende placering og afstande. Fugerne, der bør være 10–20 mm, udfyldes med f.eks. mineraluld og tætnes med fugemasse.

Adskillelsen mellem fundamenter til delvægge bør mindst være 50 mm og bør fortsætte gennem ydervæggsfundamenter og krydsende fundamenter med mindst 10 mm fuge.

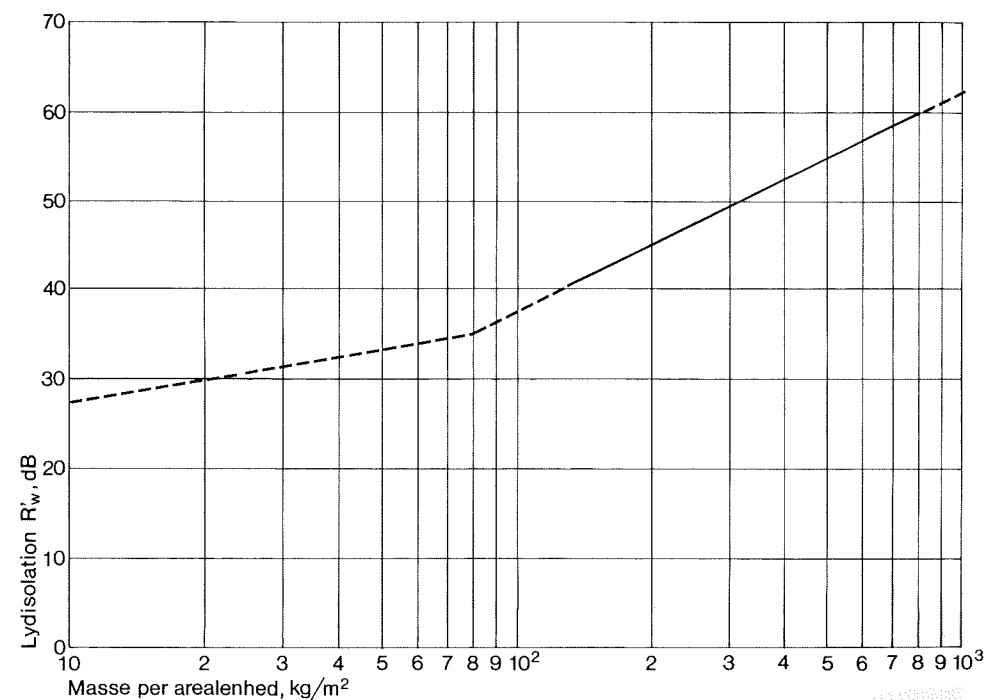
Terrændæk er *betondæk*, der som regel støbes på varmesoleringslag udlagt på drænlæg. Tidligere blev de udstøbt direkte på drænlæg. Dækykkelsen er 80 til 120 mm, og den kritiske frekvens ligger inden for det ugunstige frekvensområde, se figur 2.4.

For at reducere lydtransmission fra terrændæk via fundamenter til vægge bør der udføres lodrette fuger på ca. 10 mm mellem dæk og fundamenter. An-

vendes terrændæk gennemgående under dobbeltvægge, skal der udføres fuger under dobbeltvæggenes mellemrum. Der bør også udføres fuger i varmesoleringslag. Fuger i dæk bør udfyldes med mineraluld og tætnes med fugemasse.

### Støbte dæk

Massive støbte dæks luftlydisolation afhænger af deres masse per kvadratmeter dækareal, figur 6.1. Betegnelsen *støbte dæk* omfatter både in situ støbte og præfabrikerede dæk og såvel massive dæk af beton eller letbeton som hule



Figur 6.1. Lydisolation  $R_w$  for massive bygningsdele som funktion af massen per arealenhed. Kurvens gyldighed for bygningsdele med en masse større end  $150 \text{ kg/m}^2$  forudsætter flankerende bygningsdele med masser på ca.  $300 \text{ kg/m}^2$ . Den optrukne del er empirisk veldokumenteret, mens den punkterede del må anses for mindre sikker.

dæk udført af elementer af beton, tegl el.lign. Trinlydniveauet for støbte dæk afhænger af dæktykkelsen og for terændæk også af underlagsmaterialets elasticitet. Men også densitet og elasticitetsmodul har betydning for dækkets lydegenskaber. Eksempelvis er trinlydniveauet for 180 mm letbetondæk ca. 15 dB større end for 180 mm betondæk, se figur 2.23. For at opnå samme trinlydniveau for etageadskillelserne skal gulve på letbetondæk derfor have 15 dB større trinlyddæmpning end gulve på betondæk. Flanketransmission i massive dæk svarer nøje til transmissionen i massive vægge med tilsvarende masse per arealenhed.

For dæk med hulrum er luftlydisolationen nogenlunde som for massive dæk af samme materiale og med samme masse per arealenhed. For både hule og massive dæk er gulvets trinlyddæmpning afgørende for trinlydniveauet.

Lydtransmissionen i hule dæk påvirkes af hulrummene. Lyddæmpningen i normale hule elementdæk er mindre i elementernes længderetning parallelt med hulrummene end vinkelret herpå. Flanketransmissionen er større, når lette vægge med stor luftlydisolation opstilles på tværs af længderetningen end hvis de opstilles parallelt med denne og desuden forskudt for udsparinger. I sidste tilfælde vil flanketransmissionen stort set være den samme i hule dæk som i massive dæk med samme tykkelse.

Luftlydisolation og trinlydniveau for ribbedæk og krydsribbedæk afhænger primært af pladetykkelsen. Ribbedæk med plan underside og overliggende ribber benævnes trugdæk. Nogle typer af trugdæk udstøbes, når elementerne er placeret. Hvis betonen ikke overalt har vedhæftning til elementerne, kan dækkene give forringet luftlydisolation og

trinlydniveau i forhold til massive dæk med tilsvarende tykkelse.

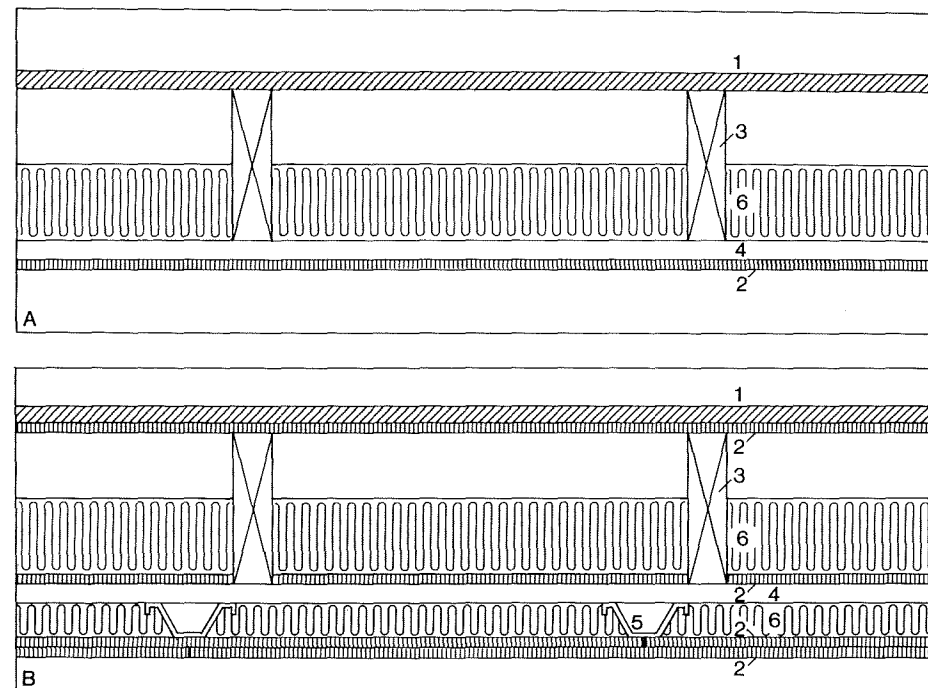
Fuger mellem dækelementer skal udstøbes tæt. Dæk og fuger skal renses før udstøbning.

### Træetageadskillelser

Træetageadskillelser anvendes hovedsagelig i fritliggende og sammenbyggede småhuse og udføres normalt med bjælkelag af planker, indskud af mineraluld, og ofte med spånpladegulv og loft af plader eller brædder på spredt forskalling. Etageadskillelser af denne type har en luftlydisolation fra 30 til 40 dB, der afhænger dels af anvendte materialer dels af udførelse af samlinger med omgivende vægge. Loftsbeklædninger udført med plader i store formater giver større tæthed end bræddebeklædning.

En større lydisolation kan opnås, hvis etageadskillelser udføres som *dobbeltkonstruktioner* med gulve og lofter som helt adskilte, selvstændige konstruktioner. Modifikationer heraf er etageadskillelser med svømmende gulve eller elastisk ophængte underlofter, se figur 6.2.

Den lodrette flanketransmission er større i vægge, der bærer træetageadskillelser, end i vægge, som bærer betondæk. Det skyldes, at træbjælkelag i modsætning til betondæk ikke giver nogen knudepunktsdæmpning af betydning.



Figur 6.2. Eksempler på træetageadskillelser. Lodrette snit 1:10.

A. Enkeltkonstruktion med gulv og loftsbeklædning fastgjort til spredt forskalling under planker.

B. Delvis adskilt konstruktion - gulv fastgjort til planker og underloft ophængt i spredt forskalling under planker.

1. Brædde- eller pladegulv.

2. Gipskartonplader.

3. Bjælkelag af planker.

4. Spredt forskalling.

5. Monteringsprofil ophængt i bøjler fastgjort til forskalling og planker eller monteringsprofil per 600 mm højde på mindst 45 mm fastgjort i forskalling.

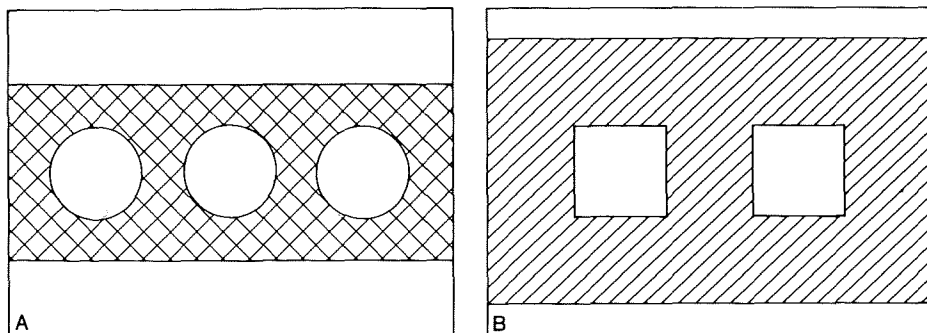
6. Mineraluld.

### Støbte og murede vægge

Enkeltvægges luftlydisolation afhænger først og fremmest af deres masse per kvadratmeter vægareal, se figur 6.1. Kurven er empirisk bestemt og gælder under de angivne forudsætninger med god tilnærmelse for massive vægges lydisolation. For andre vægges lydisolation, fx enkeltvægge med udsparinger,

kan der være betydelige afvigelser herfra. Både materialevalg og arbejdsudførelse kan være medvirkende årsag til utætheder eller uønskede hulrum i en væg. For at opnå den maksimale lydisolation skal vægge være uden utætheder og hulrum, der altid vil forringe lydisolationen.

Hvis der er udsparinger eller kanaler i en væg, må vægtykkelsen øges i væg-



Figur 6.3. Eksempler på vægge med kanaler. Vandrette snit 1:10.

A. Væg af beton, afstande mellem kanaler og mellem kanaler og vægssider mindst 55 mm.

B. Væg af mursten, afstande mellem kanaler og mellem kanaler og vægssider mindst 1/2-sten.

gens fulde udstrækning. I figur 6.3 er vist eksempler på beton- og murstensvægge med kanaler.

*Koincidence* kan reducere vægges lyd-isolation, hvorfor den kritiske frekvens  $f_c$  bør ligge uden for frekvensområdet 90–3550 Hz. Figur 2.4 viser sammenhængen mellem kritisk frekvens og vægtykkelser for forskellige materialer og angiver desuden det mest ugunstige frekvensområde 160–2000 Hz.

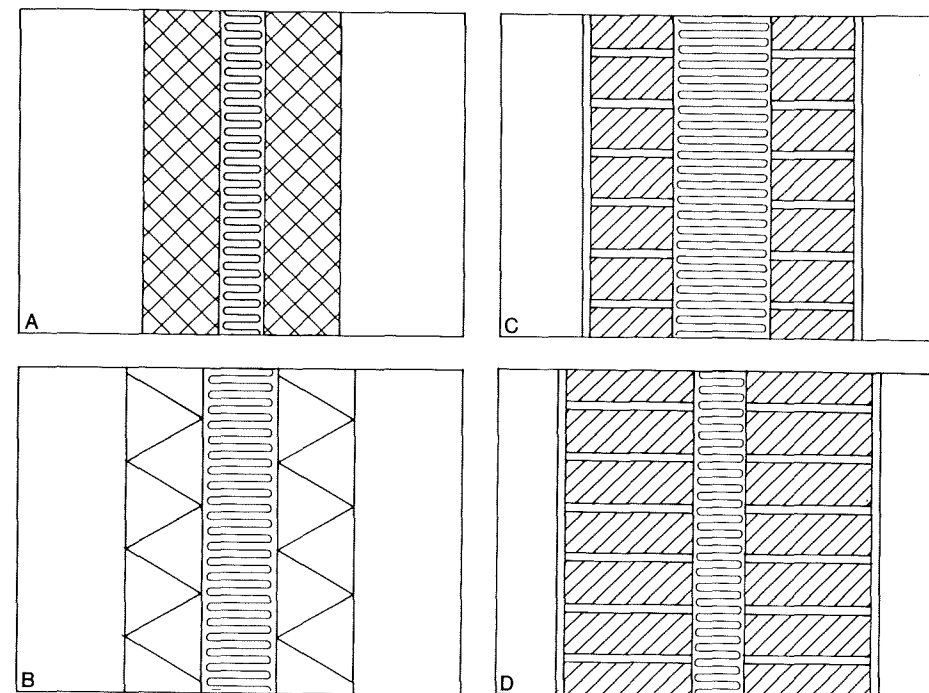
En *dobbeltvæg* defineres som bestående af to enkelte delvægge, der er adskilt med et mellemrum og uden indbyrdes forbindelse. Lydisolationen for en dobbeltvæg er normalt væsentlig større, end den er for en enkeltvæg med samme masse som dobbeltvæggen, men hvis delvæggene ikke er helt adskilte, kan lydisolationen i værste fald være mindre end for enkeltvæggen. F.eks. kan lydisolationen for en dobbeltvæg af to ikke helt adskilte 1/2-stensvægge være mindre end 1-stensvæggen, fordi koincidencefrekvensen for dobbeltvæggenes delvægge ligger i det ugunstige frekvensområde i modsætning til 1-stensvægge-

nes koincidencefrekvens. Traditionelle 290 mm og 350 mm hulmure med sten- eller trådbindere er lydteknisk set ikke dobbeltvægge, men enkeltvægge med en lydisolation som 230 mm massive vægge eller lidt mindre.

I figur 6.4 er vist eksempler på dobbeltvægge med mineraluld eller tilsvarende lydabsorberende materiale mellem delvægge. Tykkelsen af det lydabsorberende materiale bør være ca. 5 mm mindre end afstanden mellem delvæggene.

I dobbeltvægge kan foruden koincidence forekomme *resonans*. I figur 3.2 er for forskellige afstande mellem delvægge i dobbeltvægge vist sammenhængen mellem resonansfrekvenser og delvæggenes masser, der er forudsat ens for begge delvægge i en dobbeltvæg. Resonansfrekvensen for andre dobbeltvægge kan beregnes af (3.4).

Lydisolationen mellem sammenbyggede boliger afhænger foruden af fællesvæggenes masse og konstruktion også af de tilstødende bygningsdele og væggenes tilslutning hertil. I tabel 6.1 er



Figur 6.4. Eksempler på dobbeltvægge med delvægge af beton eller mursten og med mineraluld i mellemrum. Lodrette snit 1:10.

A. Delvægge af 100 mm beton, mellemrum mindst 60 mm.

B. Delvægge af 100 mm letbeton, mellemrum mindst 100 mm.

C. Delvægge af halvstensmure, mellemrum mindst 130 mm.

D. Delvægge af bredstensmure, mellemrum mindst 70 mm.

for enkeltvægge af beton og mursten i forskellige tykkelser anført målte eller skønnede værdier for væggenes maksimale lydisolation  $R_{w'}$ . Desuden er anført middelværdier for væggenes lydisolation  $R_w'$  målt under praktiske forhold. I tabel 6.2 er vist tilsvarende værdier for dobbeltvægge. Vægge med konstaterede utætheder ved tilslutninger til tilstødende bygningsdele indgår ikke i de benyttede resultater.

#### Enkeltvægge af beton, letbeton og mursten

I betonvægge støbt på stedet opstår der normalt ikke tæthedsproblemer, når støbeformen er renset før udstøbningen, og når betonblandingen har den rette sammensætning og konsistens og udstøbes og bearbejdes korrekt.

I betonvægge af elementer skal samlinger mellem elementer udføres såle-

Tabel 6.1. Enkeltvægges lydisolations  $R_w$  og  $R'_{w,middel}$ .

Vægmateriale, densitet vægtykkelse	Målt i laboratorium eller skønnet $R_w$ , dB	Middelværdi af målinger i bygninger $R'_{w,middel}$ dB	Standardafvigelse s, dB	Antal måleobjekter
Beton, ca. 2300 kg/m <sup>3</sup> 150 mm	59			
Hovedgruppe: Væggene er uden konstaterede utætheder		52,7	2,7	174
Delgruppe: Flanketransmission skønnes betydningsløs og væggene er uden utætheder		55,0	1,9	71
Restgruppe: Hovedgruppe minus delgruppe		51,1	1,8	103
Beton ca. 2300/m <sup>3</sup> 250 mm	62	57,4	2,0	80
Mursten, 1600–1800 kg/m <sup>3</sup> 230 mm, puds på begge sider	57			
Hovedgruppe: Væggene er uden konstaterede utætheder		52,6	2,6	59
Delgruppe: Flanketransmission skønnes betydningsløs og væggene er uden utætheder		55,7	1,5	15
Restgruppe: Hovedgruppe minus delgruppe		51,6	2,1	44
Mursten, 1600–1800 kg/m <sup>3</sup> 350 mm, puds på begge sider	61	58,2	3,0	19

des, at der opnås varig tæthed; især skal samlingernes begrænsningsflader vandes før udstøbningen og udstøbningsmørtlen svinde mindst muligt. I praksis bliver udstøbte samlinger med lille tværsnitsareal mindre tætte end samlin-

ger med større tværsnitsareal. I samlinger mellem brede vægelementer kan der alligevel forekomme svindrevner i udstøbningen, og der må i så fald eftertættes med fugemasse for at opnå en varig tæthed.

Tabel 6.2. Dobbeltvægges lydisolations  $R_w$  og  $R'_{w,middel}$ . Standardafvigelse og antal er ikke anført, når antallet af objekter er mindre end 10.

Vægmateriale, densitet vægtykkelse, tykkelse af delvægge	Mineraluldsindlæg	Målt i laboratorium eller skønnet $R_w$ , dB	Middelværdi af målinger i bygninger $R'_{w,middel}$ dB	Standardafvigelse s, dB	Antal måleobjekter
Beton, ca. 2300 kg/m <sup>3</sup> 250 mm, 2×100 mm	50 mm	65	61,1	4,0	12
Mursten, 1600–1800 kg/m <sup>3</sup> 410 mm, 2×bredsten, 168 mm	50 mm	65	61	-	-
350 mm, 2×halvsten, 108 mm	125 mm	60	59	2,7	10
290–350 mm med bindere, 2×halvsten, 108 mm	50–125 mm		51,7	3,2	43

Ved støbning af betonvægge i forme og ved montage af vægelementer efterlader de anvendte afstivnings- og justermidler som regel gennemgående huller, der fyldes enten med cementmørtel alene eller med tæt stoppet mineraluld og 20–30 mm cementmørtel i begge sider af vægge.

I vægge af etagehøje letbetonelementer med limede samlinger er der normalt ikke utætheder i fugerne. Derimod har letbeton ofte for ringe tæthed, hvorfor overfladebehandling kan være nødvendig for at opnå tilstrækkelig lufttæthed og dermed maksimal luftlydisolation. Letbetonvægges kritiske frekvens ligger normalt i det ugunstige område, se figur 2.4. Ved anvendelse af specielle limty-

per, der også kaldes for elastiske lime eller lydlime, til sammenlimning af elementer kan koincidenseffekten i nogle tilfælde reduceres betydeligt, men helt elimineres kan den ikke. Størrelsen af den kritiske frekvens kan også indvirke på den vægtede lydisolations  $R'_{w,m}$ , f.eks. er lydisolationsen for en 70 mm letbetonvæg ofte større end for en 100 mm væg.

Vægge af letbetonblokke skal for at opnå maksimal lydisolations mures eller limes med fyldte fuger.

Tætte vægge af letkonstruktionsbeton, densitet større end 1400 kg/m<sup>3</sup>, kan forventes at give en lydisolations, der svarer til deres masse per arealenhed, se figur 6.1. Dobbeltvægge af letkonstruktionsbeton med densitet over 1800

kg/m<sup>3</sup> kan stort set sammenlignes med dobbelte betonvægge med lidt mindre tykkelse af delvæggene.

Tegl- og kalksandstensvægge skal mures med *fyldte fuger* for at opnå maksimal lydisolations. Lydisolationen for 1-stensvægge af massive sten med en densitet på ca. 1700 kg/m<sup>3</sup> muret med fyldte fuger og pudset på begge sider vil reduceres ca. 1 dB, hvis væggene enten udføres uden puds, f.eks. som blanke mure eller udføres med mangelhulsten med 10 pct. hulrum. Hvis væggene udføres både med mangelhulsten og med blanke mure, vil deres lydisolations kun reduceres godt 1 dB, skønt deres masse er reduceret med ca. 16 pct. Hvis væggenes masse derimod reduceres med ca. 8 pct. ved, at studs-fugerne ikke fyldes ud, så vil væggenes lydisolations aftage mellem 5 og 10 dB afhængigt af pudslagets tykkelse og tæthed. Koincidens i tegl- og kalksandstensvægge har i praksis kun betydning for 1/2-stensvægge.

#### *Dobbeltvægge af beton, letbeton og mursten*

Dobbeltvægges resonansfrekvens bør i princippet ligge under 50 Hz. Afstanden mellem delvæggene i dobbeltvægge bør derfor være større end ca. 20 mm for de tungeste vægge og op til ca. 100 mm for de letteste. Erfaringer fra praksis viser, at afstanden mellem delvægge altid bør være større end 50 mm, og for at modvirke stående lydølger i hulrummet, bør det udfyldes med mineraluld. Mineraluldstypen har i teorien ikke væsentlig indvirkning på dobbeltvægges lydisolations, men i praksis bør der til vægge af letbeton og mursten anvendes mineraluldstyper med stor tæthed.

I dobbeltvægge med delvægge med tykkelser, der kan medføre koincidens i

det ugunstige frekvensområde, se figur 2.4, kan større afstand mellem delvægge og udfyldning af mellemrum med mineraluld med stor *akustisk strømningsmodstand*, DIN 52213, reducere koincidens-effektens virkning på dobbeltvæggenes lydisolations. Mineralulden må ikke være i spænd mellem delvæggene. I dobbeltvægge af letbeton og i dobbeltvægge af mursten med halvtstens delvægge bør der anvendes stive mineraluldsplader og en mindsteafstand mellem delvægge på 100 mm, fordi risikoen for utætheder i teglvægge og koincidens i letbetonvægge er forholdsvis stor.

#### **Skeletvægge**

Skeletvægges lydisolations er normalt større end svarende til deres masse og afhænger af skelettets og beklædningspladernes stivhed, af pladernes masse og for dobbeltvægge af afstanden mellem pladebeklædningerne.

#### *Skeletvægstyper*

*Skeletvægge* kan udføres med skelet af stål eller træ. Stålskiner eller træstolper er normalt mindst 45 mm, men stabilitetshensyn kan gøre større dimensioner nødvendige. Medens skinne- eller stolpedimensionerne almindeligvis har ringe indvirkning på vægges lydisolations, har *stolpeafstanden* ofte en betydelig indvirkning herpå, se figur 3.9. Stolpeafstanden bør i princippet være så stor som mulig, men må i praksis begrænses af stabilitetshensyn. Afstanden bør ikke være under 600 mm. For en pladebeklædt enkelt træskeletvæg formindskes lydisolationsen mindst 2 dB, hvis stolpeafstanden ændres fra 600 til

400 mm, og den kan øges ca. 3 dB, hvis afstanden ændres fra 600 til 1200 mm. Det sidstnævnte er dog ikke tilladt af brandtekniske hensyn. Løsholter mellem stolper bør kun anvendes, hvor de er nødvendige af stabilitetshensyn. Dobbelt skeletvægge med samme tykkelse som enkelte skeletvægge har større lydisolations end enkeltvæggene, og lydisolationsen øges, når afstanden mellem dobbeltvæggenes to delvægge øges. I figurerne med træskeletvægge er stolper vist 50 × 50 mm, men principperne er de samme for opstilling og tætning af vægge af 50 × 100 mm planker.

#### *Skeletkonstruktioner*

*Skeletvægge* udføres i princippet ens af træ og stål, figur 6.5. En *træskeletvæg* består af en fodrem, en toprem og stolper per 600 mm. I en *stålskeletvæg* anvendes betegnelserne fodskinne, topskinne og lodskinne samt vægskinne for lodskinne mod væg.

En dobbelt træskeletvæg udføres som to adskilte delvægge, der ikke må have fælles fodrem, toprem eller stolper. Afstanden mellem træskeletterne skal overalt være mindst 30 mm, og der må ikke være stive forbindelser mellem dem.

En dobbelt stålskeletvæg udføres bedst som to adskilte delvægge, der ikke må have fælles fodskinne, topskinne, lodskinner eller vægskinner. Afstanden mellem stålskeletterne skal overalt være mindst 10 mm, og der må ikke være stive forbindelser mellem dem.

En stålskeletvæg kan også udføres med fodskinne, topskinne og vægskinner fælles for to adskilte sæt lodskinner, og alligevel lydteknisk virke som en dobbeltvæg. Lodskinnerne skal være indbyrdes forsat og deres bredde bør være

mindst 20 mm mindre end de fælles skinneres bredde.

#### *Tilslutningsfuger*

Tilslutningsfuger mellem skeletvægge og andre bygningsdele bør udføres således, at fugebredden bliver mindst mulig og ikke større end 1/10 af fugedybden, figur 6.5.

Fuger omkring træskeletvægge stoppes i fuld dybde med lydabsorberende materiale, eksempelvis med strimler af 20 mm mineraluld, der sammenpresses til en fugetykkelse på 4–6 mm. For dobbeltvægge gælder dette for hver delvæg.

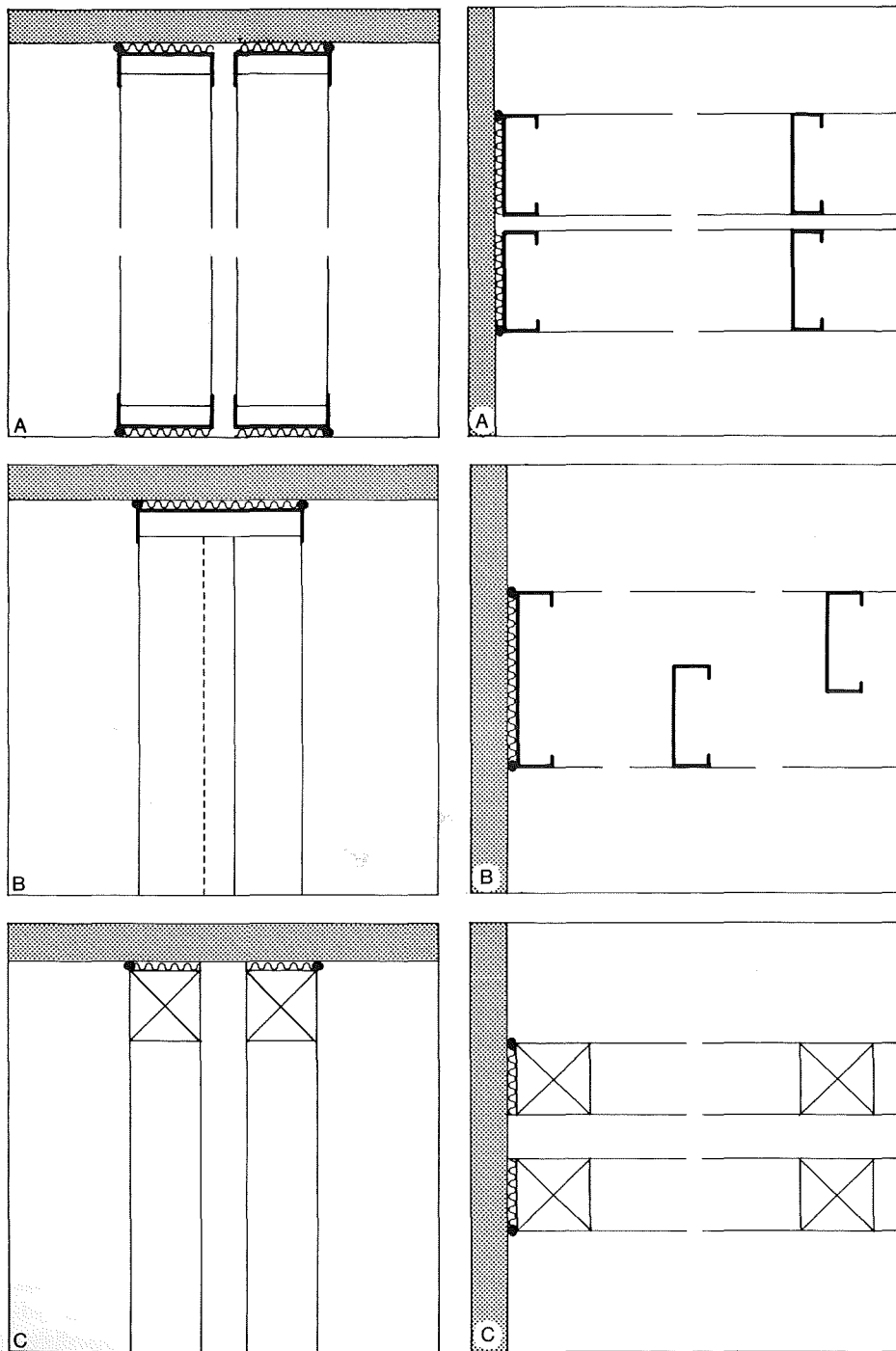
Stålprofilers (fod-, top- og vægskinner) tilslutningsflade er ofte forsynet med en påklæbet filtstrimmel, som yder en tilstrækkelig tæthed mod jævne og glatte flader.

Ujævne tilslutningsflader skal afrettes og skader i puds reparerer før opstilling af vægskellet; det gælder både for skelet af træ og stål. Tilbageiggende fuger i gulv, loft og vægge skal udfyldes, hvor vægskellet skal tilsluttes.

I enkeltvægge med en lydisolations større end 35 dB skal fuger tættes i den ene side med fugemasse. I dobbeltvægge skal fuger tættes med fugemasse i begge delvægges udvendige sider. Tætning med fugemasse kan ikke erstattes med dæk- eller fodlister af træ eller plast.

#### *Mineraluldsindlæg*

Skeletvægge udføres normalt med mineraluldsindlæg, som forøger både væggenes lyd- og varmeisolations. I enkeltvægge kan forskellen mellem lydisolationsen med hulrummet udfyldt med mineraluld og uden mineraluld være indtil ca. 6 dB. Forskellen mellem lydisolationsen ved hel og halv udfyldning



af hulrummet kan være 1–2 dB. Mineraluldstypen har ingen væsentlig indvirkning på enkeltvægges lydisolations, mens en type med stor densitet kan forøge lydisolations i dobbeltvægge. Tæt mineraluld sikrer, at væggenes lydisolations ikke aftager væsentligt på grund af enkelte huller i pladebeklædningen fra søm eller skruer. Mineraluldsindlæg i en væg med enkeltskelet bør være 5 mm tyndere end afstanden mellem pladebeklædningerne og fastholdes til den ene beklædning. I en dobbeltvæg må mineraluldsindlæggene i de to delvægge ikke berøre hinanden. Hvis afstanden mellem de to vægskelletter er øget for at give plads til et lag mineraluld mellem dem, skal dette lag være 5 mm tyndere end afstanden mellem vægskelletterne og fastholdes til det ene skelet.

#### Pladebeklædninger

Til beklædning af skeletvægge kan anvendes gips-, krydsfiner-, spån- eller træfiberplader. Alle typer af beklædningsplader til skeletvægge skal opfylde statiske og brandtekniske krav.

Da lydisolations for en væg øges med massen per arealenhed, bør pladerne ikke være for lette, men samtidig må de ikke have for stor stivhed, der kan nedsætte lydisolations ved koincidens,

figur 2.4. Dette betyder, at pladetykkelsen for de nævnte materialer i princip højest bør være 10 mm, og at der i stedet for tykkere plader kan anvendes to eller flere pladelag på hver side af både enkelt- eller dobbeltvægge. Pladelagene må ikke limes sammen, da de i så fald virker som én plade med lagenes samlede tykkelse. Pladerne fastgøres til skeletter med søm eller skruer, men ikke med lim, idet der herved skabes en stiv forbindelse mellem skelet og plader, der giver en større lydtransmission end de mindre stive søm- og skrueforbindelser.

Plader bør opsættes i hele stykker mellem gulv og loft, og hvis der anvendes to pladelag, bør pladesamlinger i de to lag forsættes 600 mm.

I de følgende afsnit er kun omtalt skeletvægge med gipspladebeklædning, men andre pladematerialer anvendes efter de samme principper.

#### Specielle flanketransmissionsforhold i ydervægge

En varmeisolerende *ydervæg* består normalt af en udvendig væg, *forvæggen*, og en indvendig væg, *bagvæggen*, hvor imellem varmeisoleringen anbringes. I murede ydervægge kaldes væggene henholdsvis *formur* og *bagmur*. For- og bagvægge er normalt forbundet ind-

Figur 6.5. Dobbelte træ- og stålskeletter. Fugetykkelse mellem skelet og væg eller dæk højst  $1/10$  af skelettykkelsen og udfyldt med mineraluld. Afstanden mellem stolper i et delskelet maks. 600 mm. Pladebeklædning og mineraluld er ikke vist. Lodrette og vandrette snit 1:5 (lodrette snit venstre spalte).

A. Dobbelt stålskelet med delskeletter adskilt mindst 10 mm.

B. Dobbelt stålskelet med fod-, top- og vægskinner fælles for to adskilte sæt lodskinner, indbyrdes forskudt 300 mm. Afstand mellem stolper og pladebeklædning til modsatte side mindst 20 mm.

C. Dobbelt træskelet med delskeletter adskilt mindst 30 mm.



byrdes af stabilitetshensyn, og ydervægge fungerer derfor ikke som dobbeltvægge i lydteknisk forstand. Ydervægge udføres ofte med for- og bagvægge af forskellige materialer og ofte af præfabrikerede ydervægselementer. Ydervægges lydisolations er stort set som indervægges med samme masse per arealenhed, men der er forskelle med hensyn til flanketransmissionen. I ydervægge, støbte eller murede, med for- og bagvægge af ens eller forskelligt materiale sker flanketransmissionen først og fremmest i bagvæggene, men lyden transmitteres også fra bagvæggene til forvæggene gennem de faste forbindelser og eventuelt tilbage til bagvæggene i et andet rum. I ydervægge af sandwichelementer er flanketransmissionen mindre end i ydervægge med gennemgående skalmure og med bagvægge af beton, hvis tykkelse svarer til tykkelsen af sandwichelementernes bagstøbning. Dette skyldes dæmpningen i fugerne mellem sandwichelementerne. I ydervægge med udvendig skalmur og indvendig skeletvæg afhænger flanketransmissionen af forbindelsen mellem skalmur og skeletvæg og af den indvendige vægbeklædnings stivhed.

### Samlinger mellem vægge, fundamenter og dæk

Lydtransmission gennem kryds- eller T-samlinger mellem adskillende og flankerende bygningsdele indvirker på lydisolations mellem de adskilte rum. Denne transmission omfatter både lydtransmission gennem utætheder og flanketransmission. I praksis er en række forhold bestemmende for *flanketransmissionen* gennem samlingerne, heriblandt forholdet mellem adskillen-

de og flankerende bygningsdeles masse per arealenhed, de flankerende bygningsdeles tykkelse og masse og om der er adskillende fuger i flankerende bygningsdele eller gennemgående flankerende bygningsdele. Projektering og udførelse af samlinger mellem dobbeltvægge og flankerende bygningsdele er mere kritisk med hensyn til at opnå den maksimale lydisolations, end det er tilfældet med samlinger mellem enkeltvægge og flankerende bygningsdele. For støbte dobbeltvægge med lille densitet, f.eks. letbeton, er samlings udførelse særlig kritiske, idet de rumadskillende vægges lydisolations kan aftage til lydisolations for enkeltvægge med samme masse per arealenhed. Når der ses bort fra virkningen af utætheder, er forskellen mellem lydisolations af lydteknisk optimale samlinger og i praksis udførte samlinger fra 5 til 10 dB for massive enkeltvægge og fra 10 til 25 dB for dobbeltvægge med massive delvægge. Risikoen for fejl i udførelsen af samlinger ved dobbeltvægge med stor densitet er formentlig den samme som ved dobbeltvægge med lille densitet, men alligevel er sandsynligheden for, at brugeren af huset opdager og påtaler fejlen, betydelig større, hvor der er anvendt lette dobbeltvægge, end hvor der er anvendt tunge, jævnfør forskellen i lydisolations for enkeltvægge af 200 mm beton og af 200 mm letbeton, figur 6.1.

I samlinger mellem enkeltkonstruktioner forekommer altid flanketransmission, der vil reducere lydisolations i forhold til den adskillende bygningsdels maksimale lydisolations. Normalt anses en ligeligt fordelt transmission gennem flankerende bygningsdele for acceptabel, når den ikke overstiger transmissionen gennem den adskillende bygningsdel. Den resulterende maksimale luft-

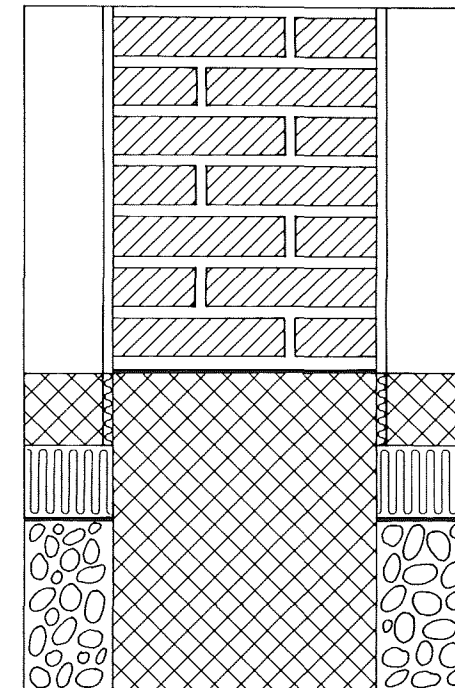
lydisolation vil så være ca. 3 dB lavere end den adskillende bygningsdels maksimale lydisolations. Da der normalt er fire flankerende bygningsdele ved en adskillende bygningsdel, må den transmitterede lydenergi i hver enkelt af de fire samlinger ikke overstige 25 pct. af den energi, der transmitteres gennem den adskillende bygningsdel.

I samlinger mellem dobbelte indervægge og ydervægge med bindere mellem for- og bagvæg er *adskillende fuger* gennem både bag- og forvæg nødvendige, for at flanketransmissionen via ydervæggene kan blive tilfredsstillende lav i forhold til indvendige dobbeltvægges maksimale lydisolations. Hvis der kun udføres adskillende fuger gennem bagvægge, kan flanketransmission via forvægge reducere den maksimalt opnåelige lydisolations med 5–15 dB, afhængigt af de dobbelte indervægges maksimale lydisolations. Flanketransmissionen kan også reduceres med forsatsbeklædninger eller forsatsvægge på vægge og med underlofter på dæk, se kapitel 7.

### Fundamenter

Fundamenter og *terrændæk* bør adskilles med elastiske, lodrette lag af f.eks. mineraluld, se figur 6.6. Herved reduceres transmission af både luftlyd og trinlyd mellem rum.

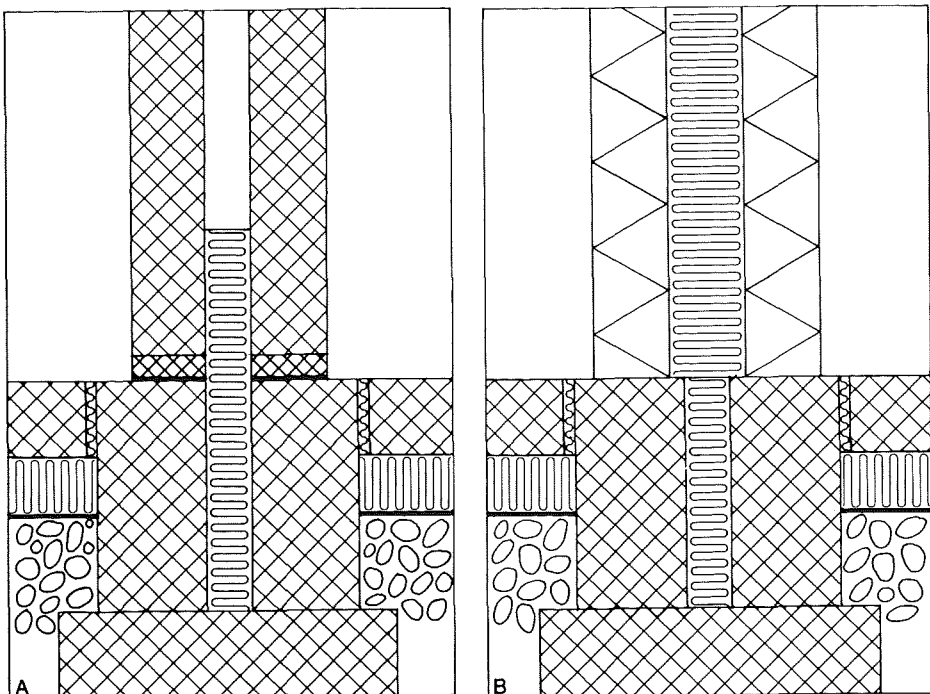
Fundamenter til dobbeltvægge bør udføres som to adskilte fundamenter til en dybde af mindst 0,5 m under overside af dæk, figur 6.7. Adskillelsen kan udføres ved indstøbning af f.eks. hårde mineraluldsplader i den øverste del af fundamenterne. Denne del af fundamenterne kan også udføres af fundamentsblokke, der mures og udstøbes på en fælles fundamentsklods som to selvstændige fundamenter adskilt med 50



Figur 6.6. Samling mellem fundament og terrændæk. Lodret snit 1:10.

mm mineraluld. Adskillelsen i fundamenter for indervægge bør føres gennem ydervæggenes fundamenter.

Ved samlinger mellem dobbeltvægge af beton eller letbeton og fundamenter kan understopningen af vægelementerne medføre, at der skabes forbindelser mellem de to delvægge, fordi der ikke som ved enkeltvægge kan sikres et modhold under stopningens udførelse. Derfor bør der mellem de to fundamenter og op til ca. 0,2 m over fundamentoverside anvendes mineraluld med stor sammentrykningsmodstand, dvs. mineraluld, der sammentrykkes mindre end 10 pct. ved en belastning på 20 kPa.



Figur 6.7. Samlinger mellem fundamenter for dobbeltvægge og terrændæk. Dybde af adskilt fundament mindst 0,3 m under dækoverside og adskillelsen mellem delfundamenter mindst 50 mm. Lodrette snit 1:10.

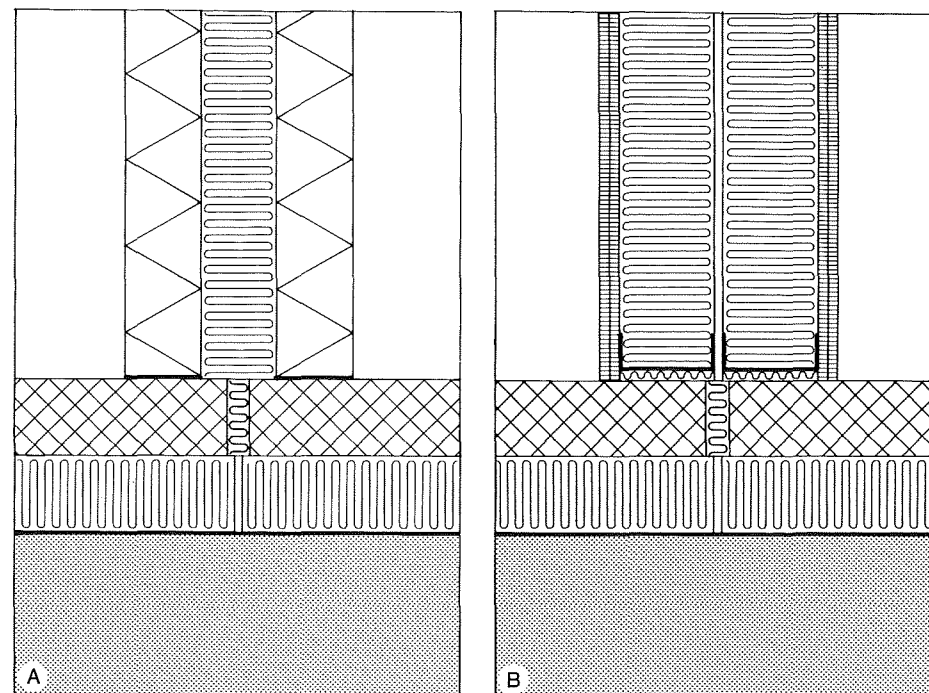
A. Delvægge af 100 mm beton, mellemrum 60 mm, stiv mineraluld indtil 0,2 m over dæk.  
 B. Delvægge af 100 mm letbeton, mellemrum 100 mm.

### Terrændæk

Lette ikke-bærende dobbeltvægge opstilles undertiden på terrændæk uden fundament, figur 6.8. For at opnå den maksimale lydisolering skal der i dækket udføres en mindst 30 mm tyk fuger under dobbeltvæggen, og ud for fugen en samling i isoleringslaget. Ud for fuger i dæk bør der også i ydervæggens fundamenter udføres fuger med mindst 10 mm tykkelse og med en dybde på ca. 0,3 m under dækoverflade.

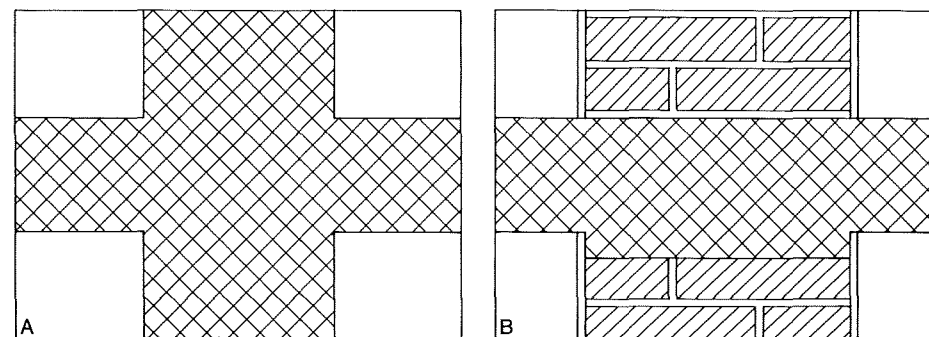
### Etagedæk

Samlinger mellem bærende vægge og pladsstøbte betondæk er vist i figur 6.9. For 150 mm betonvægge og 250 mm murstensvægge bør massen per arealenhed af hule etagedæk ikke være mindre end 310 kg/m<sup>2</sup>. Massive dæk med tykkelser under 150 mm vil reducere den med ovennævnte vægge maksimalt opnåelige lydisolering. Flanketransmissionen er større i pladsstøbte betondæk på murstensvægge end i pladsstøbte dæk



Figur 6.8. Samlinger mellem dobbeltvægge og terrændæk. Adskillelse i dæk mindst 30 mm, i isoleringslag 1-3 mm. Lodrette snit 1:10.

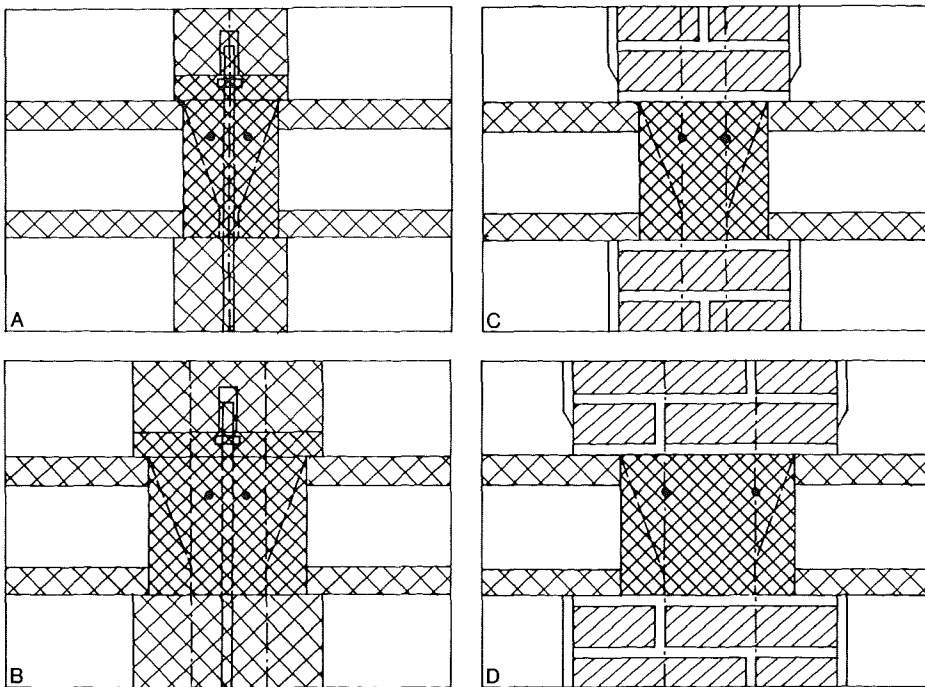
A. Dobbeltvæg af 100 mm letbeton, mellemrum 100 mm.  
 B. Dobbelt stålskeletvæg, mellemrum 10 mm.



Figur 6.9. Samlinger mellem vægge og pladsstøbte betondæk. Lodrette snit 1:10.

A. 250 mm betonvæg og 150 mm pladsstøbt dæk.  
 B. Halvandenstens væg af mursten og 150 mm pladsstøbt dæk.





Figur 6.10. Samlinger mellem bærende enkeltvægge og elementdæk. Lodrette snit 1:10. Neutral zone er områderne beliggende mellem de viste stiplede linier, modullinier.

- A. 150 mm væg af betonelementer, ingen neutral zone.
- B. 250 mm væg af betonelementer, 100 mm neutral zone.
- C. Helstensvæg af mursten, 60 mm neutral zone.
- D. Halvandenstenvæg af mursten, 120 mm neutral zone.

på betonvægge, fordi afledningen af lydenergi fra betondæk er mindre til murstensvægge end til betonvægge, hvor afledningen sker i samme materiale. I praksis vil knudepunktsdæmpningen i homogene, støbte samlinger være større end i samlinger, hvor dæk er gennemgående og i samlinger, hvor ikke-bærende vægge tilsluttes dæk.

Ved udstøbningen af samlinger mellem elementdæk og -vægge i beton, figur 6.10, opstår der ofte huller og sprækker ved dækkens underside, idet ujævnheder i vægelementernes over-

kanter, vindskævheder i dækelementer og små afstande mellem enderne af dækelementernes bæreknafter gør det vanskeligt at udføre tæt udstøbning. Lydisolationen kan dog i de fleste tilfælde forbedres, hvis alle huller og sprækker forvandes og efterfyldes fuldstændig med fed cementmørtel. Almindelig udspartling af fuger vil ikke reducere lydtransmissionen gennem utætte samlinger væsentligt.

I modulprojekteret byggeri med 150 mm vægelementer af beton vil dækelementernes bæreknafter som regel be-

røre hinanden, og udstøbning af samlinger bør her udføres særligt omhyggeligt.

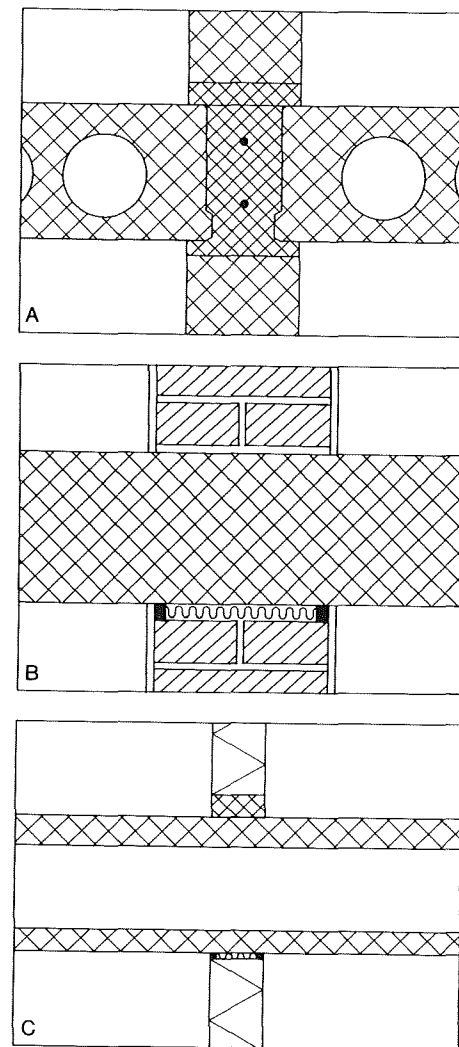
For hule dækelementer med plane endeflader bliver udstøbningsvolumenet mellem dækpladerne endnu mindre end mellem plader med bæreknafter; herved øges risikoen for lydtransmission. Afstanden mellem sådanne plader bør derfor øges for at sikre en effektiv udstøbning.

For vægelementer med større tykkelse end 150 mm kan afstanden mellem knastenderne øges med neutralzoner, f.eks. 30 mm for 180 mm vægge og 100 mm for 250 mm vægge, figur 6.10.

For murede vægge er det normalt ikke vanskeligt at udføre en tilfredsstillende udstøbning mellem dækelementer, idet der normalt er 60 eller 120 mm neutrale zoner mellem elementerne for henholdsvis helstens- og halvandenstenvægge, figur 6.10 B, C og D.

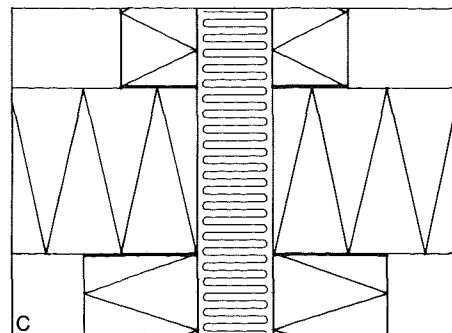
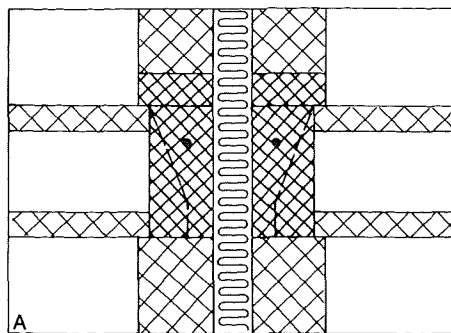
Ved understopning af bærende elementer opstår ofte *utætheder* som følge af dårlig udførelse, især omkring montageboltene, figur 6.10. Utæthederne bliver skjult af gulvbelægningen, hvorefter det kan være vanskeligt at finde dem og meget omkostningskrævende at få dem tætnet. Understopninger bør derfor altid efterses, før gulvene lægges. Understopningen bør udføres i to tempi, først i fuld længde med undtagelse af områder omkring montagebolte, dernæst omkring boltene efter afhærdning af den første stopning og løsning af mørtikker. Hvis montageboltene løsnes, og elementerne således bæres permanent af boltene, kan der være risiko for, at punktbelastninger kan skabe resonansforhold, der reducerer væggenes lydisolation i et begrænset frekvensområde.

I samlinger mellem ikke-bærende vægge og dæk opstår der meget ofte



Figur 6.11. Samlinger mellem ikke-bærende enkeltvægge og betondæk. Lodrette snit 1:10.

- A. 150 mm væg af betonelementer.
- B. Helstensvæg af mursten.
- C. 75 mm væg af letbeton, 8 mm isoleringslag mellem vægoverkant og dækunderside.

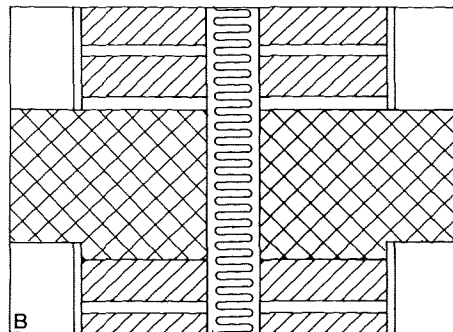


Figur 6.12. Samlinger mellem bærende dobbeltvæg og dæk. Lodrette snit 1:10.

A. Dobbeltvæg af 100 mm betonelementer, mellemrum 60 mm, dæk af betonelementer.

B. Dobbeltvæg af bredsten, mellemrum 70 mm, dæk støbt på stedet.

C. Dobbeltvæg, bærende af 150 mm letbetonelementer og ikke bærende af 100 mm letbetonelementer, mellemrum 100 mm, dæk af elementer af letkonstruktionsbeton.

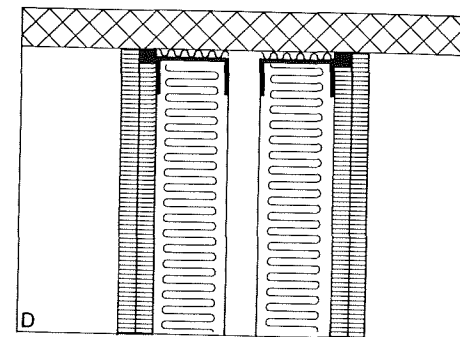
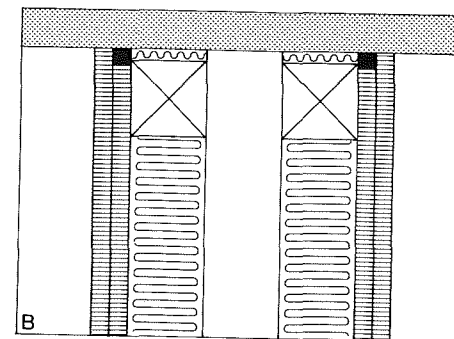
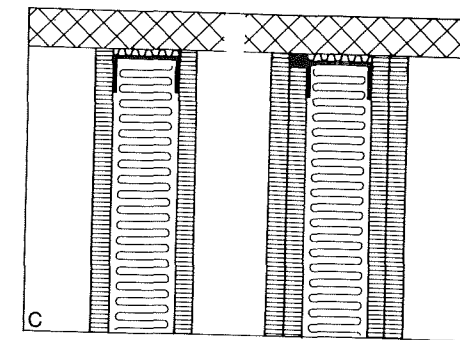
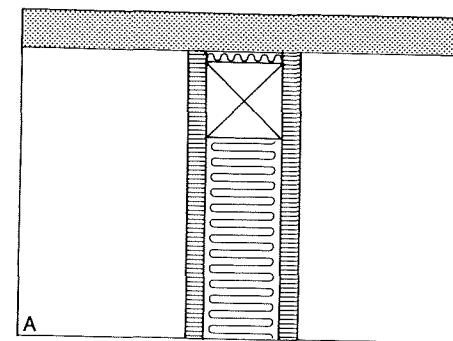


utætheder i fuger mellem vægge og dækundersider. Fuger bør stoppes med mineraluld til en tæthed på ca. 100 kg/m<sup>3</sup> og tættes med fugemasse, figur 6.11B.

Letbetonvægge anvendes som rumadskillende vægge i boliger i tykkelser, der kan medføre en betydelig koindenseffekt i det aktuelle frekvensområde. Væggens flanketransmission forøges, hvis de kommer i spænd mellem dækkene. Der bør derfor anvendes mindst 8 mm tykke mellemlag af polystyrenskum mellem væg og dæk, ligesom vægelementerne bør understoppes mellem opklodninger og sammenlimes med en elastisk lim, såkaldt lydlim, figur 6.11C.

I samlinger mellem bærende dobbeltvægge og betondæk skal dækkene afbrydes over vægmidte, og der anbringes mineraluld før samlingerne udstøbes, figur 6.12. I samlinger hvor mineralulden skal danne modhold for udstøbning og for væggenes understopning, bør den ikke kunne sammentrykkes mere end 10 pct. ved arbejdets udførelse.

Samlinger mellem gipspladebeklædte skeletvægge og betondæk, figur 6.13, reducerer ikke dækkets flanketransmission. Ved dobbeltvægge er det derfor ofte nødvendigt at anvende forsatskonstruktioner over og under dækket, dvs. underlofter og svømmende gulve, for at reducere flanketransmissionen.



Figur 6.13. Samlinger mellem skeletvægge og dæk. Lodrette snit 1:5.

A. Enkelt træskeletvæg med enkelt pladebeklædning.

B. Dobbelt træskeletvæg med dobbelt pladebeklædning.

C. Vægge med enkelt stålskelet med enkelt henholdsvis dobbelt pladebeklædning.

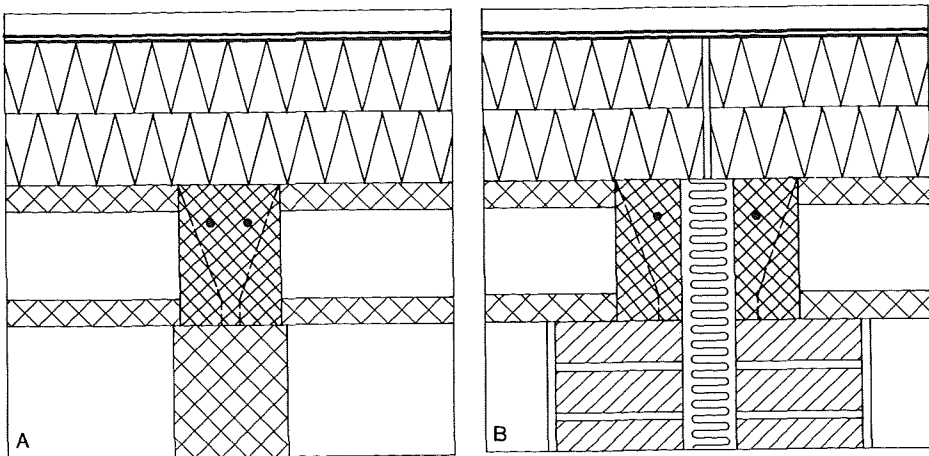
D. Dobbelt stålskeletvæg med dobbelt pladebeklædning.

### Tagdæk

Samlinger mellem enkeltvægge og tagdæk, figur 6.14, adskiller sig udførelsesmæssigt ikke meget fra samlinger mellem vægge og etagedæk, men måleresultater fra praksis viser, at der er større flanketransmission gennem tagdæk end gennem etagedæk, samtidig med at utætheder i fuger mellem vægge og tagpladers underside synes at være hyppigere end i tilsvarende fuger ved etagedæk. Det er derfor også her særdeles

vigtigt, at udstøbning af samlinger udføres tætte. En reduktion af flanketransmissionen kan umiddelbart ske ved at anvende dæk, der afbrydes med fuger over vægge. I tagdæk med mindre masse end 280 kg/m<sup>2</sup> er fuger nødvendige.

I samlinger mellem dobbeltvægge og tagdæk er flanketransmissionen uden betydning, når adskillelsen mellem delvæggene fortsættes gennem tagdækket, figur 6.14. Adskillelser i dæk udfyldes med mineraluld, der samtidig giver tilstrækkelig lydreduktion, hvis der skulle



Figur 6.14. Samlinger mellem bærende vægge og tagdæk af betonelementer med varmeisoleringslag med stor stivhed. Lodrette snit 1:10.

A. 150 m enkeltvæg af betonelementer.

B. Dobbeltvæg af bredsten, mellemrum 70 mm, fuger i varmeisoleringslag 1-3 mm.

opstå mindre utætheder mellem dæk og vægge. Stive varmeisoleringslag over tagdæk bør afbrydes med 5-10 mm fuger over vægge.

#### Træetageadskillelser

Samlinger mellem vægge og træetageadskillelser med bjælker oplagt parallelt med væggene indvirker ikke på disses lydisolations. For at undgå forringelse af etageadskillelsens lydisolations bør hulrummet mellem bjælker og vægge dog udfyldes tæt med mineraluld, figur 6.15. Bjælker oplagt vinkelret på vægge forringer væggenes lydisolations. Bjælkerne bør derfor ikke være gennemgående over bærende vægge, og bjælkeender bør være indbyrdes forsatte.

Figur 6.15. Samling mellem pudset murstensvæg og træetageadskillelse med bjælker parallelle med væg. Lodrette snit 1:10.

#### Tagkonstruktioner af træ

Samlinger mellem bærende vægge og tagkonstruktioner af træ kan udføres ved, at vægge føres op over tag eller op til underside af tag, eventuelt kun op over loftsfladen eller blot op til denne.

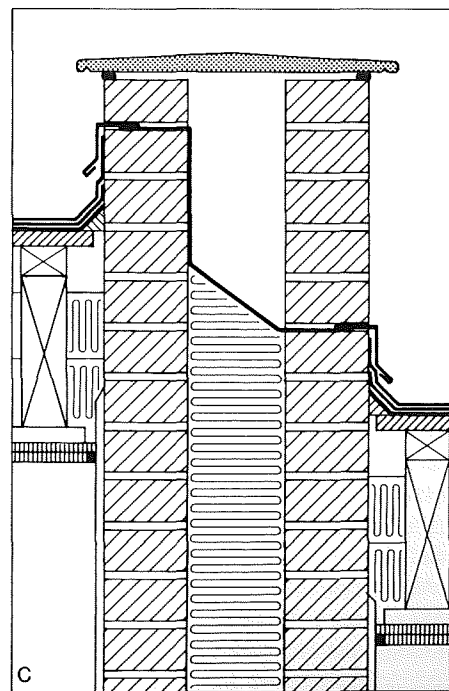
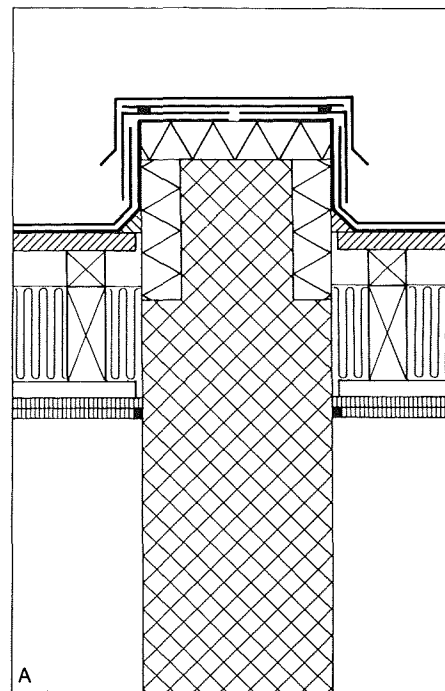
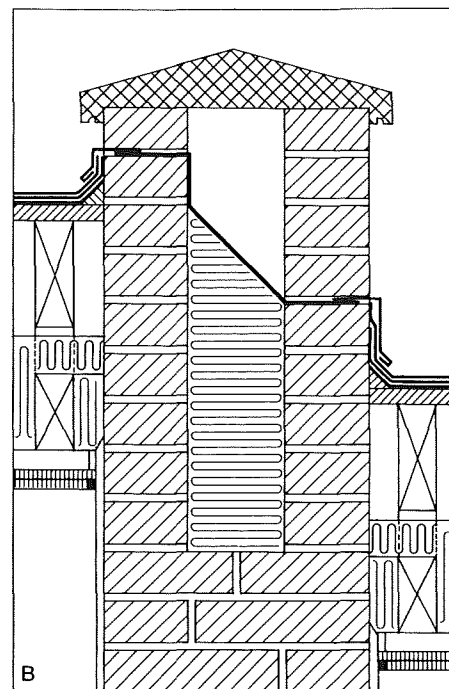
Lydteknisk er den første udførelse den bedste, figur 6.16. Med de øvrige udførelser er dobbelt pladebeklædning på

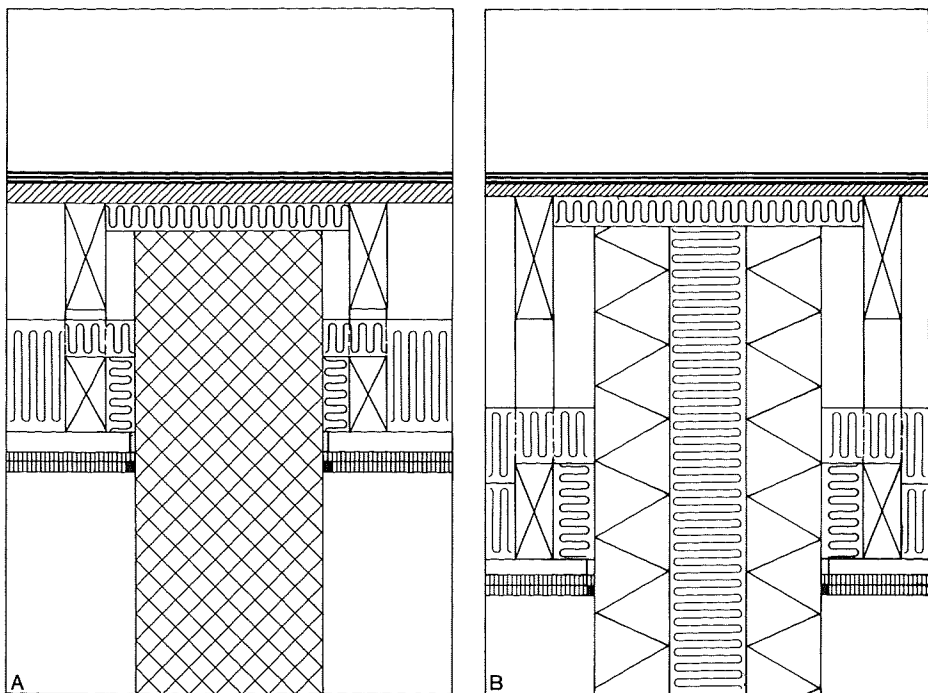
Figur 6.16. Samlinger mellem tagkonstruktioner af træ og vægge ført gennem tage. Lodrette snit 1:10.

A. Enkeltvæg af 250 mm beton med overdækning af metal.

B. Enkeltvæg af mursten, halvanden sten, udført som hulmur ud for tag og med overdækning af beton. Tag her vist med forsætning.

C. Dobbeltvæg af mursten med forankret overdækning af eternit. Tag her vist med forsætning.





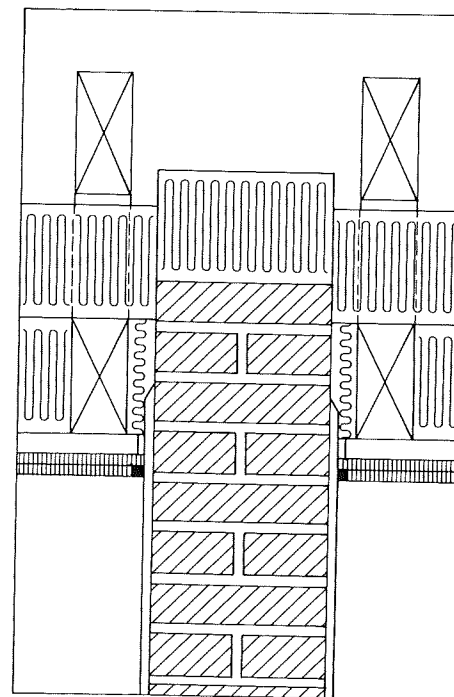
Figur 6.17. Samlinger mellem tagkonstruktioner af træ og vægge ført op til underside af tag. Afstanden mellem vægoverkant og tagunderside højst 30 mm. Lodrette snit 1:10.  
A. Enkeltvæg af 250 mm beton.  
B. Dobbeltvæg af 100 mm letbeton, mellemrum 100 mm.

lofter i reglen nødvendig for at opnå en tilfredsstillende lydisolering mellem rum i vandret retning. I alle tilfælde giver en dobbelt pladebeklædning bedre muligheder for at opnå tætte tilslutninger til omgivende vægge. Dobbeltpladebeklædninger på lofter er nødvendige i tilfælde, hvor der skal isoleres mod støj udefra.

Ved vægge, der føres over tag, bør isolering mod kuldebroer udføres således, at væggenes lydisolering ikke forringes. Ved dobbeltvægge kan overdækninger

af beton af de to delvægge medføre en forringelse af lydisoleringen, mens overdækninger af tynde plader af kobber, zink, plast mv. ikke indvirker væsentligt på væggenes lydisolering. Når en dobbeltvæg afsluttes med en betonoverdækning, bør denne kun fastgøres til den ene delvæg og hvile på den anden på et lag pap eller lignende.

Hvor vægge føres til undersiden af tag, figur 6.17, bør fugen mellem væg og tagunderside ikke være over 30 mm tyk og stoppes tæt med mineraluld, men det



Figur 6.18. Samling mellem tagkonstruktion af træ og helstensvæg af mursten ført mindst 0,2 m op over loftsflade. Lodret snit 1:10.

er i praksis vanskeligt at opnå tilfredsstillende tæthed mellem væg og tag. Hvis væggen udføres med mindre tykkelse i loftsrummet end i øvrigt, skal loftsbeklædningen være tæt, dvs. forskallet og pudset eller udført af plader og med fuger ved vægge tætmede med fugemasse. Vægge, der ikke føres op til tagunderside skal føres mindst 0,2 m op over underside af loftsbeklædning, figur 6.18. Loftsbeklædningen skal her være af mindst to lag gipsplader og med fuger ved vægge tætmede med fugemasse.

### Lette ydervægge

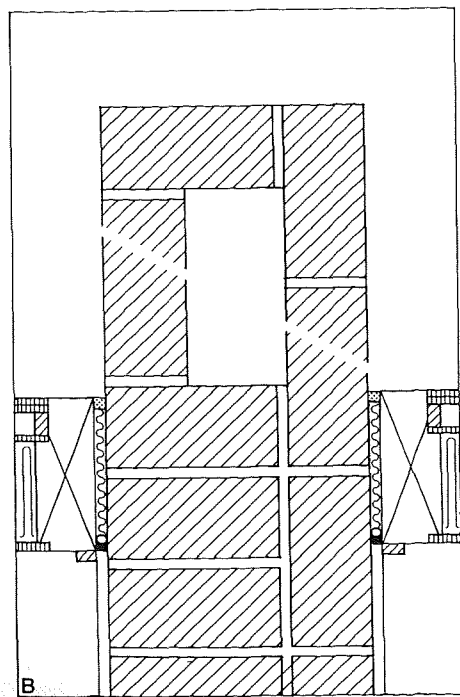
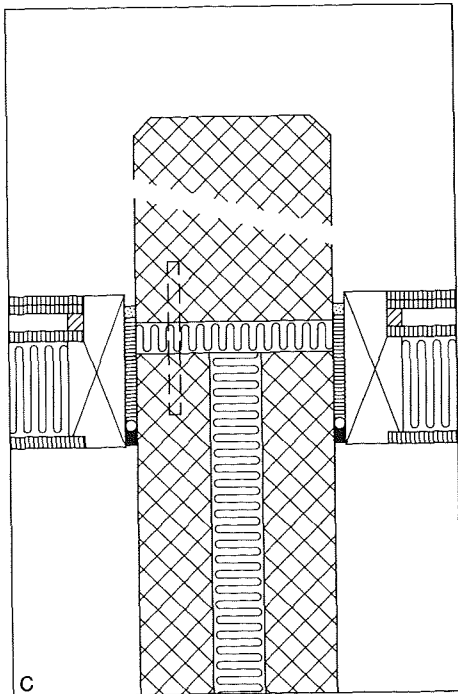
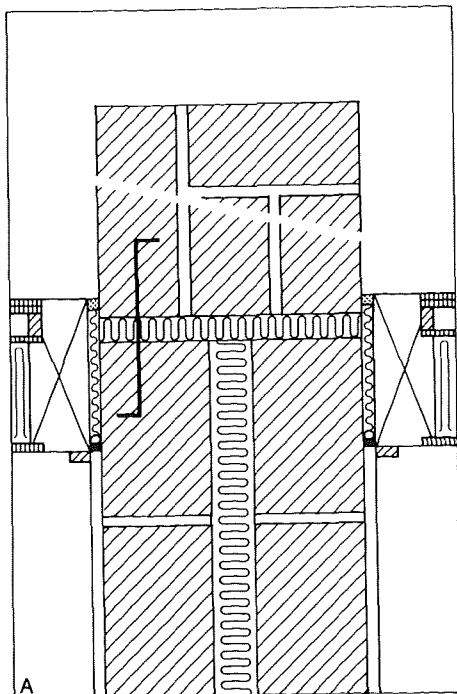
Samlinger mellem lette ydervægge og bærende vægge mellem boliger kan udføres ved at de bærende vægge føres uden for ydervægge, eventuelt kun til indvendig side af ydervægges udvendige beklædning, eller blot til indvendig side af ydervægge, figurerne 6.19, 6.20 og 6.21. Lydteknisk er den første udførelse den bedste.

Mellem ydervægge og bærende vægge, der føres uden for ydervægge eller til bagside af ydervægsbeklædning, bør der være ca. 10 mm tykke fuger, der stoppes med mineraluld i en dybde på mindst 80 mm og tætnes indvendig med fugemasse.

Isolering mod kuldebroer i de bærende vægge bør placeres mindst 80 mm uden for den indvendige side af ydervægge.

Beklædninger ud for bærende vægge bør have ringe bøjningsstivhed for at reducere flanketransmissionen gennem ydervægge, figur 6.21. Den bør derfor være tynd eller langs væggen højderetning have indsnit, der reducerer stivheden og dermed flanketransmissionen.

I dobbeltvægge, der føres uden for ydervægge, figur 6.19, bør udtagende vægdele kun være forbundet med dobbeltvæggenes ene delvæg. Hvor der ved dobbeltvægge sker en forsætning af ydervæggene, bør der i dobbeltvæggenes delvægge ud for ydervæggenes tilslutninger være lodrette eller forandede mindst 10 mm tykke fuger udfyldt med mineraluld, figur 6.20. Fuger mærket a er nødvendige af lydtekniske hensyn, mens fuger mærket b kan udelades, hvis varmetekniske hensyn tillader det. Der må ikke anbringes bindere i fugerne a og ej heller mellem delvæggene mellem disse fuger. Delvæggene skal derfor hver

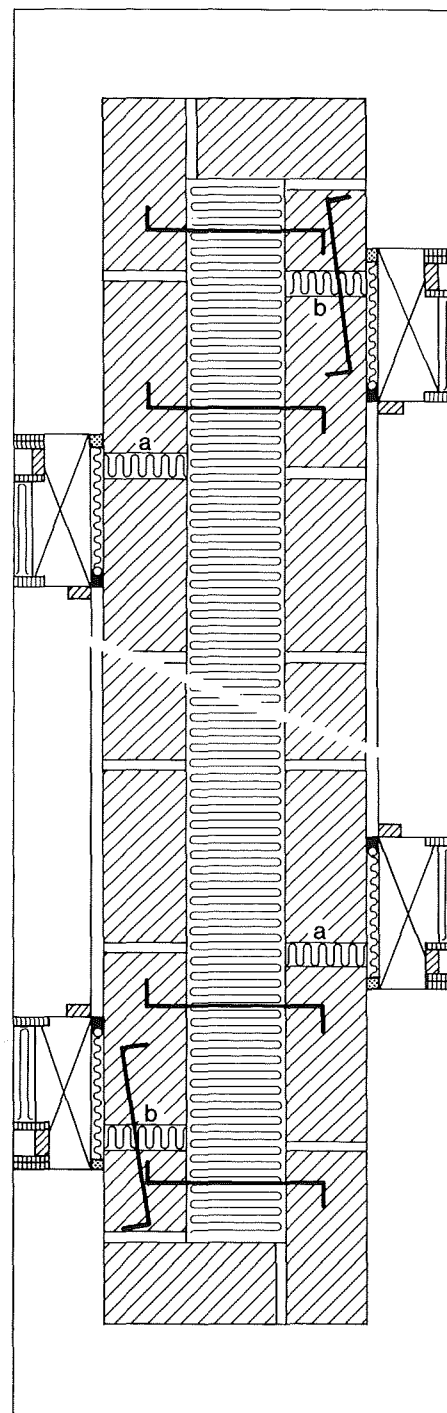


Figur 6.19. Samlinger mellem lette ydervægge og tværvægge ført uden for ydervægge. Hvis tværvæggene har isoleringslag mod kuldebroer, skal dybden af fuger mellem tværvægge og ydervægge fra indvendig vægside til varmeisoleringslag være mindst 80 mm. Vandrette snit 1:10.

A. Dobbeltvæg af mursten, mellemrum 130 mm.

B. Enkeltvæg af mursten, halvanden sten.

C. Dobbeltvæg af 100 mm beton, mellemrum 60 mm.



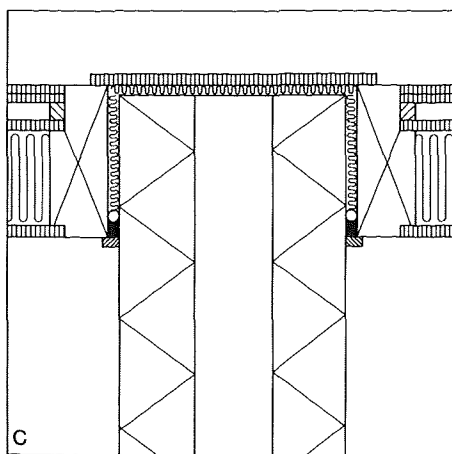
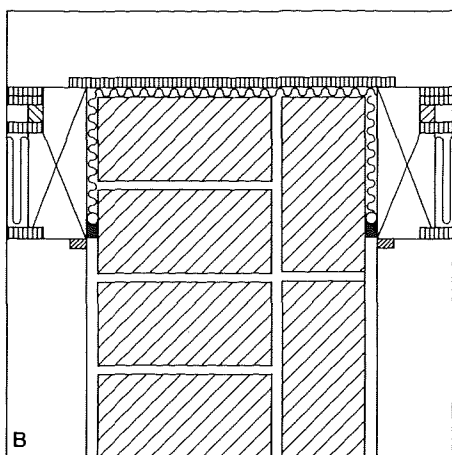
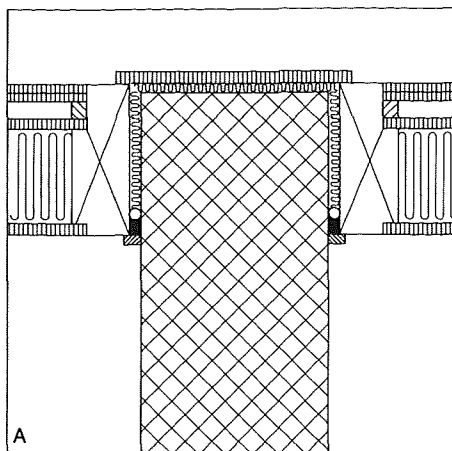
for sig have tilstrækkelig stabilitet. Vægge i beton bør afbrydes med fuger efter de samme principper som vist for murede vægge.

I bygninger, hvor der over lette ydervægge er facadebjælker, bør disse afbrydes midt for dobbeltvæggens hulrum med mindst 10 mm tykke fuger, der stoppes med mineraluld og tættes indvendigt med fugemasse samt lukkes udvendigt med en regnskærm.

Pladebeklædte skeletvægge tilsluttes almindeligvis til den indvendige side af lette ydervægge. Enkeltvægge bør, for at sikre en varig tæthed, så vidt muligt tilsluttes ud for ydervæggens stolper og fastgøres hertil uden at beskadige dampspærren, figur 6.22. Ved tilslutning af dobbelte skeletvægge skal lette ydervægge afbrydes midt for dobbeltvægge med mindst 10 mm tykke fuger, der stoppes med mineraluld. Det er ikke påkrævet, at fuger udføres i tynde yderbeklædninger, når disse kan fastgøres på lodrette bærelister.

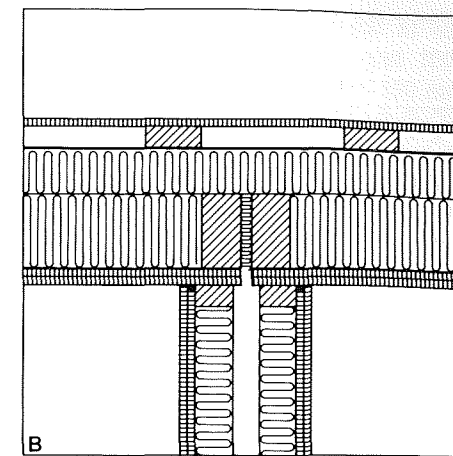
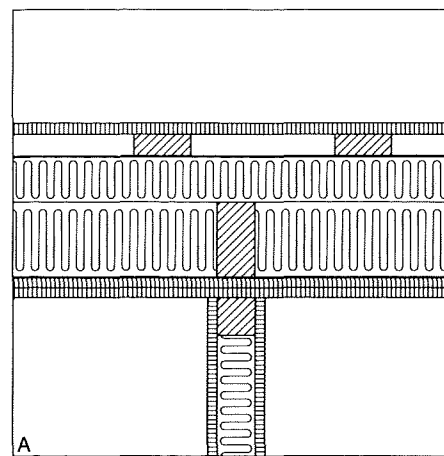
Samlinger mellem lette ydervægge og betondæk over og under dæk udføres med 80 mm dybe fuger, der stoppes med mineraluld og tættes indvendigt med fugemasse, figur 6.23.

Figur 6.20. Samling mellem lette ydervægge og tværvæg af dobbelt murstensvæg, mellemrum 130 mm. Ydervægge forsat ved tværvæg. Fugerne a er lyd- og varmeisolerende, medens fugerne b kun er varmeisolerende, og trådbinderne i fugerne skaber en mekanisk kobling i væggen. Vandret snit 1:10.



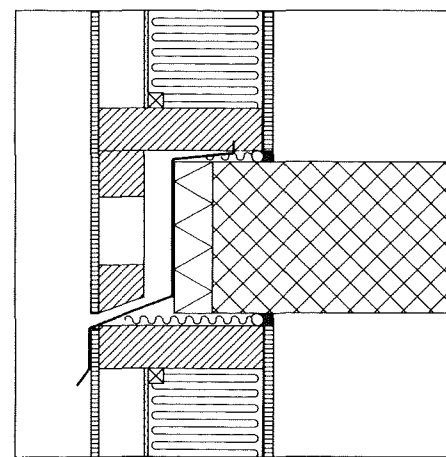
Figur 6.21. Samlinger mellem lette ydervægge og tværvægge ført frem til ydervæggens udvendige beklædning. Dybden af fuger mellem tværvægge og ydervægge fra indvendig vægside til forkant af tværvæg mindst 80 mm. Vandrette snit 1:10.

- A. Enkeltvæg af beton.
- B. Enkeltvæg af mursten.
- C. Dobbeltvæg af letbeton.



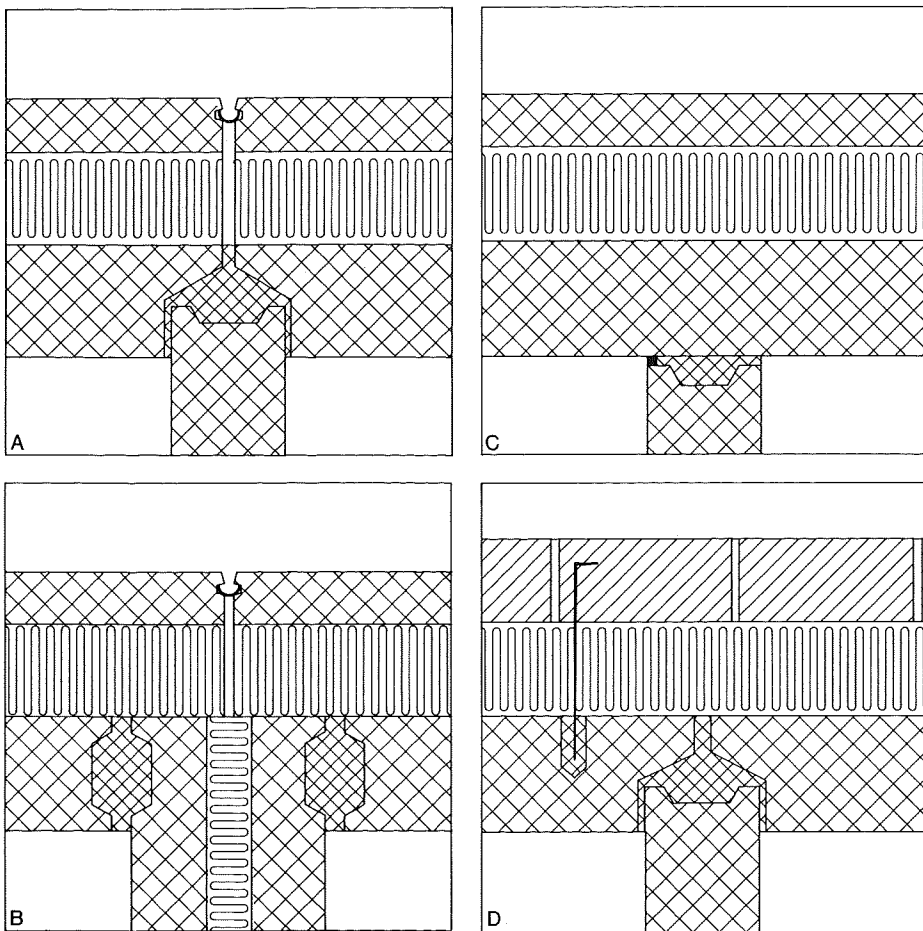
Figur 6.22. Samlinger mellem lette ydervægge og træskeletvægge. Vandrette snit 1:10.

- A. Enkeltskeletvæg tilsluttet ud for stolpe i ydervæg.
- B. Dobbelt skeletvæg tilsluttet stolper i ydervæg, der er afbrudt med fuger, tætning med fugemasse ved begge sider af indervæggen.



Figur 6.23. Samling mellem let ydervæg og elementdæk. Dybden af fuger mellem ydervæg og dæk fra indvendig vægside til forkant af dæk mindst 80 mm. Lodret snit 1:10.





Figur 6.24. Samlinger mellem ydervægge af betonelementer og indervægge af betonelementer. Vandrette snit 1:10.

- A. Ydervæg af lagdelte elementer, enkelt indervæg ført ind i ydervæggen.
- B. Ydervæg af lagdelte elementer, dobbelt indervæg ført ind i ydervæggen.
- C. Ydervæg af lagdelte elementer, enkelt indervæg tilsluttet ydervæggenes indvendige side.
- D. Ydervæg af betonelementer med skalmur, enkelt indervæg ført ind i ydervæggenes bagvæg.

### Tunge ydervægge

Samlinger mellem tunge ydervægge og indervægge kan udføres ved, at indervægge føres gennem eller ind i ydervæggenes indvendige del eller blot tilsluttes dennes indvendige side. Lydteknisk er den første udførelse den bedste. Ydervægge af lagdelte betonelementer, sandwichelementer, med forstøbning af beton eller med forstøbning med teglbeklædning og ydervægge af beton med skalmur samles med indervæggene, som vist i figur 6.24. Ved korrekt udstøbning vil samlinger være lydmeæssigt tætte, men ved udstøbning med kun delvis fyldte samlinger eller med betonmørtel med for stort svind, vil det være nødvendigt at eftertætne fuger med fugemasse. Hvis indervægge ikke føres ind i ydervægge, er der risiko for, at der opstår revner i samlingerne, og der skal derfor tættes med fugemasse ved mindst den ene side af indervægge.

Flanketransmissionen gennem ydervæggenes indvendige del er væsentlig mindre, hvor indervægge er ført ind i ydervægge, end hvor de kun er tilsluttet disse. I sidstnævnte tilfælde bør den indvendige vægdel af ydervægge, bagstøbning i ydervægselement eller bagvæg i ydervæg, have mindst samme tykkelse som indervæggene. I beboelsesbygninger vil det normalt sige mindst 150 mm betonvægge. I ydervægge med skalmure med trådbindere er flanketransmissionen større end i ydervægge af sandwichelementer. Med ens tykkelse af henholdsvis ydervægselementets bagstøbning og ydervæggenes bagvæg er flanketransmissionen i løsningen A i figur 6.24 mindre end i løsningen D, medmindre der udføres en fuger i skalmuren ud for indervæggen. Fugen kan eventuelt udføres fortandet.

I ydervægge med bagvægge af letbeton med densitet mindre end 1000 kg/m<sup>3</sup> og tykkelse mindre end 150 mm er fuger i skalmure ud for dobbelte indervægge nødvendige. Indervægge af letbeton bør ikke sluttes til bagvægge af letbeton med stumpe samlinger, men udføres enten som vist i figur 6.25 A eller de bør føres ind gennem ydervæggenes indvendige del.

Samlinger mellem ydervægge og indervægge af mursten, figur 6.25 B til D, der udføres i forbandt, er lydteknisk tilfredsstillende, når fugerne er fyldte.

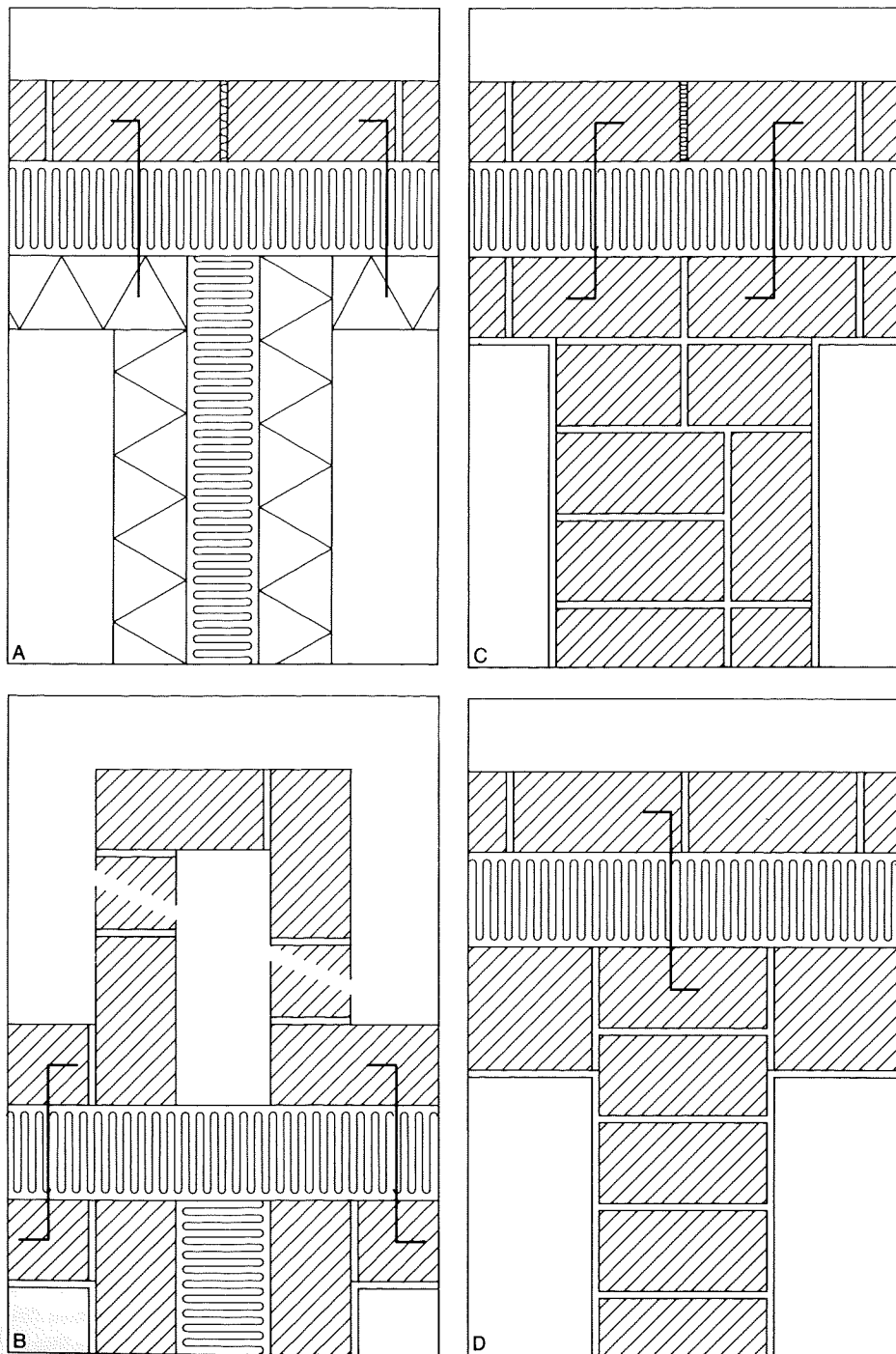
I samlinger mellem tunge ydervægge og dobbelte indervægge skal ydervægges forvæg være afbrudt med fuger ud for adskillelsen mellem indervæggenes delvægge for at reducere flanketransmission gennem ydervægges forvægge. Med ydervægge af elementer opfyldes dette krav, når elementbredder samordnes med dobbeltvæggenes placering, figur 6.24 B. De krævede fuger bør være ca. 10 mm tykke og skal stoppes med mineraluld og tættes med fugemasse.

Fuger i en ydervægs formur kan eventuelt erstattes med murefremspring, figur 6.25 B, idet sådanne også reducerer flanketransmissionen.

I samlinger mellem tunge ydervægge og pladebeklædte dobbelte skeletvægge bør der i ydervæggenes bagvæg udføres mindst 20 mm tykke fuger, der stoppes og tættes som nævnt. Flanketransmission kan også reduceres med forsatsvægge eller forsatsbeklædning, som vist i figur 6.26.

Med de i figur 6.24 til 6.26 viste samlinger mellem ydervægge og dobbeltvægge kan der opnås en lydisolations på over 60 dB og ofte nær 70 dB.

I de fleste tilfælde ønskes af æstetiske hensyn ikke gennemgående lodrette fuger i murede ydervægge, men hvis fuger



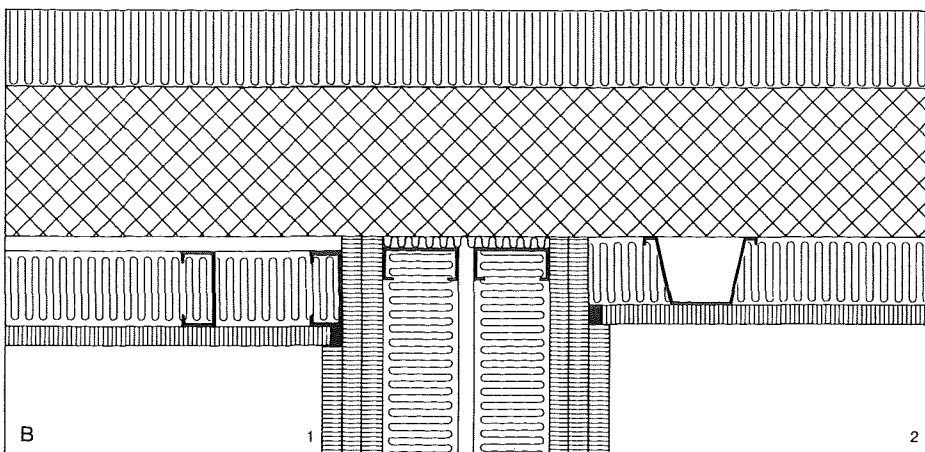
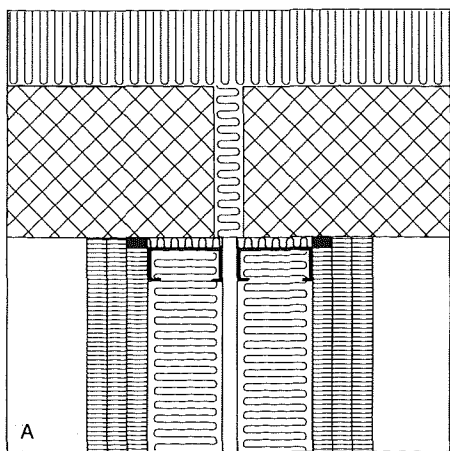
udelades, reduceres lydisoleringen afhængigt af ydervæggens udformning, areal og antallet af døre eller vinduer. Små udførelsesfejl i samlinger med dobbeltvæggens andre flankerende bygningsdele kan i så fald få en uventet stor indvirkning på lydisoleringen. Hvis både ydervægges bagvæg og indervægge er af letbeton med lav densitet medfører udeladelse af fuger i ydervægges udvendige del en reduktion af lydisoleringen mellem rum adskilt med dobbelte indervægge. Lydisoleringen kan i særlig uheldige tilfælde reduceres til under 50 dB.

I samlinger mellem tunge ydervægge og betondæk samles dækkene med ydervæggens indvendige del, der kan være af beton, letbeton eller tegl og bærende eller ikke-bærende, figur 6.27 og 6.28. Flanketransmission i lodret retning kan her sammenlignes med transmission i vandret retning mellem indervægge og ydervægge, men den resulterende lydisolering for dæk med gulve vil ofte være mindre end 53 dB og lavest med bagmure og dæk af letbeton. En forbedring af lydisoleringen kan opnås med indlæg af tynde, lyddæmpende mellemlag mellem bagmure og dæk, både ved over- og underside.

Figur 6.25. Samlinger mellem ydervægge og indervægge. Vandrette snit 1:10.

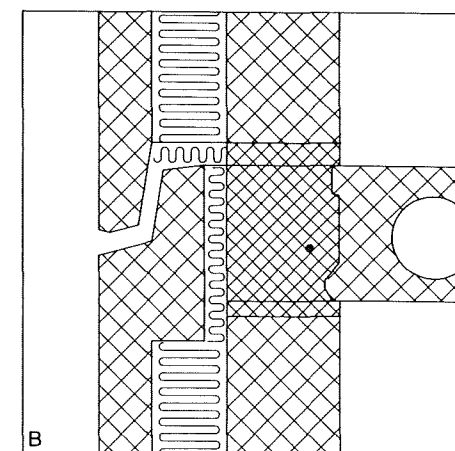
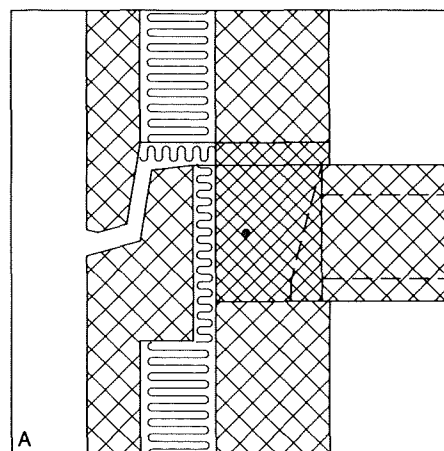
- A. Ydervæg med skalmur af mursten og bagvæg af letbetonelementer, dobbeltvæg af 100 mm letbetonelementer, mellemrum 100 mm.
- B. Ydervæg af hulmur, dobbeltvæg af mursten, mellemrum 130 mm, væggen muret i forbandt med bagmur. Murfremspring mindst 0,5 m.
- C. Ydervæg af hulmur, halvandenstensvæg af mursten muret i forbandt med bagmur.
- D. Ydervæg af hulmur med bagmur af bredsten, helstensvæg af mursten muret i forbandt med bagmur.





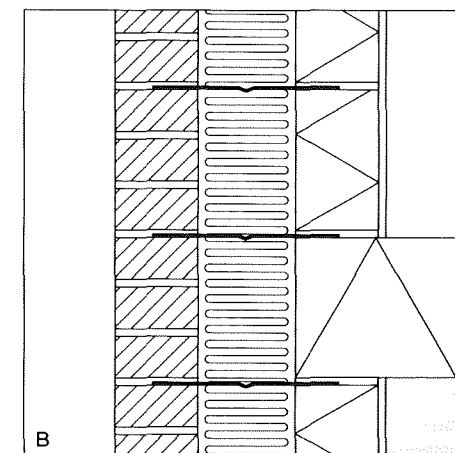
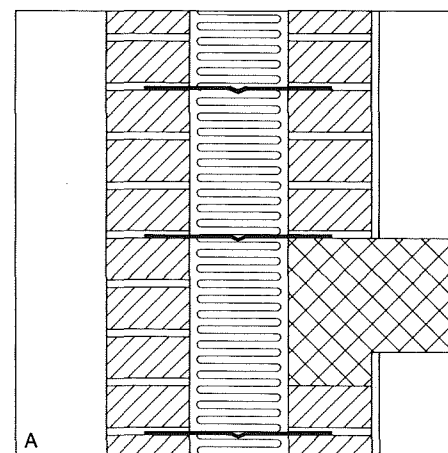
Figur 6.26. Samlinger mellem ydervægge med tunge bagvægge og lette indervægge med dobbelt skelet. Vandrette snit 1:5.

- A. Ydervæg med bagvæg af beton eller mursten, dobbeltvæg med pladebeklædt stålskelet, tætning med fugemasse ved begge vægssider. Fuge i ydervæggens for- og bagvæg ud for indervæg.
- B. Ydervæg af beton eller mursten, men uden fuger i ydervæg, dobbelt indervæg som i A.
1. Forsatsvæg med 10 mm mellemrum mellem ydervæg og skelet i forsatsvæg. Tætnet med fugemasse mellem indervæg og forsatsvæg.
  2. Forsatsbeklædning fastgjort på ydervæg og tætnet med fugemasse mellem indervæg og beklædning.



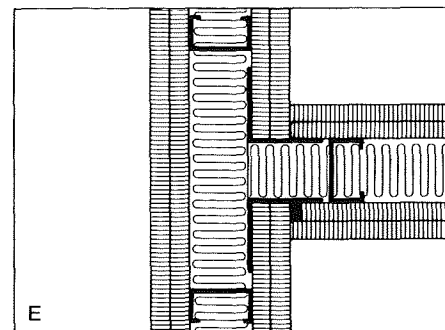
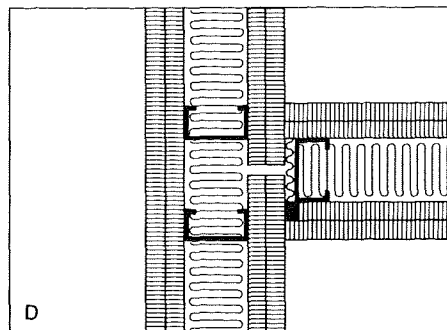
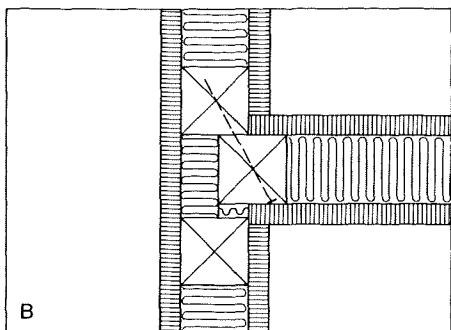
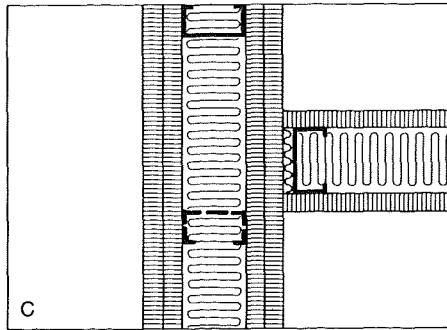
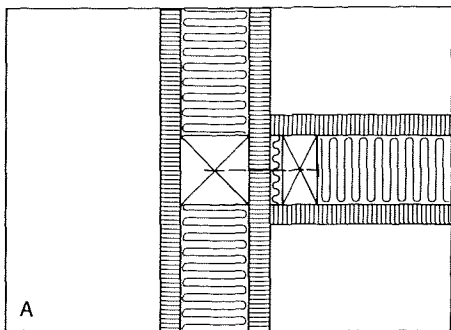
Figur 6.27. Samlinger mellem ydervægge af ydervægselementer og elementdæk. Lodrette snit 1:10.

- A. Indvendig del af ydervæg bærende.
- B. Indvendig del af ydervæg ikke bærende.



Figur 6.28. Samlinger mellem ydervægge af hulmur og dæk af beton eller letbeton. Lodrette snit 1:10.

- A. For- og bagmur af teglsten, dæk af beton støbt på stedet.
- B. Formur af teglsten, bagmur af letbetonblokke, dæk af letbetonelementer.



Figur 6.29. Samlinger mellem indvendige enkeltvægge med pladebeklædt træ- eller stålskelet. Vandrette snit 1:5.

- A. Vægge med træskelet. Den tilsluttede væg kan umiddelbart fjernes.
- B. Vægge med træskelet. Fod- og toprem afbrydes i flankerende væg.
- C. Vægge med stålskelet. Den tilsluttede væg kan umiddelbart fjernes.
- D. Vægge med stålskelet, tætnet med fugemasse i en side. Den tilsluttede væg kan fjernes, men kræver reparation ved fugen.
- E. Vægge med stålskelet, tætnet med fugemasse i en side. Permanent tilslutning.

### Indvendige vægge

I samlinger mellem massive vægge kan flanketransmission gennem lettere eller tyndere vægge reducere den med tunge eller tykkere vægge opnåelige lyd-isolation væsentligt. Derfor bør lette eller tynde vægge altid sluttes til tunge eller tykke vægge, og tilslutningsfuger bør udføres med elastiske fugematerialer, hvor sådanne kan benyttes.

Samlinger mellem pladebeklædte

skeletvægge og massive vægge udføres som vist for samlinger mellem dæk og skeletvægge i figur 6.13.

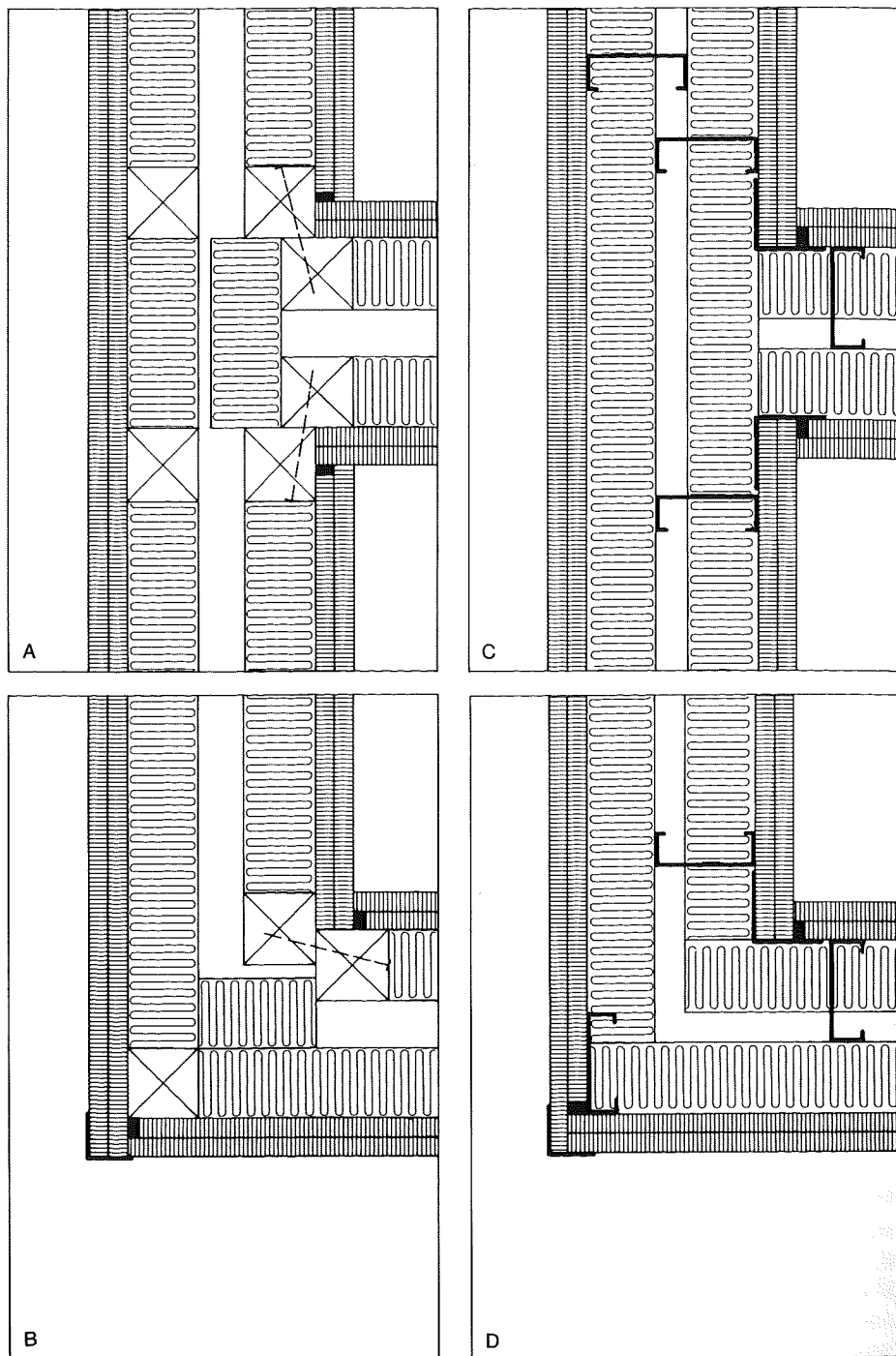
Ved samlinger mellem enkeltvægge med pladebeklædt træskelet bør der være stolper, som vist i figur 6.29. Hvis en samling ikke udføres ud for en stolpe, bør en stolpe i den tilsluttede væg fastgøres i den flankerende vægs fod- og toprem og herimellem indsættes per 400 mm specielle skruer, som kan trække gipspladen tæt til den tilsluttede stolpe.

I samlinger mellem dobbeltvægge med pladebeklædt træskelet og i disse vægges hjørnesamlinger, skal fod- og topremme afbrydes for at reducere flanketransmissionen i væggene, figur 6.30.

Hvor vægge med ens lyd-isolation,  $R'_w = 45$  dB eller derover, samles, skal pladebeklædningen afbrydes med fuger og støttes af supplerende lodskinner ved de afbrudte beklædninger. Med nogle samlinger er der enkel mulighed for at fjerne tilsluttede vægge uden ændringer

af flankerende vægge, men lydteknisk set udføres permanente samlinger mellem enkeltvægge med stålskelet bedst med vinkelskinner, figur 6.29 E.

Samlinger mellem dobbeltvægge med stålskelet udføres som samlingerne mellem vægge med træskelet. Samlinger mellem dobbeltvægge med skeletter mellem dobbeltvægge med skaller med fælles fod- og fælles topskinne er vist i figur 6.30.



Figur 6.30. Samlinger og hjørnesamlinger mellem indvendige dobbeltvægge med pladebeklædt træ- eller stålskelet. Tætning med fugemasse ved to vægsider. Vandrette snit 1:5.

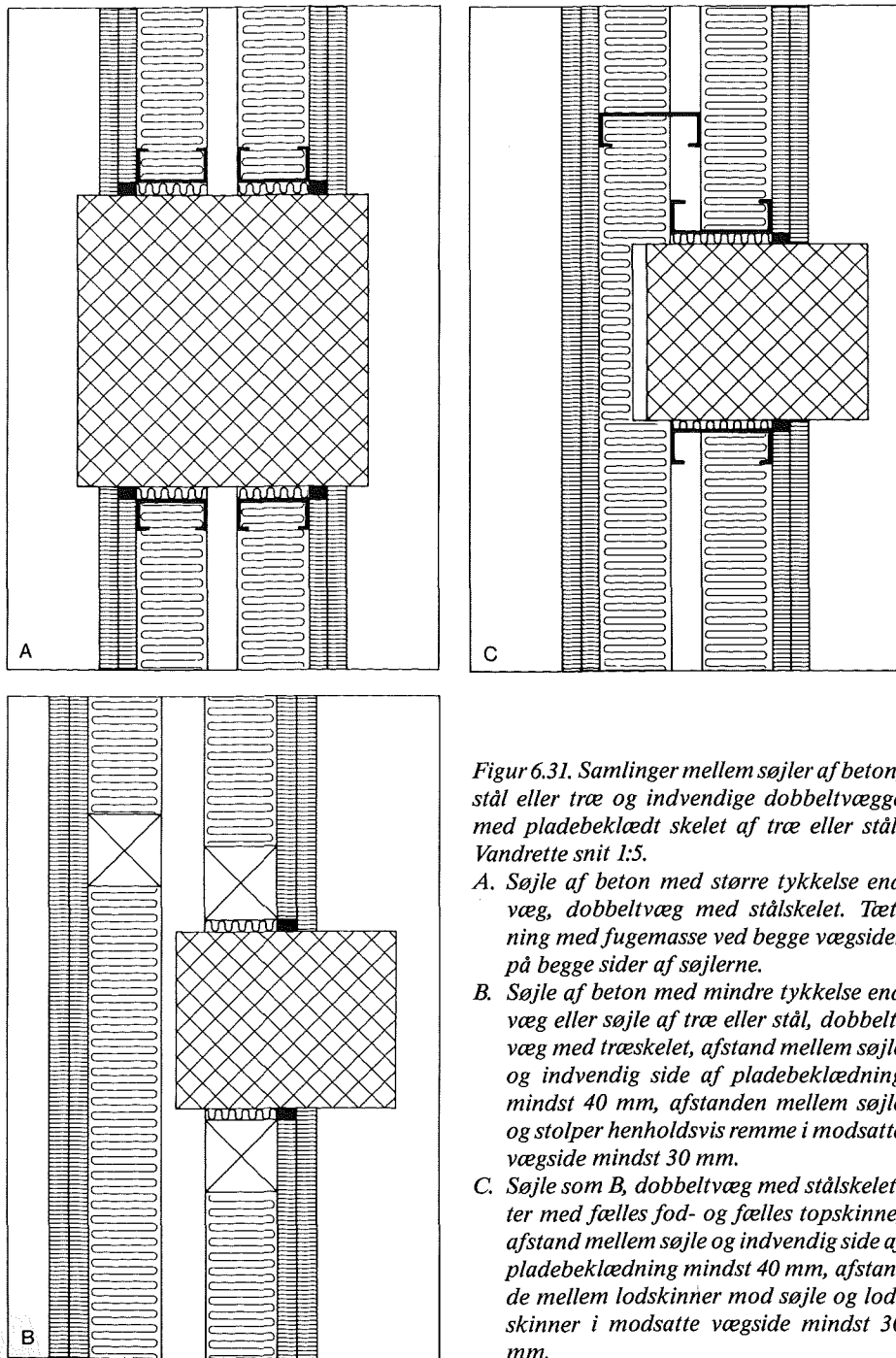
- A. Vægge med dobbelt træskelet. Fod- og toprem i delvæg nærmest den tilsluttede væg afbrydes ud for denne.
- B. Vægge med dobbelt træskelet. Fod- og toprem i delvæg med indadgående hjørne afsluttes ved hjørnestolper.
- C. Vægge med dobbelt stålskelet med fælles fod- og fælles topskinne og hjørneskinne.
- D. Vægge med dobbelt stålskelet med fælles fod- og fælles topskinne og hjørneskinne i indadgående hjørne.

## Søjler

Tætte samlinger mellem søjler og støbte eller murede enkeltvægge reducerer normalt ikke flanketransmissionen, mens samlinger mellem søjler og dobbeltvægge med støbte eller murede delvægge i reglen medfører koblinger mellem delvæggene, der kan reducere dobbeltvægges lydisolations til, hvad der kan opnås med enkeltvægge med samme masse.

Enkelt- eller dobbeltvægge med pladebeklædt skelet af træ eller stål kan samles med søjler og murede piller uden at væggenes lydisolations eller flanketransmission påvirkes. Ved samlinger med betonsøjler med mindre tykkelse end væggene eller med søjler af træ eller stål, fastgøres kun én delvæg i søjlerne, den anden skal holdes fri af dem. Hvis det er nødvendigt at placere skeletvæggen nærmere ved søjlen end vist i figur 6.31 B, er udskæring i fod- og toprem eller fod- og topskinne nødvendig. Afstanden mellem søjler og pladebeklædning bør være mindst 40 mm og udfyldt med mineraluld. Ved eventuelle udskæringer bør afstanden mellem skelet og søjler være mindst 10 mm. Lodskinner og stolper i friholdte vægge skal være mindst 30 mm fra søjler.

## Gulve, forsatsbeklædninger, forsatsvægge og underlofter



Figur 6.31. Samlinger mellem søjler af beton, stål eller træ og indvendige dobbeltvægge med pladebeklædt skelet af træ eller stål. Vandrette snit 1:5.

- A. Søjle af beton med større tykkelse end væg, dobbeltvæg med stålskelet. Tætning med fugemasse ved begge vægssider på begge sider af søjlerne.
- B. Søjle af beton med mindre tykkelse end væg eller søjle af træ eller stål, dobbeltvæg med træskelet, afstand mellem søjle og indvendig side af pladebeklædning mindst 40 mm, afstanden mellem søjle og stolper henholdsvis remme i modsatte vægside mindst 30 mm.
- C. Søjle som B, dobbeltvæg med stålskelet med fælles fod- og fælles topskinne, afstand mellem søjle og indvendig side af pladebeklædning mindst 40 mm, afstande mellem lodskinner mod søjle og lodskinner i modsatte vægside mindst 30 mm.

Lydisolationen af en etageadskillelse afhænger af den lydtekniske kvalitet både af den bærende del af adskillelsen – dækket – og af gulvet eller gulvbelægningen, samt af en eventuel loftsbeklædning under dækket. Gulve og væg- og loftsbeklædninger kan udføres som *forsatskonstruktioner* uden direkte eller i kun delvis forbindelse med dæk og vægge, eksempelvis som svømmende gulve på elastiske underlag, henholdsvis som underlofter ophængt i stropper i dæk. Herved kan isolationen mod både luftlyd og trinlyd øges betydeligt for såvel rumadskillende som flankerende bygningsdele.

Forøgelse af luftlydisolationen  $R'_{w}$  og dæmpningen af trinlydniveauet  $L'_{n,w}$ , der måles med henholdsvis et svømmende gulv og en tynd belægning, når de hver for sig måles på samme dæk, er almindeligvis ikke additive. Vedrørende addition per 1/3 oktav henvises til (3.88). I praksis er forøgelsen af luftlydisolationen og dæmpningen af trinlydniveauet for et svømmende gulv med en tynd belægning mindre end summen af de hver for sig målte værdier for det svømmende gulv og for den tynde belægning.

Gulves *trinlyddæmpning* regnes i forhold til trinlydniveauet under dæk uden gulv, og er for betondæk stort set uafhængig af dæktypen, men dæmpningen for svømmende gulve forringes med ti-

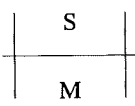


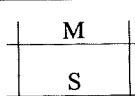

den indtil 5 dB på grund af sammentrykning af underlaget, mest for gulve med stor trinlyddæmpning. Både svømmende gulve og tynde gulvbelægninger giver normalt væsentlig mindre forbedring af trinlydniveauet for træetageadskillelser end for støbte dæk. Tabel 7.1 viser, hvorledes *konstruktionsprincippet* indvirker på trinlydniveauet.

### Gulvbelægninger på dæk

Betonslidlag, fliser, terrazzo og andre hårde belægninger på støbte dæk, herunder element- og hulstensdæk, kan isolere tilfredsstillende mod luftlyd, men ikke mod trinlyd. Lydforholdene kan endog forringes, hvis gulvbelægningen ikke er fast forbundet med eller løses fra dækket, hvorved lydudstrålingen fra dækket øges.

Til denne type gulvbelægninger henregnes lyd-mæssigt også bræddegulve sømmet på bjælker i træetageadskillelser. Transmission af trinlyd gennem træetageadskillelsen sker her direkte gennem gulvbrædder til bjælker og derfra til loftsbeklædning. Selv om lydisolationen øges med tungt indskud mellem bjælkerne, vil det resulterende trinlydniveau være bestemt af transmissionen via bjælkerne. Også trægulve på strøer, der uden elastiske underlag er opklodset på støbte dæk, vil lydteknisk virke på samme måde.

Tabel 7.1. Trinlydniveauets afhængighed af konstruktionsprincip for forskellige beliggenheder af modtagerum i forhold til senderum. I tabellen er anført differensen mellem trinlydniveauet  $L'_{n,w}$  i modtagerummet i beliggenhed 1 og trinlydniveauet i modtagerummene i beliggenhed 1-5 for henholdsvis bygninger med bærende vægge og bygninger med bærende søjler eller rammer. Dæk og gulve forudsættes ens i de to tilfælde, og lyd giveren er en standardiseret bankemaskine. I beliggenhed 5 er sender- og modtagerum adskilt med en dobbeltvæg. De med \* mærkede rum refererer til, at gulve i disse rum yderligere kan reducere trinlydniveauet ud over de anførte reduktioner.

S: Senderum M: Modtagerum		Bærende tunge vægge	Bærende søjler eller rammer
Beliggenhed. Lodrette snit		Reduktion: i trinlydniveau i modtagerum dB	dB
1		0	0
2		5	0
3		10	5
4		10	15
5		15	20

## Tynde gulvbelægninger

Tynde gulvbelægninger uden blødt underlag kan være tegl-, gummi- og korkfliser, linoleum og tæpper. Af disse giver tegl ingen trinlyddæmpning, linoleum og gummi en beskedent dæmpning ved høje frekvenser, medens kork og navnlig tæpper giver større trinlyddæmpning. Den største dæmpning opnås med tykke, bløde tæpper.

Tynde gulvbelægninger med blødt underlag kan være linoleum eller vinyl med underlag af filt, kork eller plastskum. Disse gulvbelægninger giver en trinlyddæmpning svarende til korkfliser, men væsentlig mindre trinlyddæmpning end tykke, bløde tæpper.

Tynde gulvbelægninger med blødt underlag kan give en væsentlig reduktion af trinlydniveauet under gulve med hård belægning. Derimod giver de kun ubetydelig reduktion af trinlydniveauet under svømmende gulve og under træetageadskillelser. Årsagen hertil er, at dæmpningen af trinlydniveauet fortrinsvis sker ved høje frekvenser, mens behovet for trinlyddæmpning under svømmende gulve og under træetageadskillelser især findes ved lave frekvenser.

Tynde gulvbelægninger bør påklæbes med den af fabrikanten foreskrevne limtype eller med en lim, der ikke trænger op i underlag og nedsætter elasticiteten.

Diagrammer over gulvbelægningers trinlyddæmpende egenskaber findes som figur 2.27 i kapitel 2.

## Svømmende gulve

Ved *svømmende gulve* forstås selvstændige gulvkonstruktioner oven på beton-dæk eller træetageadskillelser og adskilt herfra og fra vægge med elastiske

lag. For at opnå en stor *trinlyddæmpning* bør gulvenes resonansfrekvens være under 50 Hz, fordi trinlyddæmpningen først får væsentlig betydning ca. en oktave over resonansfrekvensen, se figur 2.26. En lav resonansfrekvens opnås ved stor sammentrykning af mellemlaget og med en tung gulvkonstruktion, se (3.67).

Svømmende gulve kan udføres som trægulve på strøer på bløde underlag og som pladegulve af træ, gips, asfalt eller beton på underlag af mineraluld, skumplast eller andet materiale.

Svømmende trægulve på strøer kan udføres med brædder med eller uden belægning og med krydsfiner- eller spånplader med tynd belægning. Gulve med plader på strøer giver i reglen en ringere lydisolation end bræddegulve på strøer.

Svømmende betonplader udstøbes på 30-50 mm tykke underlag eller udføres med betonelementer eller -fliser, der lægges på brikker af elastisk materiale eller svingningsdæmpere. Tidligere blev svømmende pladegulve ofte udført med plader af støbeasfalt. Svømmende asfaltgulve kan udføres med små tykkelser, 30-50 mm med underlag, og samtidig give en betydelig trinlyddæmpning.

## Underlag for svømmende gulve

Materialer til underlag for svømmende gulve skal være lyddæmpende og kunne tåle en sammentrykning på ca. 10 pct. ved gulvets nyttelast uden at miste elasticiteten, men de skal samtidig være så stive, at der ikke med tiden sker for stor deformation af underlag, og dermed af gulve ved påvirkning med variabel last. Den største trinlyddæmpning opnås med underlagsmaterialer med stor sammentrykkelighed og med stor tykkelse.

Underlagsmaterialet kan udlægges som brikker eller i strimler eller over hele gulvarealet. For samme last og sætning skal materialets stivhed være større, når det udlægges som brikker eller strimler, fremfor i fuld flade. Til brikker anvendes som regel 12 mm blød træfiberplade. Til underlag i strimler eller i fuld flade anvendes 30–100 mm mineraluld eller skumplast.

Til underlag for støbte, svømmende pladegulve bør ikke anvendes mineraluld eller skumplast med mindre tykkelser end 10 mm, da disse materialer ofte beskadiges eller ødelægges under støbearbejdet. Materialer med væsentlig større trækstyrke end mineraluld og som kan danne tæt underlag for støbmaterialer bør foretrækkes, f.eks. tæppefilt lagt med gummivrangensiden opad. Dækkets ruhed skal være væsentligt mindre end underlagets tykkelse. Underlag med ringe tykkelse som fiberlærred og filt udlægges i flere lag.

#### *Svømmende trægulve på strøer på betondæk*

Trinlydniveauet målt under *betondæk* med svømmende trægulve på strøer er afhængigt af strøernes underlag. I tabel 7.2 er trinlydniveauet anført for betondæk med parketgulv med forskellige underlag.

Med henvisning til figur 7.1 er i det følgende omtalt detaljer af gulve på strøer på ét lag brikker af blød træfiberplade på betondæk. Det her anførte gælder principielt også for gulve på andre underlag og for gulve på træetageadskillelser.

Før gulvlægning påbegyndes, skal betondæk renses omhyggeligt. Eventuelle pukler og grater på dæk, f.eks. over støbte dækfuger, skal afhugges under

*Tabel 7.2. Trinlydniveau  $L_{n,w}$  for betondæk med parketgulve med forskellige underlag. Måleresultater mærkede med \* kan kun undtagelsesvis opnås, og anvendelse af de pågældende underlag forudsætter en grundig afprøvning af materialets holdbarhed.*

Dæk af 150 mm massiv beton eller 185 mm hule betonelementer med parketgulv på strøer på underlag af	dB
1 lag brikker af 12 mm blød træfiberplade	56
2 lag brikker af 12 mm blød træfiberplade	54
1 lag brikker af 12 mm blød træfiberplade og med ca. 30 mm sand udlagt på papir mellem strøer	51
1 lag strimler af 20 mm polystyrenskum	58*
1 lag 30 mm mineraluld (densitet ca. 150 kg/m <sup>3</sup> ) over hele gulvarealet	47*
1 lag brikker af 4 mm hård træfiberplade	62
Plastkiler	57–61
150 mm massiv betondæk med 14 mm parketbrædder på asfalt-pap med 3–4 mm korksmuld på underside	57

strøer, således at der bliver mindst 10 mm luft under strøer. Herved sikres, at der ikke ved nedbøjning af strøer og sammentrykning af underlag dannes lydbroer mellem gulve og dæk.

Strøer lægges på underlag af 100 mm × 100 mm brikker af blød træfiberplade mindst 12 mm tyk eller på underlag med tilsvarende lydtekniske egenskaber. Strøer må ikke fastgøres til eller berøre dækket. Ved gulvlægning skal fabrikantens lægningsanvisning følges.

Der bør ikke være flere understøtningspunkter under strøer end nødvendigt, idet for mange gør underlaget for stift, og hermed forringes gulvets trinlyddæmpning.

Hvor strøer opklodses eller opkiles, skal der anbringes bløde brikker under klodser eller kiler og mellem kiler og brikker desuden hårde pladestykker til fordeling af tryk. Anvendelse af plastkiler uden underlag af bløde brikker kan forringe trinlydniveauet indtil 5 dB, afhængigt af hvor hårde kilerne er. Det er som regel nødvendigt at fæstne opklodsninger til strøer med stiksøm, men sømmene må aldrig slås ned i de bløde brikker, da de herved danner lydbroer mellem gulve og dæk, når brikkerne sammentrykkes under belastning af gulvet.

Bløde brikker kan fæstnes til strøer eller klodser ved limning; sømning må ikke anvendes.

På plane betondæk kan strøer uden opklodsning lægges på bløde brikker, forudsat at der overalt under det belastede gulv bliver mindst de nævnte 10 mm luft mellem strøer og dæk.

Ender af strøer skal holdes mindst 10 mm fra færdige vægge, eventuelle afstandsklodser og styrekiler mellem strøer og vægge skal fjernes før gulvlægning afsluttes, og der skal udskæres i strøer for eventuelle el-rør, således at der altid er mindst 10 mm luft mellem rør og strøer. Med disse foranstaltninger modvirkes forplantning af trinlyd til vægge og dæk, og frembringelse af lyd fra gnidning mellem rør og strøer.

Ved sømning af gulvbrædder til strøer skal anvendes dykkere, kortere end den samlede tykkelse af strøer og brædder, således at dykkerne ikke danner lydbroer mellem gulve og dæk. For at modvirke *knirkning* i gulve bør der ikke

sømmes i eventuelle svindrevner, og ved fordækt sømning bør dykning udføres omhyggeligt. Risikoen for knirkning kan reduceres ved at indlægge tynde strimler af filt eller kork mellem strøer og gulvbrædder. Brædder med krumme sider, som forhindrer, at bræddekanter kan ligge an mod strøer efter sømning, bør frasorteres.

Gulvbrædder bør lægges med mindst 10 mm afstand til vægge. Eventuelle afstandsklodser og kiler mellem brædder og vægge skal fjernes, når gulvet er sømmet. Fodpaneler bør kun fastgøres i vægge. Eventuelle sandlister bør kun fastgøres i gulve.

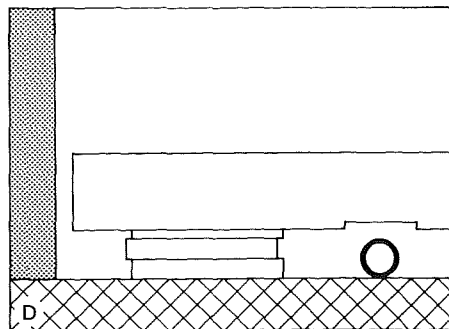
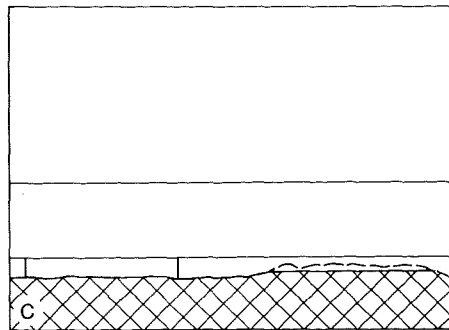
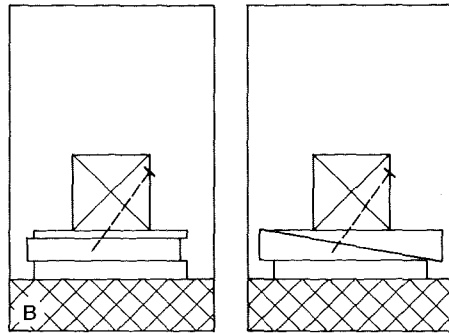
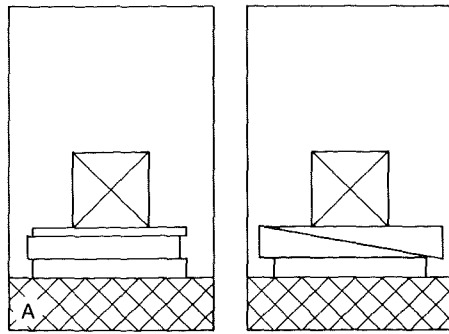
Hvor vand- og varmerør føres gennem gulve, og hvor el-rør eller -kabler føres op fra gulve, skal der i gulvbrædder udskæres således, at afstanden mellem rør og brædder bliver mindst 10 mm. Herved undgås, at gulve ved bræddernes eventuelle udvidelse kommer i spænd mod rør og danner lydbroer. Udskæringer i gulvbrædder dækkes med plader eller rosetter, der ligeledes for at undgå lydbroer ikke bør fastgøres i gulvbrædder.

Gulvbrædder bør afbrydes med mindst 20 mm fuger under døre med underkarmstykker. Strøer og eventuelle ekstra strøer under døre afbrydes tilsvarende og uden fælles opklodsning af strøender. Herved reduceres lydtransmissionen fra rum til rum via gulve.

Hvor der mellem strøer udlægges et lag lydabsorberende materiale, som uindpakket mineraluld eller sand, øges gulvenes isolation mod luft- og trinlyd. Anvendes mineraluldsgranulat eller sand, må strøer indhylles i papir eller plastfolie for at hindre, at materialet aflejres under strøer og danner lydbroer til dæk. Absorptionsmaterialet dæmper stående lydbølger i hulrum og reducerer

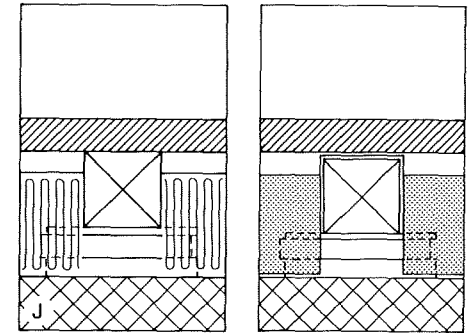
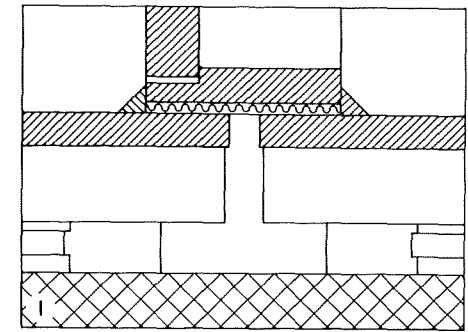
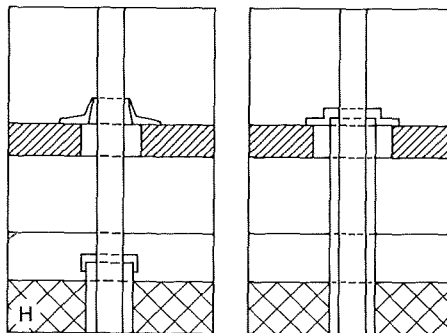
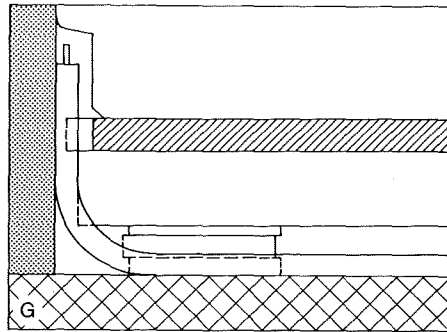
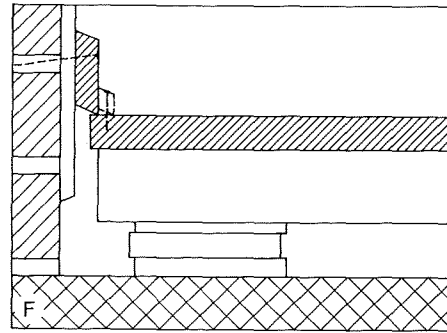
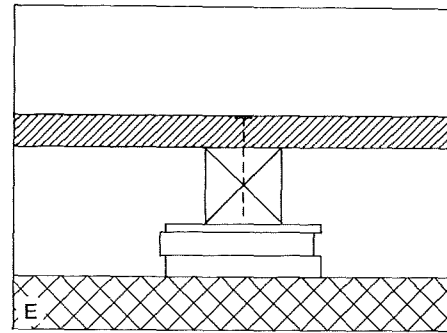


lydudstrålingen fra gulvet til rummet over gulvet. Dette har især betydning, hvor afstanden mellem dæk og gulvbrædder er stor. Sand har foruden den lydabsorberende virkning også en dæmpende virkning på lydudstrålingen fra betondækket, idet 30 mm sand virker som en forøgelse af dæktykkelsen med ca. 20 mm beton.



Figur 7.1. Detaljer af svømmende trægulve på strøer på betondæk. Mellem strøer bør udlægges lydabsorberende materiale. Lodrette snit 1:5.

- A. Opklodsning eller opkiling af strøer på bløde brikker.
- B. Stiksømning af strøer på klodser eller kiler.
- C. Afstand mellem dæk og strøer uden opklodsning mindst 10 mm.
- D. Afstand mellem strøer og væg og rør på dæk mindst 10 mm.
- E. Sømning af gulvbrædder i strøer.
- F. Afstand mellem gulvbrædder og væg mindst 10 mm.
- G. Udkæring i gulvbrædder for opføring af el-rør mindst 10 mm.
- H. Udkæring i gulvbrædder for rør og rørbøsninger med dækrosetter mindst 10 mm.
- I. Afbrydelse af strøer og gulvbrædder under dørkarm mindst 20 mm.
- J. Lydabsorberende materiale, mineraluld eller sand, mellem strøer. Aflejring af sand under strøer hindret med papir eller plastfolie over strøer.

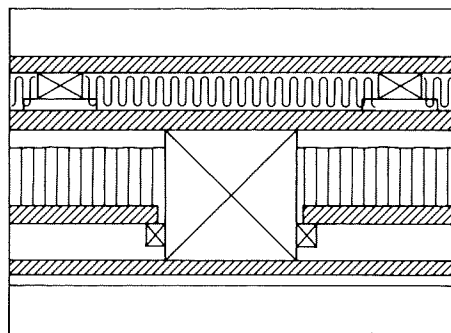


## Svømmende trægulve på strøer på træetageadskillelser

Træetageadskillelser med bjælkelag og bræddegulv kan forbedres lydæssigt med svømmende trægulve på strøer lagt på de gamle gulve og udført som tilsvarende gulve på betondæk. Før gulvlægning tættes langs vægge med mineraluld, fugemasse og eventuelt tætningslister. Mellem strøer bør udfyldes med mindst 50 mm mineraluld, figur 7.2. Trinlyddæmpningen for et svømmende trægulv på strøer på træetageadskillelser er mindre end for tilsvarende gulve på betondæk.

Hvor et gammelt bræddegulv er kassabelt og må fjernes, kan et nyt gulv som regel med fordel udføres som et svømmende trægulv på strøer enten på indskudsleret eller, hvis dette også fjernes, på et nyt indskudslag af mindst to lag 13 mm gipsplader på 20 mm stiv mineraluld på indskudsbrædderne. Gipsplader skal for at danne lydisolierende indskudslag skæres tæt mellem bjælkerne. Strøerne bør lægges på trykfordelende strimler af spånplade eller krydsfiner på gipspladerne, og således at gulvbræddernes underside er hævet ca. 20 mm over bjælkerne overside. For at modvirke lydbroer bør der lægges strimler af halvstiv mineraluld mellem bjælker og gulvbrædder og desuden udfyldes med mineraluld mellem strøer.

Svømmende trægulve på strøer er også egnede på nye træbjælkelag og udføres med strøer lagt på strimler af stiv mineraluld direkte på bjælker. Der opnås herved en bedre isolation mod trinlyd end for bjælkelag med brædderne sømmede direkte i bjælkerne. Hvis der på bjælkerne først lægges et lag plader af gips, tæt sluttet til vægge, og der mellem strøerne udfyldes med mineraluld, for-



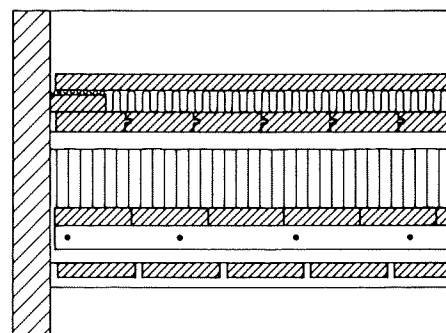
Figur 7.2. Svømmende trægulv på strøer på træetageadskillelse. Lydabsorberende materiale mellem strøer. Lodret snit 1:10.

bedres også etageadskillelsens luftlydisolation.

### Svømmende træ- eller gipspladegulve

Svømmende pladegulve kan udføres med plader af træ eller gips og anvendes både på betondæk og på træetageadskillelser. Før udførelsen skal dæk eller gulvflader renses og om nødvendigt afrettes. Ujævnheder, der kan danne lydbroer, skal fjernes. Herefter udlægges pladeunderlaget, der kan være 30–50 mm stiv mineraluld eller skumplast. Til svømmende plader kan anvendes 22–30 mm spånplader, 20 mm krydsfinerplader eller specielle gipselementer, alle samlet med fer og not. For at undgå for store sætninger langs vægge kan der langs disse anbringes afrettede brædder eller planker ca. 5 mm tyndere end det usammentrykkede underlag, figur 7.3.

Svømmende gulve med plader på tynde underlag af asfaltpap med korksmuld eller pap med kugler af polystyrenskum, kan give et rimeligt lavt trinlydniveau, se tabel 7.2, når de lægges direkte på betondæk, men ikke når de lægges på træetageadskillelser. Gulve-



Figur 7.3. Svømmende trægulv uden strøer på træetageadskillelser eller betondæk. 22–30 mm spånplade på 30 mm mineraluld og med understøtning langs vægge. Understøtningen skal være ca. 5 mm tyndere end mineraluldens tykkelse. Mellem understøtning og gulvbrædder skal anbringes 10 mm let sammentrykkeligt mineraluld. Lodret snit 1:10.

nes trinlyddæmpning sker i hovedsagen ved høje frekvenser, mens behovet for trinlyddæmpning for træetageadskillelsen hovedsagelig ligger ved lave frekvenser. Dette svarer til situationen ved anvendelse af tynde belægninger.

Svømmende gulve med 8–10 mm hårde træfiberplader på 30–40 mm afrette-

de sandlag på betondæk eller træetageadskillelser giver trinlyddæmpning svarende til trægulve på strøer, men kun hvis sand i lagets overflade ikke kan forskubbes.

### Svømmende betongulve

Betonplader i svømmende pladegulve skal være adskilte fra vægge, dæk og installationer med elastisk materiale for at modvirke lydbroer, der i væsentlig grad forringer trinlyddæmpningen. Svømmende betongulve kan inddeles i to grupper, hvor gulvene i den ene gruppe har mindst 20 mm tykke elastiske underlag og meget stor trinlyddæmpning, mens gulvene i den anden gruppe har tyndere og mindre elastiske underlag og forholdsvis ringe trinlyddæmpning. Gulve med stive underlag med ubetydelig sammentrykning er bedst egnede, hvor der skal udføres gulvafløb med indstøbte afløbsskåle.

I tabel 7.3 er vurderet egnethed af forskellige underlag for gulvene i de to grupper. Mineraluld og skumplast er velegnede til gulve i den første gruppe,

Tabel 7.3. Vurdering af egnethed af underlagsmateriale til svømmende betongulve. Gulve i gruppe 1 har stor trinlyddæmpning. Gulve i gruppe 2 har forholdsvis ringe trinlyddæmpning.

Svømmende betongulve på betondæk Pladetykkelse > 30 mm, gulvareal ≤ 30 m <sup>2</sup>	Gruppe 1	Gruppe 2
Underlagets tykkelse ved sammentrykning med nyttelast, mm	> 20	6–10
Underlagets dynamiske stivhed, MN/m <sup>3</sup>	< 30	30–90
Skøn over underlagets egnethed		
Mineraluld 10–30 MN/m <sup>3</sup>	Velegnet	Mindre egnet
Skumplast 30–200 MN/m <sup>3</sup>	Egnet	Mindre egnet
Korksmuld 80 MN/m <sup>3</sup>	Mindre egnet	Egnet
Filt 90 MN/m <sup>3</sup>	Ikke egnet	Velegnet



men uegnede som tynde underlag til gulve i den anden gruppe, idet der erfaringsmæssigt dannes lydbroer i underlag af disse materialer med tykkelser under 20 mm. Normalt bruges mineraluld i 30–50 mm plader med relativ stor stivhed og hårdhed eller skumplast i lidt mindre tykkelser. Betonplader bør altid være tykkere end 30 mm og er normalt 40 til 70 mm tykke for gulve i begge grupper. I større, sammenhængende gulvarealer er armering nødvendig. Det frarådes, DIN 4109, at udføre større sammenhængende arealer end 30 m<sup>2</sup>. Den anførte stivhed for underlagsmateriale er den dynamiske stivhed per arealenhed, ISO 9052/1.

Før underlag udlægges skal dæk renses fuldstændigt, og eventuelle ujævnheder, der kan danne lydbroer mellem svømmende betonplader og dæk, skal afhugges. Større lunger kan afrettes med tørt sand, højdeforskelle ved fuger mellem dækelementer bør udjævnes med mørtel. Underlag skal kunne tåle en sammentrykning på 10 pct. uden at miste elasticiteten. Sammentrykningen over enkle, lokale ujævnheder bør intet sted overstige 50 pct.

Med henvisning til figur 7.4 er i det følgende omtalt detaljer af svømmende betongulve med mere end 20 mm tykke underlag. Det her anførte gælder principielt også for gulve med andre underlag.

Fuger mellem underlag skal være tætte, og underlagspladerne bør fastholdes under støbningen, således at beton ikke kan trænge ned mellem dem og danne lydbroer til betondæk. Tykke underlag kan udføres af to lag plader med forskudte fuger, hvorved risikoen for lydbroer reduceres. Dette gælder også for tynde underlag af filt eller lignende materialer, der normalt kan lægges med overlæg. Langs vægge og om rør bør an-

bringes lodret kant- og rørisolering med samme elasticitet som underlagsmaterialet og mindst 10 mm tyk.

Pudslag og andre hårde gulvbelægningsmaterialer som keramiske fliser på svømmende plader kan skabe lydbroer til vægge. Kantisoleringen ved vægge og isoleringen ved rør bør derfor føres op til oversiden af disse belægningsmaterialer og tættes med elastisk fugemasse.

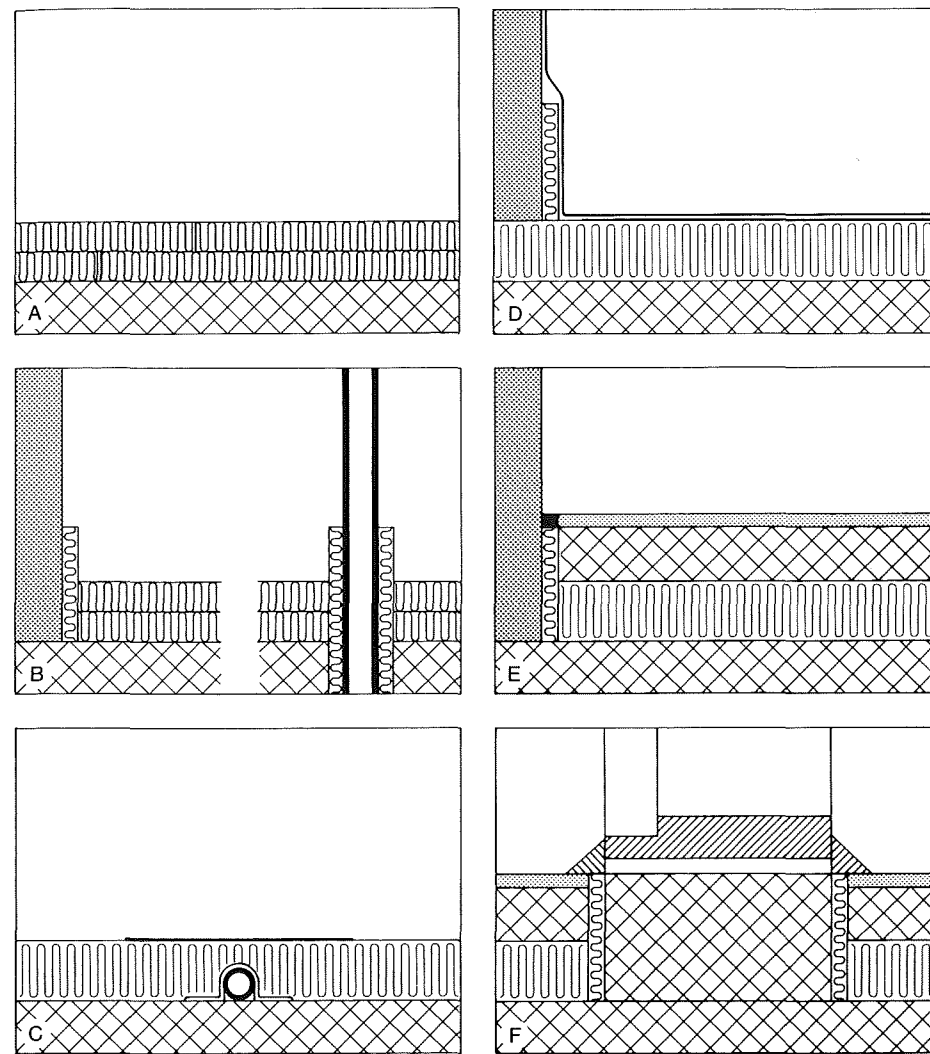
Hvor el-rør lægges i underlag under plader bør de fastgøres til dæk med rørholdere og dækkes med underlagsmateriale og kraftig ribbepap. Tykkelsen af underlagsmaterialet over rør må ikke være mindre end det halve af underlagets tykkelse, dog aldrig mindre end 15 mm.

Før betonplader støbes, dækkes alle fuger mellem underlagsplader med mindst 0,2 mm plastfolie. For underlag med porøs overflade som mineraluld bør plastfolie udlægges med mindst 150 mm overlæg over hele underlaget. Langs vægge og ved rør skal plastfolien bøjes op og nøje følge underlaget.

Udlagte underlag kan blive overbelastet og ødelagt ved færdsel før og under støbearbejdet og skal beskyttes med gangbrædder og trilleplanker på trykfordelende brædder eller plader, der fjernes i takt med støbearbejdet. Armering i betonplader skal fastholdes i korrekt position under støbningen.

Store svømmende betonplader bør opdeles i mindre plader. Hvor der skal opstilles lette skillevægge, og hvor der er døre i bærende vægge bør der ligeledes udføres fuger i betonplade eller udstøbes som vist i figur 7.4.

Svømmende betonplader i rum med maskiner bør udføres med tykkelser på 80–150 mm, afhængigt af maskinernes størrelse. Jo større tykkelse pladerne har, desto mindre vibrationsamplituder vil



Figur 7.4. Detaljer af svømmende betongulve. Lodrette snit 1:5.

- A. Underlag af et lag plader eller af to lag med forskudte fuger.
- B. Kantisolering langs væg og rørisolering til overside af betonplade med gulvbelægning. Isoleringstykkelse mindst 10 mm.
- C. El-rør eller kabel fastgjort i betondæk og dækket med underlagsmateriale og pap. Underlagets tykkelse over rør eller kabel mindst 15 mm.
- D. Dækning af underlag og kant- og rørisolering med plastfolie med mindst 150 mm overlæg.
- E. Tætning med fugemasse mellem væg og belægning på betonplade.
- F. Udstøbning under dør adskilt fra gulv med mindst 10 mm isolering.

maskinerne frembringe i en bygning. Tykke plader er også nødvendige i restaurationer og andre lokaler, hvor der frembringes kraftig *bygningsslyd* ved dans, udøvelse af sport og ved brug af visse musikinstrumenter, f.eks. klaver, kontrabas og slagtøj.

### Forsatsbeklædninger, forsatsvægge og underlofter

Lydisolation af vægge og dæk kan øges med forsatsbeklædninger eller med selvstændige forsatskonstruktioner som forsatsvægge og underlofter. *Forsatsbeklædninger* fastgøres direkte på vægge og på underside af betondæk,

træetageadskillelser eller tagkonstruktioner. *Forsatsvægge* fastgøres foruden eller foroven i dæk eller etageadskillelser og i siderne i flankerende vægge. *Underlofter* ophænges i dæk eller etageadskillelser eller tagkonstruktioner med stropper eller fastgøres i vægge, hvis de udføres tilstrækkeligt stive til at spænde frit her imellem. Både forsatsbeklædninger, forsatsvægge og underlofter skal være tætte for at give en væsentlig forbedring af lydisolationen. Beklædninger af loftsfliser og -brædder kan i lydteknisk henseende ikke anses for tætte, og bør kun sættes på tætte pladeunderlag.

Som regel anvendes beklædningspla-

der i store formater, hyppigt gipsplader, men også plader af andre materialer kan anvendes. Beklædning med to lag plader med forskudte fuger er mindre bøjningsstive og isolerer derfor bedre mod luftlyd end beklædning med et pladelag med den dobbelte pladetykkelse.

### Forsatsbeklædninger

Væg- og loftsbeklædningsplader op-sættes på underlag af trælægter, træ-lister eller stålskinner, der fastgøres til vægge, dæk, etageadskillelser eller tagkonstruktioner, eventuelt på opret-ningslister. Lægter og skinner, der nor-malt er mellem 16 og 40 mm tykke, an-bringes med en centerafstand på 600 mm, og der udfyldes med mineraluld mellem dem, figur 7.5.

For med en forsatsbeklædning at opnå en forbedring af lydisolationen i hele frekvensområdet fra 100 Hz til 3150 Hz for en bygningsdel skal den med beklædningen frembragte resonansfrekvens være væsentlig under 100 Hz. Dette kan opnås med to lag gipsplader på 40 mm underlag, hvorimod 16 mm underlag kan medføre en forringelse i stedet for en forbedring af lydisolationen for bygningsdelen uden beklædning. Lette vægges og træetageadskillel-sers lydisolation kan i praksis ikke for-bedres med forsatsbeklædninger.

### Forsatsvægge

Lydisolationen af vægge kan gøres mere end 5 dB bedre med forsatsvægge frem for forsatsbeklædninger. Forsatsvægge udføres med træ- eller stålskelet med stolper eller lodskinner, der opstilles med en centerafstand på 600 mm og i en afstand fra vægge på mindst 30 mm for stolper og 10 mm for lodskinner. Mel-

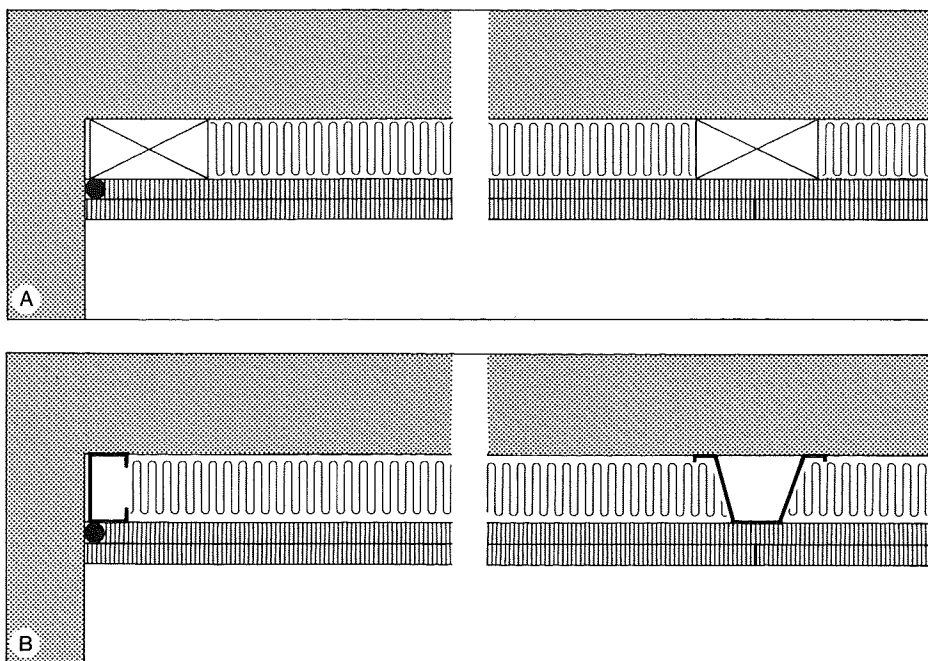
lem stolper og mellem lodskinner an-bringes mindst 50 mm mineraluld. For-satsvægge udføres i øvrigt som pladebe-klædte skeletvægge med detaljer som vist i figur 6.5.

### Underlofter

Lydisolationen af betondæk og træeta-geadskillelser kan gøres væsentlig bedre med underlofter frem for med forsats-beklædning.

Underlofter kan udføres med bæren-de lag af brædder, planker eller stålskin-ner, der med en centerafstand på 600 mm ophænges i dæk eller etageadskil-lelser med stålstropper og desuden un-derstøttes med brædder eller skinner fastgjort på vægge, figur 7.6 A og B. Til det bærende lag fastgøres per 600 mm lægter, brædder eller stålskinner, der sammen med understøtningerne på vægge danner underlag for pladebe-klædningen. Over beklædningen an-bringes mindst 50 mm mineraluld, og der tættes mellem beklædning og væg-ge med fugemasse. Den samlede højde for ophængte underlofter er mindst 150 mm.

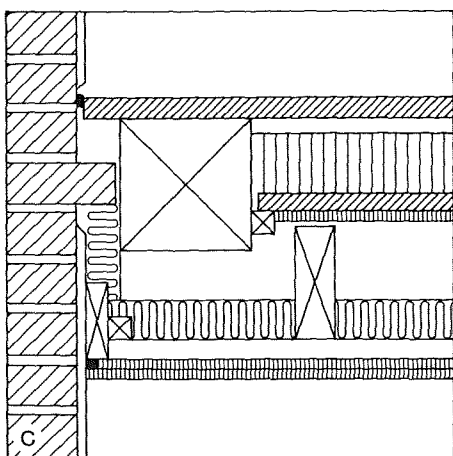
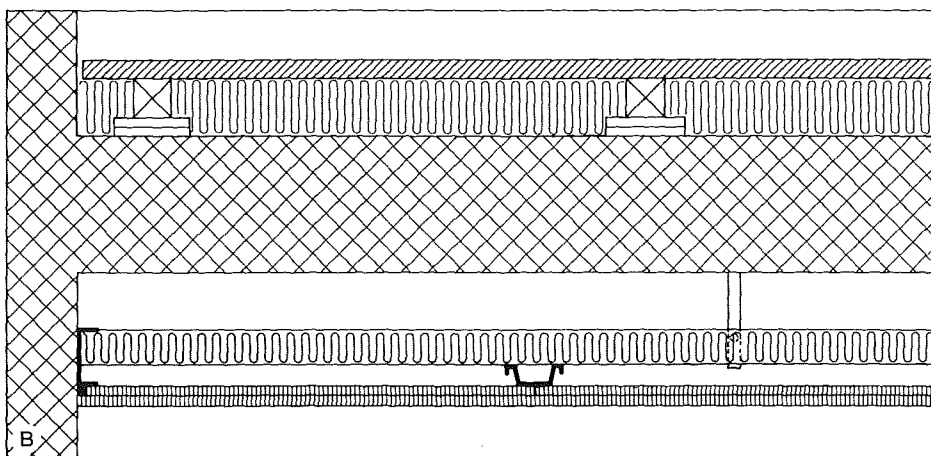
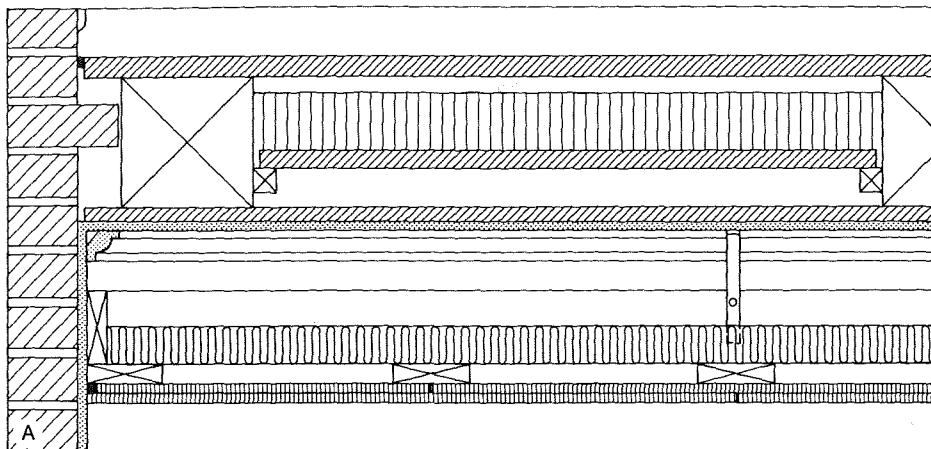
Underlofter kan også udføres med bærende planker eller bjælker, frit-spændende mellem og kun fastgjort i vægge, altså uden forbindelse med dæk eller etageadskillelser. Hertil kræves en større højde end 150 mm afhængigt af spændvidde og dermed bjælkehøjde. Disse underlofter kan af hensyn til for-skriftsmæssige etagehøjder og rumhøj-der i reglen kun anvendes i bygninger med træbjælkelag, hvor underlofternes bjælker i højden kan placeres delvis mellem bjælkelagens bjælker, men uden forbindelse med disse og eventuelt indskud, figur 7.6 C. I ældre bygninger vil denne placering nødvendigvis, at



Figur 7.5. Eksempler på forsatsbeklædninger på lofter og vægge, centerafstand mellem underlagslister 600 mm. Lodrette og vandrette snit 1:5.

A. Underlag af mindst 40 mm tykke lægter eller planker.

B. Underlag af 45 mm stålskinner.



Figur 7.6. Eksempler på underlofter. Lodrette snit 1:10.

- A. Bærende brædder eller planker ophængt i stropper, underlag af brædder for beklædning.
- B. Bærende stålskinner ophængt i stropper, underlag af stålskinner for beklædning.
- C. Bjælker fritspændende mellem vægge og hævet mellem bjælker i etageadskillelser, underlag af brædder for beklædning. Gipspladebeklædning på underside af indskudsdæk.

loftsbeklædning under bjælker fjernes. Som underlag for pladebeklædning på underlofternes bjælker anvendes normalt spredt forskalling med supplerende underlag langs vægge. Over beklædning anbringes mindst 75 mm mineraluld, og der tætnes mellem beklædning og vægge med fugemasse.

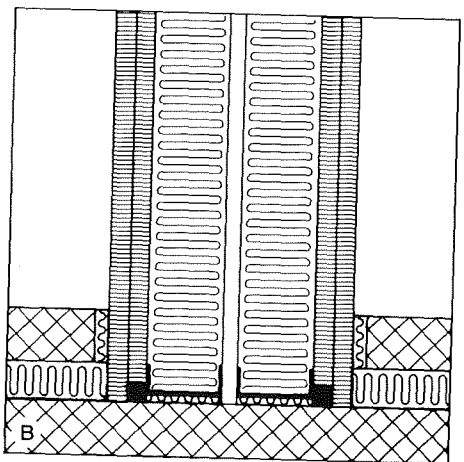
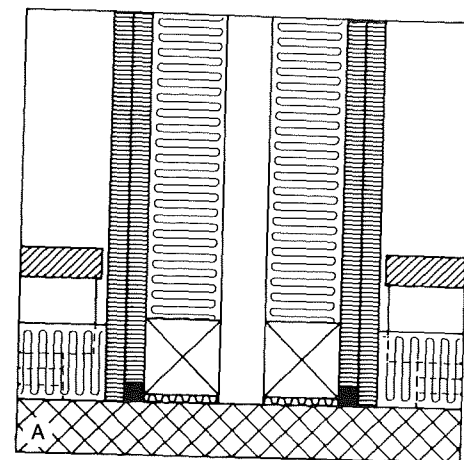
## Samlinger

### Gulve

Hårde gulvbelægninger som betonslidlag, terrazzo og teglfliser, der lægges direkte på betondæk, og tynde belægninger som linoleum og vinyl, der lægges med eller uden bløde underlag på betondæk eller træetageadskillelser, afsluttes mod vægge uden særlige lydtekniske foranstaltninger. Anvendes disse belægninger på svømmende gulve, skal de afsluttes uden forbindelse med vægge, således at der ikke dannes lydbroer mellem gulve og vægge, se figur 7.7. Hvor svømmende gulve afbrydes med fuger under lette vægge, skal belægningerne afbrydes tilsvarende, se figur 7.8 C og 7.8 D.

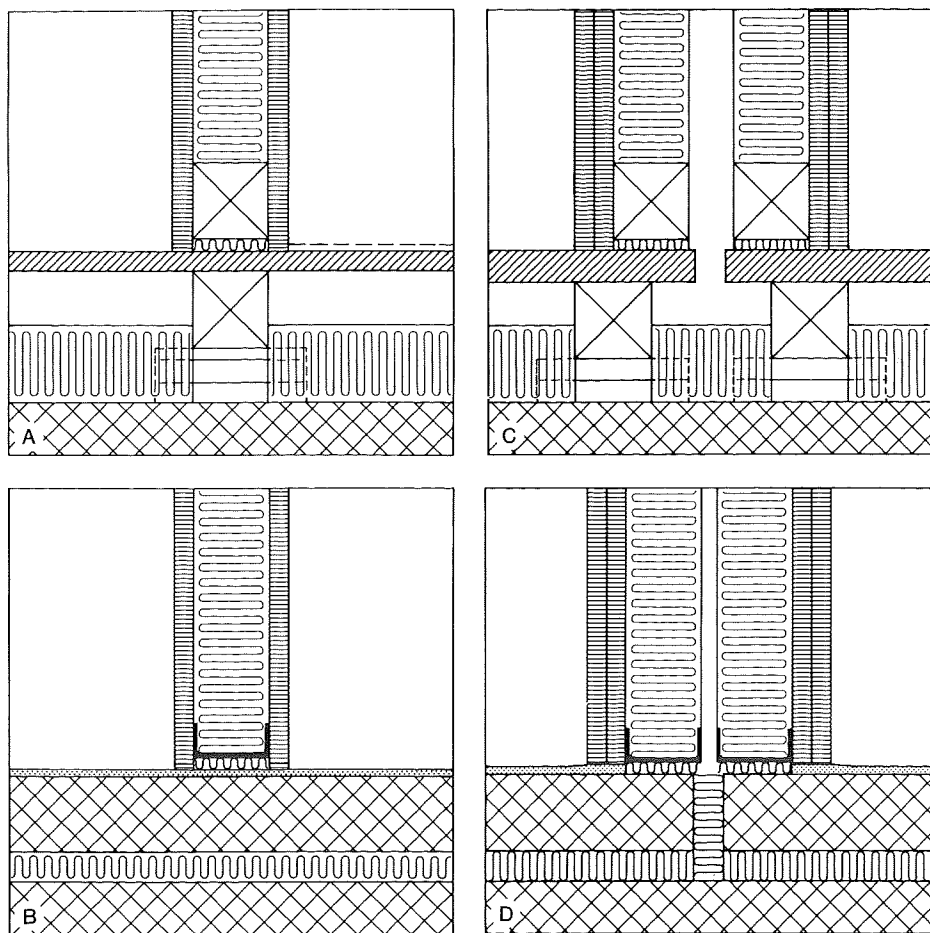
Samlinger mellem svømmende gulve og lette vægge bør udføres sådan, at lydtransmission via gulvene ikke forringer den med de givne vægge opnåelige lyd-isolation.

Hvor lette vægge opstilles på betondæk, se figur 7.7, vil transmissionen af trinlyd kun virke ubetydeligt forringende på den med de pågældende vægge opnåelige lyd-isolation. Vægge kan opstilles på svømmende gulve, se figur 7.8, men lydtransmissionen gennem gulvene bør så være væsentlig mindre end gennem væggene, og gulvene bør desuden dækkes med effektivt trinlyddæmpende tæpper eller med tynd belægning på blødt underlag. Hvis væggenes lyd-isola-



Figur 7.7. Samlinger mellem svømmende gulve og pladebeklædte skeletvægge opstillet på betondæk. Lodrette snit 1:5.

- A. Dobbelt træskeletvæg, mindst 30 mm mellemrum mellem vægskelletter, og svømmende trægulv på strøer med mineraluld mellem strøer.
- B. Dobbelt stålskeletvæg, mindst 10 mm mellemrum mellem vægskelletter, og svømmende betongulv med mineraluld mod væg.



Figur 7.8. Samlinger mellem svømmende gulve og pladebeklædte skeletvægge. Dobbelt vægge opstillet på gulve med fuger under vægge og tætning med fugemasse ved begge vægside. Lodrette snit 1:5.

- A. Enkelt træskeletvæg på svømmende gulv.
- B. Enkelt stålskeletvæg på svømmende betongulv.
- C. Dobbelt træskeletvæg, mellemrum 30 mm, på svømmende trægulv på strøer med mineraluld mellem strøer med mindst 20 mm fuger i gulv.
- D. Dobbelt stålskeletvæg, mellemrum 10 mm mellem vægskelletter, på svømmende betongulv med mindst 20 mm fuger i gulv.

tion er 40 dB eller mere, bør der i gulve under vægge udføres mindst 20 mm tykke fuger, der i svømmende betongulve udfyldes med mineraluld eller med skumplast. Fugerne placeres således, at enkeltvægge kan fastgøres i gulve til samme side for fuger og delvægge i dobbeltvægge til hver sin side for fuger. Med disse foranstaltninger bliver transmissionen gennem gulve af både luftlyd og trinlyd uvæsentlig i forhold til transmissionen gennem vægge og dermed for den resulterende lydisolations.

Med enkeltvægge opstillet på trægulve på strøer bliver lydtransmissionen

gennem gulvene så stor, at der højst kan opnås en resulterende lydisolations på 35 dB. Dæmpningen af trinlyd er – selv med en tæppebelægning – heller ikke acceptabel. Med dobbeltvægge opstillet på trægulve på strøer med fuger under vægge kan højst opnås en resulterende lydisolations på lidt under 50 dB, mens isoleringen mod både luft- og trinlyd bliver ca. 5 dB bedre med vægge opstillet på dæk, som vist i figur 7.7.

Med vægge opstillet på svømmende betongulve kan der med fuger i gulve under vægge opnås en stor lydisolations, se tabel 7.4.

Tabel 7.4. Opnåelig lydisolations for samlinger mellem skeletvægge og svømmende pladegulve af beton, eller støbeasfalt på betondæk. Væggenes maksimale lydisolations  $R_w$  forudsættes større end den opnåelige lydisolations  $R_w$ .

Samling mellem skeletvæg og svømmende gulve		Opnåelig lydisolations $R_w$ dB
Gulv gennemgående under væg:	Betonplade	40
	Plade af støbeasfalt	45
Betongulv afbrudt med fuge under væg:	10 mm fuge	50
	20 mm fuge	55
Betongulv afbrudt ved væg:		65

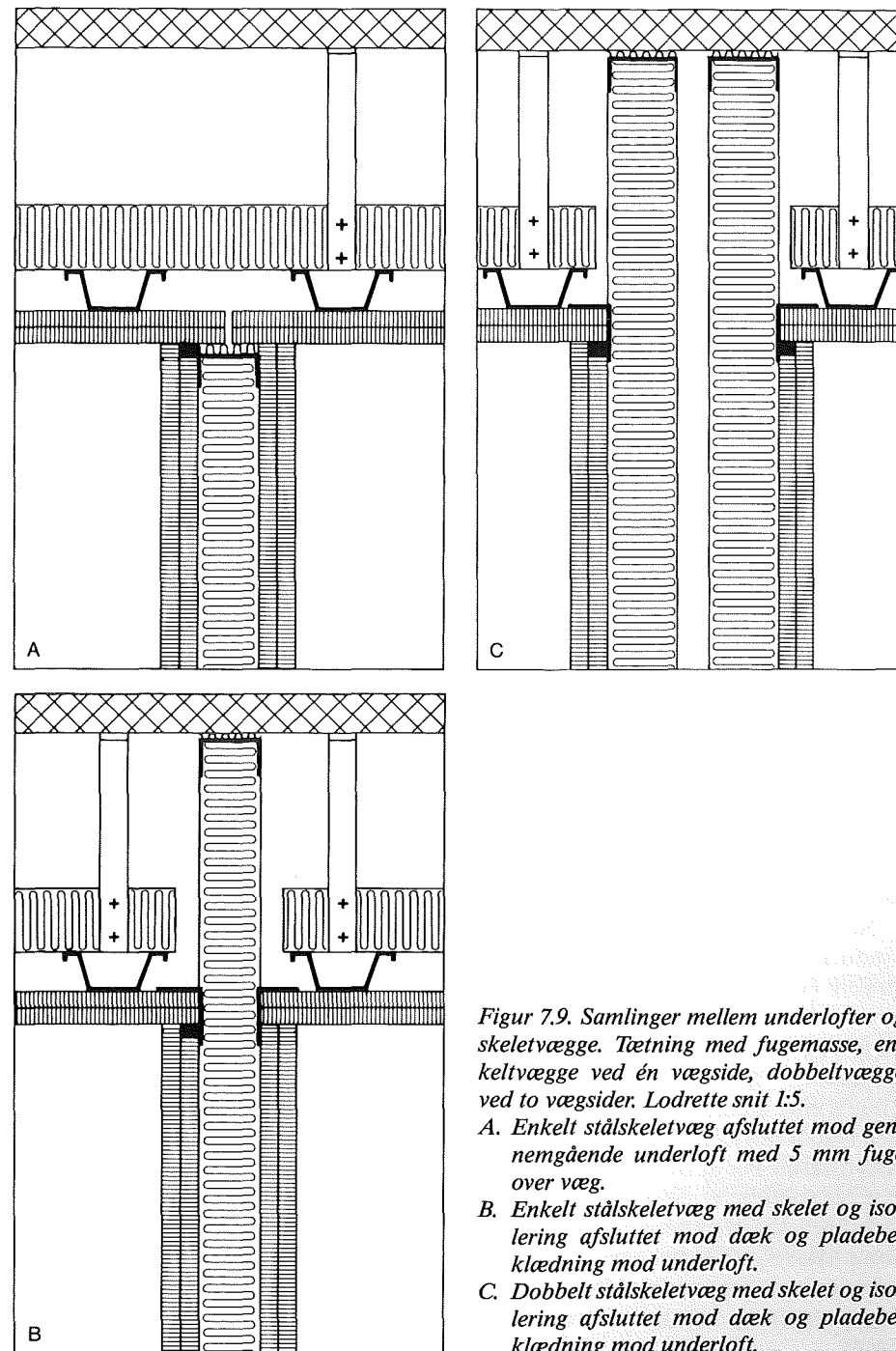
## Forsatsbeklædninger og forsatsvægge

Samlinger mellem forsatsbeklædninger eller forsatsvægge og gulve, lofter og flankerende vægge er vist i figur 7.5, henholdsvis figur 6.5, og samlinger med skeletvægge i figur 6.26.

## Underlofter

Samlinger mellem underlofter og begrænsende vægge udføres med brædder eller stålskinner fastgjort på vægge, som vist i figur 7.6. Samlinger med skeletvægge kan udføres med vægge afsluttet med gennemgående underlofter eller – lydteknisk bedre – med vægge ført over underlofter og afsluttet mod dæk, etageadskillelse eller tagkonstruktion, se figur 7.9.

Afslutning mod gennemgående underloft bør kun anvendes for enkeltvægge med enkelt pladebeklædning, og altid med tætte fuger mod lofter. For enkeltvægge med dobbelt pladebeklædning bør underlofter afbrydes med fuger over vægge eller skelet med isolering ført op til dæk. Dobbeltvægge bør altid føres over underlofter til dæk, etageadskillelser eller tagkonstruktioner og lydteknisk bedst med pladebeklædning i fuld højde. Fuger i hjørner mellem væg og loftsbeklædningsplader bør tættes med fugemasse.



Figur 7.9. Samlinger mellem underlofter og skeletvægge. Tætning med fugemasse, enkeltvægge ved én vægside, dobbeltvægge ved to vægside. Lodrette snit 1:5.

- A. Enkelt stålskeletvæg afsluttet mod gennemgående underloft med 5 mm fuge over væg.
- B. Enkelt stålskeletvæg med skelet og isolering afsluttet mod dæk og pladebeklædning mod underloft.
- C. Dobbelt stålskeletvæg med skelet og isolering afsluttet mod dæk og pladebeklædning mod underloft.

## Døre og vinduer

Tunge vægge med døre og vinduer har som regel ringere lydisolationsend tilsvarende vægge uden døre og vinduer. Dette skyldes, at lydtransmissionen gennem døre og vinduer normalt er større end transmissionen gennem tunge vægge og derfor bestemmende for den resulterende lydisolationsend. For lette vægge med vinduer vil lydtransmissionen gennem vægge og vinduer ofte være af samme størrelse, og vinduer vil i sådanne tilfælde indvirke mindre på den resulterende lydisolationsend. Lydtransmission gennem døre er derimod normalt større end gennem vægge.

Korrekt udførte og indsatte døre og vinduer giver, målt i laboratorium, en lydisolationsend, der omtrent svarer til lydisolationsend for de pågældende dørplader og vinduesruder.

Når lydisolationsend målt med døre og vinduer indsat i vægge i reglen er noget ringere end ved måling i laboratorium, skyldes det, at lydisolationsend nedsættes på grund af – ofte tilsyneladende betydningsløse – fejl og mangler ved indsætningen eller småændringer i forhold til den i laboratoriet afprøvede type af dør eller vindue. For at opnå den størst mulige lydisolationsend er det især nødvendigt at indsætningen af døre og vinduer udføres således, at dørplader og vinduesrammer har tætte anslag i karme, og at fuger omkring karme udføres varigt tætte.

## Døre

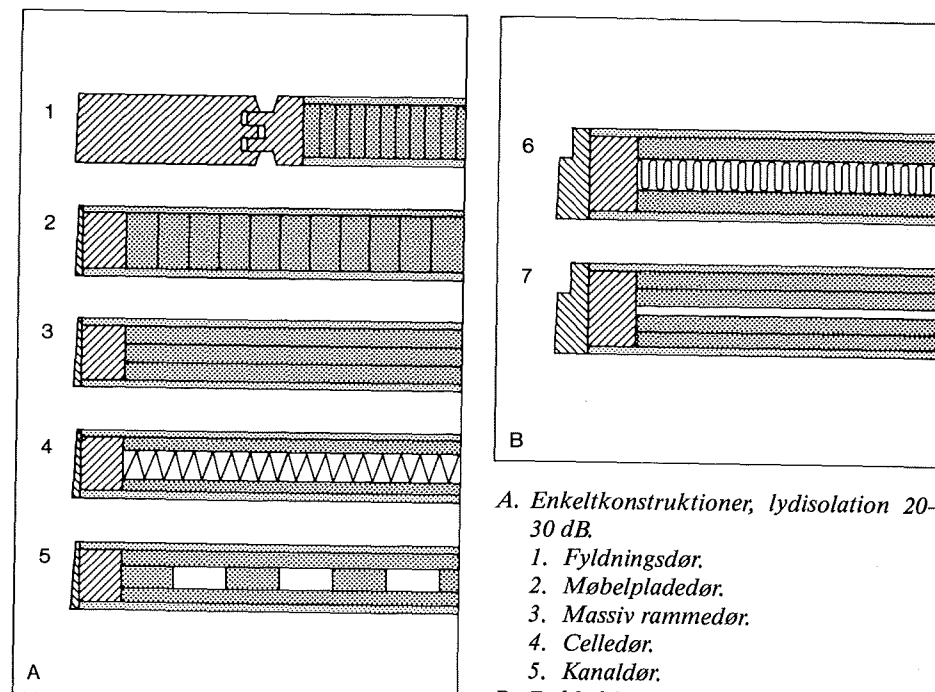
Dørens lydisolationsend afhænger af den færdige *dørkonstruktion* omfattende dørkarm med karmbefæstelser i væg, dørplade med hængsler, dörgreb og -lås (for entredøre eventuelt brevskilt og dørkikkert), tætningslister og karmfuger med fugetætning mellem såvel karm og væg som karm og gulv, samt dørindfatninger og eventuelle karmtilsætninger.

## Dørpladers lydisolationsend

Dørplader kan udføres og lydmæssigt virke som enkeltkonstruktioner eller som dobbeltkonstruktioner, se figur 8.1.

Som enkeltkonstruktion virker massive dørplader, der kan være fyldningsdøre, møbelpladedøre og rammedøre med pålimede afspærringsbeklædninger og udfyldning med træ- eller træfiberlister eller med stive plader som gips-, spån- eller træfiberplader. Møbelpladedøre kan være blok- eller stavlimede. Som enkeltkonstruktion virker også såkaldte celledøre og kanaldøre, udført som rammedøre med afspærringsbeklædninger og med hulrum opdelt i celler eller kanaler med stive indlæg af træ, pap eller andet materiale.

Som dobbeltkonstruktion virker dørplader udført af to plader, der kun er forbundet med elastiske mellemlag, for eksempel rammedøre med afspærrings-



Figur 8.1. Eksempler på dørplader. Vandret snit 1:5.

A. Enkeltkonstruktioner, lydisolationsend 20–30 dB.

1. Fyldningsdør.
2. Møbelpladedør.
3. Massiv rammedør.
4. Celledør.
5. Kanaldør.

B. Dobbeltkonstruktioner, lydisolationsend 25–40 dB.

6. Dør med elastisk mellemlag.
7. Dør med luftmellemlag.

beklædninger af tunge plader som spån-, fiber-, gips- og metalplader og med elastiske mellemlag af mineraluld eller med luftmellemlag.

Lydisolationsend for en dørplade afhænger af pladens masse per kvadratmeter og er den maksimalt opnåelige lydisolationsend for den færdige dør. Med en dørplade, der virker som dobbeltkonstruktion, kan der i gunstigste tilfælde opnås indtil 10 dB større lydisolationsend end med en dørplade, der med samme masse virker som enkeltkonstruktion.

Tidligere blev sandfyldte hulrum eller indlæg af blyplader i dobbeltkonstruktioner undertiden anvendt, når en særlig stor lydisolationsend var nødvendig. Mere hensigtsmæssigt er det at benytte stålpladedøre med lyddæmpende indlæg i en udførelse, hvor de virker som dobbeltkonstruktioner. Sådanne specialdøre er i handelen både som en-fløjede og to-fløjede døre og med lydisolationsend på 50 til 55 dB.



## Tæthed mellem dørplader og dørkarme

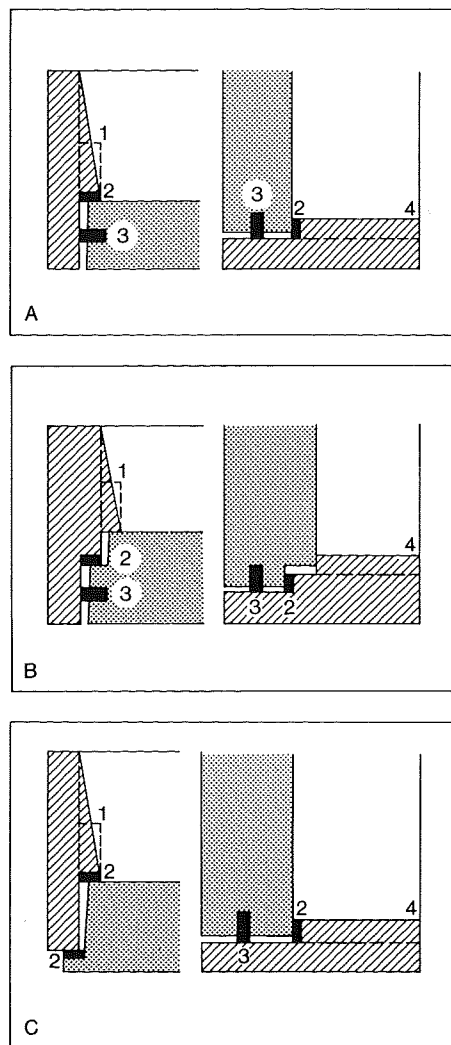
En forudsætning for, at døres lyd-isolation svarer til dørpladernes lyd-isolation, er, at lydtransmission gennem *anslag* og *frigange* mellem plader og karme er ubetydelig. Dørplader og -karme bør derfor være formstabile og udføres med brede anslag og så snævre frigange som muligt.

Døre med dobbelt *karmfals* eller med *overfals*et dørplade giver alt andet lige mindre lydtransmission end døre med enkelt karmfals, se figur 8.2.

Hvor dørkarme udføres med anslagslister, skal listerne limes og skrues i karme, så der ikke kan opstå *utætheder* mellem lister og karme. Tætningslister i anslag og frigange formindsker lydtransmissionen og er nødvendige i døre, der skal give stor lyd-isolation. *Tætningslister* skal være gennemgående uden stød, og hjørnesamlinger skal være varigt tætte.

## Karmfuger

En anden forudsætning for at døres lyd-isolation svarer til dørpladernes lyd-isolation, er, at lydtransmissionen gennem karmfuger, det vil sige fuger mellem dørkarme og vægge og mellem karme og gulve, er ubetydelig. Hulmål og karmmål skal overholde standardiserede tolerancer, for at karmfuger kan stoppes tæt. Karmfuger bør have en tykkelse på 10 til 12 mm og aldrig mindre end 5 mm eller større end 20 mm og skal stoppes jævnt og tæt med mineraluld i den fulde karmdybde. Stopning med mineraluld giver kun tilstrækkelig tæthed, hvis dørenes lyd-isolation er mindre end 25 dB. Hvis lyd-isolationen er mellem 25 og 35 dB, bør fugerne desuden tættes i én side med fugemasse. Tætning



Figur 8.2. Eksempler på dørkarme med false og anslags- og tætningslister. Snit 1:5. Venstre snit: Side- og overkarm. Højre snit: Underkarm.

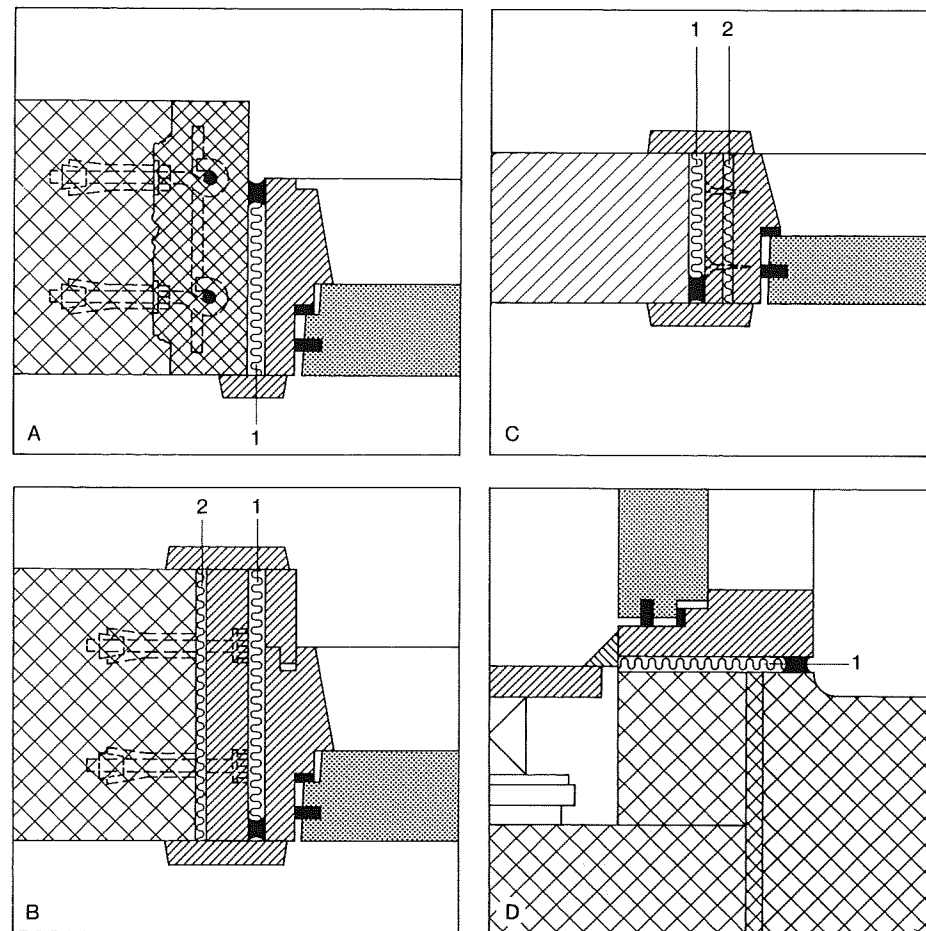
- A. Karm med enkeltfals.  
B. Karm med dobbeltfals.  
C. Karm med enkeltfals, dørplade overfals.

1. Anslagsliste  
2. Anslagstætningsliste  
3. Fugetætningsliste  
4. Slidliste

med fugemasse i begge fugesider er nødvendig, når dørens lyd-isolation er større end 35 dB, og når stopningsdybden er mindre end 80 mm. Tilfugning med mørtel giver ikke samme tæthed som fugemasse.

## Tilpasning mellem karmhuller og dørhuller

Dørhuller kan som følge af udførelsesfejl (eller hvor gamle døre skal ændres eller udskiftes) være så afvigende i mål



Figur 8.3. Eksempler på påføring i dørhuller og på dørkarm samt tætning af karmfuger. Snit 1:5.

- A. Side- eller overfals med armeret påstøbning, forankret i væg med bolte.  
B. Side- eller overfals med bræt, tykkelse højst 30 mm, boltet på væg.  
C. Side- eller overfals med bræt påskruet dørkarm.  
D. Dørkarm opstillet på supplerende udstøbning ved trappereposer.  
1. Fuge stoppet med mineraluld og tætnet i en side med fugemasse.  
2. Fuge med komprimeret mineraluld.

fra de karme, der skal indsættes i hullerne, at karmfugernes tykkelse bliver mindre end 5 mm eller mere end 20 mm tykke. I så fald skal dørhuller tilpasses karmen ved afhugning i hullernes false eller ved påføring i false eller på dørkarme, figur 8.3.

Påføring i dørhuller i murede vægge skal ved sidefalse udføres ved tilmuring i forbandt med vægge og ved overfalse ved sænkning af stik eller overliggere eller med armeret, forankret tilstøbning under overliggere. I støbte vægge skal påføring i både side- og overfalse udføres med armeret påstøbning, forankret i vægge med indborede bolte.

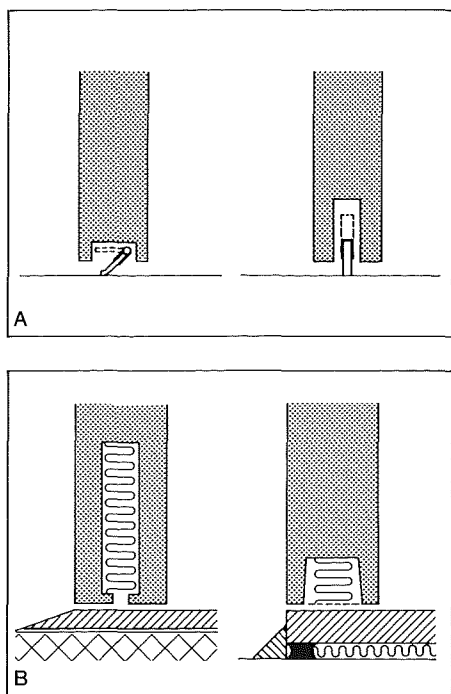
Påføring i false med træ bør kun udføres i én sidefals og overfals i et dørhul, og kun med massive højst 30 mm tykke brædder i den fulde vægtykkelse. Brædderne skrues eller boltes til vægge på et mellemlag af mineraluld, der tættes i én side med fugemasse. Påføring kan udføres på dørkarme med indtil 20 mm brædder i den fulde karmdybde og på et mellemlag af mineraluld. Påføringsbrædder må ikke stødes i dørhullets eller dørkarmens højde og bredde.

Døre mellem boliger og fælles trappe- rum bør opstilles på trappereposer og ikke på gulve i entreer. Hvor reposer ikke er ført ind eller kun ført delvis ind i dørhuller, skal der under dørkarme udføres en supplerende udstøbning, der ikke må have forbindelse med gulve i entreer og med reposer, se figur 8.3.

### Døre uden underkarmstykke

Døre uden underkarmstykke, se figur 8.4, er, alt andet lige, mindre lydisolerede end døre med underkarmstykke med anslag.

Lydtransmission under døre uden underkarmstykke kan formindskes med



Figur 8.4. Døre uden anslag ved dørunderkant. Lodrette snit 1:5.

A. Døre uden underkarmstykke og med bevægelige tætningslister, afstand mellem dørunderkant og gulvoverflade højst 6 mm.

B. Døre med underkarmstykke og med lyd-dæmpere, hulrum med lydabsorberende materiale, i dørpladernes underkant, afstand fra underkant til overside af understykke højst 2 mm. Tætning under underkarmstykke nødvendig.

bevægelige tætningslister eller med lyd-dæmpere med lydabsorberende materiale i udsparinger i dørpladernes underkanter. Bevægelige tætningslister skal for at isolere tilfredsstillende slutte tæt både i udsparinger i dørplader og til gulve. Med lyd-dæmpere vil det være nødvendigt at hæve gulvet lidt under døre eller at anbringe metalskinner med den mindst mulige frigang på 1–2 mm under

dørplader i lukket stilling for at lyd-absorptionen kan blive tilstrækkelig stor.

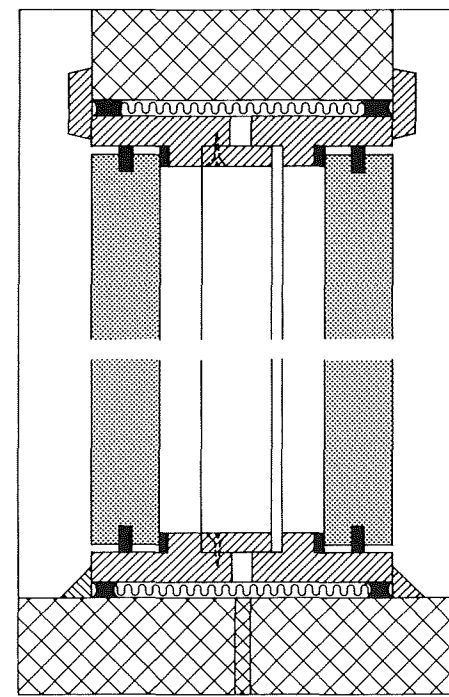
### Dobbeltdøre

En *dobbeltdør* – ikke at forveksle med en to-fløjet dør – har to dørplader anbragt over for hinanden enten i en fælles karm eller – lydteknisk bedre og hvor vægtykkelsen gør det muligt – i hver sin karm. En dobbeltdør kan give større lydisolation end en enkeltdør med samme masse for dørpladen som dobbeltdørens to dørplader tilsammen. Vægges lydisolations skal for ikke at påvirke døres lydisolations være ca. 20 dB større end dørenes.

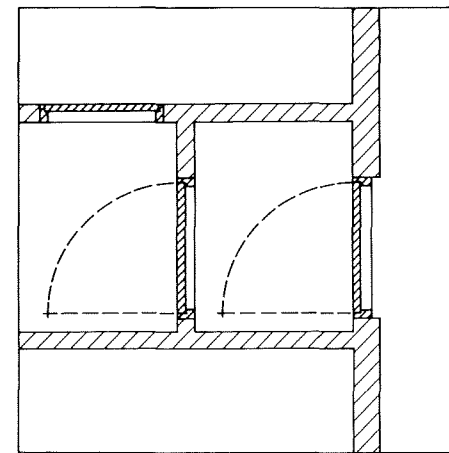
Forudsætningen for at opnå den størst mulige lydisolations med to massive døre, hvis masse er 20 kg/m<sup>2</sup>, er, at der anvendes adskilte karme med størst mulig indbyrdes afstand. Karmene bør have dobbeltfals, og der bør for begge dørplader anvendes anslagstætningslister og eventuelt tætningslister i frigange. Karmfuger skal stoppes med mineraluld og tættes med fugemasse, og karmtilsætninger eller udfyldning mellem karme må kun fastgøres i den ene karm, se figur 8.5.

### Lydsluser

Dobbeltdørens lydisolations kan øges ved at adskille de to døre med en mellemliggende *lydsluse*. Denne løsning anvendes ofte mellem boliger og fælles adgangsrum, hvor lydslusen udgøres af forrum eller vindfang, se figur 8.6. Lydisolationen kan yderligere forøges med lydabsorberende beklædning på vægge og loft i rummet, hvorved lydtransmissionen fra dør til dør gennem rummet reduceres.



Figur 8.5. Dobbeltdøre med adskilte karme. Lodret snit 1:5.

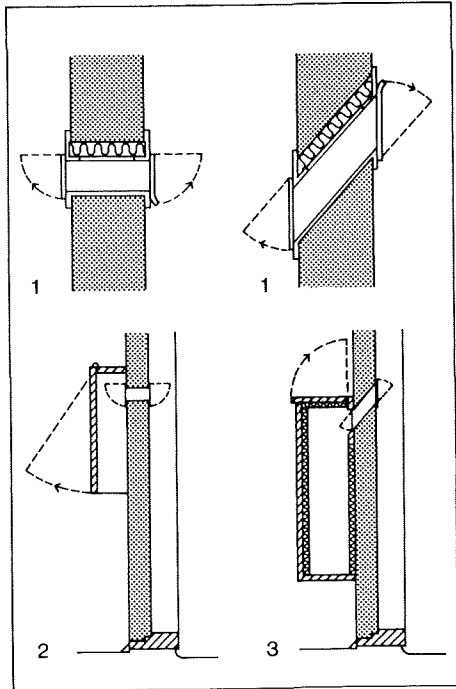


Figur 8.6. Lydsluse med to døre mellem bolig og fælles adgangsrum. Plan 1:50.



## Entredøre med brevåbninger

Døre med brevåbninger og tilhørende brevskilte med enkelt lukke er, alt andet lige, mindre lydisolierende end døre uden åbninger, og der bør derfor anvendes brevskilte med dobbelt lukke. Lydtransmission gennem brevåbninger kan yderligere formindskes med skærme eller kasser anbragt på dørenes indvendige side og foret med ubrændbart lydabsorberende materiale, se figur 8.7.



Figur 8.7. Lyddæmpning af brevåbninger i entredøre. Lodrette snit 1:5 og 1:20.

1. Brevskilte med dobbelt lukke.
2. Bevægelig skærm.
3. Brevkasse.

## Døre og vinduer i fælles karmpartier

Hvor døre og vinduer sammenbygges i fælles karmpartier, for eksempel i lette facadeelementer, bør ventilationslemme og varebokse, samt ruder, brystninger og andre faste partier have mindst samme lydisolationsniveau som dørplader.

## Vinduer

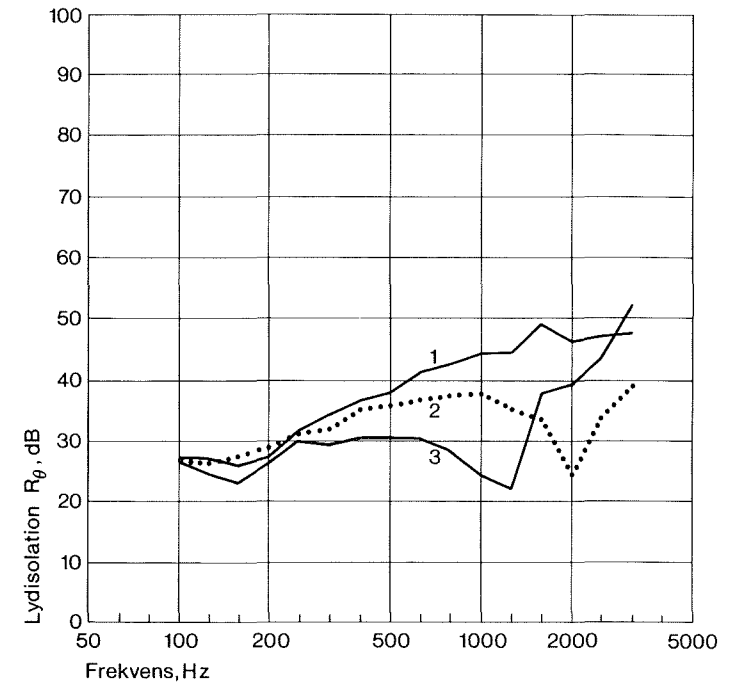
Vinduers lydisolationsniveau afhænger af den færdige vindueskonstruktion omfattende vindueskarm med karmbefæstelser i væg, vinduesrammer med alle tilhørende beslag og tætningslister, vinduesruder med glaslister og karmfuger med fugetætning mellem karm og væg samt sålbænk, vinduesplade og eventuelle lysningspaneler.

Vinduer med oplukkelige rammer giver, alt andet lige, ringere lydisolationsniveau end vinduer med faste rammer eller ruder.

## Vinduesruder lydisolationsniveau

Vinduesruder kan betegnes enkeltruder, dobbeltruder eller flerlagsruder efter antallet af glaslag, hvoraf de består.

Lydisolationsniveauet for enkeltruder afhænger af glastykkelsen, men den bør på grund af koincidenseffekten, se figur 2.4, være mindre end 6 mm, idet koincidensfrekvensen bør være over 2000 Hz. Koincidensfrekvensen er vinkelafhængig, se kapitel 2, og det indvirker på lydisolationsniveauet, når denne måles under forskellige indfaldsretninger, se figur 8.8. Vinduers lydisolationsniveau måles i laboratorier under samme betingelser som vægge, se kapitel 4. Herved udviskes de enkelte indfaldsvinklers indvirkning på lydisolationsniveauet, og der opnås en samlet virkning som ofte ligger nær ved lyd-



Figur 8.8. Lydisolationsniveau for 12 mm tykt glas ved lydindfald under tre forskellige vinkler. Efter (A. Eisenberg, 1958).

1. 0°,  $R_{\theta,w} = 42$  dB
2. 45°,  $R_{\theta,w} = 35$  dB
3. 75°,  $R_{\theta,w} = 31$  dB

isolationsniveauet under 45°. Ved vurdering af enkeltruders lydisolationsniveau, det vil sige frekvensvægtning, se figur 4.2, viser det sig, at  $R_w$  på grund af koincidenseffektens indvirkning stort set ligger omkring 30 dB for glastykkelser mellem 3 og 12 mm.

Dobeltruder og koblede rammer med to lag glas kan give større lydisolationsniveau end enkeltruder med samme tykkelse som de to lag glas tilsammen, og isolationsniveauet øges med øget afstand mel-

lem glaslagene. Eksempelvis opnås med koblede rammer med hver et lag glas 2 til 3 dB større lydisolationsniveau end med enkelt-rammer med et lag glas med samme tykkelse som de koblede rammers to glaslag tilsammen, hvorimod lydisolationsniveauet for termoruder med to lag glas i afstande på 6–12 mm ikke afviger væsentlig fra lydisolationsniveauet for enkeltruder i tykkelse som termorudernes to glaslag tilsammen. Resonansfrekvensen for de to glaslag i dobbeltruder bør ligge under

ca. 90 Hz og kan for ruder med glas af samme densitet bestemmes af (8.1), der kan findes ved omskrivning af (3.4).

$$f_0 = 1200 \sqrt{\frac{1}{d} \left( \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right)} \text{ Hz} \quad (8.1)$$

hvor  $f_0$  er resonansfrekvensen,  $d$  glasafstanden i mm og  $h_1$  og  $h_2$  tykkelserne i mm for de to glaslag.

Almindelige termoruder af to lag 4 mm glas med en afstand på 8 mm giver en lydisolations på knap 30 dB og en resonansfrekvens på 300 Hz, mens vinduer med to enkeltruder af 4 mm glas i en afstand på 100 mm giver en lydisolations på ca. 35 dB og en resonansfrekvens på 85 Hz. For at reducere virkningen af koincidens er det hensigtsmæssigt at have forskellige glastykkelser, mindst i forholdet 1:2.

I såkaldte *lydruder* eller *termolydruder* er det ene glaslag af lamineret glas, der består af flere tynde glaslag sammenlagt, men ikke sammenklæbet, eventuelt med viscoelastisk, klart materiale imellem. Herved nedsættes glasets bøjningsstivhed og koincidensfrekvensen  $f_c$  øges jævnt (2.3), hvilket i praksis forøger lydisolationsen.

Hulrum mellem glaslag i termoruder kan for at øge lydisolationsen også fyldes med en inaktiv gas, hyppigst svovlhexafluorid, SF<sub>6</sub>. I termoruder med mindre glasafstand end 15 mm kan *gasfyldning* dog ofte forringe lydisolationsen, hvorimod den øges i ruder med større glasafstand. Men den øgede lydisolations fremkommer ikke, hvis gasfyldningen er utilstrækkelig, og den forsvinder hurtigt, hvis ruden punkterer. Med gasfyldte termolydruder kan opnås en lydisolations på over 40 dB.

Et tredje lag glas i en termorude med ens glastykkelser og -afstande forøger

normalt ikke lydisolationsen ud over, hvad der opnås med den forøgede masse. (Rasmussen, 1985). Med forskellige glastykkelser og -afstande og med gasfyldning i kun ét hulrum kan lydisolationsen øges mere end svarende til den forøgede masse.

#### Tæthed mellem vinduesruder og -rammer eller -karme

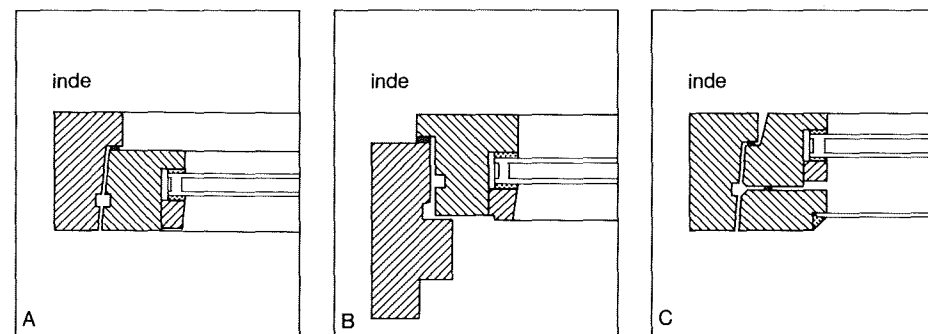
En forudsætning for at opnå den størst mulige lydisolations er tæthed i glasfalsen mellem ruder og rammer eller karme. Isætning af ruder skal ske i overensstemmelse med fabrikanternes anvisninger, men lydtransmission gennem foreskrevne dræn fra glasfalsen kan forringe ruderens lydisolations. For ruder med større lydisolations end 40 dB skal de enkelte dræn udføres med mindst mulig tværsnitsareal og en rørlængde på mindst 2 gange rudetykkelsen for at opretholde maksimal lydisolations.

#### Tæthed mellem vinduesrammer og -karme

En forudsætning for, at lydisolations af vinduer med oplukkelige rammer svarer til rudernes lydisolations, er, at lydtransmission gennem anslag og frigange mellem rammer og karme er ubetydelig. Rammer og karme skal derfor være formstabile og udføres med så brede anslag og så snævre frigange som muligt.

Rammer med *dobbeltanslag* giver alt andet lige mindre lydtransmission end rammer med enkeltanslag, figur 8.9.

*Tætningslister* formindsker lydtransmissionen og er nødvendige i vinduer, der skal give stor lydisolations. Listerne indsættes således i falsen, at der ikke kan opstå *utætheder* mellem lister og karme, og at listerne overalt trykkes lidt sam-



Figur 8.9. Eksempler på vindueskarme med enkeltfals og anslagstætningslister. Vandrette snit 1:5.

A. Karm med enkeltramme.

B. Karm med overfalsset ramme.

C. Karm med koblede rammer, tætningsliste mellem rammerne.

men, når rammerne lukkes. Lister af rørtypen med en diameter på 6–7 mm vil normalt være bedre egnet til lydisolering end lister af læbetypen, der er hensigtsmæssige til varmeisolering. Tætningslister skal være gennemgående uden stød, og hjørnesamlinger skal være varigt tætte.

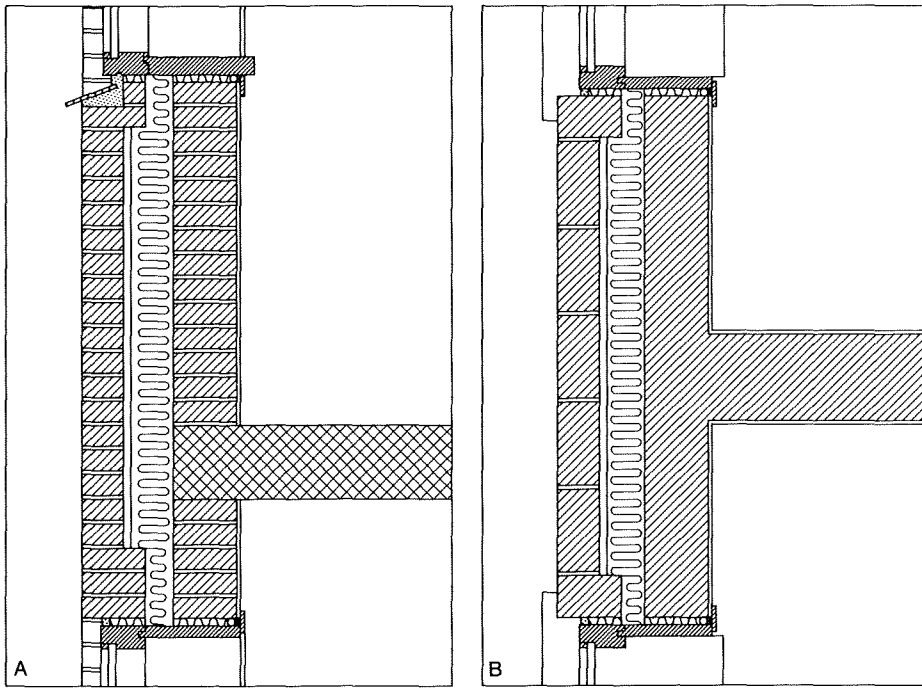
Vinduer med lydisolations større end 35 dB skal udføres med dobbeltanslag med tætningslister i begge anslag, men der må sikres både fugt- og lydteknisk tilfredsstillende udluftning af hulrummet mellem listerne. I vinduer med enkeltrammer med velisolerende termolydruder kan dobbeltanslag med effektive tætningslister i begge fals forøge lydisolationsen med op til 8 dB frem for tætning i enkeltanslag.

I vinduer med koblede rammer og tætningslister bør der udføres udluftning mellem rammerne, således at dugdannelse reduceres, men udluftningsåbningerne bør ikke være større end nødvendig både af hensyn til lydisolationsen og tilsmudsningen af ruderne mod hul-

rummet. På grund af udluftningskravet vil den lydisolations virkning af termolydruder være større, når de i vinduer med koblingsrammer indsættes i de indvendige rammer frem for i de udvendige.

#### Karmfuger

En yderligere forudsætning for, at vinduers lydisolations svarer til rudernes lydisolations, er, at lydtransmissionen gennem *karmfuger*, det vil sige fuger mellem vindueskarm og væg, er ubetydelig. Hulmål og karm mål skal overholde standardiserede tolerancer, for at karmfuger kan stoppes tæt. Der kan normalt ikke udføres tilpasning mellem vindueshuller og vindueskarm, som angivet for dørhuller og dørkarme. Karmfuger bør have en tykkelse på 10–12 mm og aldrig mindre end 5 mm eller større end 20 mm og skal stoppes jævnt og tæt med mineraluld i den fulde karmdybde. Da det kan være vanskeligt at få udført en tilstrækkelig og ensartet stopnings-tæthed, bør fugerne tætnes ved indven-



Figur 8.10. Stopning med mineraluld mod lydtransmission via vindueslysninger og murfals og hulrum mellem formur og isolering i ydervægge. Snit 1:20.

A. Lodret snit i vinduesbrystning.

B. Vandret snit i vinduespille.

dig side med fugemasse, altså som ved almindelig to-trinstætning af karmfuger med indvendig vindtætning og udvendig regntætning. Ved vinduer med større lydisolations end 35 dB bør den udvendige side også tætnes med fugemasse, hvis den effektive stopningsdybde er under 80 mm. Udvendig tætning med fugemasse forudsætter, at der udføres dræn til udledning af kondensvand.

Lydudstråling fra lysningspaneler kan reducere vinduers lydisolations med 2-4 dB på grund af lydtransmission gen-

nem panelers stive forbindelser med vindueskarmer.

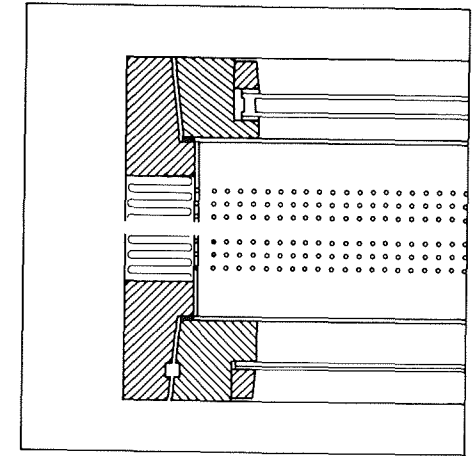
I ydervægge udført som hulmur eller skalmur forekommer undertiden hørbar lydtransmission mellem boliger via vindueslysninger og mellemrum mellem formure og bagmure eller isolering, når der kun er en kort afstand mellem lysningspanelerne i to naboboliger. Dette kan modvirkes ved stopning med mineraluld mellem for- og bagmure i vinduesfals og mellem fals og lysningspaneler samt under vinduesplader, se figur 8.10.

### Dobbeltvinduer

Et *dobbeltvindue* - ikke at forveksle med et vindue med koblede rammer eller med dobbeltrude - har to rammer, en udvendig og en indvendig (eller en fast rude i stedet for den ene ramme) i en fælleskarm eller - lydteknisk bedre - i hver sin karm. Eksempelvis er et traditionelt vindue med udvendig enkeltramme og indvendig forsatsramme, hængslet i vindueskarmen eller i en forsatskarm, et dobbeltvindue.

Et dobbeltvindue kan give større lydisolations end et vindue med koblede rammer eller med dobbeltrude, hvis den samlede tykkelse af glaslagene er ens i vinduerne. Lydisolationen af dobbeltvinduer øges med øget afstand mellem udvendige og indvendige ruder, og med en rudeafstand på 120 mm for 3 mm glas - og mindre afstand for tykkere glas - kan der opnås resonansfrekvenser på under 90 Hz.

I tunge ydervægge kan der med dobbeltvinduer med mindst 200 mm rudeafstand og med udelte karmer som regel opnås en resulterende lydisolations på mere end 40 dB og med karmer delte i for- og bagkarmer uden indbyrdes forbindelse 50 dB eller endnu mere. I begge tilfælde forudsættes, at karmfuger stoppes med mineraluld og tætnes ved indvendige sider med fugemasse. For at reducere lydtransmissionen gennem eventuelle lysningspaneler mellem for- og bagkarmer, må der ikke være forbindelse mellem lysningspaneler og forkarmer. Ved anvendelse af perforerede paneler og udfyldning med mineraluld bag panelerne, såkaldte *karmabsorbenter*, øges lydabsorptionen og dermed vinduernes lydisolations med 1-3 dB, se figur 8.11.



Figur 8.11. Dobbeltvindue med selvstændig forkarm og bagkarm, lydabsorberende lysningspanel mellem karme, enkeltrude i udvendig ramme og dobbeltrude i indvendig ramme, anslagstætningsliste i begge rammer. Vandret snit 1:5.

## Installationers indvirkning på lydisolations

Installationer kan forringe lydforholdene i en bygning, dels ved at frembringe generende støj, dels ved at virke som transmissionsveje både for egen støj og anden lyd. Mens lydtransmission gennem *utætheder* ved rør- eller kanalgenemføringer i dæk og vægge er forholdsvist let at reducere, kan det være vanskeligt og bekosteligt at reducere transmission, der skyldes uhensigtsmæssig rør- eller kanalføring, samt transmission i rørvægge og kanaler.

### Rørgennemføringer

Lodrette rør bør i etagehuse placeres i skakte i birum, og hvis det er uundgåeligt at føre rør gennem vægge mellem boliger, bør gennemføring kun udføres gennem vægge i birum. Rørgennemføringer i dæk og vægge, se figur 9.1, kan tætnes med forskellige typer af patenterede rørbøsninger, der altid skal samles og indstøbes som foreskrevet af fabrikanten for at yde den maksimale tætning.

Isolerede vand- og varmerør kræver større gennemføringshuller end uisolerede rør, og gennemføringerne er derfor vanskeligere at tætne lydteknisk tilfredsstillende. Huller til gennemføringer bør ikke være større end nødvendigt og skal i alle tilfælde tætnes ved udmuring, udstøbning eller stopning med mi-

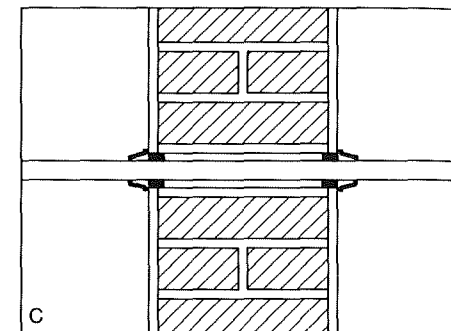
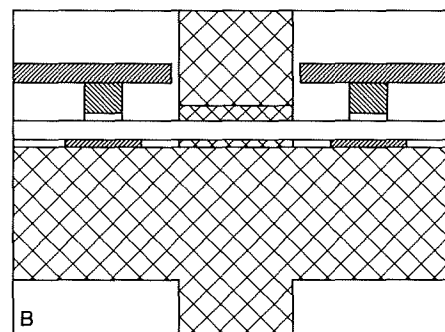
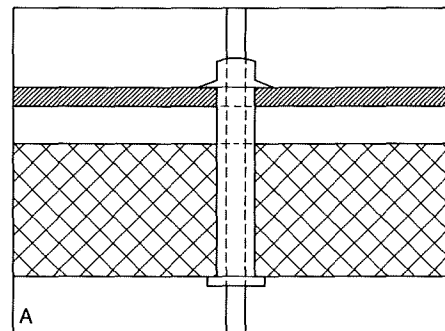
neraluld. Rørgennemføringer i dobbeltvægge kan danne stive forbindelser mellem de to delvægge og bør aldrig udføres i tunge dobbeltvægge.

Rørgennemføringer i dobbelte pladebeklædte skeletvægge kan give lydbroer, men virkningen heraf er væsentlig mindre end i dobbeltvægge med tunge delvægge. Lydbroer har mindre virkning i vægge med beklædninger af tynde plader med ringe bøjningsstivhed end i vægge med tykkere og mere bøjningsstive beklædninger. Det er dog vanskeligt at opnå en tilfredsstillende tætthed ved gennemføringer i skeletvægges pladebeklædninger.

### El-anlæg

Ved anlæg forstås her både el-, antenne- og telefoninstallationer. El- og antenneledninger lægges ofte under gulve med gennemføringer i vægge under gulvoverfladen og som regel uden bøsninger, el-ledninger dog undertiden i gennemføringsrør. Lydtransmission gennem huller omkring ikke tilstøbte eller tilmurrede ledninger og rør er en hyppig årsag til at vægge ikke yder den maksimalt opnåelige lydisolations.

I institutions- og kontorbygninger bruges hyppigt gennemgående vandrette kabelbakker, der er næsten umulige at tætne effektivt ved væggennemførin-



Figur 9.1. Rørgennemføringer i dæk og væg. Lodrette snit 1:10.

- Vand- eller varmerør ført gennem dæk med bøsning med tætte pakninger ved gulv og dækkunderside.
- El-rør eller -kabel ført gennem væg under gulvoverflade og uden bøsning, men indstøbt i væggen.
- Vand- eller varmerør ført gennem massiv væg med bøsning med tætte pakninger ved begge vægsider.

ger, hvorfor kabelrender i gulve, der giver bedre tætningsmuligheder, bør foretrækkes.

Dåser og rør til el- og antenneinstallationer kan især i massive vægge forringe lydisolationsen og bør derfor undgås i boligadskillende vægge. Dåser i begge sider af en væg skal forsættes indbyrdes i vandret eller lodret retning, se figur 9.2.

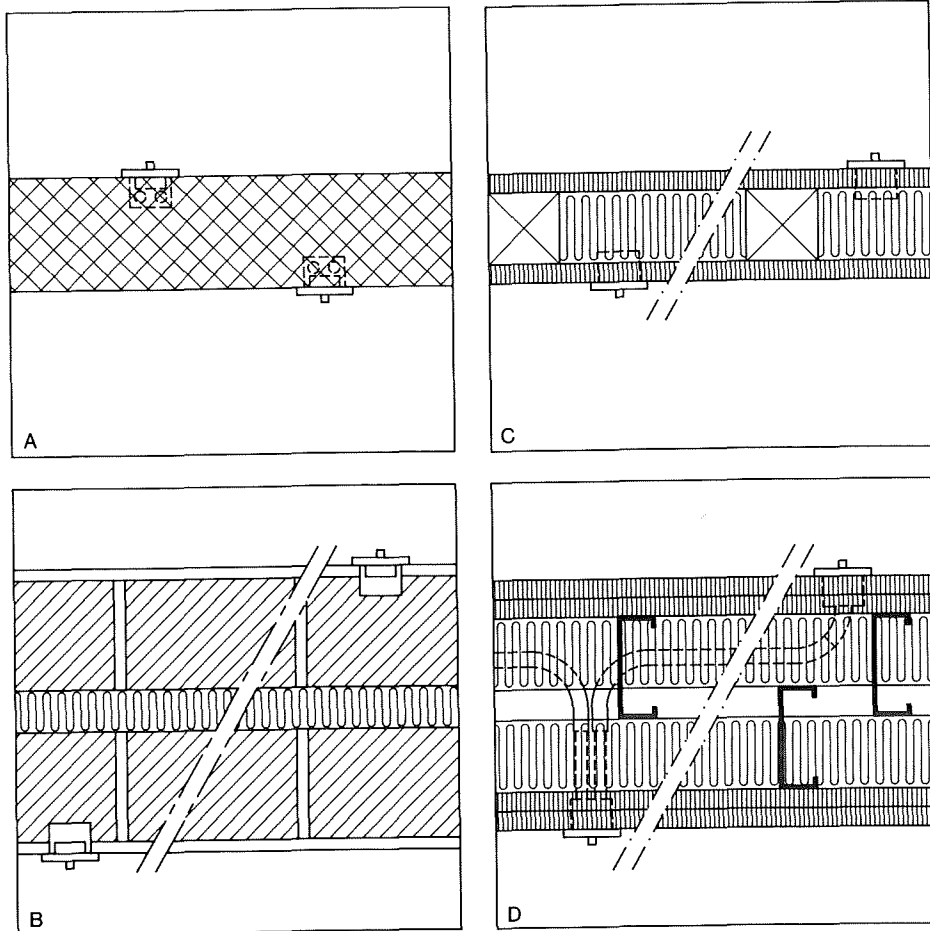
I murede og støbte enkeltvægge bør forsætningerne være mindst 1 sten og henholdsvis 150 mm, dog aldrig mindre end vægtykkelsen. I murede og støbte dobbeltvægge kan der forekomme lydtransmission via væggenes hulrum, og forsætningerne bør her være mindst 10 gange afstanden mellem delvæggene.

I pladebeklædte skeletvægge, enkelte eller dobbelte og med eller uden udfyld-

ning med mineraluld, bør forsætningerne mellem dåser være mindst 10 gange afstanden mellem beklædninger, i enkeltvægge dog ikke mindre end stolpe- eller lodskinnes-afstanden.

El-rør i dobbelte skeletvægge må ikke danne stive forbindelser mellem delvæggene og må derfor kun fastgøres til én delvæg. Forbindelser mellem delvæggene skal udføres fleksible, eksempelvis med kabler i rør.

Alarmklokker til telefoner i sammenbyggede boliger og i beboelsesenheder i institutioner bør ikke opsættes direkte på vægge, men på plader fastgjort til vægge med dæmpere af blødt gummi, således at klokkers bidrag til transmission af *bygningsslyd* dæmpes uden at den udstrålede luftlyd reduceres.



Figur 9.2. Forsætninger af el- og antenneråser i vægge. Vandrette snit 1:10 og 1:5.  
 A. Muret eller støbt væg, forsætningen større end vægtykkelsen.  
 B. Muret eller støbt dobbeltvæg, forsætningen større end ti gange mellemrumdybden.  
 C. Enkelt træskeletvæg, forsætningen større end ti gange vægtykkelsen.  
 D. Dobbelt stålskeletvæg med fleksible forbindelser mellem elråser, forsætningen større end ti gange vægtykkelsen.

### Centralvarmeanlæg

Lydtransmissionen gennem rør og radiatorer i centralvarmeanlæg kan være større end gennem dæk og vægge og således forringe den resulterende lydisolering, figur 9.3. Lydtransmissionen kan reduceres med radiatorer, der er dårlige lydudstrålere, med *gummikompensatorer* indsat i rør mellem radiatorer og med mindst 10–12 m lange rørforbindelser mellem radiatorer.

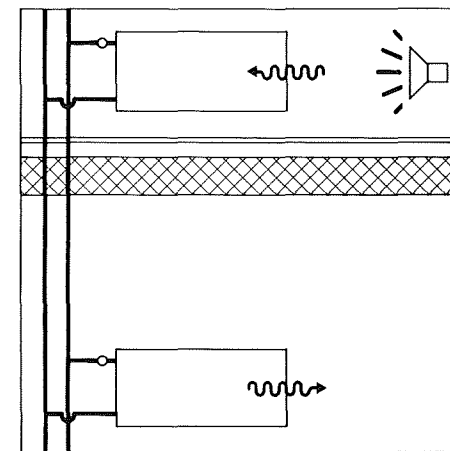
Radiatorer kan deles i to grupper efter deres lydudstråling over ca. 500 Hz i det bygningsakustiske frekvensområde. Radiatorer med stor lydudstråling er af relativt tynde plader med en form, der giver ringe stivhed. En kvadratisk form, der medfører sammenfald af egenfrekvenser, er den mest uheldige, og enkelt-radiatorer er mere lydudstrålende end dobbelte eller flerdobbelte radiatorer med samme frontareal.

Radiatorer med ringe lydudstråling er af noget tykkere plader, eventuelt afsti-

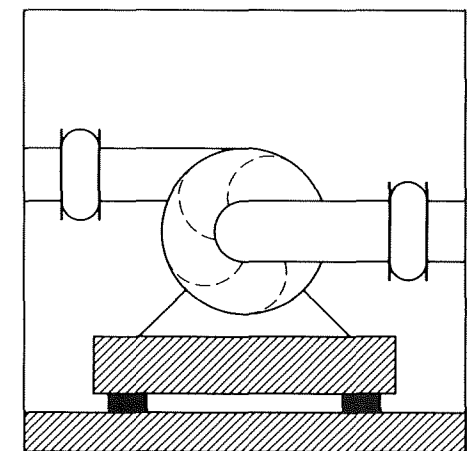
vet med ribber, eller af støbejern. Sådanne radiatorer påvirker ikke bygningsdeles lydisolering væsentligt, når denne ikke overstiger 55 dB.

Ingen af radiatorerne i de to grupper kan i væsentlig grad reducere den støj, der opstår ved mekanisk påvirkning af radiatorer eller rør, f.eks. ved slag med hårde genstande. Transmission af støjen kan derimod reduceres ved at opdele et varmeanlæg i lyd-mæssigt passende adskilte sektioner med de nævnte gummikompensatorer. Kompensatorer mellem radiatorer og tilhørende reguleringsventil reducerer også transmission af støj fra ventilen til radiatoren. Hvor varmeanlæg er opdelt med gummikompensatorer, kan støjtransmission yderligere reduceres med en elastisk ophængning, f.eks. med gummiforinger i rørbæringer og -ophæng.

Motorer og pumper bør altid svingningsisoleres fra bygninger, pumper bør desuden isoleres fra rør med gummikompensatorer, figur 9.4. Pumper fast-



Figur 9.3. Lydtransmission gennem radiatorer tilsluttet fælles lodrette rørstreng.



Figur 9.4. Cirkulationspumpe monteret på svingningsisoleret fundament og forbundet til rør med gummikompensatorer.

gøres alt for ofte direkte på betondæk uden *svingningsisolerende monterning*. For at undgå for store vibrationer af pumpen er det i reglen nødvendigt at montere den direkte på et svingningsisoleret fundament med en masse på mindst tre og helst fem gange massen af pumpe med vandindhold.

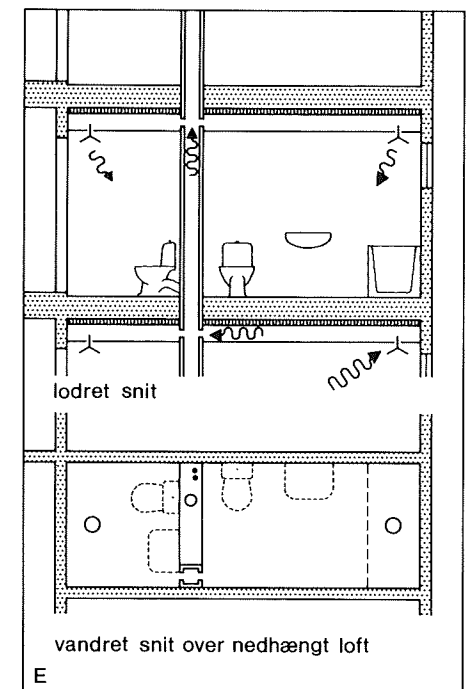
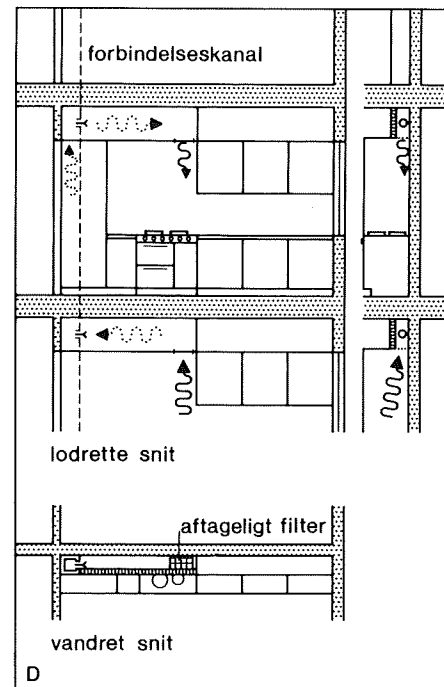
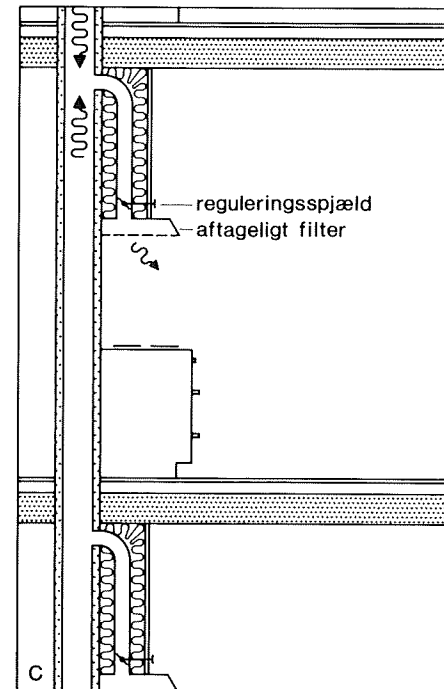
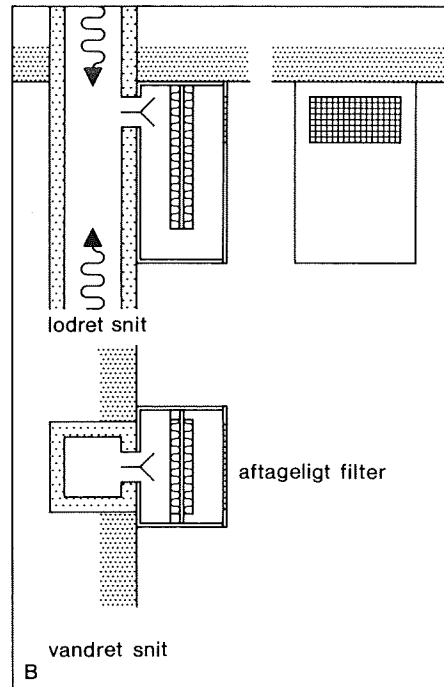
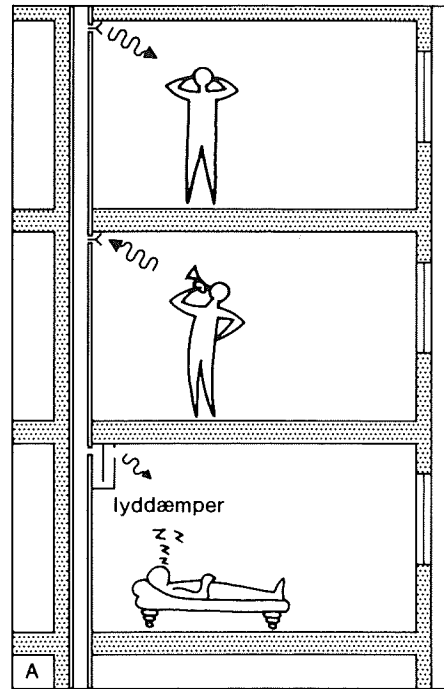
## Ventilationsanlæg

Ventilationsanlæg er i mange tilfælde årsag til en forringelse af lydforholdene. Anlæg, der fungerer luftteknisk perfekt, kan i lydmæssig henseende være til gene for personer i de ventilerede rum.

Ventilatorer kan frembringe for megen støj, ligesom luftstrømme med for store hastigheder kan frembringe utilsigtet støj i kanalbøjninger og ventiler. Ventilationskanaler kan virke som transmissionsveje mellem rum for tale, sang, musik og anden luftlyd. Utætte kanaler og kanalers indbygning i vægge og gennemføring i dæk kan forringe den lydisolerende virkning af de rumafgrænsende bygningsdele.

Anvendelse af støjsvage ventilatorer, hensigtsmæssig kanalføring og omhyggelig arbejdsudførelse vil være vigtige forudsætninger for at opnå acceptable lydforhold. I beboelsesbygninger medfører separate kanaler for hver bolig, alt andet lige, mindre lydtransmission mellem boliger end kanaler fælles for flere boliger.

Ved *ventilationskanaler* fælles for flere boliger eller for flere rum, hvorimellem der ønskes en given lydisolation, bør lydtransmissionen gennem kanalerne ikke influere væsentligt på de adskilende bygningsdeles lydisolation. Derfor bør differensen mellem lydtrykniveau foran kanalåbningerne i to nabo-



Figur 9.5. Eksempler på reduktion af lydtransmission gennem ventilationskanaler for mekanisk udsugning fra etageboliger.

- Lydtransmission gennem lodret kanal med og uden lyddæmper ved kanalåbning.
- Lyddæmper foran ventil i kanal, aftageligt filter foran lyddæmper.
- Lyddæmpning af forbindelseskanaal fra emhætte over komfur. Emhætte med aftageligt filter og reguleringsspjæld.
- Lyddæmpning med vandret forbindelseskanaal i køkken, aftageligt filter foran kanalåbning.
- Lyddæmpning med vandret forbindelseskanaal over underloft i toilet- og baderum. Afstand mellem kanal og indsugningsåbninger mindst 1 m.

rum, hvorimellem lydisoleringen skal være  $R'_w$  opfyldte betingelsen

$$D_w > R'_w - 10 \log \frac{S}{S_k} + 20 \text{ dB} \quad (9.1)$$

hvor  $D_w$  er forskellen mellem lydtryk-niveau målt i tre punkter ca. 50 mm foran kanalåbninger i både senderum og modtagerum og frekvensvægtet som angivet i kapitel 4.  $S$  er arealet af dæk eller væg mellem rummene og  $S_k$  kanalens tværsnitsareal. Hvis kanalåbningerne er nærmere et rumhjørne end 0,6 m, bør  $D_w$  være 6 dB større.

Lydtransmission gennem ventilationskanaler afhænger af kanalernes lyd-dæmpende virkning, der er større, jo længere de er, jo flere bøjninger de har, og jo snævrere de er. Lyddæmpningen øges desuden ved absorption af lydenergi i kanalvægge og i eventuelt absorptionsmateriale i kanaler. På grund af støv- og fedtafsætning bør lydabsorberende beklædninger kun anvendes, hvor absorptionsmaterialet er let tilgængeligt for udskiftning. Mineraluldsbeklædninger bør kun anvendes i udsugningskanaler, dog ikke i anlæg med recirkulering af luft, på grund af risiko for indblæsning af mineraluldsfibre.

Eksempler på reduktion af lydtransmission gennem ventilationskanaler er vist i figur 9.5.

*Lyddæmpere* foran åbninger eller ventiler i kanaler kan formindske lydtransmissionen gennem kanaler samt støjniveauet frembragt af ventilatorer og ved luftens passage gennem ventiler. Absorptionsmaterialet i lyddæmpere, f.eks. mineraluld, forurenes af støv og fedt og skal jævnligt udskiftes, men for at mindske forurening bør udsugningsåbningerne have filtre, der let kan aftages og rengøres.

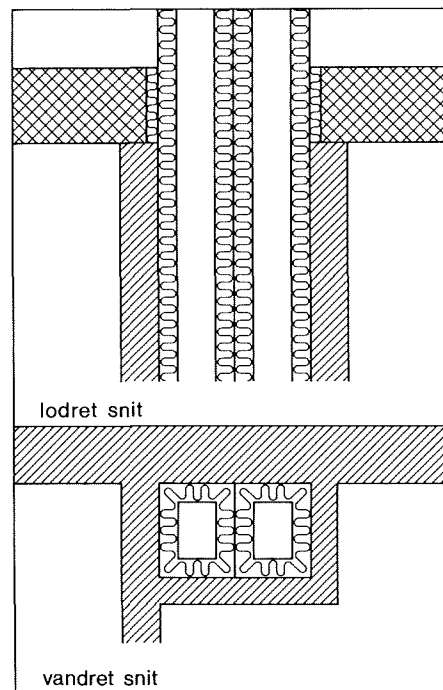
Emhætter over kogepladser i køkke-

ner med fælles mekanisk udsugning kan ligesom lyddæmpere formindske både lydtransmission gennem kanaler og støjniveauet i køkkener. En forbedret lyddæmpende virkning af emhætter opnås, når forbindelseskanaler fra hætter til lodrette kanaler isoleres med lydabsorberende materiale, f.eks. mineraluld, og desuden afskærmses med pladebeklædning eller indbygges i overskabe. For at mindske støv- og fedtforurening af kanaler og ventilatorer, bør emhætter have filtre, der let kan aftages og rengøres.

Lydtransmissionen mellem køkkener med mekanisk udsugning kan reduceres med lyddæmpende vandrette forbindelseskanaler udført af ubrændbare materialer og eventuelt indbygget i inventar. For at yde tilstrækkelig lyddæmpning skal forbindelseskanalerne være mindst 1 m lange og indvendig beklædt på en lodret side eller oversiden med lydabsorberende materiale, f.eks. 30–50 mm mineraluld. Kanalerne bør indrettes således, at absorptionsmaterialet kan udskiftes. For at mindske forurening af ventilatorer, kanaler og absorptionsmateriale, bør udsugningsåbninger have filtre, der let kan aftages og rengøres.

Lydtransmission mellem toilet- og baderum med mekanisk udsugning kan reduceres med nedhængte lofter, hvor mineraluldsfyldte hulrum over lofter sammen med tynde kanalvægge virker som lydabsorbenter ved lave frekvenser.

Kanaler af tyndt materiale, f.eks. jernplade, skal udføres med ubrændbar beklædning eller omstøbning, og for at reducere lydtransmissionen gennem kanalvægge og mellem kanaler bør de desuden lydisoleres med 30–50 mm mineraluld. Ved kanal gennemføringer i dæk og vægge bør kanalerne lydisoleres særlig omhyggeligt, figur 9.6.



Figur 9.6. Lydisolering af ventilationskanaler. Lodret og vandret snit.

Lydabsorberende beklædninger i udsugningskanaler og tilslutningskasser for lodrette samlekanaler skal som følge af støv- og fedtforurening jævnligt renses eller udskiftes for at bevare absorptionen.

Regulerbare ventiler i ydervægge eller vinduer for tilførsel af udeluft kan nedsætte lydisoleringen mod det fri og bør derfor være lyddæmpet således, at det af trafik frembragte støjniveau, målt ca. 0,5 m fra ventilens indvendige side, højst overstiger støjniveauet midt i rummet med en enkelt decibel. *Udeluftventiler* med lyddæmpning til indsætning i ydervægge er i handelen i Danmark. Ventiler til udeluft indbygget i vinduer skal udføres efter de samme principper for

dæmpning som benyttes i f.eks. figur 9.5 B. Det vil sige, at de kræver en forholdsvis stor del af et vindues areal for at kunne fungere tilfredsstillende (Homb og Hveem, 1988). Vinduer af den type er i handelen i udlandet.

Udeluftventiler bør i øvrigt af sundhedsmæssige grunde ikke anbringes i de nederste 2 eller 3 etager i facader mod trafikerede gader med forurenede luft.



## Litteratur og stikord

*Listen over litteratur omfatter fortrinsvis artikler, rapporter og bøger, hvorfra der er benyttet enkelte, ofte bearbejdede figurer, eller hvortil der direkte er henvist i teksten. Normer og standarder er medtaget i et omfang, der skønnes dækkende for det bygningsakustiske fagområde.*

*Stikordsregistret henviser enten til kursiverede ord i teksten eller til overskrifter, tabeller og figurer på de anviste sidenumre.*



## Artikler og bøger

- Austnes, J. & Hveem, S. (1983). Lydisolerende, lette flytende golv. Rapport 90, Norges Byggeforskningsinstitutt, NBI, Oslo.
- Berger, R. (1911). Über die Schalldurchlässigkeit. Dissertation, Königliche Technische Hochschule, München.
- Bodlund, K. (1980). Luftljudisolering. En sammanställning av tillämplig teori. Rapport R60:1980, Statens råd för Byggnadsforskning, Stockholm.
- Breeuwer, R. & Tukker, J. C. (1976). Resilient Mounting Systems in Buildings. Applied Acoustics, vol. 9, p. 77-101.
- Brekke, A. (1980). Beregningsmetoder for reduksjonstall til enkelt-, dobbelt- og trippelkonstruksjoner. Rapport STF 44 A 80021, Akustisk Laboratorium/ELAB, NTH, Trondheim.
- Craik, R. J. M. (1981) Damping of Building Structures. Applied Acoustics, vol. 14, p. 347-359.
- Cremer, L. & Heckl, M. (1967). Körperschall. Physikalische Grundlagen und Technische Anwendungen. Springer Verlag, Berlin. (Oversat og revideret af E. E. Ungar (1973). Structure-borne sound. Springer Verlag, Berlin.)
- DSB (1987). Støjprojektet. Lydisolering. Tekniske løsninger. Statens Informations-tjeneste, København.
- Dym, C. L., Ventres, C. S. & Lang, M. A. (1976). Transmission of sound through sandwich panels: A reconsideration. J. Acoust. Soc. Am., vol. 59, p. 364-367.
- Eisenberg, A. (1958). Die Schalldämmung von Gläsern und Verglasungen. I. Fest eingebaute Einzelscheiben. Glastechnische Berichte, årgang 31, p. 297-302.
- Fahy, F. (1985). Sound and Structural Vibration. Radiation, Transmission and Response. Academic Press, London.
- Fasold, W. & Sonntag, E. (1978). Bauakustik. Bauphysikalische Entwurfslehre, Band 4, 3. udg., VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Gerretsen, E. (1979). Calculation of the Sound Transmission between Dwellings by Partitions and Flanking Structures. Applied Acoustics, vol. 12, p. 413-433.
- Gerretsen, E. (1986). Calculation of Airborne and Impact Sound Insulation between Dwellings. Applied Acoustics, vol. 19, p. 245-264.
- Gudmundsson, S. (1984). Sound Insulation Improvements of Floating Floors. A Study of Parameters. Report TVBA-3017, Lunds Tekniska Högskola, LTH, Lund.
- Gösele, K. (1964). Schallbrücken bei schwimmenden Estrichen und anderen schwimmend verlegten Belägen. Berichte aus der Bauforschung, Heft 35. Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin.
- Heckl, M. (1960). Untersuchungen an orthotropen Platten. Acustica, vol. 10, p. 109-115.
- Heckl, M. (1977). Abstrahlung von ebenen Schallquellen. Acustica, vol. 37, p. 155-166.
- Heckl, M. (1981). The Tenth Sir Richard Fairley Memorial Lecture: Sound Transmission in Buildings. J. Sound and Vib., vol. 77, p. 165-189.
- Heckl, M. & Heckl, M. (1976). Darstellung von Abstrahlungsvorgängen im Film. DAGA '76, VDI-Verlag, Düsseldorf, p. 165-168.

- Homb, A. & Hveem, S. (1988). Isolering mot utendørs støy. Beregningsmetode og data-samling. Håndbok 39, Norges Byggeforskningsinstitutt, Oslo.
- Homb, A., Hveem, S. & Strøm, S. (1983). Lydisolerende konstruksjoner. Datasamling og beregningsmetode. NBI-Anvisning 28, Norges Byggeforskningsinstitutt, Oslo.
- Ingerslev, F. (1949). Akustik. Lærebog i bygningsakustik for ingeniører. Teknisk Forlag, København.
- Jones, R. E. (1981). Field Sound Insulation of Load-Bearing Sandwich Panels for Housing. Noise Control Engineering, vol. 16, p. 90-105.
- Josse, R. & Lamure, C. (1964). Transmission du son par une paroi simple. Acustica, vol. 14, p. 266-280.
- Kristensen, J. (1983). Bygningers lydisolering. Ældre bygninger. SBI-anvisning 136, Statens Byggeforskningsinstitutt, SBI, Hørsholm.
- Kristensen, J., Nissen, H. & Wiuff, E. (1983). Bygningers lydisolering. Nye bygninger. SBI-anvisning 112, 2. udgave, Statens Byggeforskningsinstitutt, SBI, Hørsholm.
- Kristensen, J. & Petersen, L. J. (1981). Entrédøres lydisolering. Undersøgelsesresultater og erfaringer fra praksis. SBI-rapport 124, Statens Byggeforskningsinstitutt, SBI, Hørsholm.
- Kristensen, J. & Petersen, L. J. (1987). Lydisolering mellem boliger. En undersøgelse i ældre bygninger med træetageadskillelser. SBI-rapport 124, Statens Byggeforskningsinstitutt, SBI, Hørsholm.
- Kuhl, W. (1982). Impedanz von Platten endlicher Fläche, Körperschallpegeldifferenz punktförmig angeregter paralleler Platten und Trittschallminderung. Acustica, vol. 51, p. 103-115.
- Kurtze, G. & Watters, B. G. (1959). New Wall Design for High Transmission Loss or High Damping. J. Acoust. Soc. Am., vol. 31, p. 739-748.
- Maidanik, G. (1962). Response of Ribbed Panels to Reverberant Acoustic Fields. J. Acoust. Soc. Am., vol. 34, p. 809-826.
- Maidanik, G. (1975). Erratum. J. Acoust. Soc. Am., vol. 57, p. 1552.
- Makris, S. E., Dym, C. L. & Smith, J. M. (1986). Transmission loss optimization in acoustic sandwich panels. J. Acoust. Soc. Am., vol. 79, p. 1833-1843.
- Morse, P. M. & Ingard, K. U. (1968). Theoretical Acoustics. McGraw-Hill, New York.
- Narayanan, S. & Shanbhag, R. L. (1968). Sound transmission through a damped sandwich panel. J. Sound and Vib., vol. 80, p. 315-327.
- Northwood, T. D. (1970). Transmission loss of plasterboard walls. Build. Res. Note No. 66. National Research Council of Canada, Ottawa.
- Pedersen, D. B. (1986). EDB-program til beregning af lydisolering i bygninger. Nordic Acoustical Meeting, Aalborg, p. 329-332.
- Rasmussen, B. (1984). Optimering af lydisolering for 2-lags termoruder. Rapport nr. 113, Lydteknisk Institut, Lyngby.
- Rasmussen, B. (1985). Optimering af lydisolering for 3-lags termoruder. Rapport nr. 128, Lydteknisk Institut, Lyngby.
- Rindel, J. H. (1975). Transmission of Traffic Noise through Windows. Influence of Incident Angle on Sound Insulation in Theory and Experiment. Report No. 9, Laboratoriet for Akustik, DTH, Lyngby.
- Rindel, J. H. (1979 a). Notat A: Lydudstråling fra plader. Laboratoriet for Akustik, DTH, Lyngby.
- Rindel, J. H. (1979 b). Notat B: Lydtransmission - impedansteori. Laboratoriet for Akustik, DTH, Lyngby.
- Rindel, J. H. (1980). Notat C: Lydtransmission - statistisk energianalyse. Laboratoriet for Akustik, DTH, Lyngby.
- Sato, H. (1973). On the Mechanism of Outdoor Noise Transmission through Walls and Windows. J. Acoust. Soc. Japan, vol. 29, p. 509-516.
- Sewell, E. C. (1970). Transmission of Reverberant Sound through a Single-leaf Partition surrounded by an Infinite Rigid Baffle. J. Sound and Vib., vol. 12, p. 21-32.
- Sharp, B. H. (1978). Prediction Methods for the Sound Transmission of Building elements. Noise Control Engineering 11, p. 53-63.
- Ver, I. L. (1971). Impact Noise Isolation of Composite Floors. J. Acoust. Soc. Am., vol. 50, p. 1043-1050.
- Ver, I. L. & Holmer, C. I. (1971). Interaction of Sound Waves with Solid Structures. Chap. 11 in: Noise and Vibration Control, L. L. Beranek (ed.). McGraw Hill, New York.
- Vigran, T. E. (1979). Lydisolasjon i bygninger. Et teoretisk grunnlag med eksempler. Tapir, Trondheim.
- Vries, D. de, Bakel, J. G. van & Berkhout, A. J. (1981). Application of S.E.A. in Building Acoustics: A Critical Note. Inter-Noise '81, Amsterdam, p. 465-469.

## Normer og standarder

### DS (Dansk Standard)

- DS/ISO 31/7 (1984). Fysiske størrelser, måleenheder og symboler. Akustik.
- DS 452 (1984). Termisk isolering af tekniske installationer.
- DS 1082 (1982). 3. udgave. Døre. Lydisolering. Klassifikation.
- DS 1084 (1979). Vinduer. Lydisolering. Klassifikation.
- DS 2186.1 (1982). Akustik. Vurdering af lydisolering. Del 1: Luftlydisolering i bygninger og af bygningsdele.
- DS 2186.2 (1982). Akustik. Vurdering af lydisolering. Del 2: Trinlydniveau.
- DS 2186.3 (1982). Akustik. Vurdering af lydisolering. Del 3: Luftlydisolering af facader og dele af facader.
- DS 2188 (1982). Akustik. Ordliste.

### IEC (International Electrotechnical Commission)

- IEC 225 (1966). Octave, half-octave and third-octave band filters intended for the analysis of sounds and vibrations. (DS fra 1978).

### ISO (International Organization for Standardization)

- ISO 140/1 (1978). Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Requirements for laboratories. (DS fra 1979).
- ISO 140/2 (1978). Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 2: Statement of precision requirements. (DS fra 1979).
- ISO 140/3 (1978). Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements. (DS fra 1979).
- ISO 140/4 (1978). Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms. (DS fra 1979).
- ISO 140/5 (1978). Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of facade elements and facades. (DS fra 1979).
- ISO 140/6 (1978). Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 6: Laboratory measurements of impact sound insulation of floors. (DS fra 1979).
- ISO 140/7 (1978). Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors. (DS fra 1979).
- ISO 140/8 (1978). Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 8: Laboratory measurements of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a standard floor. (DS fra 1979).
- ISO 140/9 (1985). Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 9: Laboratory measurement of room-to-room airborne sound insulation of a suspended ceiling with a plenum above it. (DS fra 1986).

ISO 266 (1975). Acoustics – Preferred frequencies for measurements. (DS fra 1975).

ISO 354 (1985). Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room. (DS fra 1986).

ISO 717/1 (1982). Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation in buildings and of interior building elements.

ISO 717/2 (1982). Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation.

ISO 717/3 (1982). Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 3: Airborne sound insulation of facade elements and facades.

ISO 1683 (1983). Acoustics – Preferred reference quantities for acoustic levels. (DS fra 1986).

ISO 2041 (1975). Vibration and shock – Vocabulary.

ISO 2509 (1973). Cork – Sound absorbing expanded pure agglomerated cork in tiles – Characteristics.

ISO 2510 (1973). Cork – Sound absorbing composition cork in tiles – Characteristics.

ISO 9052/1 (1989). Acoustics – Determination of dynamic stiffness – Part 1: Materials used under floating floors in dwellings.

#### *NORDTEST (nordiske målemetoder)*

NT ACOU 013 (1979). Doors and windows: Sound reduction index.

NT ACOU 033 (1980). Bulkheads: Sound radiation efficiency – laboratory test.

NT ACOU 034 (1980). Floor coverings: Rating of impact sound improvement. (Under revision).

NT ACOU 035 (1981). Floating floors – insulation materials: Dynamic stiffness.

NT ACOU 037 (1982). Small building elements: Sound insulation.

NT ACOU 050 (1985). Floor coverings: Reduction of transmitted impact noise – laboratory method.

NT ACOU 053 (1985). Rooms: Reverberation time.

NT ACOU 059 (1986). Rooms: Reverberation time – interrupted noise precision method.

NT ACOU 061 (1987). Windows: Traffic noise reduction indices.

#### *DIN (Deutsche Industrie Norm, tysk standard)*

DIN 4109 (1962/63). Schallschutz im Hochbau.  
Teil 1: Begriffe.  
Teil 2: Anforderungen.  
Teil 3: Ausführungsbeispiele.  
Teil 4: Schwimmende Estriche auf Massivdecken; Richtlinien für die Ausführung.  
Teil 5: Erläuterungen.

DIN 18164 Teil 2 (1979). Schaumkunststoffe als Dämmstoffe für das Bauwesen; Dämmstoffe für die Trittschalldämmung.

DIN 18165 Teil 2 (1975). Faserdämmstoffe für das Bauwesen; Dämmstoffe für die Trittschalldämmung.

DIN 52213 (1980). Bauakustische Prüfungen; Bestimmung des Strömungswiderstandes.

DIN 52214 (1984). Bauakustische Prüfungen; Bestimmung der dynamischen Steifigkeit von Dämmschichten für schwimmende Estriche.

DIN 52217 (1984). Bauakustische Prüfungen; Flankenübertragung; Begriffe.

## Stikordsregister

Absorptionsareal 26, 115  
Absorptionskoefficient 26, 40, 133  
Accelerationsniveau 25  
Admittans, mekanisk 94  
Afbøjningseffekt 53  
Afstivede plader, eksempler 49

Bagvæg 147  
Bankemaskine 28, 100, 118  
Beregningsmodel  
dobbeltvægge 83  
enkeltvægge 61  
flanketransmission 124  
lydbroer 94  
Betondæk 137, 150, 178  
Bygningslyd 26, 136, 186, 207  
Bøjningsbølger 18, 21, 31  
Bøjningsstivhed 21, 32  
Bølgefronter 18  
Bølgelængde 20  
Bølger 18  
dilatations 21  
forskydnings 21  
kompressions 18  
longitudinal 20  
overflade 21  
plane 18  
quasilongitudinale 20  
stående 18  
transversal 21  
Båndbredde 22  
Båndbredde, relativ 22

Centerfrekvens 22, 26

Decibel 24  
Densitet 20  
Diffust lydfelt 25  
Dilatationsbølger 21, 72  
Dilatationsresonans 77

Dobbeltkonstruktioner 138, 80  
døre 194  
lydbroer 80  
vinduer 200  
vægge 140

Dæk  
dæk på jord 136  
etagedæk 150  
støbte dæk 137  
tagdæk 155  
terrændæk 136, 150

Døre 194  
dobbelte 199  
dørhuller 197  
dørkonstruktion 194  
karmfuger 196  
lydsluse 199  
overfalsede 196  
påføring 197

Dørkarme 196  
anslag 196  
frigang 196  
karmfals 196

Effektivværdi 24  
Efterklangstid 26  
i plade 40  
måling 119  
Sabines formel 115  
vurdering 123

Egenfrekvenser 37, 75  
Egensvingninger 36  
luftlydsexcitering 60  
punktexcitering 64

Elasticitetsmodul 20  
dynamisk 67, 103  
materialedata 41, 79, 103

Elastiske forbindelser 94  
Etagedæk 150  
Excitering 24

Flankereduktionstal 124  
Flanketransmission 30, 148  
Forsatskonstruktioner 175  
  forsatsbeklædninger 186  
  forsatsvægge 186  
  svømmende gulve 183, 191  
  underlofter 186  
Forskydningsbølger 21, 72  
Forskydningsmodul 21, 73  
  materialedata 79  
Forvæg 147  
Frekvens 20  
Frekvensområde, bygningsakustisk 26  
Fuger 138, 144, 149, 154, 159, 177, 191  
Fundamenter 136

Gasfyldning 202  
Gulvbelægnings 66, 110, 128  
Gulve 175  
  knirkning 179  
  samling med vægge 189  
  svømmende 177, 183  
Gummikompenatorer 209

Harmoniske svingninger 22  
Hastighedsniveau 25  
  måling 120  
Hvid støj 114

Impedans  
  af hammer 100  
  af plade 93  
  af væg 57  
Inhomogene plader 70

Karmabsorbent 85, 205  
Knodepunktsdæmpning  
  beregning 125  
  måling 120  
Knækfrekvens 83  
  dobbeltvægge 82  
  svømmende gulve 105

Koblet ramme 201  
Koblingsfaktor 95  
Koincidens 140  
Koincidenseffekt 201  
Koincidensfrekvens 33, 200  
Koincidenstal 32  
  materialedata 41

Kompleks notation 22  
Kompressionsbølger 18  
Kompressionsmodul 20, 78  
Korrugerede plader 71  
Kritisk frekvens 71, 75

Linieforbindelser 90  
Linieimpedans 90  
Lofter  
  underlofter 186  
Longitudinalbølger 20  
Luftlyd 18  
Luftlydisolation 114  
  beregning 116, 124  
  måling 115  
  vurdering 122

Lyd 18  
Lydbroer 80, 94  
Lyddæmper 212  
Lydeffekt 25  
Lydenergi 25  
Lydfelt 25  
Lydhastighed 20  
  i faste stoffer 20, 21  
  i luft 20  
  i mineraluld 104

Lydintensitet 25  
Lydtryk 24  
Lydtrykniveau 25  
Lydudstråling 42, 93  
Lyserød støj 114

Masselov 10, 56, 137  
Materialedata 21, 41, 79, 103  
Mineraluld  
  belastet 103  
  strømningsmodstand 144

Niveaudifferens, standardiseret 117  
Nærfelt ved kraftexcitering 50, 65, 93  
Nærfeltsudstråling 51, 93

Oktav 22  
Orthotrope plader 70  
Overfladebølger 21

Plane bølger 18  
Poissons forhold 20  
  materialedata 21

Punktexcitering 64  
Punktforbindelser 88  
Punktimpedans 64, 127

Quasilongitudinalbølger 20

Randforbindelser 92  
Randtab 40  
Reduktionstal 26  
  måling 114  
  vægtet 122  
Resonansfrekvens 66  
  dobbeltvægge 82, 140  
  gulvbelægnings 67  
  ruder med to lag glas 201  
  svømmende gulve 102, 106, 109  
Resonant transmission 60  
  udstråling 93  
Rørgennemføringer 206

Sabines formel 115  
Sandwich-plader 72  
Skeletvægge 144  
  stolpeafstand 144  
  stålskeletvægge 145  
  træskeletvægge 145  
Stivhed, dynamisk 94, 102  
Strålingsfaktor 42  
  måling 120  
  resonant transmission 60  
  tvungen transmission 59

Strålingstab 42  
Støbte dæk 137  
Stående bølger 18  
  i gulvunderlag 105  
  i hulrum 83  
  i plader 44

Svingningsisolerende montering 210  
Søjler 173

Tabsfaktor 39, 42  
  materialedata 41  
  teglstensvæg 63  
  ækvivalent 59

Tagdæk 155  
Tagkonstruktion af træ 157  
Terrændæk 136, 149  
Transmissionskoefficient 130  
Transversalbølger 21

Trediedel-oktav 22  
Trinlyd 26  
Trinlyddæmpning 29, 175, 177  
  gulvbelægnings 66  
  svømmende gulve 100  
Trinlydniveau 28  
  beregning 127  
  massive dæk 65  
  måling 118  
  svømmende gulve 99  
  vægtet 123  
Trætageadskillelser 182  
Tvungen transmission 59  
Tykke plader 62, 66  
Tætningslister 196, 202

Udeluftventiler 213  
Udstrålingsvinkel 43, 53  
Underlofter 186  
Utætheder 153, 206

Ventilationskanaler 210  
Vinduer 200  
  dobbeltanslag 202  
  dobbeltvindue 205  
  karmfuge 203  
  koblet ramme 201  
  lydruder 202  
  termolydruder 202  
  termoruder 202  
  vindueskonstruktion 200  
  vinduesruder 200  
Vinkelbølgetal 24  
Vinkelfrekvens 24  
Vægimpedans 57  
  normeret 81, 83

Ydervægge 147  
  bagvæg 147  
  forvæg 147

Ækvivalent lydabsorptionsareal 26, 115

I denne anvisning behandles bygningsakustik kun ud fra teoretiske og byggetekniske synsvinkler. Den teoretiske del forudsætter kendskab til den grundlæggende akustik og den byggetekniske del almindelig viden om byggematerialer og bygningskonstruktioner. Anvisningen kan anvendes både som lærebog i ingeniøruddannelserne og som håndbog af projekterende teknikere.

