

INSTITUTTET FOR HUSBYGNING

Rapport nr. **118**

LAURITZ RASMUSSEN

**MINERALULDBASEREDE
SANDWICHELEMENTERS
LUFTLYDISOLATION**

Den polytekniske Lærestalt, Danmarks tekniske Højskole
Lyngby 1976

FORORD

Som et led i undersøgelserne af de i DtH-0-energihuset anvendte sandwichkonstruktioner blev der foretaget en reduktionsbestemmelse for 4 forskellige sandwich-elementer.

Målingerne havde til formål at belyse sandwichkonstruktionens lydisolerende egenskaber over for luftlyd.

Målingerne blev foretaget i samarbejde med Lydteknisk Laboratorium (L.L.) under mit eksamensarbejde i foråret 1975.

Målingerne blev udført i overensstemmelse med DS/ISO/R 140.

Lyngby, august 1976

Lauritz Rasmussen

INDHOLD

side

FORORD	1
INDHOLDS- OG BILAGSFORTEGNELSE	2
SAMMENFATNING	3
1. INDLEDNING	4
2. TEORETISKE OVERVEJELSER	5
2.1 "Massive vægge"	5
2.2 "Dobbeltvægge"	9
3. FORSØGSBESKRIVELSE	12
3.1 Forsøgselementer	12
3.2 Forsøgsopstilling	12
3.3 Målemetode	14
3.4 Beregning af reduktionstal	15
4. FORSØGSRESULTATER	18
5. VURDERING AF RESULTATER	22
6. REFERENCER	25

BILAG:

- Bilag 1 : Elementudformning - type 1
- 2 : Elementudformning - type 2
 - 3-10: Forsøgsdata og beregninger
 - 11 : Kurveblade til bestemmelse af grænsefrekvenser for frie bøjningsbølger i forskellige pladematerialer som funktion af tykkelsen

SAMMENFATNING

I rapporten beskrives målinger af reduktionstal som funktion af frekvensen for 4 forskellige sandwichelementer med 30 cm kerne af tværstillet mineraluld og pålimede flanger af krydsfiner og spånplade. Elementernes fladevægt er varieret gennem variation af mineraluldens rumvægt.

Reduktionstallene som funktion af frekvensen i området 100-3150 Hz viser middelreduktionstal på 34 dB for kernerumvægt 40 kg/m^3 og 32 dB for rumvægt 130 kg/m^3 .

For de lave rumvægte beskriver kurverne typiske forløb for en dobbeltkonstruktion med karakteristiske resonansdyk i området 200-500 Hz (alm. tale ligger i området 400-600 Hz).

For de høje rumvægte udviser konstruktionen ikke resonansfænomener og konstruktionens større masse og stivhed bevirker, at den her optræder som en massiv konstruktion.

Kobling af flangerne i form af kantbegrænsninger ved samlinger betyder ikke mærkbar sænkning af reduktionstallene.

1. INDLEDNING

Bygningsreglementet stiller ikke egentlige krav til konstruktioners luftlydisolation i fritliggende enfamiliehuse som 0-energi-huset. Skal sandwich-konstruktionen imidlertid anvendes som afgrænsning mellem sammenbyggede boliger, skal konstruktionen opfylde to krav vedrørende luftlydisolationen. Det første krav opstiller grænsen for den totale lydtransmission via den fælles skillevæg og via flankerende konstruktioner (middelrumisolation: mindst 52 dB). Det andet krav vedrører de lydisolerende egenskaber for den fælles skillevæg (middelreduktionstal: mindst 53 dB). Begge krav skal opfyldes samtidig.

Sandwichkonstruktionen bestående af en mineraluldskerne med pålimede flanger af krydsfiner og spånplade hører til de lette konstruktionstyper ($< 100 \text{ kg/m}^2$) og luftlydisolationen for selve væg- eller dækdelen er selvsagt lille i forhold til tungere konstruktioner.

Reduktionstallene for en akustisk set fejlfri væg afhænger dels af dens vægt pr. fladeenhed, dels af frekvensen. I de beskrevne målinger undersøges reduktionstallenes afhængighed af frekvensen for forskellige kernerumvægte og mineraluldstyper. Endelig undersøges betydningen af, at der mellem flangerne sker en direkte kobling, når disse af byggetekniske årsager ved samlinger forsynes med kantbegrænsninger.

2. TEORETISKE OVERVEJELSER

Udledningen af teorien for vægges lydisolering har desværre ført til komplicerede implicitte udtryk, hvoraf det ikke umiddelbart er muligt at forklare de enkelte parametres indflydelse på lydisoleringen.

Reduktionstallet for en væg afhænger bl.a. af væggenes konstruktion, væggenes masse pr. arealenhed, lydens frekvens og af det indfaldende lydfelts karakter. Reduktionstallet for et plant lydfelt er således ikke det samme som for et diffust lydfelt.

De teorier, der skal omtales her, er udledt under meget idealiserede forudsætninger, som næppe kan genskabes i praksis. De omtalte beregningsmodeller er utilstrækkelige for en egentlig beregning af lydens udbredelse og må her opfattes som et redskab til at forklare lydisoleringens afhængighed af frekvens, masse og konstruktionsstivhed.

2.1 "Massive vægge"

Vinkelret indfaldende
plant lydfelt

Under forudsætning af, at:

- væggen er homogen
 - væggen er uendelig i sin plan
 - vægtykkelsen er væsentlig mindre end bølgelængden for væggenes longitudinalsvingninger, så der kan ses bort fra bølgeudbredelsen mellem væggenes sider
 - og det udstrålede lydfelt på modtagersiden ikke påvirkes af omgivelserne,
- kan reduktionstallet for et vinkelret indfaldende plant lydfelt iflg.[2] beregnes af udtrykket:

$$(2-1) \quad R_o = 10 \log \left(1 + \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right)^2 \right) \text{ dB}$$

hvor:

m = væggenes vægt pr. m^2

ρ = luftens massefylde

c = lydhastigheden i luft

$\omega = 2\pi f$ = den cykliske frekvens, hvor

f = frekvensen

Skrået indfaldende
plant lydfelt

Er det plane lydfelt skråt indfaldende med indfaldsvinklen θ , beregnes reduktionstallet af udtrykket:

$$(2-2) \quad R_\theta = 10 \log \left(1 + \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \cdot \cos\theta \right)^2 \right) \text{ dB}$$

For de i praksis forekommende bygningsdele er:

$$1 \ll \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right)$$

og (2-1) kan herefter skrives som:

$$(2-3) \quad R_o \approx 20 \log m + 20 \log f + K_1 \quad \text{dB}$$

hvor m er fladevægten i kg/m^2 , f er frekvensen i Hz og K_1 er en konstant.

Af (2-3) ses, at reduktionstallet stiger $20 \log 2 = 6$ dB, når væggenes masse pr. arealenhed fordobles, ligesom reduktionstallet stiger 6 dB, når frekvensen fordobles, d.v.s. en stigning på 6 dB pr. oktav.

Bølgeudbredelse
mellem væggenes
to sider

Er væggenes tykkelse ikke lille i sammenligning med bølgelængden, sker der bølgeudbredelse mellem væggenes to sider, og reduktionstallet kan iflg. [2] beregnes af udtrykket:

$$(2-4) \quad R_o = 10 \log \left[\cos^2 k_2 d + \frac{1}{4} \left(n + \frac{1}{n} \right)^2 \sin^2 k_2 d \right] \quad \text{dB}$$

hvor:

$$k_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} = \frac{2\pi f}{c_2} = \text{bølgetallet}$$

$$n = \frac{\rho_2 c_2}{\rho c}$$

d = vægtykkelsen

λ_2 = bølgelængden i vægmaterialet

c_2 = lydhastigheden i vægmaterialet

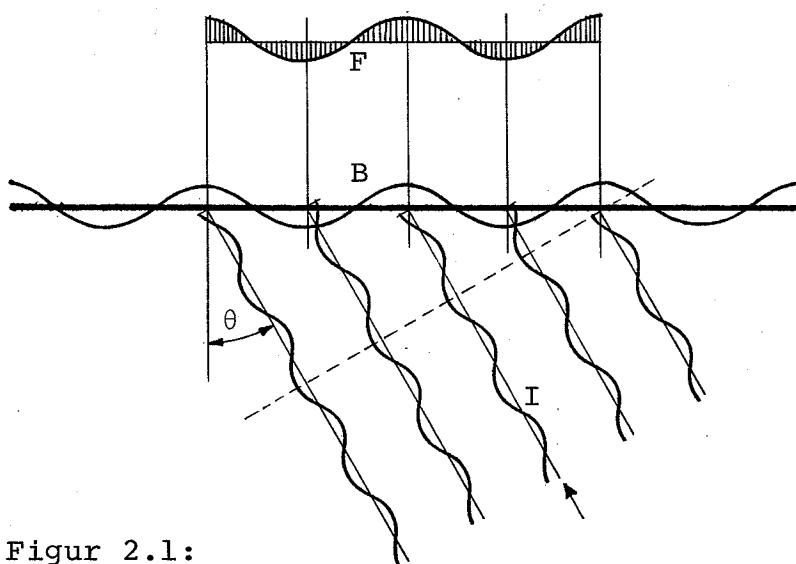
ρ_2 = vægmaterialets massefylde

Formel (2-4) går over i (2-3) for $k_2 \cdot d \ll 1$, d.v.s. for små vægtykkelser.

Formel (2-3) og (2-4) er gældende for $f \ll f_c$, hvor f_c er den såkaldte grænsefrekvens for koincidens.

Koincidens

I et mindre frekvensområde, koincidensområdet, formindskes lydisolationen, idet der sker sammenfald mellem den overfladebølge, som den plane lydbølge i luften frembringer på væggenes overflade, og væggenes "frie" bøjningsbølger. D.v.s. bølger, som kan bestå i forholdsvis lang tid uden ydre påvirkninger. Fænomenet er illustreret på figur 2.1.



Figur 2.1:

Under en bestemt indfaldsvinkel θ vil den af en indfaldende lydbølge I frembragte bøjningsbølge B falde sammen med pladens "frie" bølger F, og væggen koinciderer.

Bølgelængden i en bøjningsbølge afhænger af frekvensen, pladens tykkelse og materialet. Hvis bøjningsbølgens længde er mindre end bølgelængden i luft, vil der ikke kunne optræde koincidens.

På bilag 11 er vist sammenhængen mellem grænsefrekvensen for frie bøjningsbølger og pladetykkelsen for forskellige pladematerialer.

Koincidensfrekvens

Koincidensfrekvensen kan iflg. [3] bestemmes af udtrykket:

$$(2-5) \quad f = \frac{c^2}{2\eta \sin^2 \theta} \sqrt{\frac{m}{B}}$$

hvor:

m = massen pr. arealenhed

B = bøjningsstivheden

c = lydens hastighed i luft

θ = indfaldsvinklen

Grænsefrekvens for koincidens

Grænsefrekvensen for koincidens f_c , d.v.s. den laveste frekvens ved hvilken koincidens kan finde sted, fås for $\theta = 90^\circ$ til:

$$(2-6) \quad f_c = \frac{c^2}{2\eta} \sqrt{\frac{m}{B}}$$

Af (2-6) ses, at koincidensfrekvensen stiger med stigende masse og falder med stigende bøjningsstivhed.

Bøjningsstivheden for en massiv, homogen væg kan beregnes af udtrykket $B = Ed^3/12(1-\nu^2)$. Indføres udtrykket for B i (2-6) fås:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m \cdot 12(1-\nu^2)}{Ed^3}} = \frac{c^2 \sqrt{3}}{\pi \cdot d} \sqrt{\frac{\rho}{E} (1-\nu^2)}$$

hvor:

d = vægtykkelsen

ρ = m/d = væggen massefylde

ν = Poissons forhold

E = materialets dynamiske elasticitetsmodul

Gøres udtrykket dimensionsbundet ved at indføre ρ i kg/m^3 , d i cm og E i kp/cm^2 samt $c = 340 \text{ m/s}$ fås:

$$(2-7) \quad f_c \approx \frac{20000}{d} \sqrt{\frac{\rho}{E} (1-\nu^2)} \quad \text{Hz}$$

Det bemærkes, at E er materialets dynamiske elasticitetsmodul, der for de fleste materialer er noget større end det statiske E -modul.

Høje frekvenser

Over grænsefrekvensen for koincidens, d.v.s. for $f \gg f_c$, kan massive vægges reduktionstal iflg. [4] bestemmes af udtrykket:

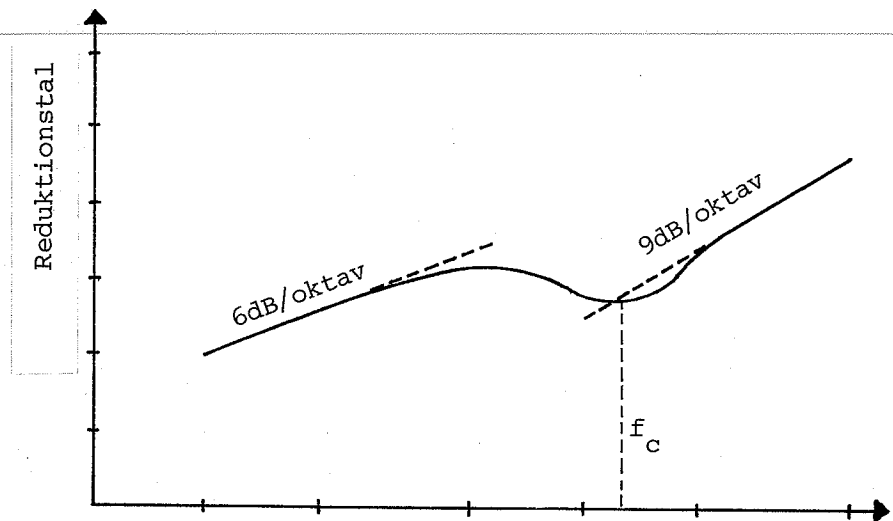
$$(2-8) \quad R = 30 \log f + 20 \log m - 10 \log f_c + 10 \log \eta + K_2$$

hvor η er et udtryk for materialets indre dæmpning og K_2 er en konstant.

Det ses, at reduktionstallet i dette område stiger med 9 dB hver gang frekvensen fordobles.

Det teoretiske forløb af reduktionstallet som funktion af frekvensen for en massiv væg ser herefter ud som illustreret på figur 2.2.

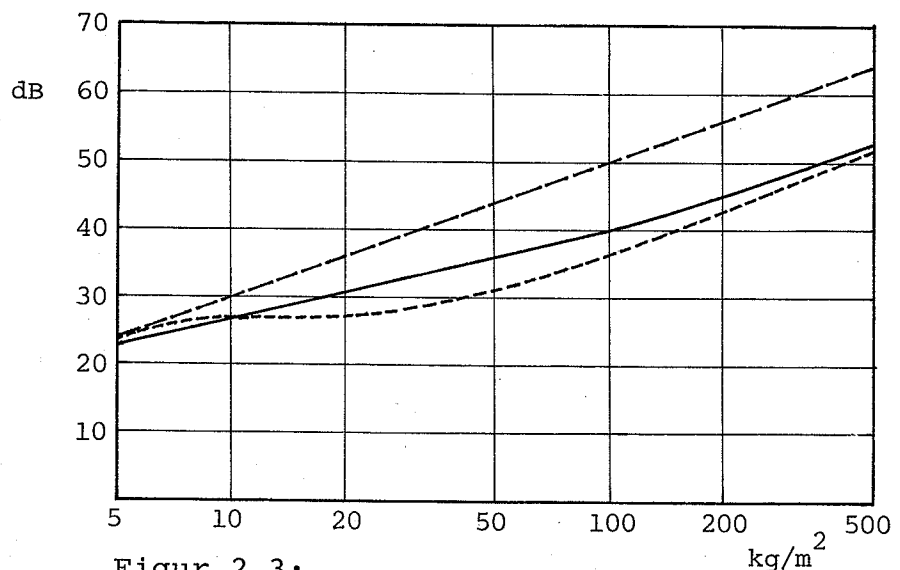
På figur 2.3 ses en beregnet og en empirisk bestemt sammenhæng mellem massive vægges middelduktionstal i frekvensområdet 100-3150 Hz som funktion af vægten pr. m^2 .



Figur 2.2:

Frekvens, logaritmisk

Teoretisk forløb af reduktionstal som funktion af frekvensen for "massive vægge". f_c angiver grænsefrekvensen for koincidens.



Figur 2.3:

Middelreduktionstal (100-3150 Hz) som funktion af vægten pr. m^2 for massive vægge.

- Den punkterede kurve er beregnet efter (2-3) uden hensyntagen til koincidens.
- Den prikkede kurve er beregnet med hensyntagen til koincidenseffekt (litt.[4]).
- Den fuldt optrukne kurve er en empirisk bestemt "vægtkurve" (litt.[4]). Sammenlign litt.[1].

2.2 "Dobbeltvægge"

Beregning af reduktionstallet for dobbeltvægge svarende til at flangerne i sandwichkonstruktionen virker som to uafhængige enkeltvægge, er betydelig mere kompliceret end for enkeltvægge. Resultaterne stemmer imidlertid meget dårligt overens med resultater fra praksis og har begrænset gyldighed.

Dobbeltvægge kan opfattes som et svingende system bestående af to masser m_1 og m_2 (her flangerne) indbyrdes forbundet med en fjeder (her mineraluldkernen) med en vis stivhed S .

Resonans

Et sådant svingende system har et egensvingningstal ved en bestemt frekvens, resonansfrekvensen, ved hvilke reduktionstallet er teoretisk nul.

I praksis vil resonansfænomenet vise sig i reduktionstalskurven som et lokalt minimum med en ret stor værdi, idet væggen altid vil have en vis tabsmodstand.

Resonansfrekvensen kan iflg.[3] beregnes af følgende udtryk:

$$(2-9) \quad f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2} S}$$

Sættes $m_1 = m_2 = m$ fås:

$$(2-10) \quad f_o = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \sqrt{\frac{S}{m}}$$

Stivheden S er kernematerialets dynamiske stivhed givet ved:

$$S = \frac{E}{d},$$

hvor:

E = kernematerialets dynamiske E -modul

d = vægtykkelsen

Indsættes i (2-10) fås:

$$(2-11) \quad f_o = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \sqrt{\frac{E}{dm}}$$

Gøres udtrykket dimensionsbundet ved at indføre m i kg/m^2 , E i kp/cm^2 og d i cm fås:

$$(2-12) \quad f_o = 700 \sqrt{\frac{E}{dm}}$$

Af (2-11) ses, at resonansfrekvensen vokser med stigende kernestivhed og aftager med stigende flangevægt og kernetykkelse.

Koincidens

Koincidens forekommer i dobbeltvægge på tilsvarende måde som i enkeltvægge. Er væggene tilmed ens kan virkningen af koincidens være endnu mere udtalt end i enkeltvægge.

Reduktionstal

Reduktionstallet for dobbeltvægge ved lave frekvenser, d.v.s. for $f \ll f_o$, er lig reduktionstallet for en enkeltvæg, hvis vægt er summen af de to delvægges vægt.

Det teoretiske udtryk er helt analogt til (2-3), d.v.s. for $f \ll f_0$ stiger reduktionstallet tilsvarende med 6 dB, når frekvensen fordobles.

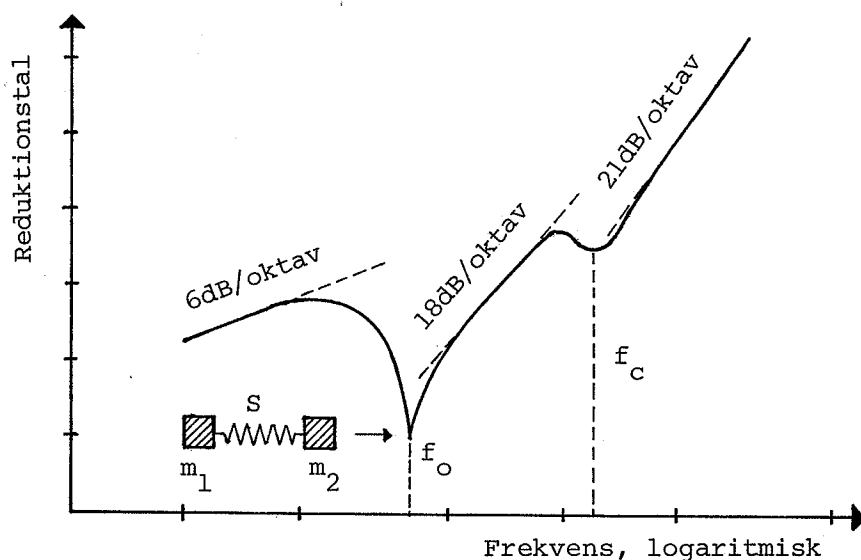
For $f_0 \ll f \ll f_c$ kan reduktionstallet iflg. [2] beregnes af udtrykket:

$$(2-13) \quad R = 60 \log f + 40 \log m + 20 \log d + K_3 \text{ dB}$$

hvor f er frekvensen i Hz, m er fladevægten i kg/m^2 , d er afstanden mellem flangerne ("væggene") i m og K_3 er en konstant.

Reduktionstallene stiger her 18 dB hver gang frekvensen fordobles og 12 dB ved en fordobling af massen pr. arealenhed.

Ved høje frekvenser, d.v.s. for $f \gg f_c$ er beregningsformlerne meget komplicerede og med stærkt begrænset gyldighed. De gengives ikke her, men fremgår af litt. [2]. Reduktionstallenes teoretiske stigning er her ca. 21 dB ved fordobling af frekvensen. Se figur 2.4.



Figur 2.4:

Teoretisk forløb af reduktionstal som funktion af frekvensen for dobbeltvægge. f_0 angiver resonansfrekvensen, f_c grænsefrekvensen for koindens.

3. FORSØGSBESKRIVELSE:

Prøvningerne er udført på Lydteknisk Laboratorium (L.L.) i to lydhårde rum forsynet med lyddiffuserende elementer. Rummenes volumen er hver på 210 m³. Rummene er opført på hvert sit fundament med en mellemliggende betonramme for indbygning af prøvevægge.

Måleudstyr er anbragt i et tilstødende hjælperum.

3.1 Forsøgselementer

Sandwichelementerne er opbygget af en 30 cm kerne af tværstillet mineraluld med pålimede flanger af 12 mm spånplade og 12 mm krydsfiner (Douglas Fir Plywood). Krydsfineren er samlet med lasker pr. 1.20 m. Limen er en enkomponent polyurethanklæber.

Prøveelementernes størrelse er: 138,3 x 179,3 cm, hvilket giver et prøveareal på ca. 2,5 m².

Elementudformningen for de to afprøvede elementtyper fremgår af bilagene 1 og 2.

Variationen i kernerumvægt fremgår af nedenstående elementoversigt.

Element- betegnelse		Mineraluld- kerne		Flade- vægt
Nr.	Type	Type	Rum- vægt kg/m ³	kg/m ²
1	1(u.kant)	glasuld	40	22
2	2(m.kant)	glasuld	40	28
3	1(u.kant)	stenuld	85	36
4	1(u.kant)	glasuld	130	49

Figur 3.1: Elementoversigt.

3.2 Forsøgsopstilling

Prøveelementerne blev opstillet i åbningen mellem målerummene.

Prøveåbningens størrelse var reduceret med en hjælpevæg for prøvning af mindre elementer (se figur 3.2)



Figur 3.2:

Sammensatte prøvevæg set fra modtagerrummet.

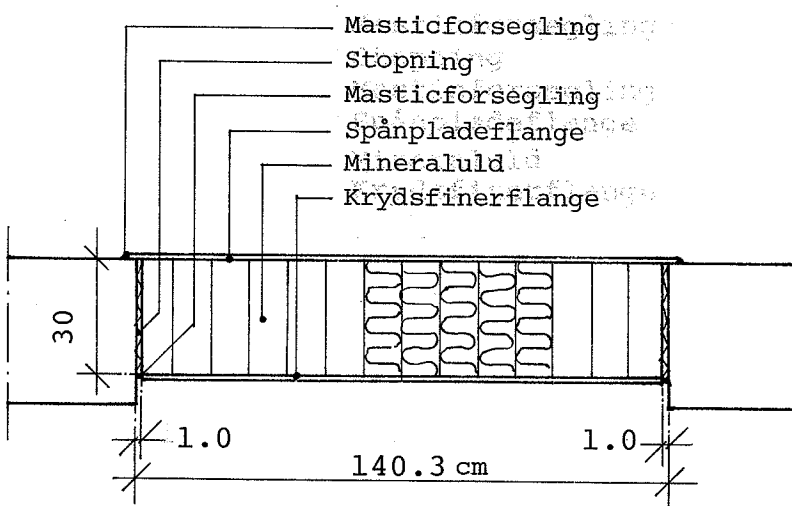
a) Sandwichkonstruktion

b) Hjelpevæg

c) Stopning + masticforsegling

Åbningen i hjælpevæggen var 140,3 x 181,3 cm. Elementerne blev fastgjort til målerammen med skruer gennem den udkragede spånpladeflange.

Fugen med en nominal bredde på 10 mm blev stoppet med værk og forseglet med mastic. (se figur 3.3).



Figur 3.3: Vandret snit i prøvevæg.

3.3 Målemetode

Lydtrykniveauer

I senderummet udsendtes båndbegrænset hvid støj med en båndbredde på 1/3 oktav med følgende standardiserede middelfrekvenser: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500 og 3150 Hz.

Gennem filtre med båndbredder på 1/3 oktav registreredes lydtrykniveauer i henholdsvis sende- og modtagerum ved hjælp af en niveauskriver med logaritmisk karakteristik. Der blev optaget kurver for lydtrykniveauet som funktion af frekvensen ved seks forskellige placeringer af mikrofoner i såvel sende- som modtagerum.

For at korrigere for modtagerummets absorption er dettes ækvivalente absorptionsareal A_m bestemt for hvert prøveelement.

Efterklangstid

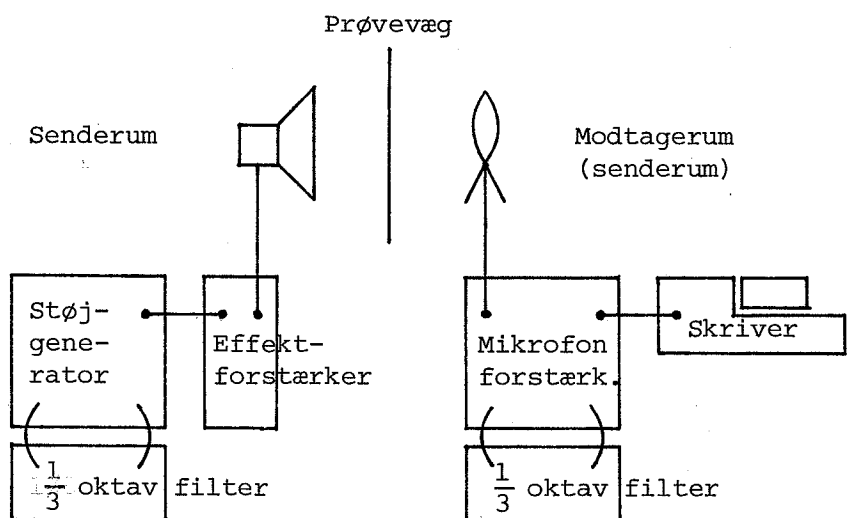
A_m blev bestemt ved måling af efterklangstiden i modtagerrummet.

Hertil anvendtes samme måleopstilling som til måling af luftlydisolationen, idet der dog til støj-generatoren blev koblet et 1/1 oktavfilter i stedet for 1/3 oktavfilter.

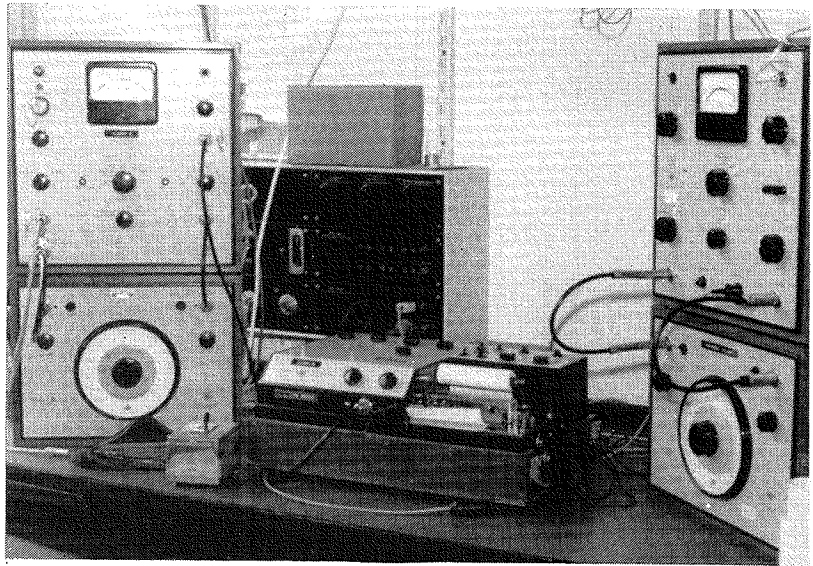
Signalet fra støjgeneratoren blev afbrudt, og det aftagende lydtrykniveau registreredes på niveauskriver som funktion af tiden.

Efterklangstiden er bestemt som kurvernes middelhældning. Måling blev foretaget ved alle førnævnte standardfrekvenser.

Forsøgsdata fremgår af bilagene 3-10.

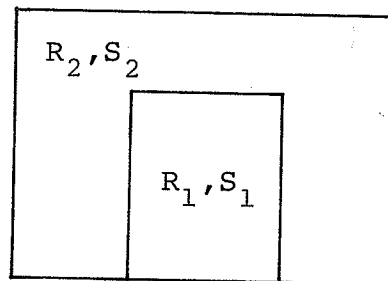


Figur 3.4: Diagram af måleopstilling.



Figur 3.5: Måleudstyr i tilstødende hjælperum.

3.4 Beregning af reduktionstal



$$\begin{aligned} S_1 &= 2.54 \text{ m}^2 \\ S_2 &= 7.36 \text{ m}^2 \\ S_{1+2} &= 9.90 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Figur 3.6: Sammensatteprøvevæg

Sammensatte
konstruktion

Reduktionstallet for den sammensatte konstruktion (prøvevæg + hjælpevæg) (R_{1+2}) beregnes iflg.[2] af formelen:

$$(3-1) \quad R_{1+2} = L_s \div L_m + 10 \cdot \log \frac{S_{1+2}}{A_m}$$

hvor:

L_s = lydtrykniveau i senderum

L_m = lydtrykniveau i modtagerum

S_{1+2} = areal af prøvevæg + hjælpevæg

A_m = absorption i modtagerum ($A_m = \frac{0.16 \cdot V}{T_m}$)

V = modtagerummets volumen

T_m = efterklangstiden i modtagerummet

Indsættes udtrykket for A_m fås:

$$10 \cdot \log \frac{S_{1+2}}{A_m} = 10 \cdot \log \frac{T_m S_{1+2}}{0.16 V} =$$

$$10 \cdot \log T_m - 5.5 = d_{L(003)}$$

$d_{L(003)}$ er indført i beregningsskemaerne bilagene 3, 5, 7 og 9.

Da prøvevæggen (R_{1+2}, S_{1+2}) er sammensat af en hjælpekonstruktion (R_2, S_2) og af sandwichkonstruktionen (R_1, S_1) vil der transmitteres en del luftlyd gennem hjælpekonstruktionen.

Det målte reduktionstal R_{1+2} må således korrigeres for dette bidrag.

Hjælpekonstruktionen

Hjælpekonstruktionens reduktionstal R_2 er bestemt af L.L.

Sandwichkonstruktionen

Beregningen af sandwichkonstruktionens reduktionstal gennemgås i det følgende.

Reduktionstallet for en bygningsdel er defineret som:

$$R = 10 \log \frac{P_i}{P_u} = 10 \log \frac{1}{q} \quad (\text{dB})$$

hvor P_i er den på sendesiden indfaldende effekt, og P_u er den på modtagesiden udstrålende effekt.

$q = \frac{P_u}{P_i}$ betegnes transmissionsforholdet.

For en sammensat konstruktion gælder:

$$q_{\text{res.}} = \frac{\sum_i^n q_i \cdot S_i}{S_{\text{total}}}$$

Her fås: $q_{1+2} \cdot S_{1+2} = q_1 \cdot S_1 + q_2 \cdot S_2$

$$R_1 = \div 10 \cdot \log q_1 \Leftrightarrow q_1 = 10^{\div 0,1 \cdot R_1}$$

$$R_2 = \div 10 \cdot \log q_2 \Leftrightarrow q_2 = 10^{\div 0,1 \cdot R_2}$$

$$R_{1+2} = \div 10 \cdot \log q_{1+2} \Leftrightarrow q_{1+2} = 10^{\div 0,1 \cdot R_{1+2}}$$

$$\begin{aligned}
R_{1+2} &= 10 \cdot \log \frac{1}{q_{1+2}} \\
&= 10 \cdot \log \frac{S_{1+2}}{q_1 S_1 + q_2 S_2} \\
&= \div 10 \cdot \log \left(q_1 \cdot \frac{S_1}{S_{1+2}} \left(1 + \frac{q_2}{q_1} \cdot \frac{S_2}{S_1} \right) \right) \\
&= R_1 \div 10 \cdot \log \frac{S_1}{S_{1+2}} + 10 \cdot \log \left(\frac{q_1 S_1}{q_1 S_1 + q_2 S_2} \right) \\
&= R_1 \div 10 \cdot \log \frac{S_1}{S_{1+2}} \\
&\quad + 10 \cdot \log \left(\frac{q_{1+2} \cdot S_{1+2} \div q_2 S_2}{q_{1+2} \cdot S_{1+2}} \right) \\
&= R_1 \div 10 \cdot \log \frac{S_1}{S_{1+2}} + 10 \cdot \log \left(1 \div \frac{S_2}{S_{1+2}} \cdot \frac{q_2}{q_{1+2}} \right) \\
&= R_1 \div 10 \cdot \log \frac{S_1}{S_{1+2}} \\
&\quad + 10 \cdot \log \left(1 \div \frac{S_2}{S_{1+2}} \cdot 10^{\div 0.1 (R_2 \div R_{1+2})} \right)
\end{aligned}$$

Heraf fås:

$$\begin{aligned}
(3-2) \quad R_1 &= R_{1+2} + 10 \cdot \log \frac{S_1}{S_{1+2}} \\
&\quad \div 10 \cdot \log \left(1 \div \frac{S_2}{S_{1+2}} \cdot 10^{\div 0.1 (R_2 \div R_{1+2})} \right)
\end{aligned}$$

Indføres:

$$10 \cdot \log \frac{S_1}{S_{1+2}} = \div 5.9 \text{ dB og } \frac{S_2}{S_{1+2}} = 0.743 \text{ fås:}$$

$$R_1 = R_{1+2} + d_s, \text{ hvor:}$$

$$d_s = \div 10 \cdot \log \left(1 \div 0.743 \cdot 10^{\div 0.1 (R_2 \div R_{1+2})} \right) \div 5.9 \text{ dB}$$

Korrektionsleddet d_s er tilføjet på Lydteknisk Laboratoriums beregningsskemaer, bilagene 3, 5, 7 og 9.

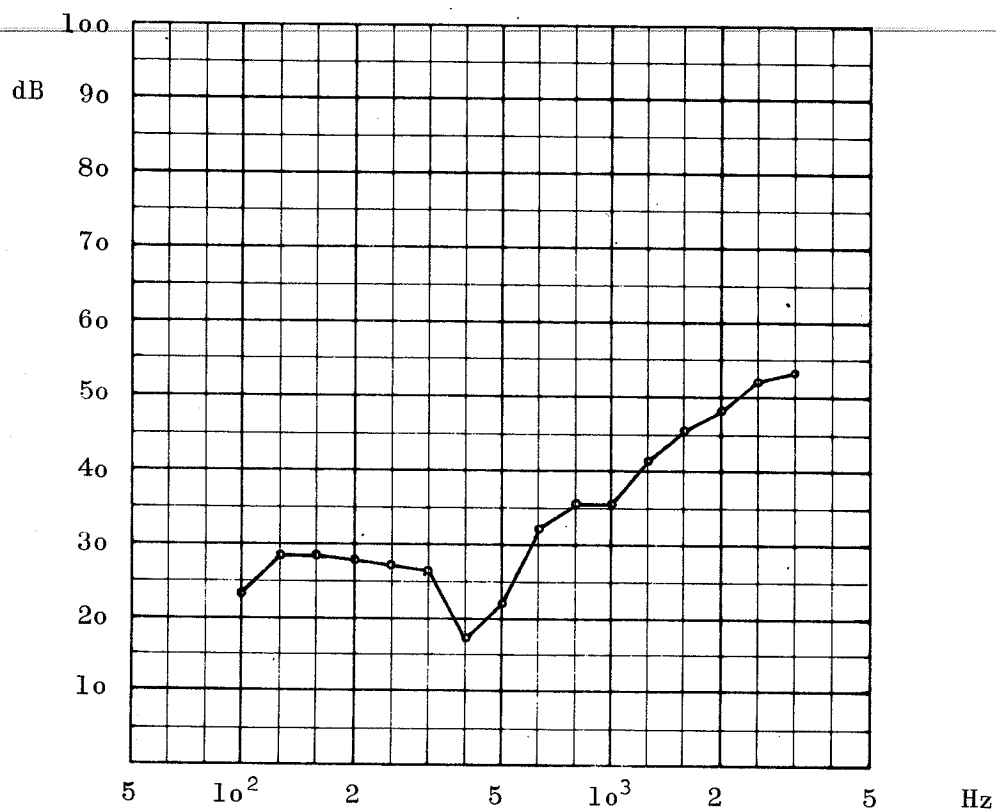
Det resulterende reduktionstal R_1 er angivet i beregningsskemaernes nederste række og afbildet i diagram som funktion af frekvensen.

4. FORSØGSRESULTATER

På de efterfølgende sider, figurerne 4.1-4.4, er gengivet reduktionstallene som funktion af frekvensen for de fire prøveelementer.

Middelreduktionstallene er middeltal af reduktionstallene pr. 1/3 oktav i frekvensområdet 100-3150 Hz.

På figur 4.5 er de fire prøveelementers reduktionstal som funktion af frekvensen sammenlignet med Bygningsreglementets krav til reduktionstal for vægge, der afgrænser sammenbyggede boliger.

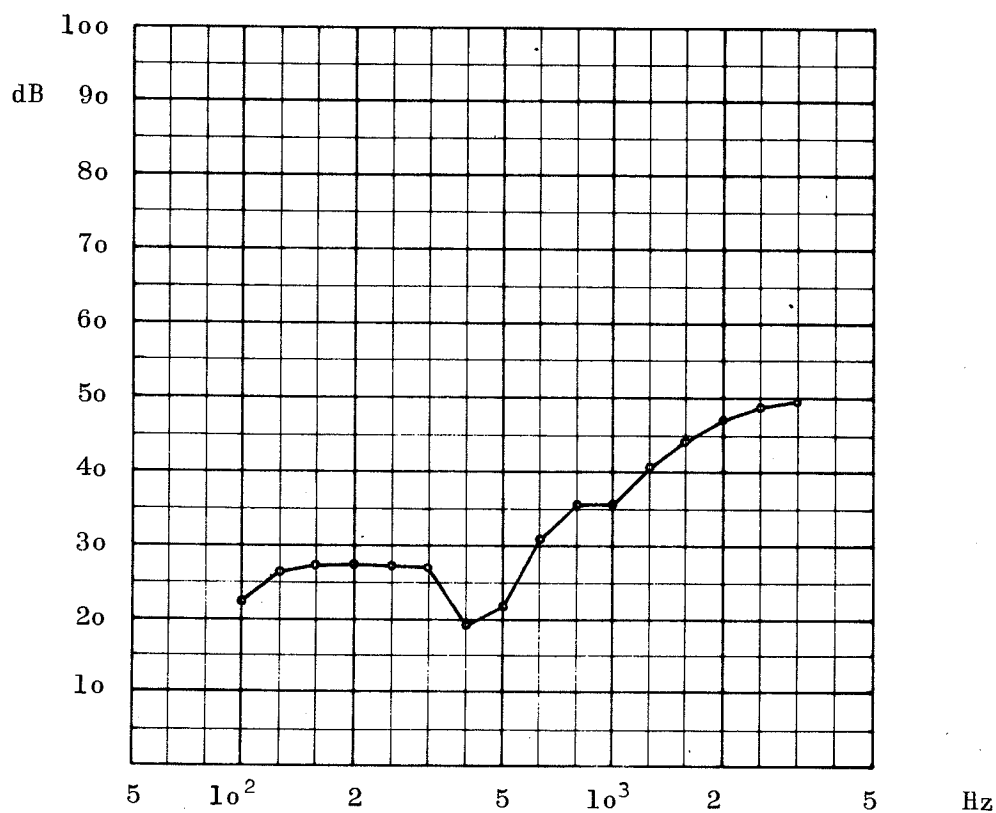


Figur 4.1:

Reduktionstal som funktion af frekvensen for element 1: glasuld 40 kg/m³ uden kant.

Middelreduktionstal:

34 dB

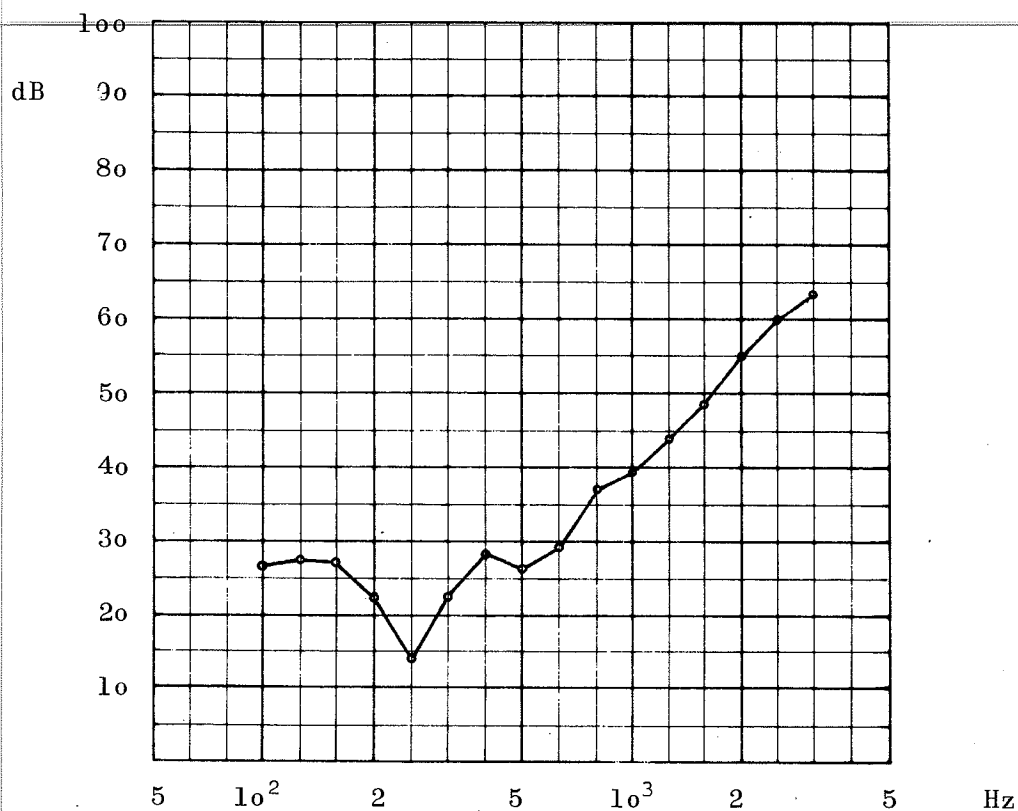


Figur 4.2:

Reduktionstal som funktion af frekvensen for element 2: glasuld 40 kg/m³ med kant.

Middelreduktionstal:

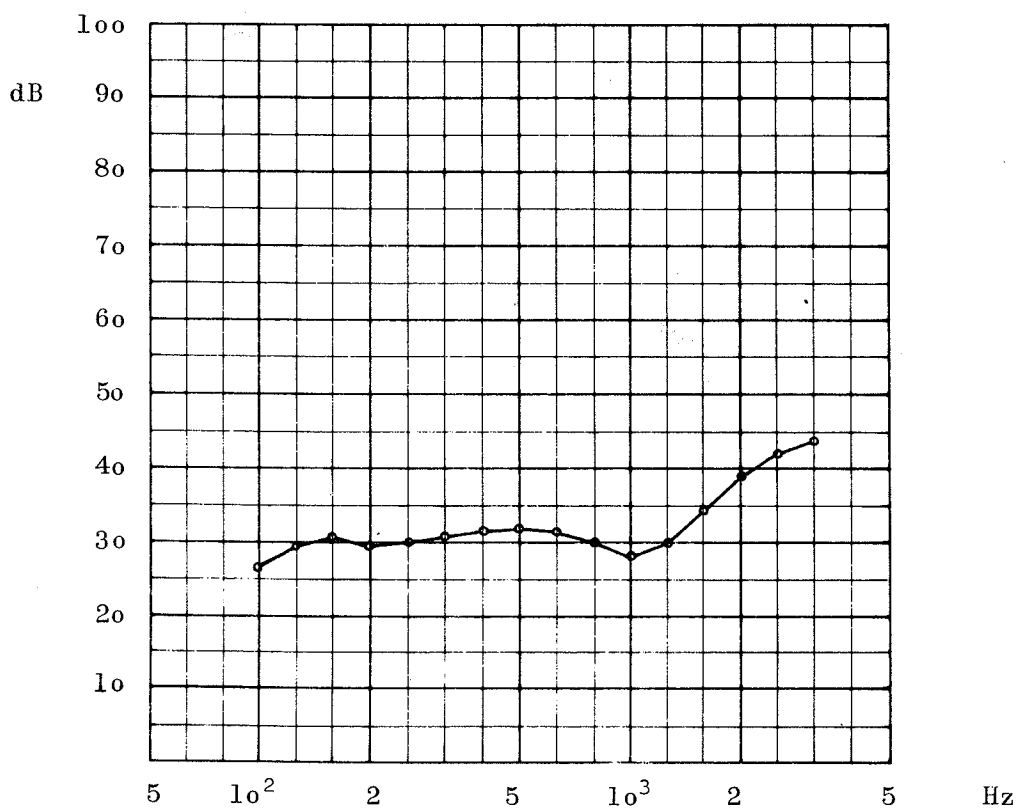
33 dB



Figur 4.3:

Reduktionstal som funktion af frekvensen for element 3: stenuld 85 kg/m³ uden kant.

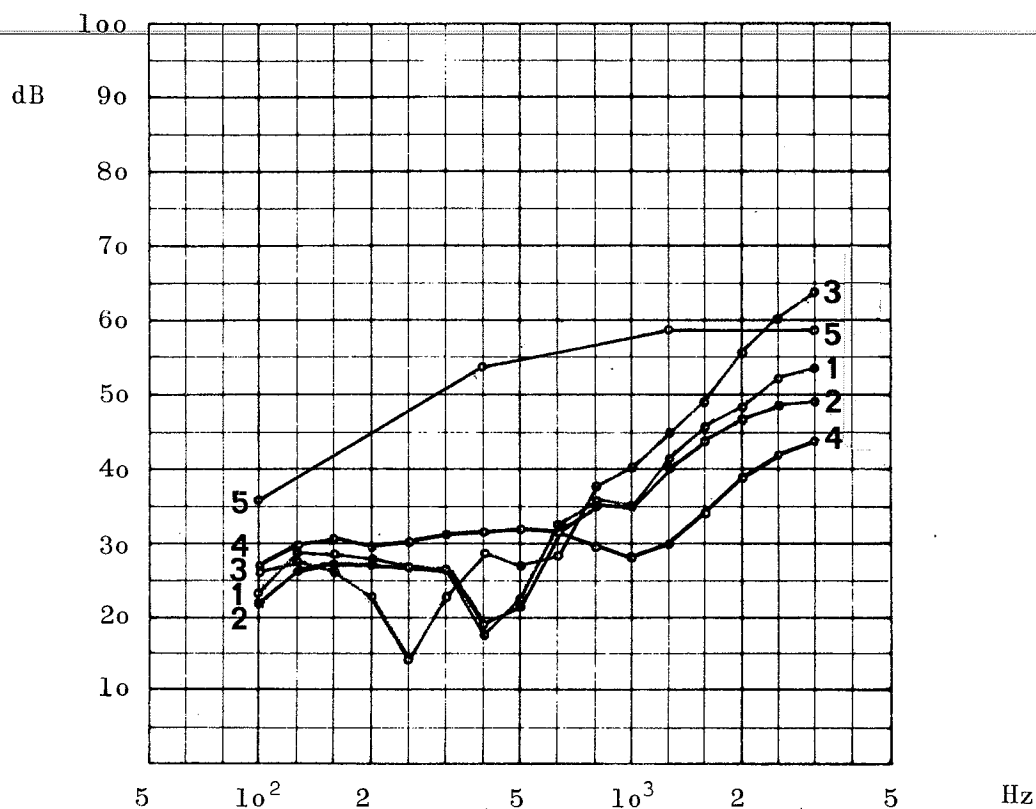
Middelreduktionstal: 36 dB



Figur 4.4:

Reduktionstal som funktion af frekvensen for element 4: glasuld 130 kg/m³ uden kant.

Middelreduktionstal: 32 dB



Figur 4.5:

Reduktionstal som funktion af frekvensen for fire prøveelementer sammenlignet med BR-kravet til afgrænsning mellem sammenbyggede boliger.

Kurve 1: glasuld 40 kg/m³ uden kant.

Kurve 2: glasuld 40 kg/m³ med kant.

Kurve 3: stenuld 85 kg/m³ uden kant.

Kurve 4: glasuld 130 kg/m³ uden kant.

Kurve 5: Bygningsreglementets krav til reduktionstal for vægge, der afgrænser boliger i dobbelthuse, rækkehuse, kædehuse, gruppehuse o.l.

Middelreduktionstal: 53 dB

5. VURDERING AF RESULTATER

Alle reduktionsmålinger er foretaget under helt analoge forsøgsbetingelser, hvorfor resultaterne danner god baggrund for sammenligninger. Det bemærkes, at reduktions-tallene er afhængige af konstruktionens dimensioner og randbetingelser. Det kan således ikke udelukkes, at den i disse forsøg valgte reduktion af prøvearealet øger randbetingelsernes indflydelse på væggenes svingninger og derved reduktionstallene i forhold til større prøvearealer. Randeffecten er søgt minimeret med den valgte opsætning af prøveemnerne.

Med undtagelse af element nr.4 med kernerumvægt 130 kg/m^3 beskriver kurverne (figur 4.1, 4.2 og 4.3) typiske forløb for dobbeltkonstruktioner (se afsnit 2.2) med karakteristiske resonansdyk i området 200-500 Hz. Resonansfrekvensen for element 3: stenuld 85 kg/m^3 ligger lavere end frekvensen for elementerne 1 og 2 med kernerumvægt 40 kg/m^3 , selv om den øgede fladevægt skulle bevirke højere resonansfrekvens. Da kurven for element 3 iøvrigt meget nøje svarer til en parallelforskydning af de to næsten sammenfaldende kurver for 1 og 2, tyder det på at stenuldens stivhed er mindre end glasuldens (sammenlign formel (2-10)), hvilket også er i overensstemmelse med stenuld - elementets højere middelreduktionstal. Sættes det dynamiske stivhedsmodul for stenuld-85 til 20 kp/cm^2 og for glasuld-40 til 50 kp/cm^2 fås resonansfrekvenserne af formel (2-12) til:

$$f_{\text{stenuld}} = 700 \sqrt{\frac{20}{30 \cdot 5}} = \underline{250 \text{ Hz}}$$

$$f_{\text{glasuld}} = 700 \sqrt{\frac{50}{30 \cdot 5}} = \underline{400 \text{ Hz}}$$

i god overensstemmelse med resonansdykkene på figurerne 4.1 og 4.3.

Reduktionstallene for element 4: glasuld 130 kg/m^3 (se figur 4.4) adskiller sig fra de øvrige prøveelementer ved ikke at udvise resonansfænomener. Dette hænger sandsynligvis sammen med konstruktionens væsentlig større masse og stivhed, således at den ikke længere optræder som en dobbeltkonstruktion, men som en massiv enkeltkonstruktion. Middelreduktionstallet 32 dB svarer ganske godt til den forventede værdi for massive konstruktioner med fladevægt 50 kg/m^2 . Sammenlign figur 2.3.

Prøveelement 4, glasuld 130 kg/m³ viser tegn på koincidens omkring 1000 Hz. Beregnes grænsefrekvensen for koincidens af formel (2-7) fås for $E = 60 \text{ kp/cm}^2$ og $\nu \approx 0$:

$$f_c = \frac{20.000}{32} \sqrt{\frac{50}{0,32 \cdot 60}} = 1010 \text{ Hz}$$

Af bilag 11 ses, at grænsefrekvensen for "frie" bøjningsbølger i de anvendte pladematerialer ligger omkring 1200 Hz, hvilket tyder på, at det virkelig er konstruktionens koincidensfrekvens omkring 1000 Hz.

Sammenligning af reduktionstallene for elementerne 1 og 2 (se figur 4.1 og 4.2) med samme kerne, glasuld 40 kg/m³, men henholdsvis med og uden kantbegrænsninger viser meget god overensstemmelse. Det må således konkluderes, at de flangekoblinger, der i sandwichkonstruktionen kan optræde ved samlinger, ikke betyder mærkbar ændring af reduktionstallenes frekvensafhængighed og sænkning af konstruktionens middelreduktionstal.

Generelt set er konstruktionens middelreduktionstal omkring 35 dB ret lavt. Set fra et akustisk synspunkt er væggen i sin nuværende form uanvendelig som afgrænsning mellem sammenbyggede boliger. Se figur 4.5. Hertil kommer isolationssvigtet - resonansdykket - i frekvensområdet 400-500 Hz, hvilket er beliggende i frekvensområdet for almindelig tale (400-600 Hz). Det vil i praksis betyde, at der kan "tales" gennem konstruktionen, idet isolationen her kun er 15-20 dB.

Hvordan kan lydisolationsevnen forbedres? En forøgelse af fladevægten, som lydisolationsteknisk er ønskelig, står i direkte kontrast til sandwich-princippet.

Teoretisk set kunne fjederen gøres svagere ved at gå yderligere ned i rumvægt, eller ved at flække elementerne eller fremstille dem i to halvdele og så sammenlime dem partielt. Men da det netop er fjederens store stivhed i fiberplanet der giver konstruktionen de gode bygningstatiske egenskaber, vil sådanne muligheder nedsætte ydeevnen på dette område.

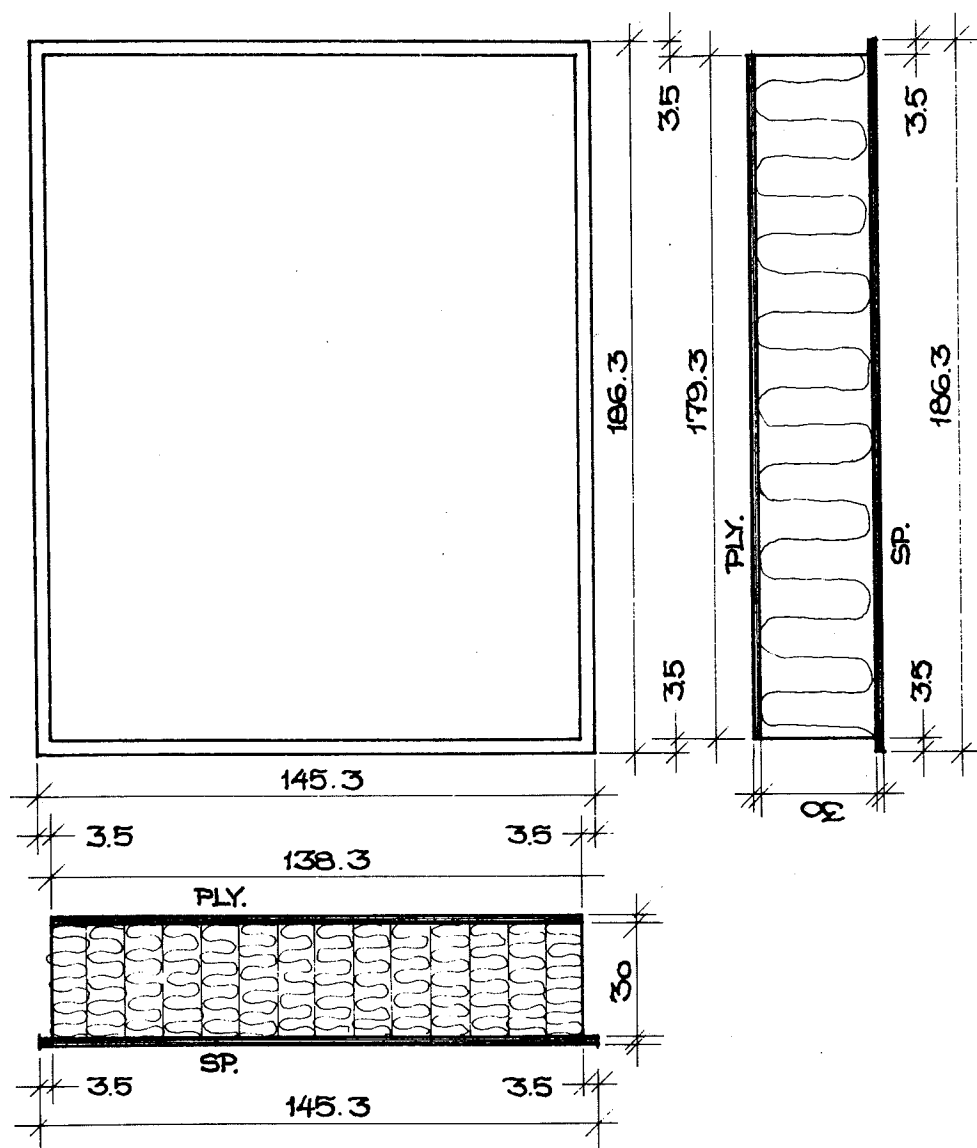
Alternativt kan bruges lydabsorberende beklædninger udenpå sandwichkonstruktionen med mellemlag af blødt materiale, eller massen af flangepladerne kan øges ved at øge pladetykkelserne eller anvende andre tungere pladematerialer (eks. eternit, glaton).

Endelig er der med foreliggende resultater god grund til at tro, at en dobbeltkonstruktion sammensat af to enkeltelementer med mindre tykkelser koblet via bløde materialer vil kunne opfylde BR-kravene. I alle tilfælde vil det føre til en betydelig vægtforøgelse og tilsvarende prisforøgelse for sandwich-konstruktionen.

6. REFERENCER

- [1] Lydteknisk Laboratorium
Bygningsakustiske Laboratoriemålinger
1973.
- [2] Fritz Ingerslev
Kompendium om luftlydisolation
Laboratoriet for Akustik. Forelæsnings-
notat 1973.
- [3] Stamm, K und Witte, H.:
Ingenieurbauten 3,
Sandwichkonstruktionen
Springer-Verlag - Wien - New York 1974
- [4] Jørgen Kristensen
SBI-notat 24
Lydisolation:
Teori, måling, vurdering og bestemmelser
Byggeriets Akustiske Målestation, 1973.

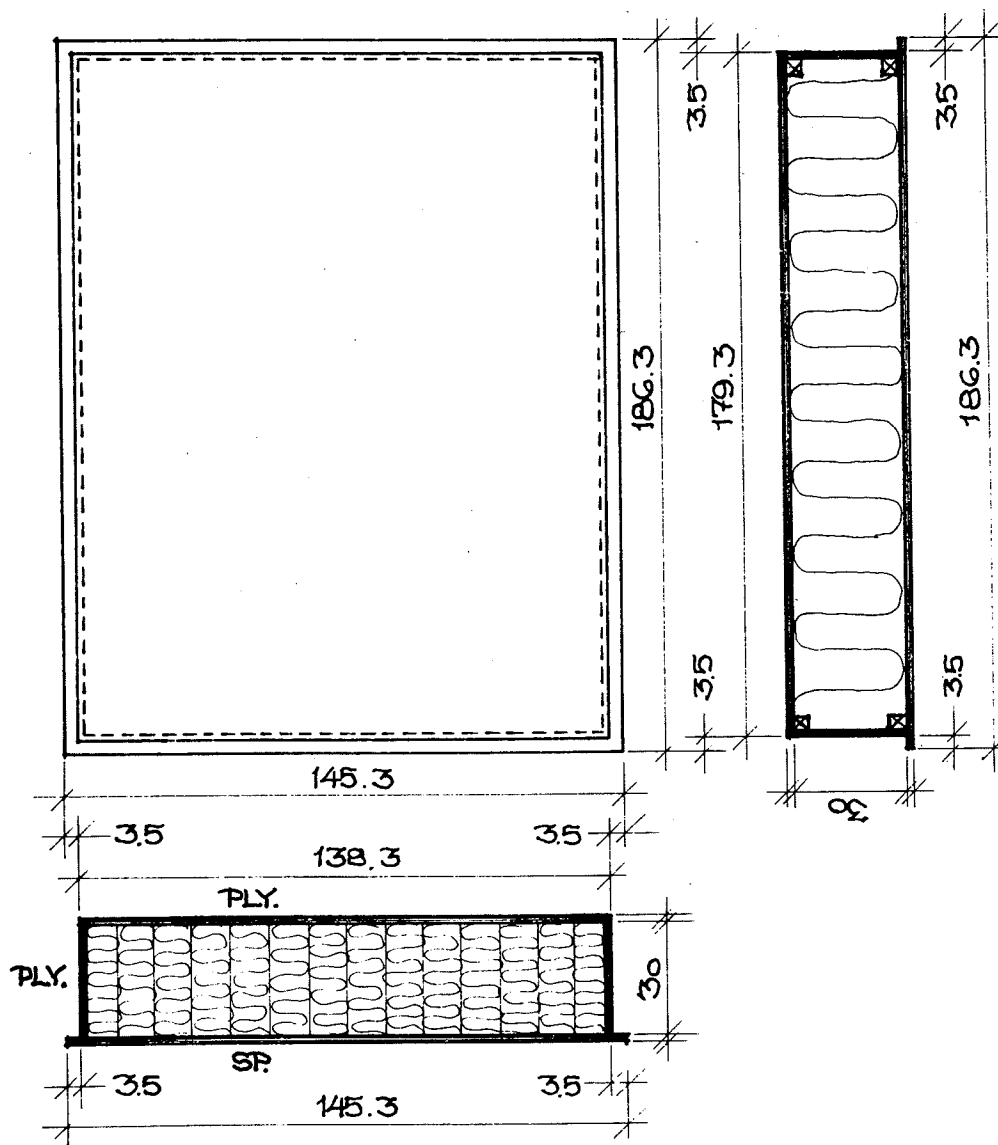
Sandwichelement: TYPE 1
(uden kantbegrænsninger)



Mål 1:20

Alle mål i cm

Sandwichelement: TYPE 2
(med kantbegrænsninger)



Mål 1:20

Alle mål i cm

DATO

15 / 5 / 15

KONSTRUKTION: SANDWICH-ELEMENT 1, GLASUD 40 kg/m³ U.K.

Frekvens Hz.	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
Efterklangstid T sek.	5.1	6.1	5.9	6.1	6.3	6.2	6.1	6.0	6.0	5.7	5.3	5.1	4.6	4.2	3.7	3.2	2.7
	4.5	5.0	6.0	5.9	6.2	6.0	6.0	5.9	5.8	5.7	5.2	5.0	4.6	4.0	3.7	3.2	2.6
	4.1	5.2	6.2	5.8	6.5	6.3	5.8	5.8	5.6	5.4	5.2	5.1	4.6	4.2	3.8	3.2	2.5
Middel T _M	4.6	5.4	6.0	5.9	6.3	6.2	6.0	5.9	5.8	5.6	5.2	5.1	4.6	4.1	3.7	3.2	2.6
Senderum	88.7	91.3	92.3	92.0	92.8	93.0	92.2	90.7	89.0	88.7	89.2	89.5	85.3	84.5	85.0	84.3	82.0
Modtagerum	61.0	59.2	60.8	61.0	62.3	63.5	71.5	64.7	53.0	49.5	49.8	43.7	35.0	31.5	27.8	25.2	18.3
Differens	27.7	32.1	31.5	31.0	30.5	29.5	20.7	26.0	36.0	39.2	39.4	45.8	50.3	53.0	57.2	59.1	63.7
d _L (003)	1.1	1.8	2.3	2.2	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.7	1.6	1.1	0.6	0.2	-0.4	-1.4
Resultat R ₁₊₂	28.8	33.9	33.8	33.2	33.0	31.9	23.0	28.2	38.1	41.2	41.1	47.4	51.3	53.6	57.4	58.7	Sum
d _s	-5.8	-5.8	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.8	-5.7	-5.5	-5.4	Sum
Resultat R ₁	23.0	28.1	27.9	27.3	27.1	26.0	17.1	22.3	32.2	35.3	35.2	41.5	45.5	47.9	51.9	53.3	Sum

Middeltal: 34 dB

Gennemsnitsafvigelse (tabel):

(tabel):

$$d_L = +10 \log \frac{S}{A_M}$$

$$d_L(003) = 10 \log T_M - 5.5$$

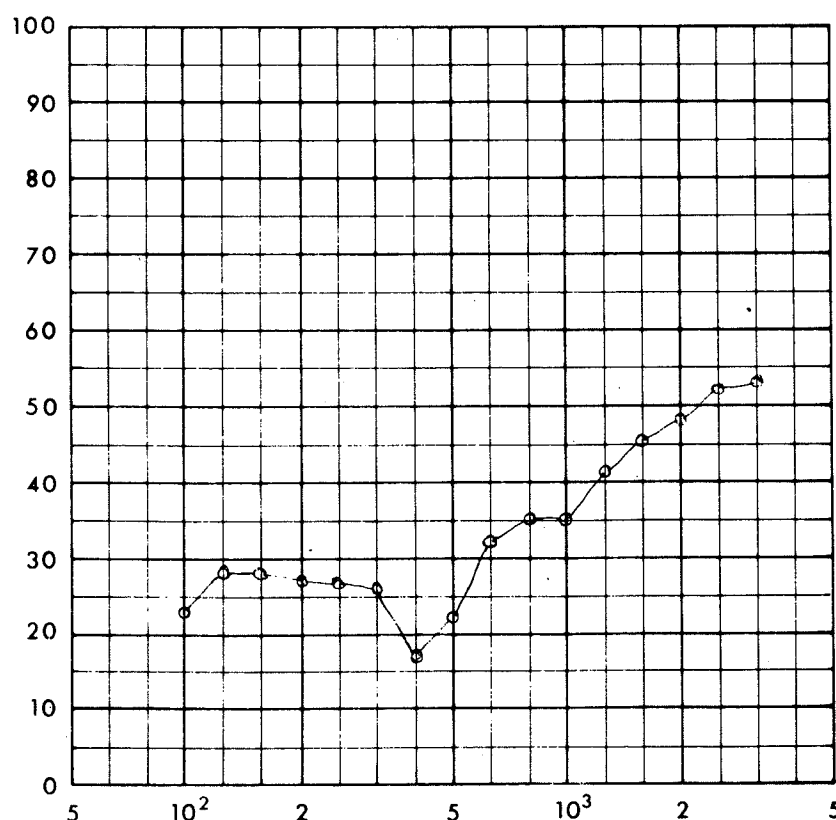
$$d_L(004) = 10 \log T_M - 5.8$$

$$d_L(904) = 10 \log T_M - 6.0$$

$$d_T = +10 \log \frac{A_M}{10}$$

$$d_T(904) = 6.0 - 10 \log T_M$$

$$d_s = -10 \log [1 - 0.743 \cdot 10^{-0.1(1 - R_{1+2})}] - 5.9$$



004

Filter nr.	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Frekvens Hz.	100	125	160	200	250	320	400	500	640	800	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000
Senderum	87	91	94	93	93	93	93	90	89	89	89	89	85	84	85	85	80
	89	90	92	91	92	92	91	90	89	89	89	89	85	85	85	85	82
	91	92	92	92	93	95	93	92	90	89	89	90	86	85	86	85	84
	89	91	93	92	93	93	92	90	89	89	90	90	85	84	85	83	82
	89	92	91	93	93	92	92	90	89	88	89	89	85	84	84	84	82
	87	92	92	91	93	93	92	92	88	88	89	90	86	85	85	84	82
Middel	88.7	91.3	92.3	92.0	92.8	93.0	92.2	90.7	89.0	88.7	89.2	89.5	85.3	84.5	85.0	84.3	82.0
Modlagerum	63	59	60	62	63	63	71	65	53	50	51	44	35	31	28	26	19
	59	59	62	60	63	64	72	65	53	49	49	43	35	31	27	24	18
	59	57	58	59	60	62	70	63	52	50	50	43	32	32	28	24	15
	63	61	62	63	65	65	73	66	54	50	50	45	36	32	28	26	21
	61	61	62	61	61	63	71	64	53	49	50	44	36	31	28	26	20
	61	58	61	61	62	64	72	65	53	49	49	43	36	32	28	25	17
Middel	61.0	59.2	60.8	61.0	62.3	63.5	71.5	64.7	53.0	49.5	49.8	43.7	35.0	31.5	27.8	25.2	18.3
Baggrund																	

003

a1

b2

c3

a6

b5

c4

a4

b5

c6

a3

b2

c1

~0

Dato: 15/5-75

Målt af: LR

Bearbejdet af: LR

Konstruktion: SANDWICH-ELEMENT 1, GLASULD 40 kg/m³ U.K.

DATO

16/5 /75

KONSTRUKTION: SANDWICH-ELEMENT 2, GLASULD 40 KG/M³ M.K.

Frekvens Hz.	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
Efterklangstid T sek.	5.1	5.9	6.0	6.2	6.3	6.2	6.1	5.5	5.8	5.7	5.2	4.8	4.7	4.2	3.8	3.3	2.7
	4.3	4.8	5.9	5.8	6.1	6.3	6.0	5.9	5.8	5.5	5.2	5.1	4.6	4.2	3.8	3.2	2.7
	5.1	5.1	6.2	5.7	5.8	6.2	6.0	5.8	5.9	5.6	5.3	5.2	4.7	4.1	3.7	3.2	2.5
Middel	4.8	5.3	6.0	5.9	6.1	6.2	6.0	5.7	5.8	5.6	5.2	5.0	4.7	4.2	3.8	3.2	2.6
Senderum	89.5	91.5	93.5	93.2	93.2	93.7	93.2	91.2	89.7	89.3	89.5	89.8	85.7	85.2	85.5	85.0	82.5
Modtagerum	62.7	61.3	62.7	62.0	62.3	63.2	70.2	66.2	55.2	50.0	49.8	44.8	36.7	33.2	31.2	29.3	24.8
Differens	26.8	30.2	30.8	31.2	30.9	30.5	23.0	25.0	34.5	39.3	39.7	45.0	49.0	52.0	54.3	55.7	57.7
d _L (003)	1.3	1.7	2.3	2.2	2.4	2.4	2.3	2.1	2.1	2.0	1.7	1.5	1.2	0.7	0.3	-0.4	
Resultat R ₁₊₂	28.1	31.9	33.1	33.4	33.3	32.9	25.3	27.1	36.6	41.3	41.4	46.5	50.2	52.7	54.6	55.3	Sum
d _s	-5.8	-5.8	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.8	-5.7	-5.7	-5.7	Sum
R ₁	22.3	26.1	27.2	27.5	27.4	27.0	19.4	21.2	30.7	35.4	35.5	40.6	44.4	47.0	48.9	49.6	Sum

Middeltal: 33 dB

Gennemsnitsafvigelse (tabel):

(tabel):

$$d_L = +10 \log \frac{S}{A_M}$$

$$d_L(003) = 10 \log T_M - 5.5$$

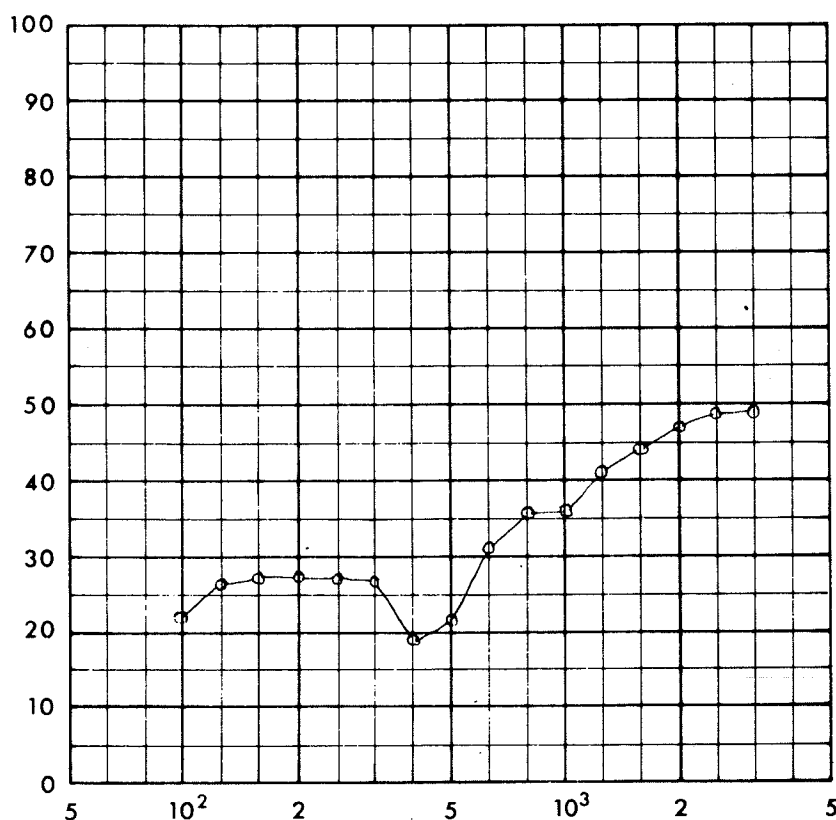
$$d_L(004) = 10 \log T_M - 5.8$$

$$d_L(904) = 10 \log T_M - 6.0$$

$$d_T = +10 \log \frac{A_M}{10}$$

$$d_T(904) = 6.0 - 10 \log T_M$$

$$d_s = -10 \log \left[1 - 0.743 \cdot 10^{-0.1(R_2 + R_{1+2})} \right] - 5.9$$



004

Filter nr.	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Frekvens Hz.	100	125	160	200	250	320	400	500	640	800	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000
Senderum	87	89	96	93	92	93	93	90	90	91	90	90	85	84	86	84	82
	91	92	92	95	94	95	94	92	90	89	89	90	87	86	85	85	82
	90	93	93	93	93	93	93	92	89	89	90	90	86	85	86	85	83
	89	90	93	92	94	94	93	91	90	89	89	90	85	86	86	85	81
	88	92	93	92	92	93	92	90	89	89	90	89	85	85	85	85	83
	92	93	94	94	94	94	94	92	90	89	89	90	86	85	85	86	84
Middel	89,5	91,5	93,5	93,2	93,2	93,7	93,2	91,2	89,7	89,3	89,5	89,8	85,7	85,2	85,5	85,0	82,5
Modtagerum	65	62	63	64	65	65	71	67	57	51	51	47	38	34	32	31	28
	64	63	64	61	60	62	70	66	55	51	50	45	38	34	32	30	27
	63	61	61	62	63	64	71	67	55	50	49	44	37	34	32	29	23
	63	62	64	63	63	63	70	66	55	50	50	45	38	33	31	30	25
	59	61	62	62	62	63	70	66	55	49	49	44	36	33	30	29	24
	62	59	62	60	61	62	69	65	54	49	50	44	33	31	30	27	22
Middel	62,7	61,3	62,7	62,0	62,3	63,2	70,2	66,2	55,2	50,0	49,8	44,8	36,7	33,2	31,2	29,3	24,8
Baggrund																	

003

~ 0

Dato: 16/5-75

Målt af: LR

Bearbejdet af: LR

Konstruktion: SANDWICH-ELEMENT 2, GLASULD 40 KG/M³ M.K.

DATO 17 / 5 / 95

KONSTRUKTION: SANDWICH-ELEMENT : 3 ROCKWOOL 85 kg/m³ U.K.

Frekvens Hz.	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
Efterklangstid T sek.	4.7	5.0	5.2	5.7	5.9	5.9	6.2	5.9	5.7	5.5	5.4	5.1	4.9	4.2	3.8	3.2	2.7
	5.2	5.3	6.0	5.8	5.8	5.9	6.1	5.9	5.7	5.5	5.4	5.0	4.5	4.1	3.7	3.1	2.8
	4.6	5.0	6.2	5.6	5.5	5.6	6.2	5.9	5.9	5.7	5.2	6.0	4.7	4.2	3.8	3.2	2.7
Middel T _M	4.8	5.1	5.8	5.7	5.8	5.7	6.2	5.9	5.8	5.6	5.3	5.0	4.7	4.2	3.8	3.2	2.7
Senderum	89.7	90.7	93.2	92.8	92.5	93.0	92.5	91.0	89.3	89.0	89.5	89.5	85.3	84.8	85.2	84.7	81.8
Modtagerum	58.5	59.0	62.5	66.3	74.5	66.5	60.5	61.3	56.5	48.2	45.5	40.7	32.2	25.8	21.7	18.5	13.0
Differens	31.2	31.7	30.7	26.5	18.0	26.5	32.0	29.7	32.8	40.8	44.0	48.8	53.1	59.0	63.5	66.2	68.8
d _L (003)	1.1	1.5	2.1	2.1	2.1	2.1	2.4	2.2	2.1	2.0	1.7	1.5	1.2	0.7	0.3	-0.4	-1.2
Resultat R ₁₊₂	32.3	33.2	32.8	28.6	20.1	28.6	34.4	31.9	34.9	42.8	45.7	50.3	54.3	59.7	63.8	65.8	Sum
d _s	-5.7	-5.8	-5.9	-5.9	-5.9	-6.9	-5.9	-6.9	-6.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.7	-4.9	-3.8	-2.8	Sum
R ₁	26.6	27.4	26.9	22.7	14.2	22.7	28.5	26.0	29.0	36.9	39.8	44.4	48.6	54.8	60.0	63.0	Sum

Middeltal: 36 dB

Gennemsnitsafvigelse (tabel):

(tabel):

$$d_L = +10 \log \frac{S}{A_M}$$

$$d_L(003) = 10 \log T_M - 5.5$$

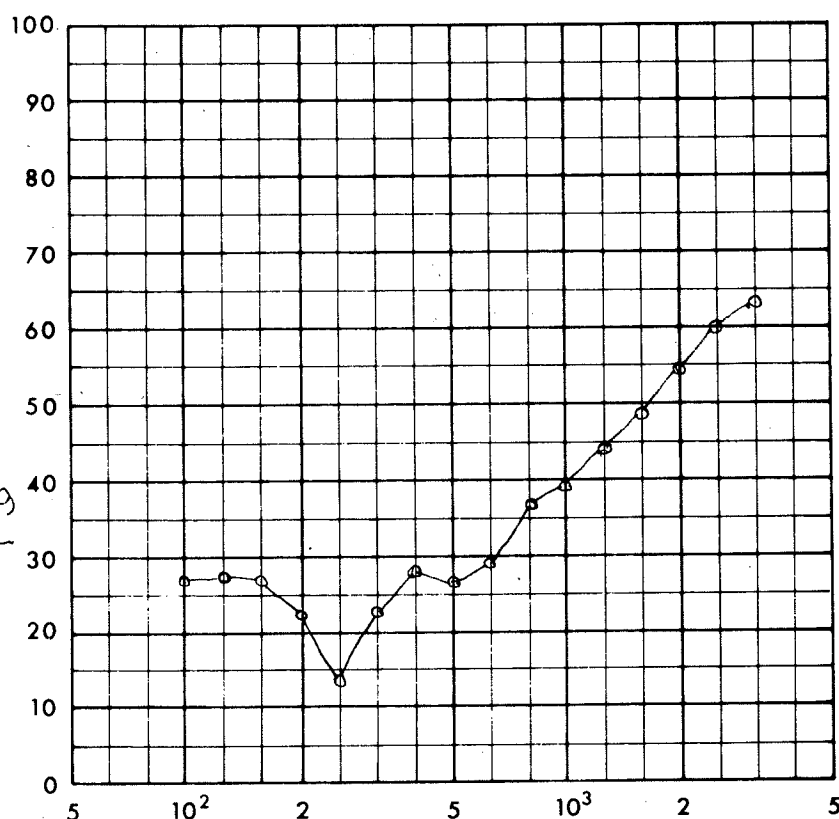
$$d_L(004) = 10 \log T_M - 5.8$$

$$d_L(904) = 10 \log T_M - 6.0$$

$$d_T = +10 \log \frac{A_M}{10}$$

$$d_T(904) = 6.0 - 10 \log T_M$$

$$d_s = -10 \log \left[1 - 0.7113 \cdot 10^{0.1(R_2 - R_{1+2})} \right] - 5.9$$



004

Filter nr.	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Frekvens Hz.	100	125	160	200	250	320	400	500	640	800	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000
Senderum	87	89	94	94	93	93	94	91	90	89	89	90	86	85	86	85	80
	91	91	92	93	92	93	93	91	89	89	89	89	85	85	85	85	82
	93	94	93	93	93	93	93	92	90	90	90	90	86	85	85	86	84
	89	87	94	92	92	93	91	90	89	88	90	89	85	84	85	83	81
	89	92	93	94	93	93	92	91	89	89	89	89	85	85	85	84	82
	89	91	93	91	92	93	92	91	89	89	90	90	85	85	85	85	82
Middel	89.7	90.7	93.2	92.8	92.5	93.0	92.5	91.0	89.3	89.0	89.5	89.5	85.2	84.8	85.2	84.7	81.8
Modlagerum	58	60	65	68	74	66	61	61	57	49	46	41	33	27	22	19	14
	55	59	63	66	74	66	61	61	56	47	45	40	32	26	21	18	13
	56	58	63	65	73	66	60	60	55	48	45	40	30	22	21	17	10
	61	61	63	68	77	67	62	63	58	49	47	42	33	27	22	20	15
	61	56	60	65	74	67	59	61	56	48	45	41	32	26	22	19	14
	60	60	61	66	75	67	60	62	57	48	45	40	33	27	22	18	12
Middel	58.5	59.0	62.5	66.3	74.5	66.5	60.5	61.3	56.5	48.2	45.5	40.7	32.2	25.8	21.7	18.5	13.0
Baggrund																	

003

~0

Dato: 17/5-75

Målt af: JR

Bearbejdet af: JR

Konstruktion: SANDWICH-ELEMENT: 3, ROCKWOOL 85 KG/M³ LK.

DATO

17/5/75

KONSTRUKTION: SANDWICH-ILLEMENT: 4 GLASULD 130 KG/M³ U.K.

Frekvens Hz.	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
Efterklangstid T sek.	4.8	5.9	6.0	5.9	6.2	6.1	6.2	5.9	6.0	5.5	5.2	4.9	4.6	4.2	3.9	3.2	2.8
	4.9	5.5	6.0	5.7	6.3	6.0	6.2	5.6	5.8	5.7	5.2	5.1	4.6	4.4	3.8	3.4	2.8
	4.8	5.3	5.8	5.8	6.1	5.9	6.1	5.8	5.8	5.8	5.3	4.9	4.5	4.1	4.0	3.2	2.8
Middel T _M	4.8	5.6	5.9	5.8	6.2	6.0	6.2	5.8	5.9	5.7	5.2	5.0	4.6	4.2	3.9	3.3	2.8
Senderum	89.7	90.8	92.5	92.2	92.7	93.0	93.0	91.2	89.3	88.8	89.5	89.5	85.3	84.8	85.0	84.7	82.3
Modtagerum	58.2	57.2	58.3	58.8	59.3	59.0	58.3	55.5	54.0	55.2	57.2	55.2	46.0	40.8	38.2	35.0	28.3
Differens	31.5	33.6	34.2	33.4	33.4	34.0	34.7	35.7	35.3	33.6	32.3	34.3	39.3	44.0	46.8	49.7	54.0
d _L (003)	1.3	1.7	2.2	2.1	2.4	2.3	2.4	2.1	2.2	2.1	1.7	1.5	1.1	0.7	0.4	-0.3	-1.0
Resultat: R ₁₊₂	32.8	35.3	36.4	35.5	35.8	36.3	37.1	37.8	37.5	35.7	34.0	35.8	40.4	44.7	47.2	49.4	Sum
d _S	-5.6	-5.8	-5.8	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.9	-5.8	Sum
R ₁	27.2	29.5	30.6	29.6	29.9	30.4	31.2	31.9	31.6	29.8	28.1	29.9	34.5	38.8	41.3	43.6	Sum

Middeltal: 32 dB

Gennemsnitsafvigelse (tabel):

(tabel):

$$d_L = +10 \log \frac{S}{A_M}$$

$$d_L(003) = 10 \log T_M - 5.5$$

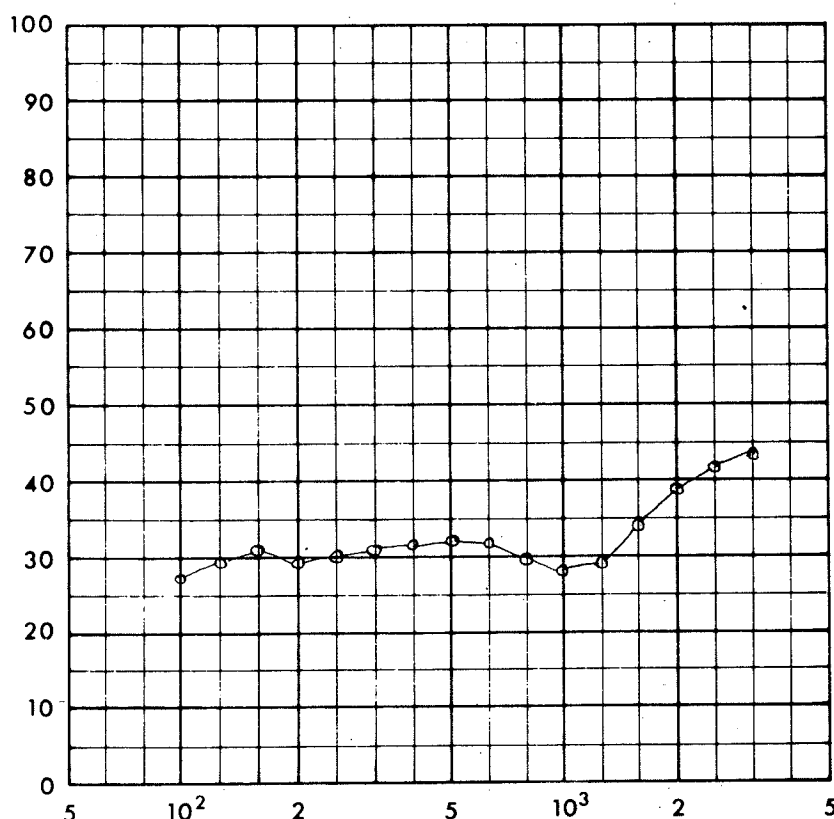
$$d_L(004) = 10 \log T_M - 5.8$$

$$d_L(904) = 10 \log T_M - 6.0$$

$$d_T = +10 \log \frac{A_M}{10}$$

$$d_T(904) = 6.0 - 10 \log T_M$$

$$d_S = 10 \log \left[1 - 0.743 \cdot 10^{-0.1(R_2 - R_{1+2})} \right] - 5.9$$



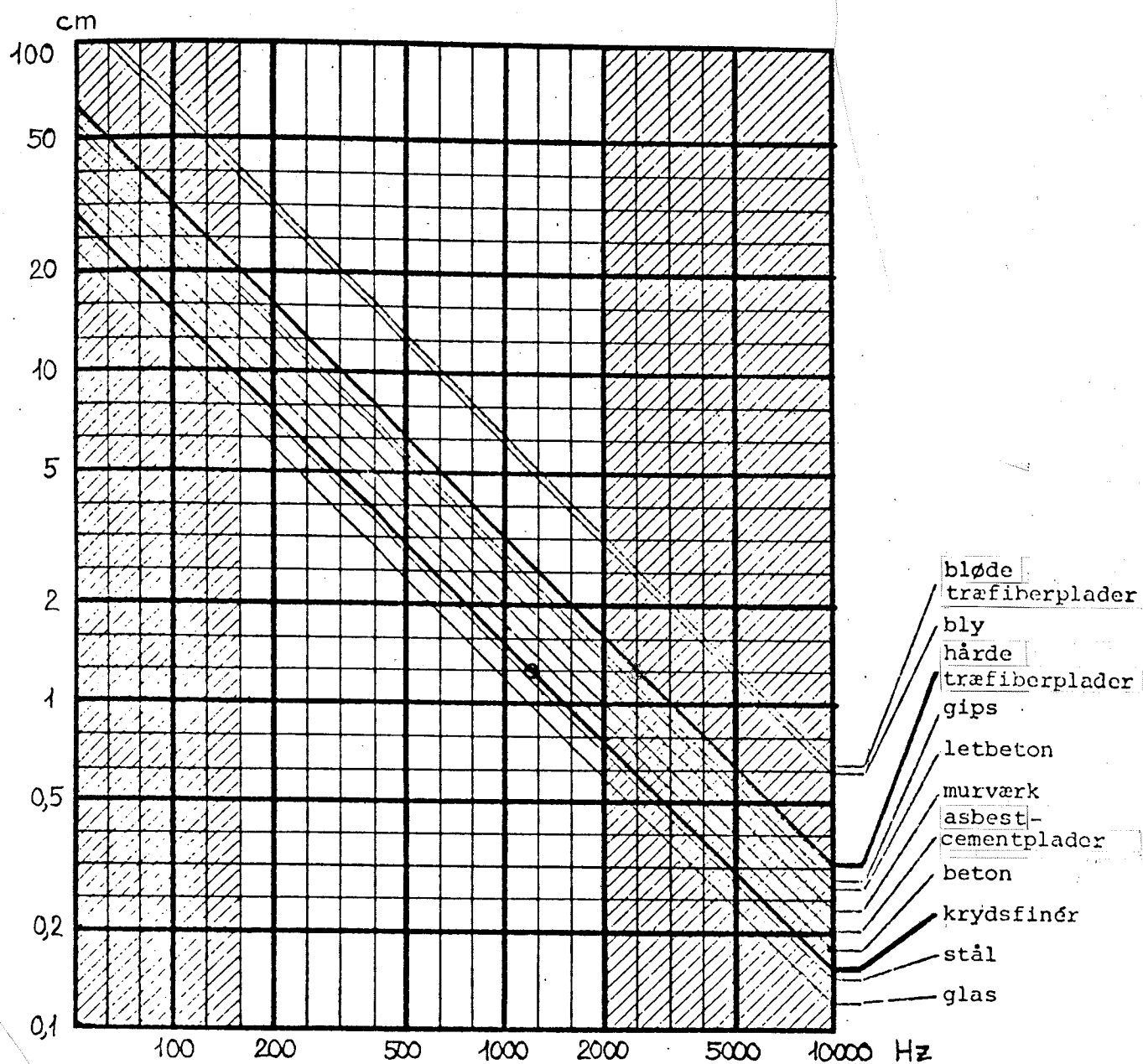
Filter nr.	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Frekvens Hz.	100	125	160	200	250	320	400	500	640	800	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000	
Senderum	87	88	94	92	90	93	92	90	89	89	90	90	84	84	84	83	82	a 6
	92	93	92	93	93	92	92	91	90	89	90	89	86	85	85	85	82	b 5
	91	93	92	91	93	93	93	92	90	89	90	90	86	85	85	85	82	c 4
	92	90	91	93	94	93	94	91	89	89	89	89	86	85	86	84	81	a 1
	87	89	93	91	91	92	93	90	89	88	89	89	85	86	85	85	83	b 2
	89	92	93	93	95	95	94	93	89	89	89	90	85	84	85	86	84	c 3
Middel	89,7	90,8	92,5	92,2	92,7	93,0	93,0	91,2	89,3	88,8	89,5	89,5	85,3	84,8	85,0	84,7	82,3	
Modlagerum	57	57	60	62	60	61	60	57	55	56	59	57	47	42	39	37	33	a 3
	61	56	57	59	58	58	57	55	54	55	58	56	47	41	39	36	29	b 2
	58	58	58	59	61	59	58	56	54	55	56	54	46	42	39	35	27	c 1
	60	57	60	60	60	59	59	56	54	55	57	56	47	41	38	35	29	a 4
	56	57	57	58	59	59	59	56	54	55	56	54	46	41	37	34	28	b 5
	57	58	58	55	58	58	57	53	53	55	57	54	43	38	37	33	24	c 6
Middel	58,2	57,2	58,3	58,8	59,3	59,0	58,3	55,5	54,0	55,2	57,2	55,2	46,0	40,8	38,2	35,0	28,3	
Baggrund																		

Dato: 11/5-75

Målt af: IR

Bearbejdet af: IR

Konstruktion: SANDWICH - ELEMENT 21, GLASULD 130 kg/m³ U.K.



Grænsefrekvensen for frie bøjningsbølger i plader
afhængig af pladetykkelsen for forskellige pladematerialer.