

Geluidisolatie

Eddy Gerretsen

Geluidisolatie:

- in algemene zin:
 - geluid tegen houden, geluidwering
 - in de bouwakoestiek: luchtgeluid- en contactgeluidisolatie
- specifiek begrip:
 - de goed gedefinieerde eigenschap van een bouwelement bij luchtgeluid
- eerst dat laatste dan dat eerste voor luchtgeluid

- de geluidisolatie van een bouwelement is de verhouding van de doorgelaten tot de invallende geluidintensiteit, uitgedrukt in decibel

$$R = -10 \lg \tau \quad \text{met} \quad \tau = \frac{I_{door}}{I_{in}} \quad \text{ook wel} = \frac{W_{door}}{W_{in}}$$

- het resultaat is afhankelijk van de eigenschappen van het element, maar ook van het soort invallend geluidveld
- het meest gebruikte en bekende is de geluidisolatie voor diffuse geluidvelden. Dan kan dit worden uitgedrukt in een eenvoudige meetvergelijking

$$R = L_z - L_o + 10 \lg \frac{S}{A} \quad \text{met} \quad A = \frac{V}{6T_{60}}$$

wat is de geluidisolatie van typische bouwelementen?

- eenvoudig beginnen:
 - vlakke invallende geluidgolf
 - bouwelement (wand, vloer) is in essentie een massa
- diverse mogelijkheden om dit te beschrijven en op te lossen
(golfvergelijkingen oplossen, invallende en gereflecteerde golven e.d.)
- nu kiezen voor de aanpak via een elektrisch vervangingsschema
- geen nieuwe aanpak:
eerder ook door Zwikker en van den Eijk op de Impedantiedag,
Geluidstichting, 27 november 1941

vlakke golf (golfvergelijking):

$$p = \rho_o c_o v$$

analogie met elektrische schakelingen:

spanning e over weerstand R geeft stroom i :

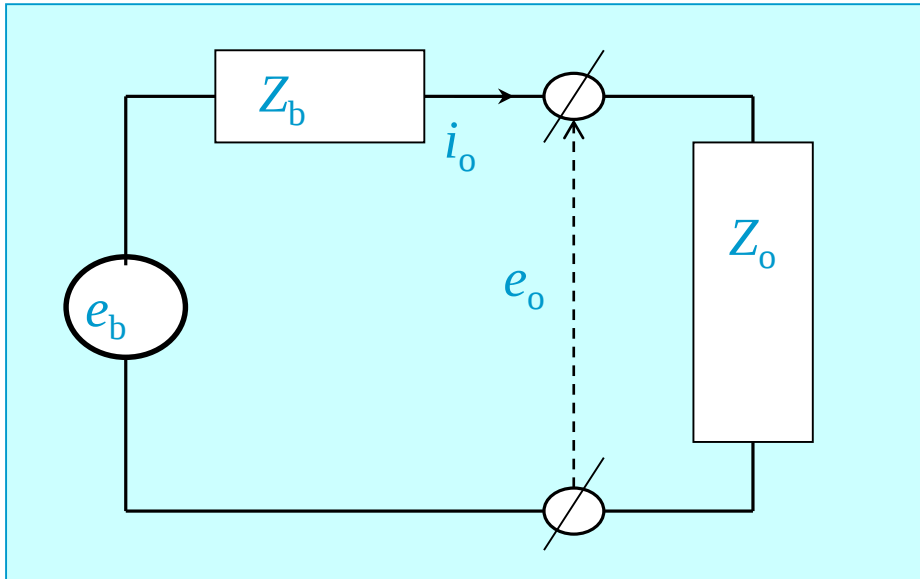
$$e = R i$$

of algemener (serie weerstanden, een condensator, een spoel etc.)
een impedantie Z :

$$e = Z i \Rightarrow Z = \frac{e}{i}$$

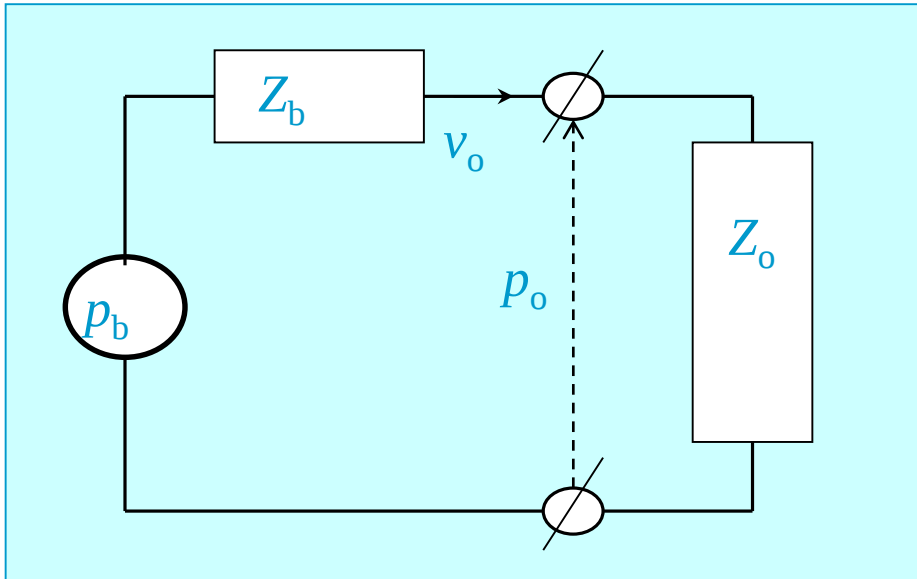
analogie: akoestische impedantie Z
voor geluidgolf in lucht:

$$Z = \frac{p}{v} = \rho_o c_o$$



batterij met lampje:
bronspanning e_b en bronweerstand Z_b
geeft spanning e_o over 'lampje' Z_o

$$e_b = i_o (Z_b + Z_o)$$

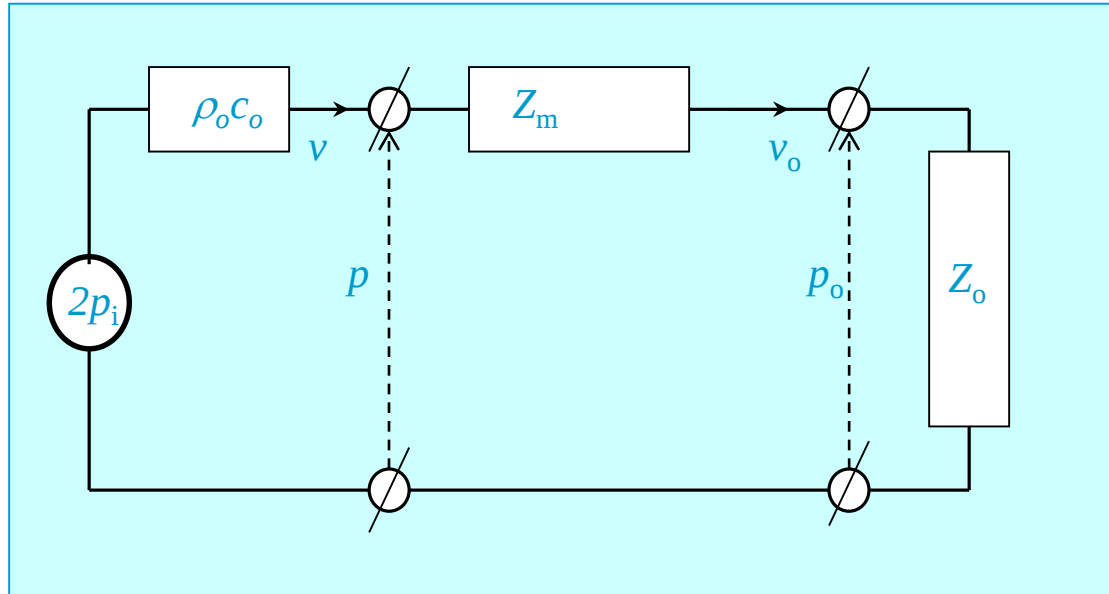


$$Z_o \gg \Rightarrow p_b = p_i + p_r = 2p_i$$

$$Z_o = \rho_o c_o \Rightarrow \dots Z_b = \rho_o c_o$$

$$p_b = v_o (Z_b + Z_o)$$

Vlakke golven door constructie = MASSA

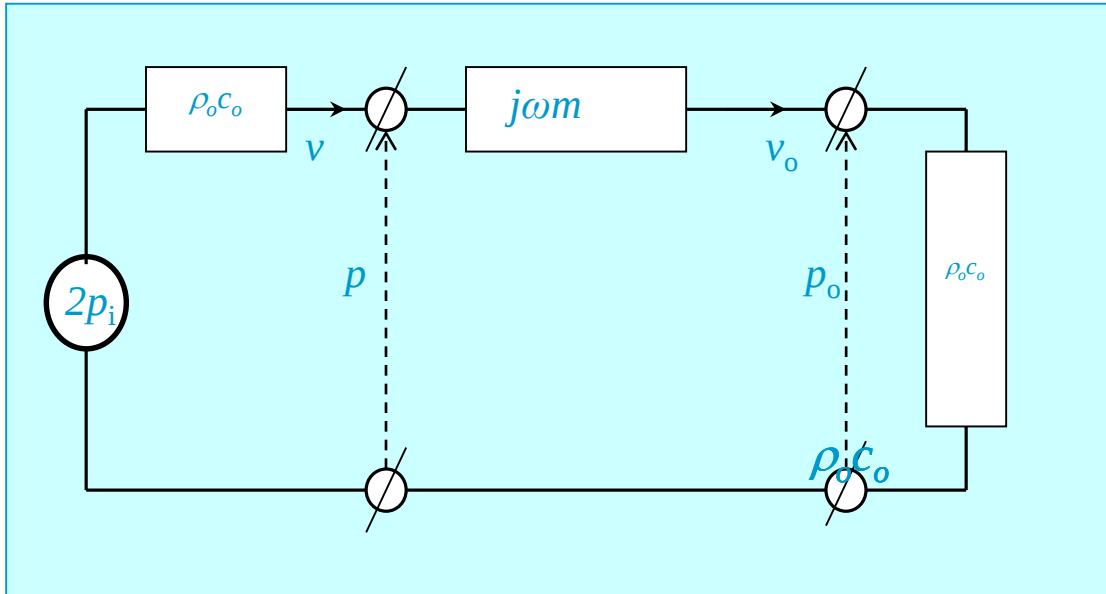


$$Z_o = \rho_o c_o$$

massa: 2^e wet van Newton $F = M a$

$$p = m a = m j \omega v \Rightarrow Z_m = j \omega m$$

Vlakke golven door constructie = MASSA



$$2p_i = v_o(\rho_o c_o + j\omega m + \rho_o c_o)$$

$$p_o = v_o \rho_o c_o$$

$$\tau = \frac{I_{door}}{I_{in}} = \left| \frac{p_o^2}{p_i^2} \right| = \left| 1 + \frac{j\omega m}{2\rho_o c_o} \right|^{-2}$$

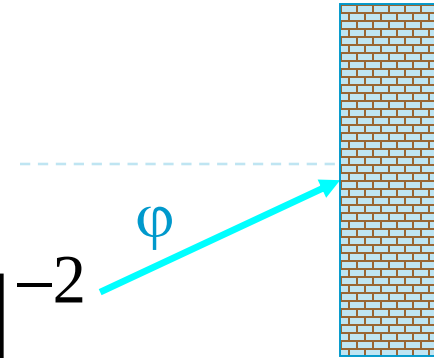
$$R = 10 \lg \left(\frac{\omega m}{2\rho_o c_o} \right)^2$$

theoretische massawet

invallende golf onder hoek φ :

$$Z_b = Z_o = \rho_o c_o / \cos \varphi$$

$$\tau_\varphi = \left| 1 + j\omega m \cos \varphi / 2\rho_o c_o \right|^{-2}$$



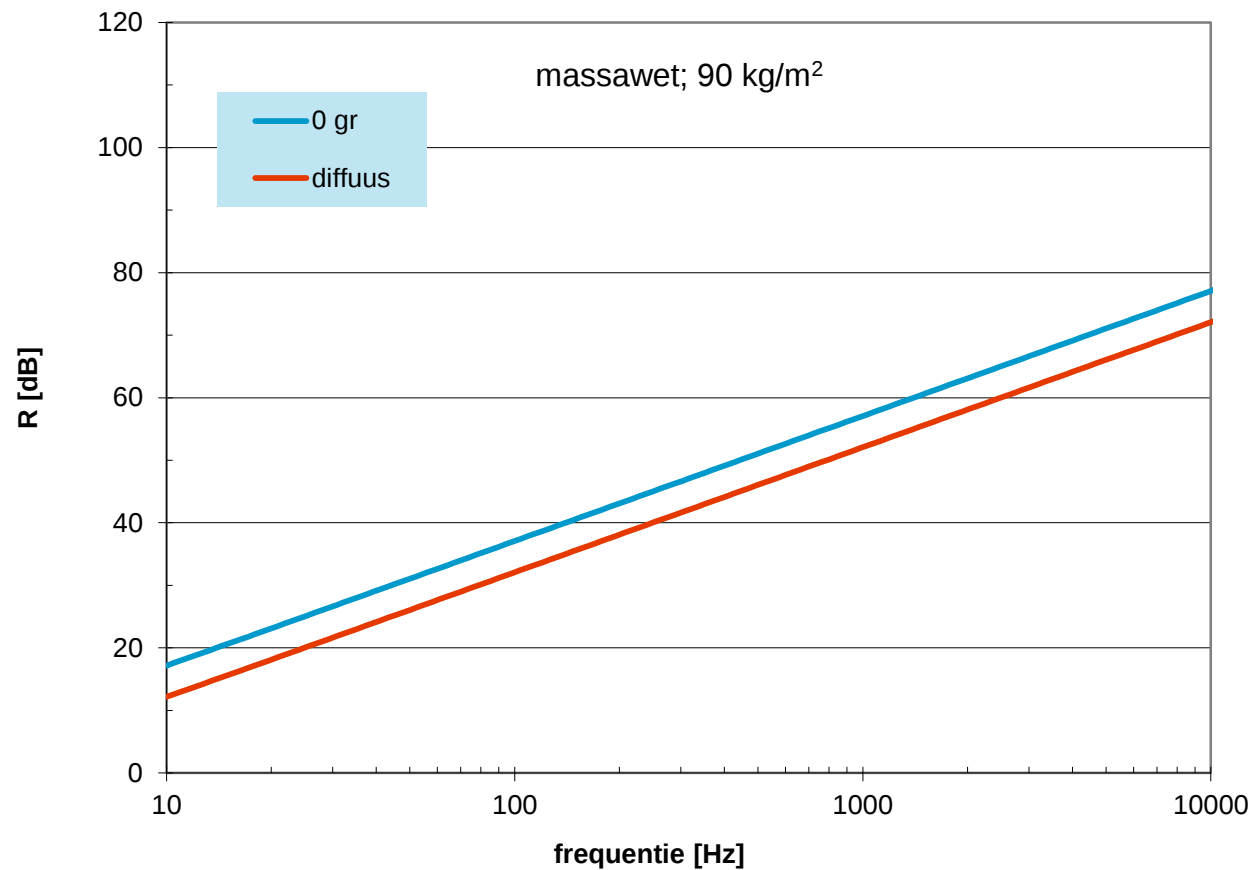
alzijdige inval:

$$\tau_{alz} = \int_0^{\pi/2} \tau_\varphi \sin 2\varphi d\varphi$$

diffuus geluidveld ($\varphi < 80^\circ$):

$$R_{diff} = R_\perp - 5$$

Vlakke golven door constructie = MASSA



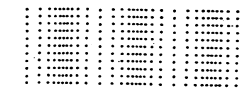
Lucht: geen schuifspanning > alleen longitudinale golven

Elastische media: longitudinale golven en transversale golven

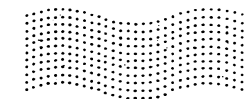
Begrensde media: quasi-longitudinale golven, torsie en schuifgolven
buiggolven

Buiggolven zijn het belangrijkste golftype:

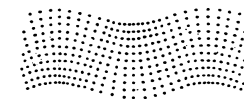
- eenvoudig op te wekken
- goede geluidafstraling



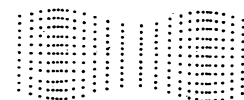
a. longitudinale golf: deeltjessnelheid parallel aan voortplantingsrichting



b. transversale golf: deeltjessnelheid loodrecht op voortplantingsrichting



c. buiggolf: deeltjessnelheid overwegend loodrecht op voortplantingsrichting



d. quasi-longitudinale golf: deeltjessnelheid overwegend parallel aan voortplantingsrichting

longitudinale golf: uit golfvergelijking balk (wet van Hooke), plaat

$$c_{L,balk} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} ; c_{L,plaat} = \sqrt{\frac{E}{(1-\mu^2)\rho}}$$

beton: $c_L = 3500$ m/s

glas: $c_L = 5000$ m/s

gips: $c_L = 2400$ m/s

lucht: $c_L = 340$ m/s

meeste bouw materialen: $\mu \approx 0,3$ dus beperkt effect

buiggolf (balk, plaat)

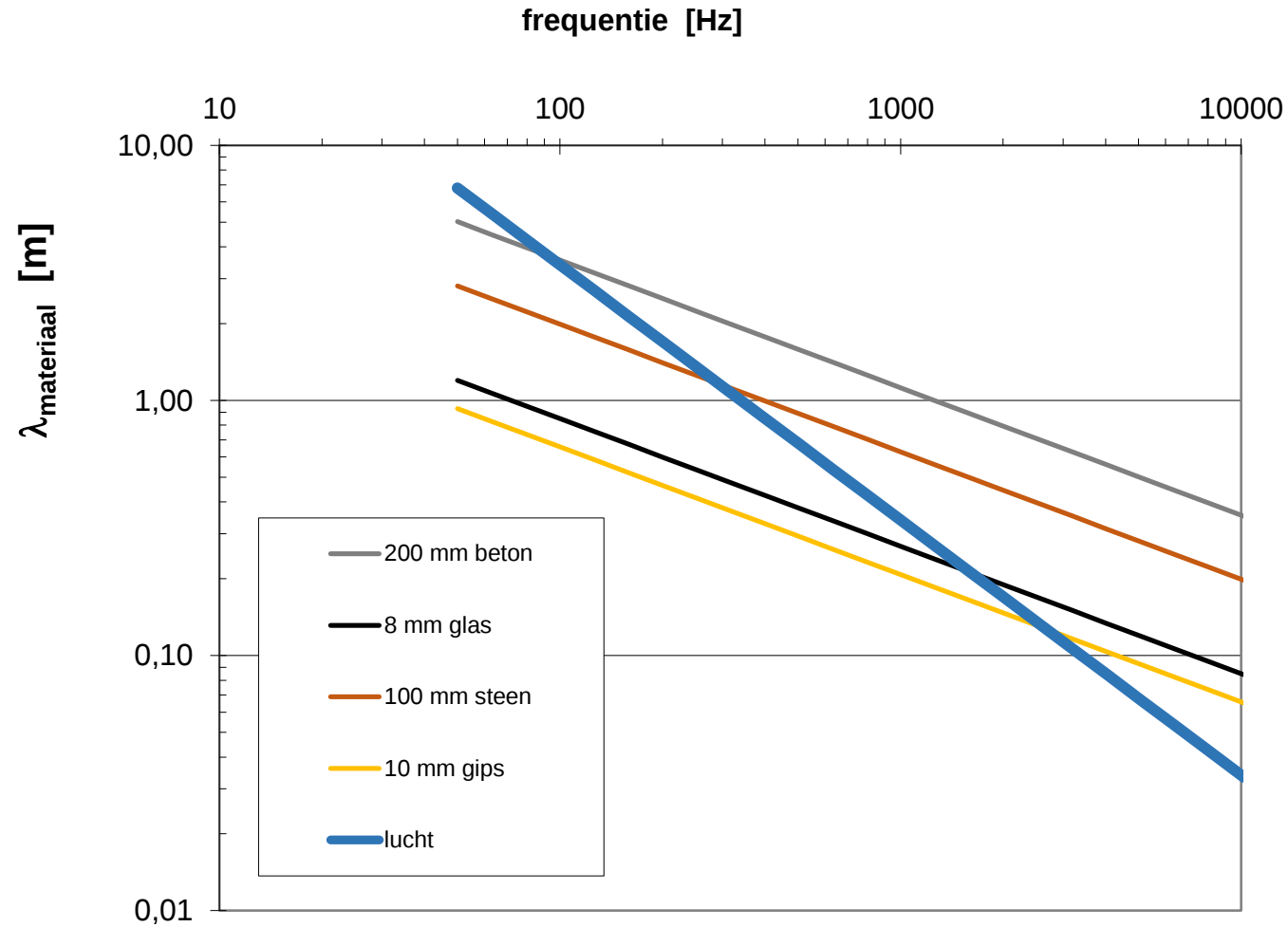
$$B' \frac{\partial^4 v_x}{\partial x^4} = -m \frac{\partial^2 v_x}{\partial t^2} \Rightarrow c_B = \sqrt{\omega \sqrt{\frac{B'}{m}}} = \sqrt{1,8 c_L h f}$$

buiggolfsnelheid afhankelijk frequentie ! $\lambda_b = \frac{c_B}{f} = \sqrt{\frac{1,8 c_L h}{f}}$

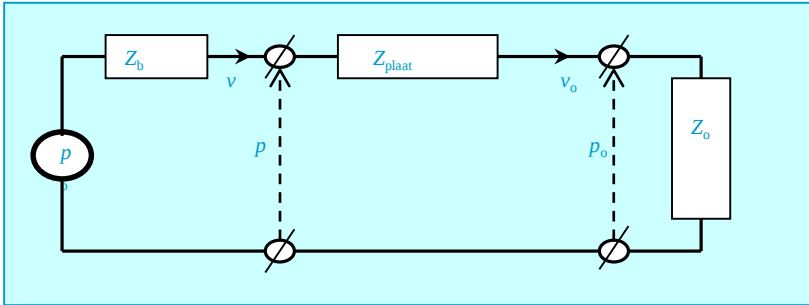
$\lambda_B = \lambda_{\text{lucht}} > c_B = c_0$ coïncidentie, samenvallen: f_c

afhankelijk invalshoek: laagste = grensfrequentie f_g

Vlakke golven door constructie = ELASTISCHE PLAAT



$$\lambda_b = \frac{c_B}{f} = \sqrt{\frac{1,8c_L h}{f}}$$



constructie met massa (m) en stijfheid (B)
uit buiggolfvergelijking volgt dan

$$Z_{plaat} = j\omega m \left[1 - \frac{\omega^2 B}{m} c_o^{-4} \sin^4 \varphi \right]$$

$$\tau_\varphi = \left| 1 + \frac{j\omega m \cos \varphi}{2\rho_o c_o} \left(1 - \frac{c_B^4}{c_o^4} \sin^4 \varphi \right) \right|^{-2}$$

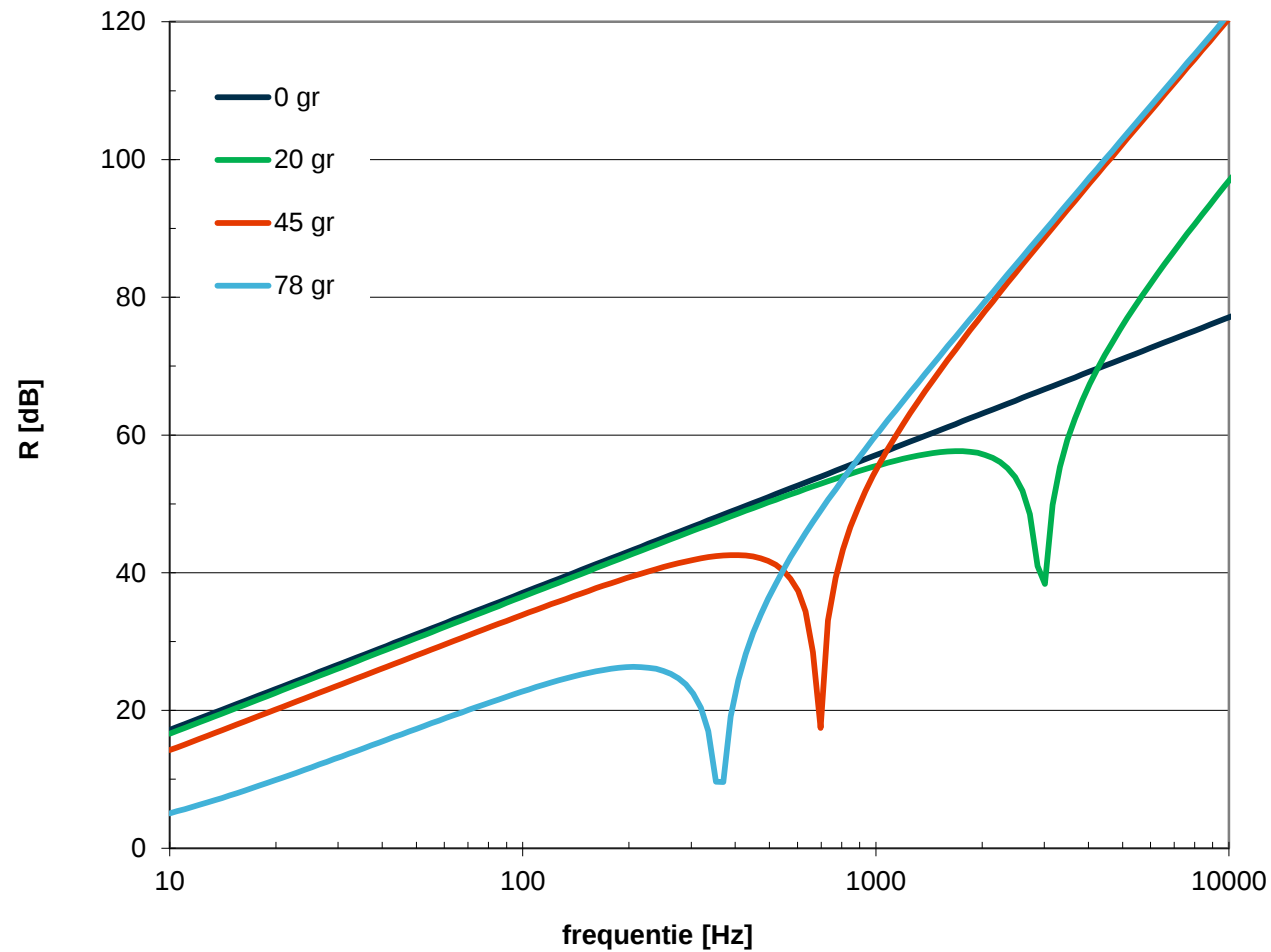
volledige geluidsoorgang als laatste term = 0

$$c_B = c_o / \sin \varphi \Rightarrow f_c = \frac{c_o^2}{1,8c_L h \sin \varphi}$$

coïncidentiefrequentie, laagste ($\varphi = 90^\circ$) is grensfrequentie

met een complexe buigstijfheid $B(1+j\eta)$ ook damping te verwerken

Vlakke golven door constructie = ELASTISCHE PLAAT



tot nu oneindig grote en dunne constructie beschouwd
eindige afmetingen heeft een aantal gevolgen:

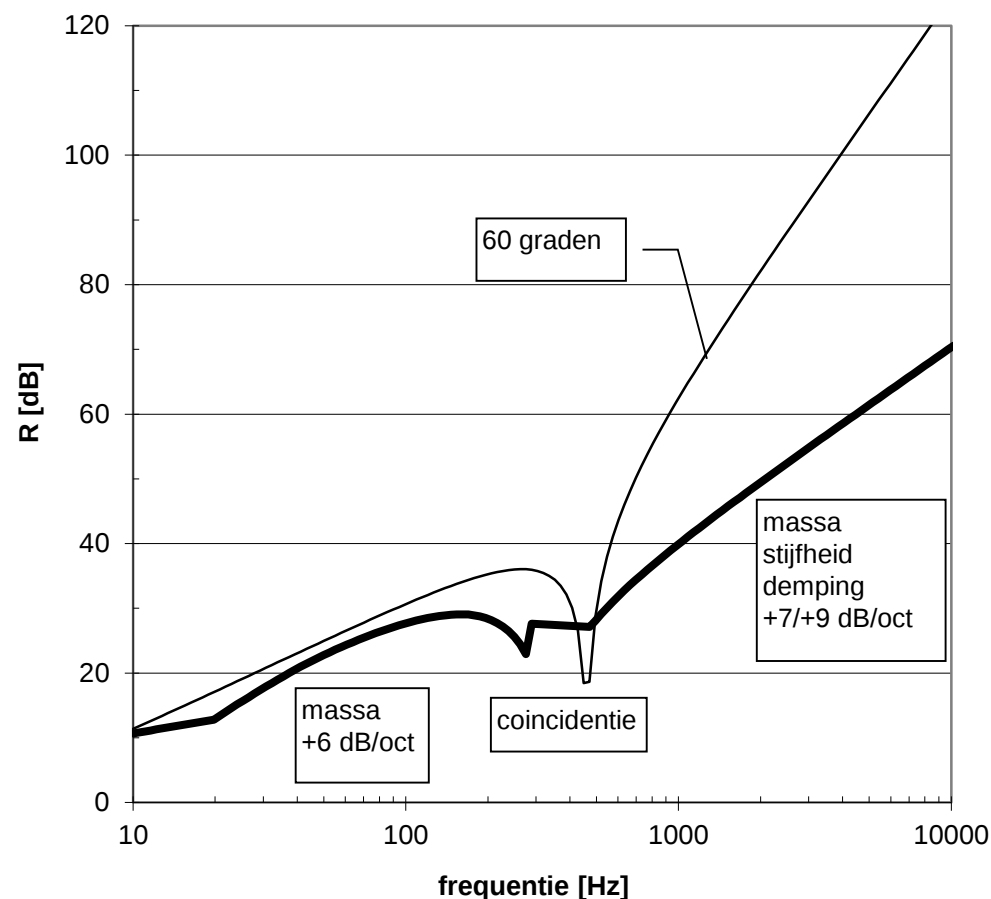
- plaatresonanties
 - > onder laagste eigenfrequentie geluidisolatie bepaald door stijfheid
- buiggolven reflecteren aan randen
 - > galmveld van vrije buiggolven
- demping niet alleen materiaaleigenschap
 - > bepaald door afmetingen en randen

bij dikkere constructies minder isolatie bij hogere frequenties

ook hiervoor bestaan beschrijvende theorieën,
vaak uitgaande van een diffuus invallend geluidveld

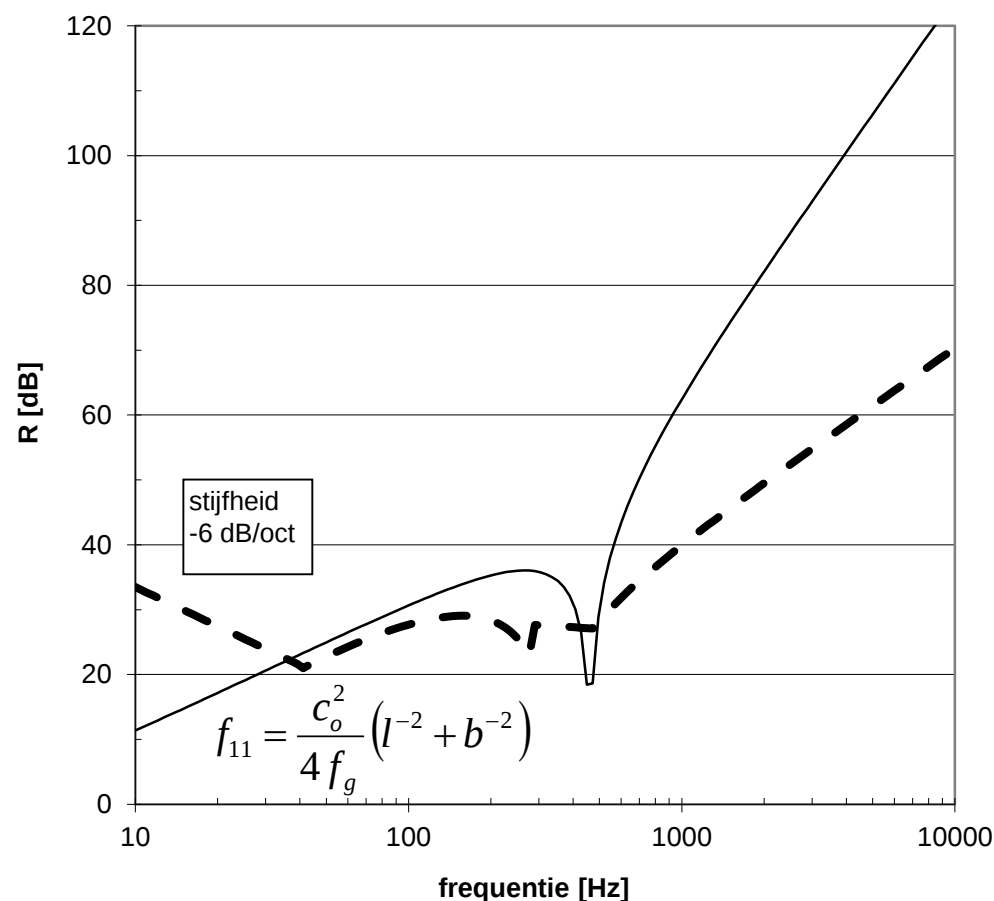
Samenvatting: globaal gedrag enkelvoudige constructie

vrij golven



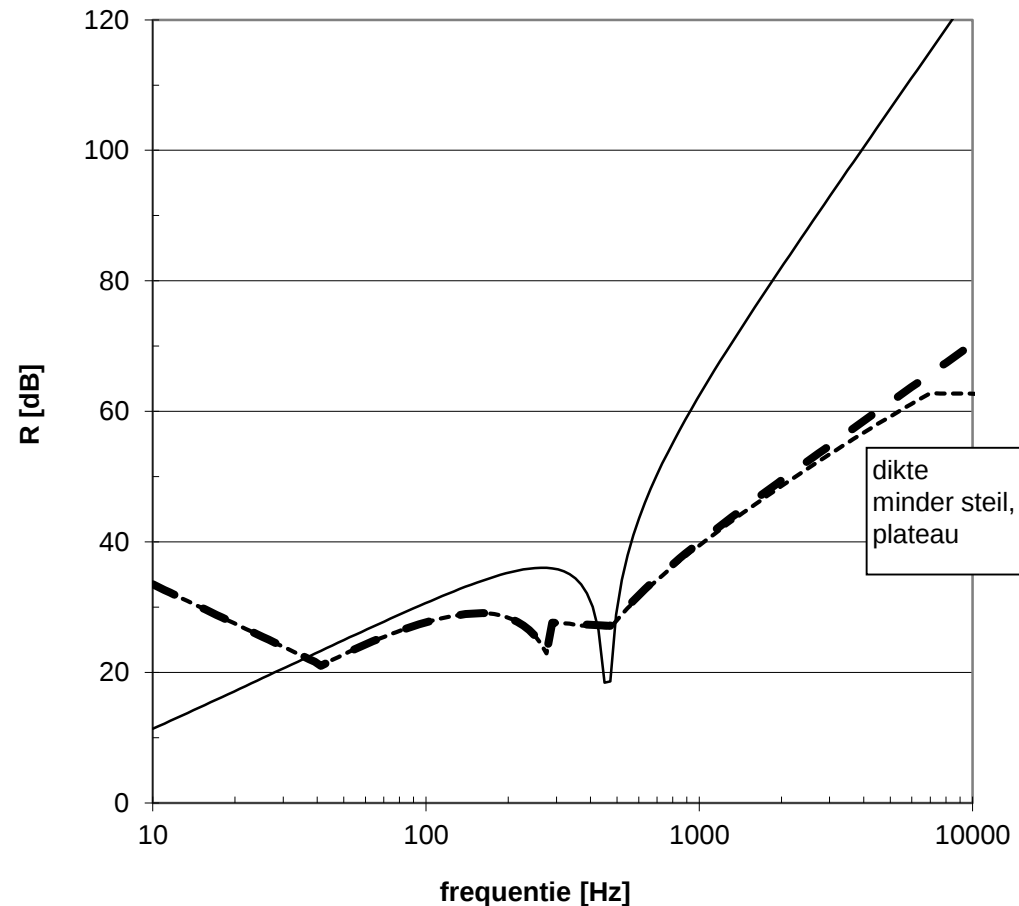
Samenvatting: globaal gedrag enkelvoudige constructie

plaatresonantie, stijfheid



Samenvatting: globaal gedrag enkelvoudige constructie

dikte effect



Voorbeeld uit bijlage van EN-ISO 12354:2017

$$R = -10 \lg \tau$$

$$\tau = \left(\frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi f_c \sigma^2}{2 f \eta_{\text{tot}}} \quad f > f_c$$

$$\tau = \left(\frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi \sigma^2}{2 \eta_{\text{tot}}} \quad f \approx f_c$$

$$\tau = \left(\frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \left(2\sigma_f \left[\frac{1-f^2}{f_c^2} \right]^{-2} + 2 \frac{\pi f_c}{4f} \frac{\sigma^2}{\eta_{\text{tot}}} \right) \quad f < f_c$$

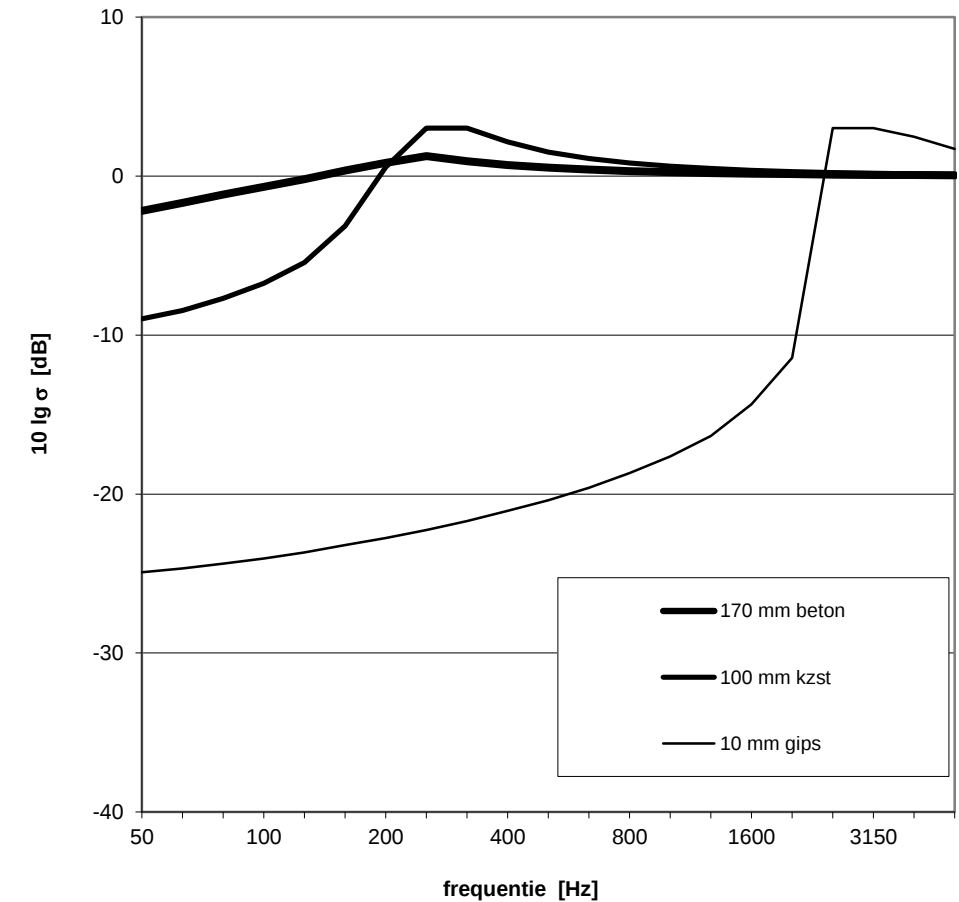
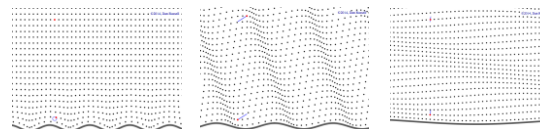
Cremer, 1942
Josse & Lamure, 1964
Davy, 2009

niet alleen toepasbaar voor homogene constructies,
maar ook voor gelaagde of verstijfde constructies
als m , f_c , η en σ bepaald kunnen worden

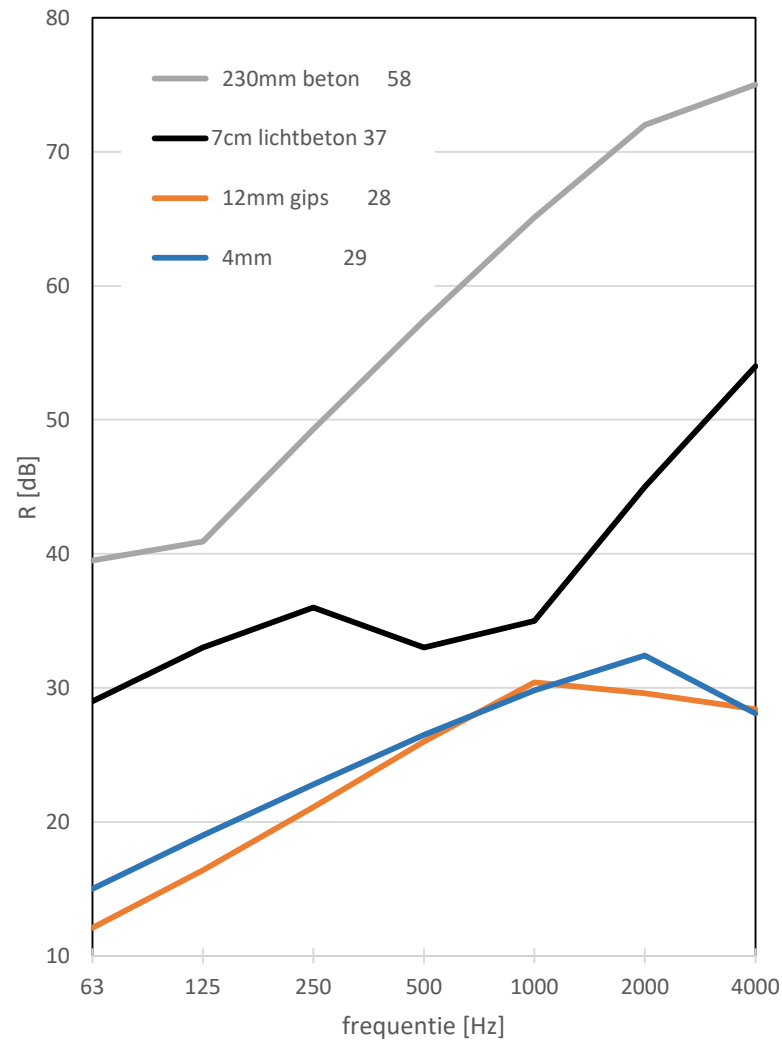
afstraalfactor vrije buiggolven:
afhankelijk afmeting, materiaal en dikte

$$\begin{aligned} f > f_g: & \quad \sigma \approx 1 \\ f \approx f_g: & \quad \sigma \approx 2 \\ f < f_g: & \quad \sigma \ll 1 \end{aligned}$$

Animatie Dan Russel, Penn State Uni



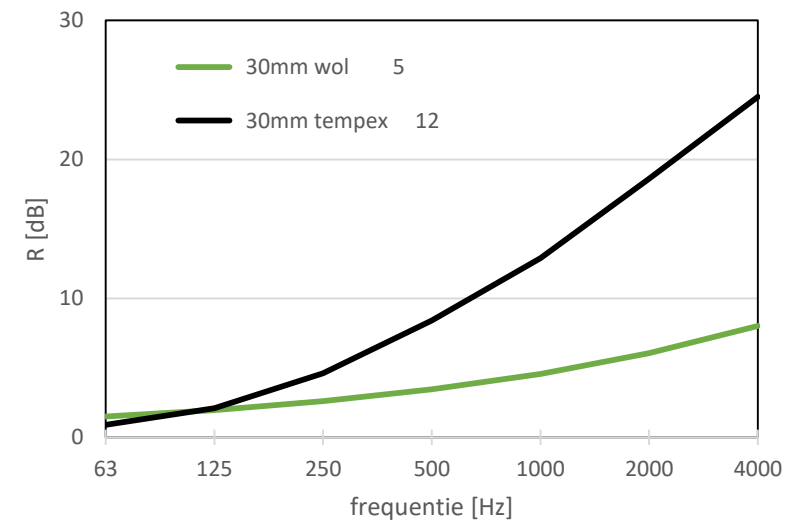
Vlakke golven door constructie = ELASTISCHE PLAAT



enkele voorbeelden met BASlab

te horen bij kubus woning

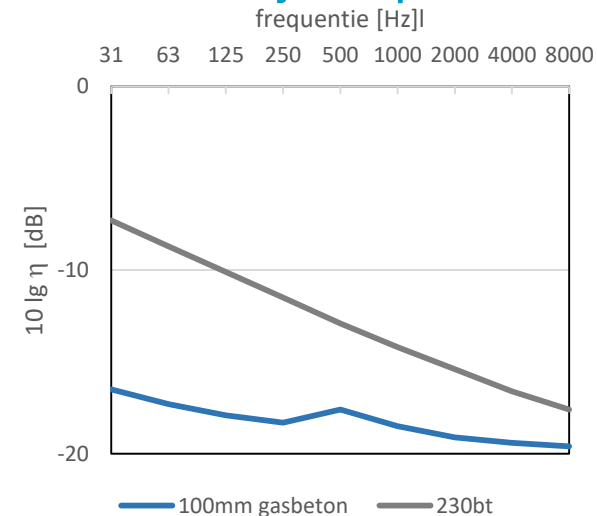
ook voor heel licht materiaal (tempex) en poreus materiaal (steenwol)



- belangrijk aspect is damping
randverliezen overheersen, dus afmetingen en randcondities zijn bepalend,
niet materiaaldamping

$$\eta_{tot} = \eta_{int} + \frac{2\rho_o c_o \sigma}{\omega m} + \frac{c_o}{\pi^2 S \sqrt{f_c f}} \sum l_i \alpha_i \quad T_s = \frac{2,2}{f \eta}$$

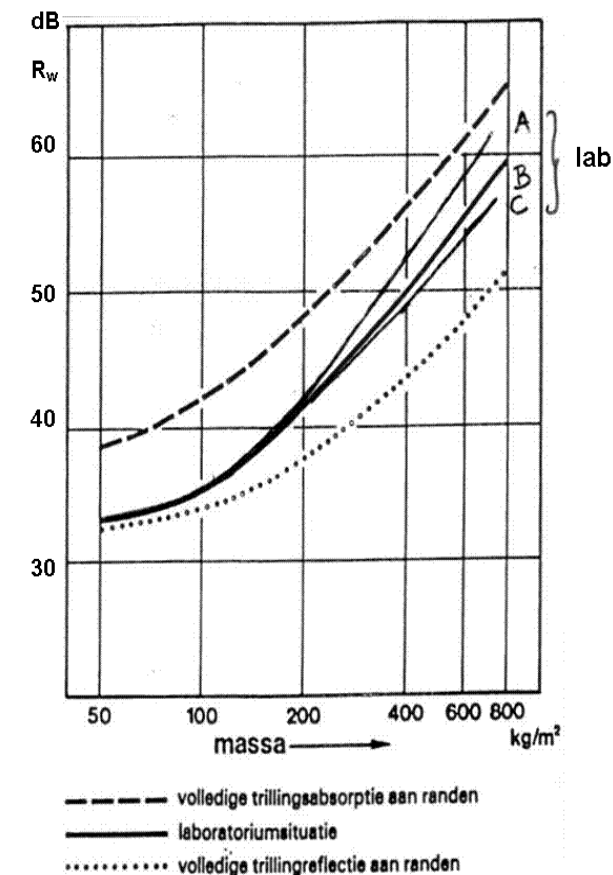
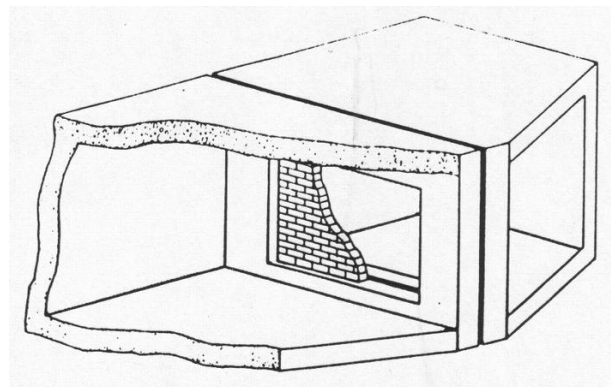
- consequentie:
 - verschillen lab – praktijk
 - praktijk – praktijk
 - lab - lab



- belangrijk aspect is damping
randverliezen overheersen, dus afmetingen en randcondities zijn bepalend,
niet materiaaldamping

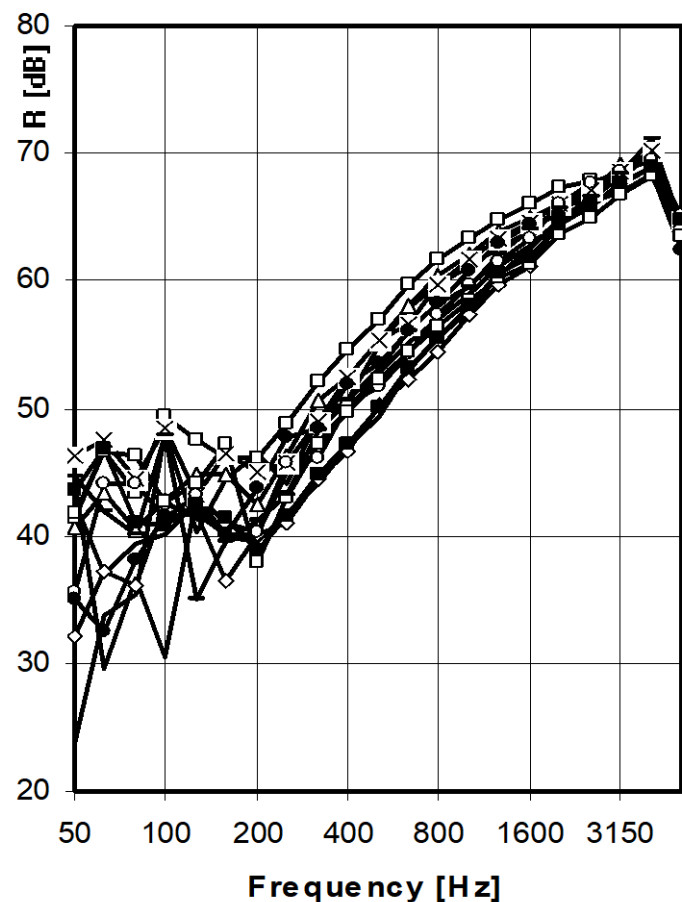
$$\eta_{tot} = \eta_{int} + \frac{2\rho_o c_o \sigma}{\omega m} + \frac{c_o}{\pi^2 S \sqrt{f_c f}} \sum l_i \alpha_i \quad T_s = \frac{2,2}{f \eta}$$

- consequentie:
 - verschillen lab – praktijk
 - praktijk – praktijk
 - lab - lab

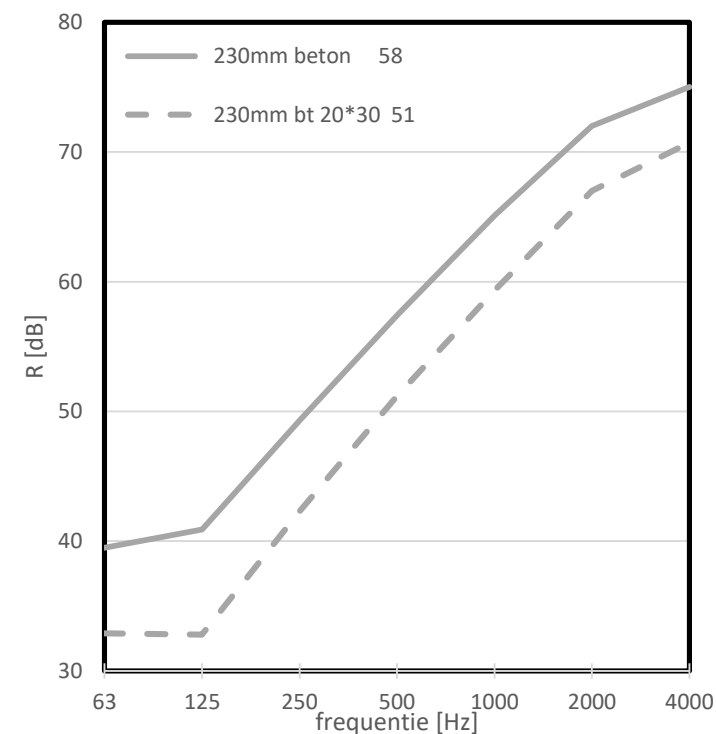


Vlakke golven door constructie = ELASTISCHE PLAAT

Round Robin Duitse laboratoria
kalkzandsteenwand 440 kg/m²

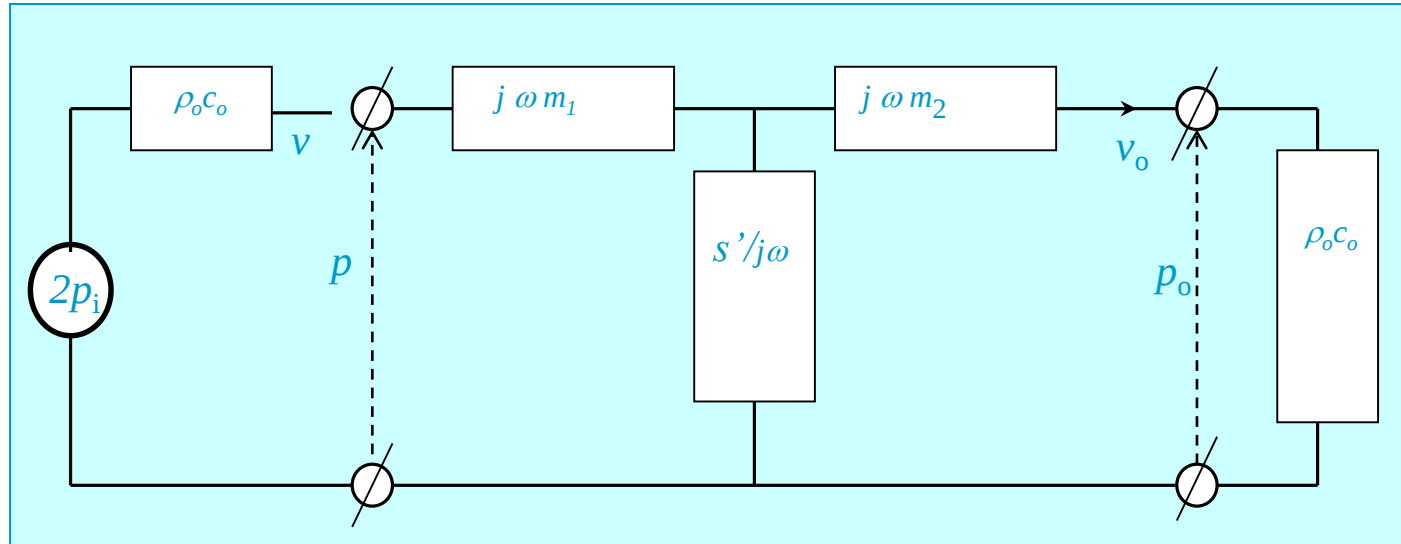


Invloed afmetingen
zelfde randen 3x4 en 20x30 m²



Vlakke golven door constructie = SPOUWWAND

Spouwwand: massa – spouw – massa



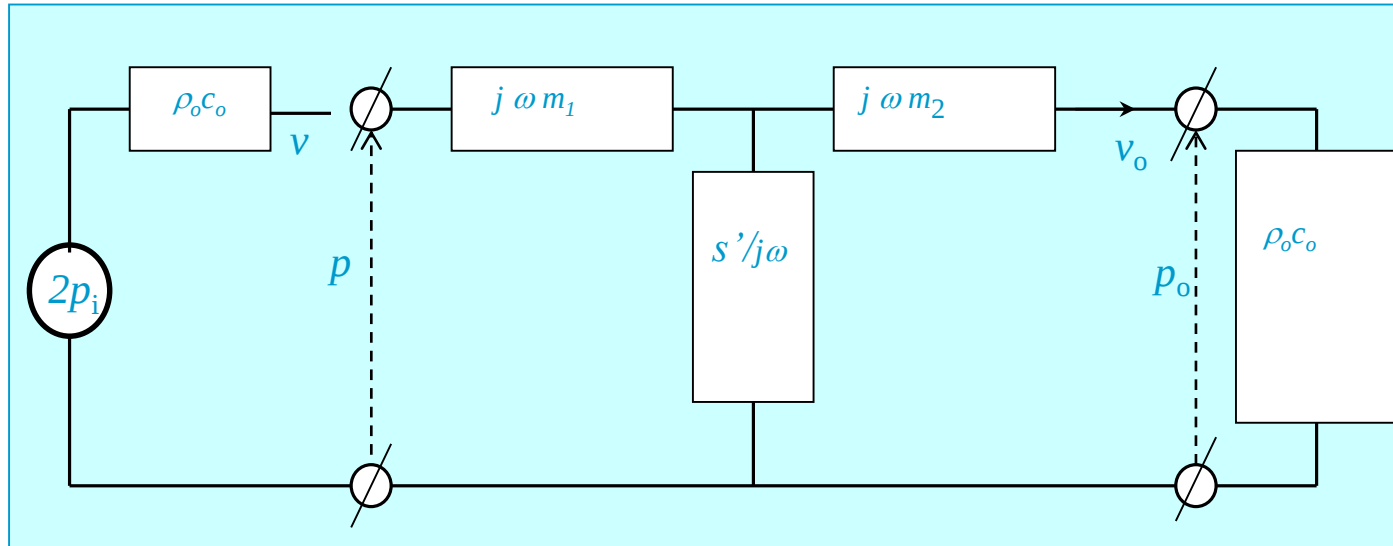
spouw als veer:
wet van Hooke

$$Z_{\text{veer}} = \frac{E}{j\omega h} = \frac{s'}{j\omega}$$

$$\tau_o = \left[1 + \frac{\omega^4}{4s'^2} (m_1 - m_2)^2 + \left(\frac{\omega(m_1 + m_2)s' - \omega\rho_o^2 c_o^2 - \omega^3 m_1 m_2}{2\rho_o c_o s'} \right)^2 \right]^{-1}$$

$$\approx \left[1 + \left(\frac{(m_1 + m_2)s' - \omega^2 m_1 m_2}{2\rho_o c_o s' / \omega} \right)^2 \right]^{-1} \Rightarrow \omega_o$$

Vlakke golven door constructie = SPOUWWAND



$$\omega_o^2 = \frac{s'(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}$$

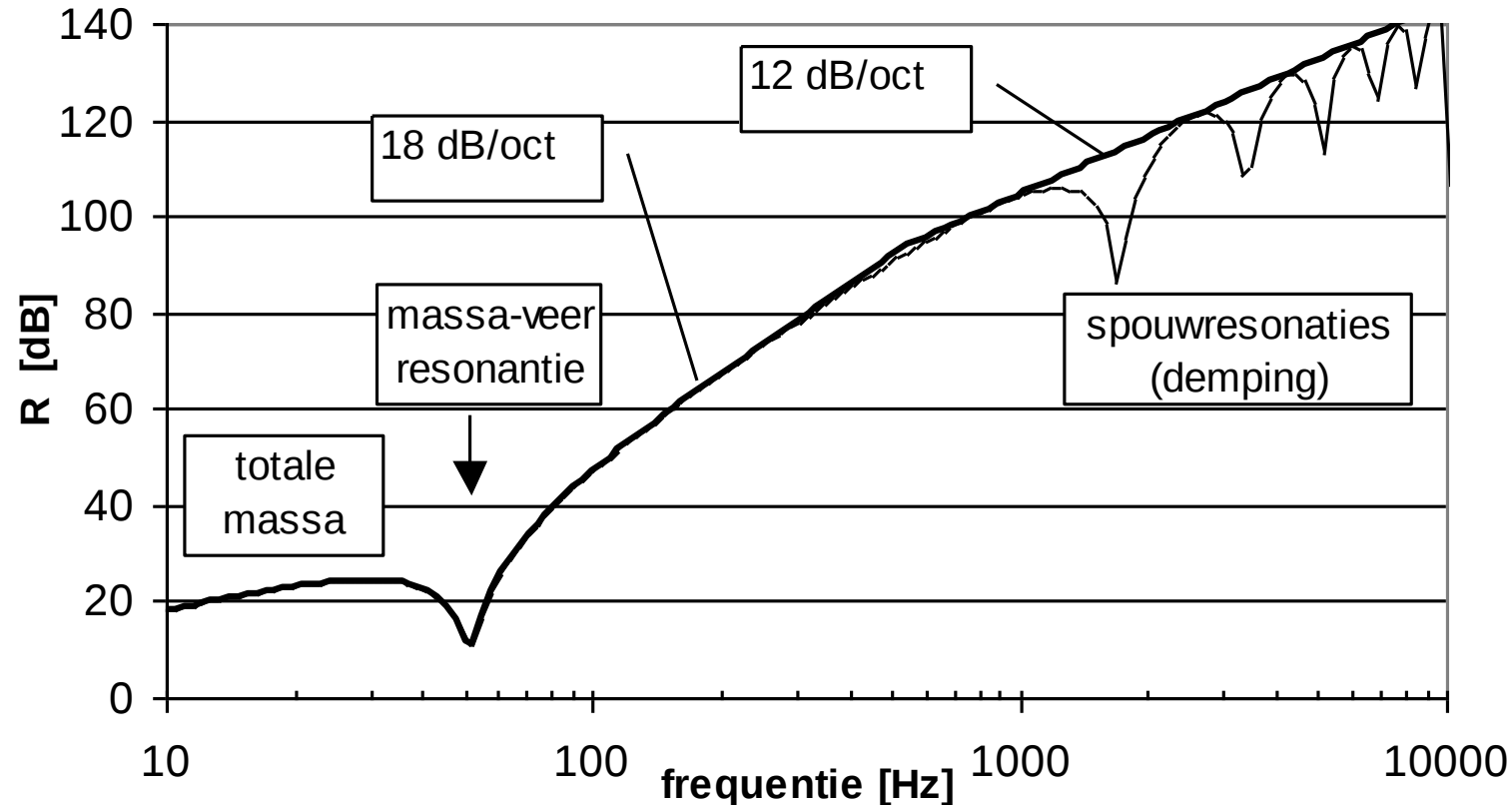
$$\tau_{\omega < \omega_o} \approx \left(\frac{2\rho_o c_o}{\omega(m_1 + m_2)} \right)^2$$

$$\tau_{\omega > \omega_o} \approx \left(\frac{2\rho_o c_o}{\omega \sqrt{m_1 m_2}} \right)^4 \left(\frac{s'}{2\rho_o c_o \omega} \right)^2 = \tau_1 \tau_2 \left(\frac{s'}{2\rho_o c_o \omega} \right)^2$$

Spouw
smal: veer
breed: laag
kamer: diffuus
A/S

Vlakke golven door constructie = SPOUWWAND

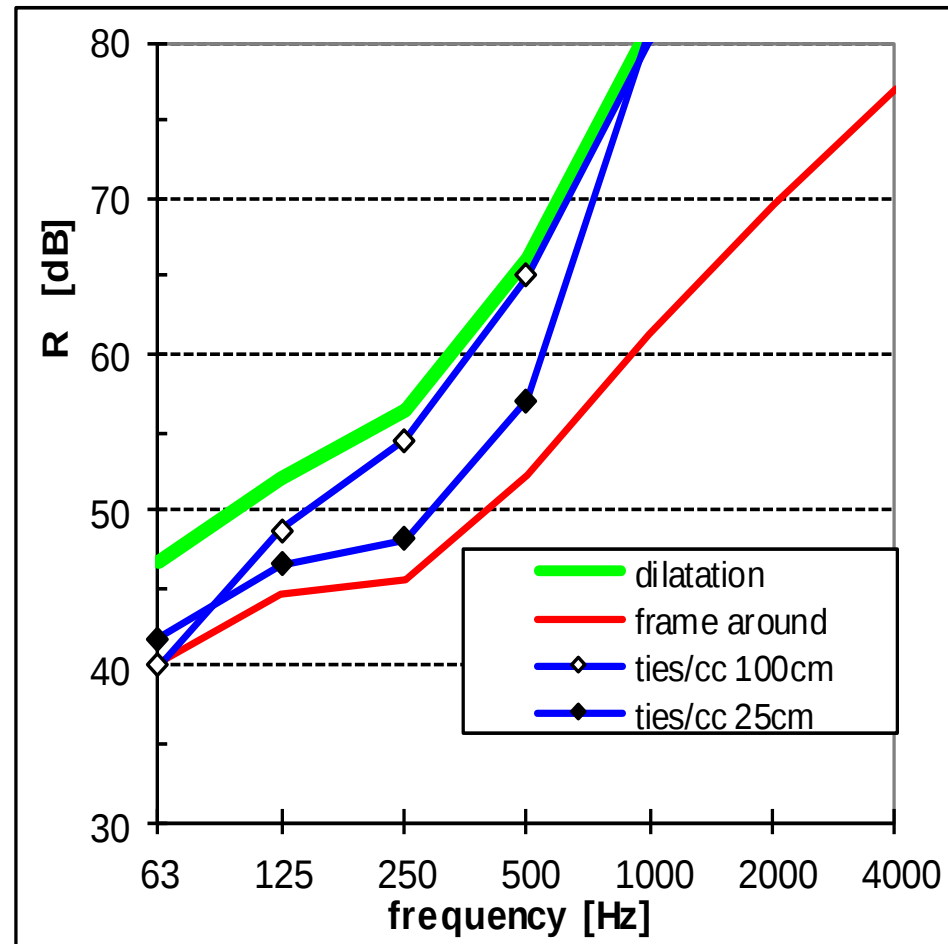
Globaal gedrag spouwconstructie



Spouwvulling, koppelingen, stijlen, randen

Vlakke golven door constructie = SPOUWWAND

Voorbeeld geluidisolatie spouwconstructies 100-50-100 (BASlab)



Geluidisolatie samengesteld vlak

$$R_{vlak} = -10 \lg \frac{W_{af,1} + W_{af,2} + \dots W_{af,n}}{W_{in,S}} = -10 \lg \sum \frac{S_j}{S} 10^{-R_j/10}$$

alternatieve schrijfwijze via deelisolatie

$$R_{deel,j} = R_j + 10 \lg \frac{S}{S_j} \quad R_{vlak} = -10 \lg \sum 10^{-R_{deel,j}/10}$$

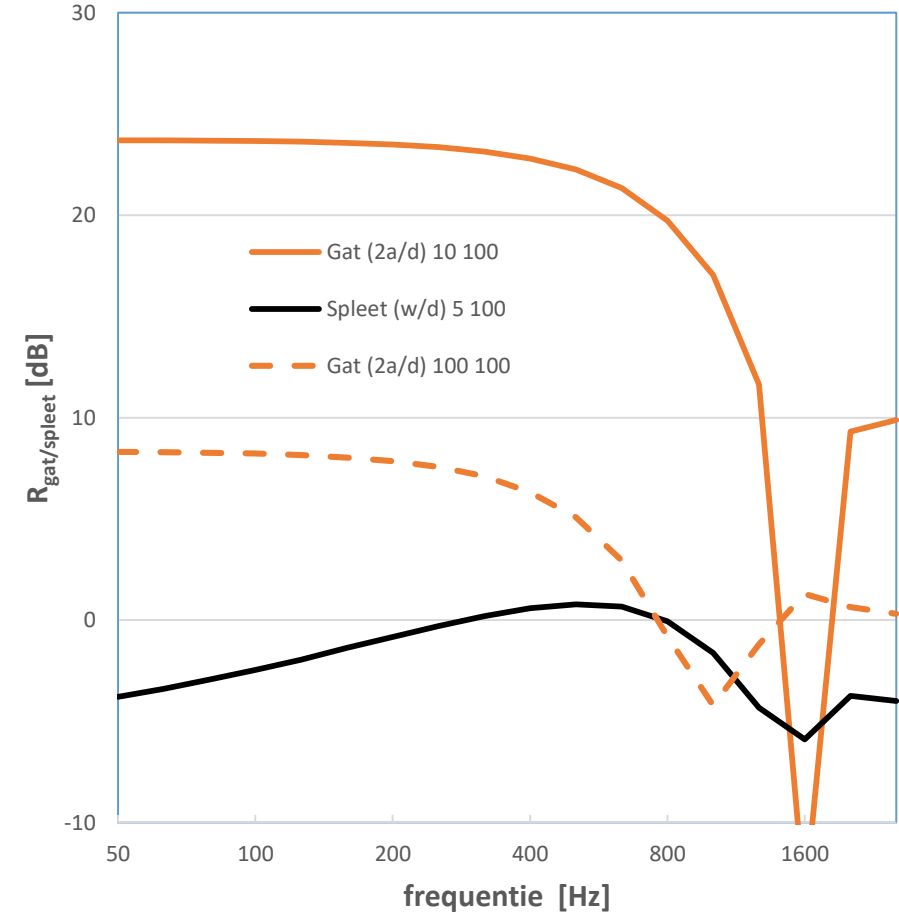
laagste deelisolatie bepalend:

groot deel met grote R of klein deel met kleine R > sleutelgat-effect

gat met $R=0$ dB in 10 m^2 wand

- 5 mm spleet $> R_{\text{max}} = 30 \text{ dB}$
- 10 cm gat $> R_{\text{max}} = 30 \text{ dB}$
- 1 cm gat $> R_{\text{max}} = 50 \text{ dB}$

invloed hoekpositie, spleetvorm,
vulling etc.

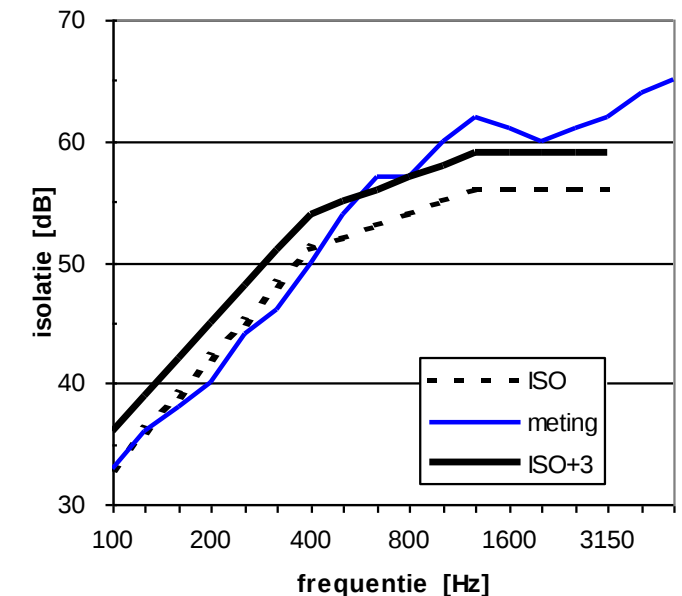


Gomperts& Kihlmann, 1964
Wilson&Sodoka, 1965

ISO 717:1968 tot nu:

vergelijk meetcurve met curve voor typische Duitse woning,
tel alleen negatieve afwijkingen $R > R_w$

TNO onderzoek (My neighbours radio, van den Eijk) naar relevantie
via kenmerkende geluidpieken in radioniveau en
acceptabel ontvangniveau (NR-curve) wel OK



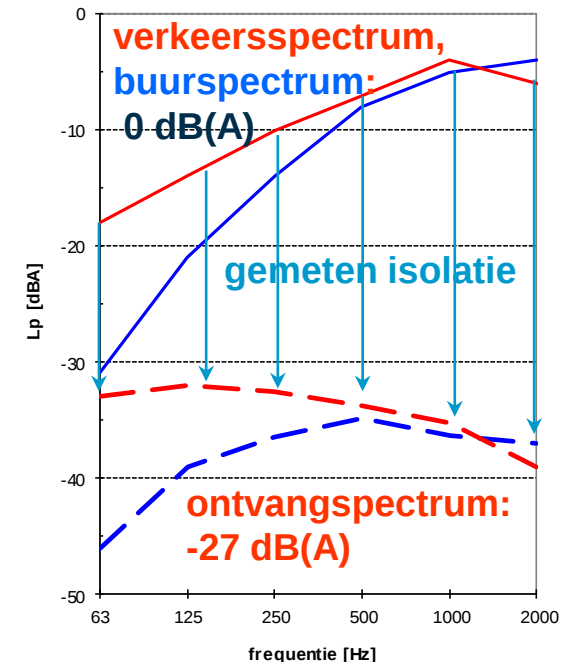
Geluidisolatie uitdrukken in één getal

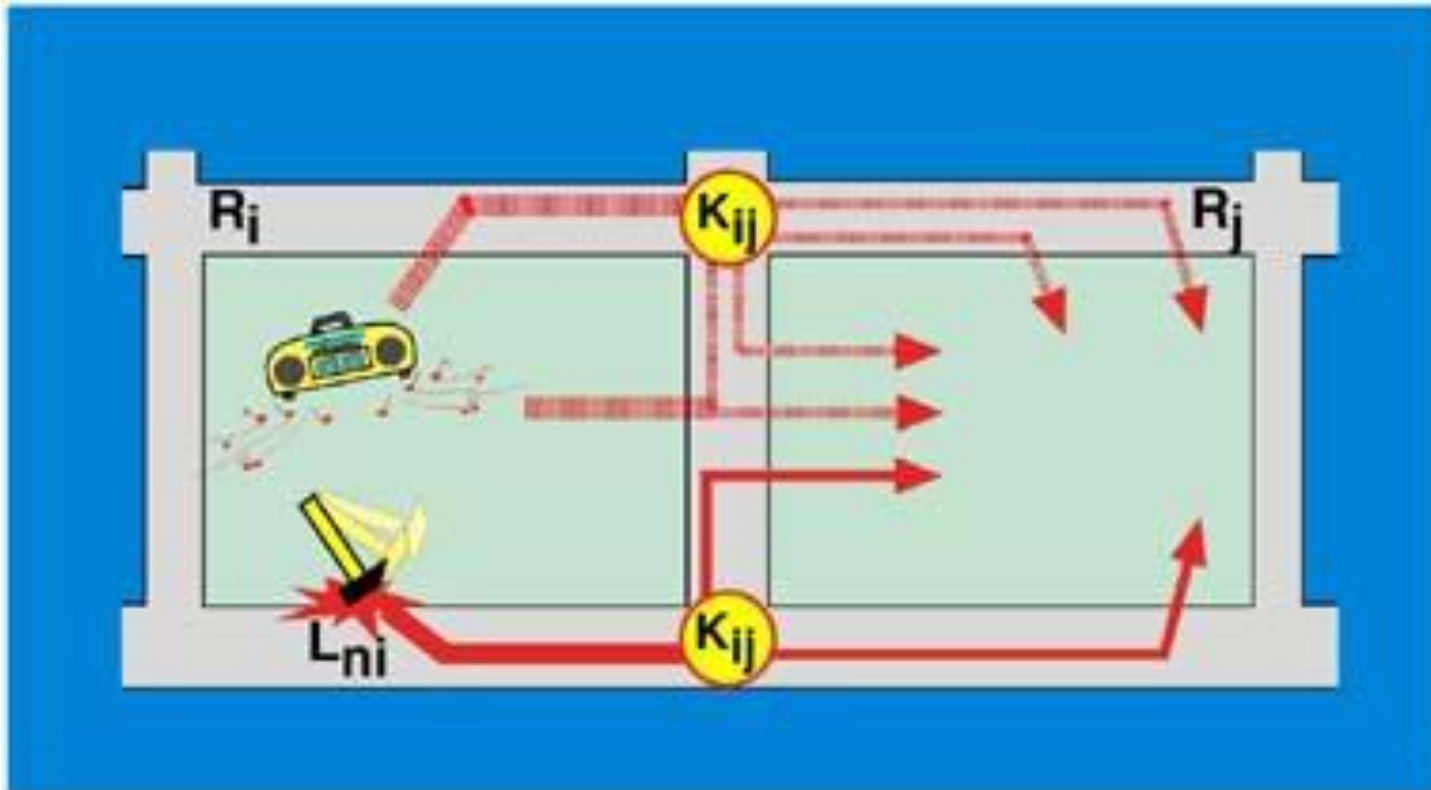
ISO 717:1968 tot nu:

vergelijk meetcurve met curve voor typische Duitse woning,
tel alleen negatieve afwijkingen $R > R_w$

TNO onderzoek (My neighbours radio, van den Eijk) naar relevantie
via kenmerkende geluidpieken in radioniveau en
acceptabel ontvangniveau (NR-curve) wel OK

dat basis voor huidig alternatief in ISO 717:2013
kenmerkend bronspectrum (buren of wegverkeer) en
resultierend ontvangniveau in dB(A) $R > R_A$ en R_{Atr}





niet alleen directe overdracht, maar ook via flankerende paden
per pad: aanstoting, knooppuntoverdracht, afstraling
aanstoting volgt uit geluidisolatie

flankerende overdracht:

$$R_{ij} = R_i + D_{v,ij} + 10 \lg \frac{S_s}{S_j} + 10 \lg \frac{\sigma_i}{\sigma_j}$$

Gösele, 1968

nadelen:

- afstraalfactoren minder gekend
- schijnbaar niet reciprook

$$R_{ij} = R_{ji}$$

oplossing: reciprociteit opleggen

$$R_{ij} = \frac{R_i}{2} + \frac{R_j}{2} + \overline{D}_{ij} + 10 \lg \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \quad \text{met} \quad \overline{D}_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2}$$

Gerretsen, 1979

R afhankelijk van demping, dus:

$$R_{situ} = R_{lab} + 10 \lg \frac{T_{s,lab}}{T_{s,situ}}$$

$$R_{ij} = \frac{R_i}{2} + \frac{R_j}{2} + \overline{D}_{ij} + 10 \lg \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}}$$

D_{ij} afhankelijk van situatie,
dus knooppunt onafhankelijk karakteriseren:
trillingoverdrachtsverzwakking K_{ij}

$$K_{ij} = \overline{D}_{ij} + 10 \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \quad \text{met } a = \frac{2,2\pi^2 S}{c_o T_s} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} ; f_{ref} = 1000 \text{ Hz}$$

vergelijkbaar met R voor element: $R = D_p + 10 \lg \frac{S}{A}$

Voorbeelden van meetresultaten bij knooppunten (1975)

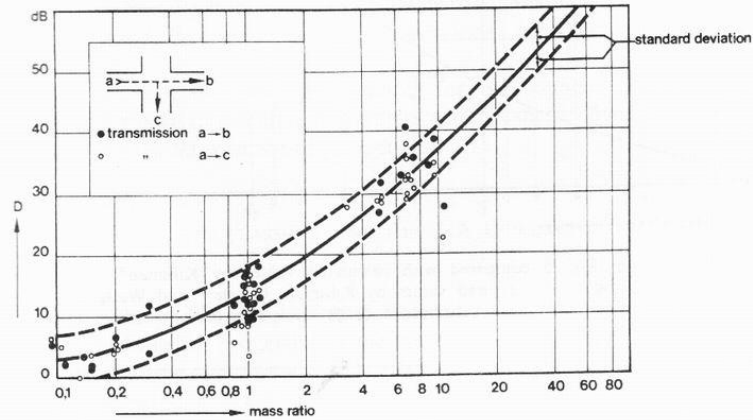


Fig. 5. Measured vibration level differences for rigid cross-junctions; best-fit-least-square curve and

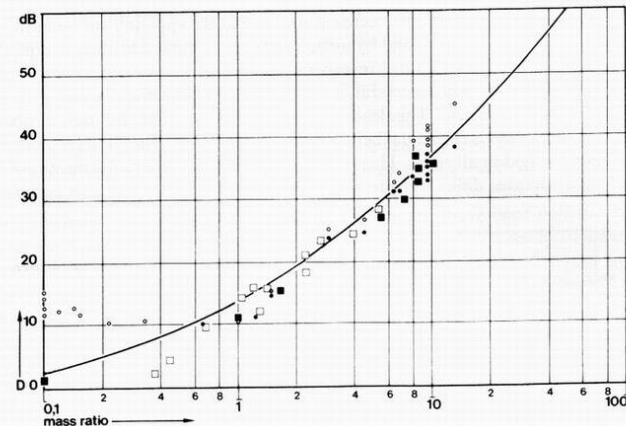
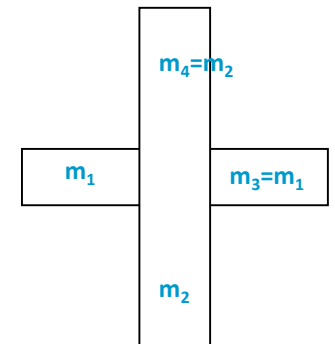
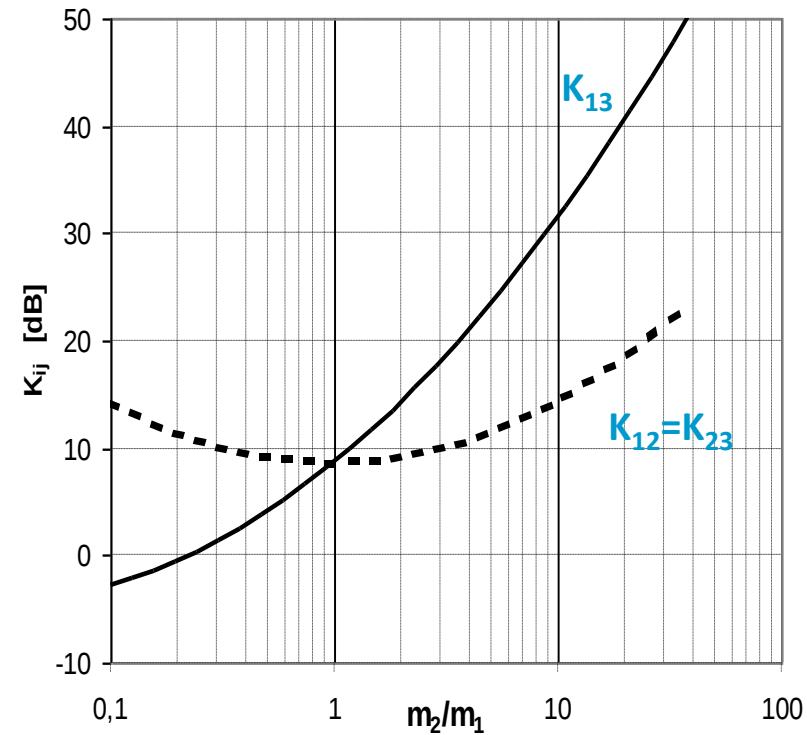
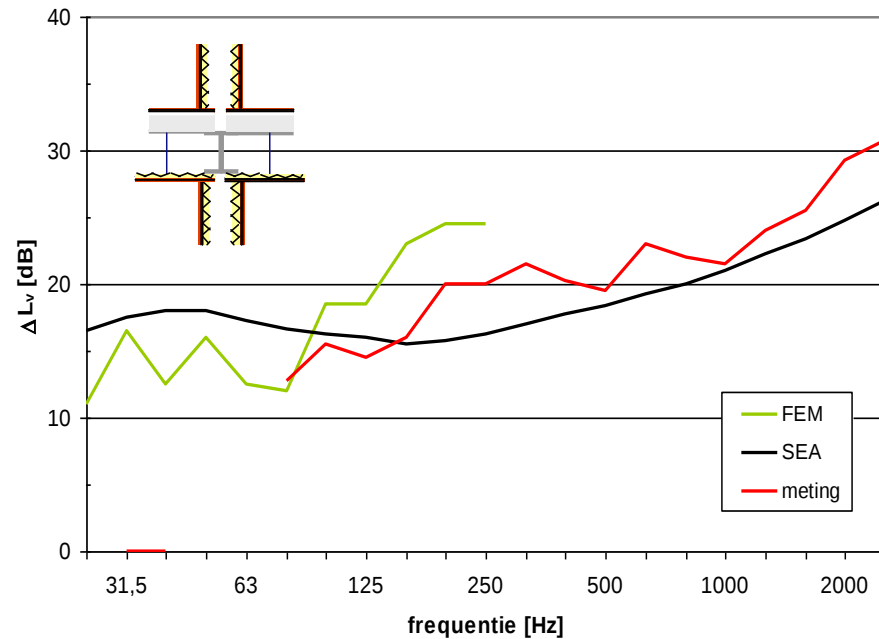


Fig. 6. Curve from Fig. 5 compared with calculated values by Kihlman²⁰ (neglecting the $10 \log l/a$ - term) (○, ●) and measured values by Kihlman, Gösele²² and Westphal.²³ (□, ■).
○, □: transmission around the corner; ●, ■: straight-through transmission.

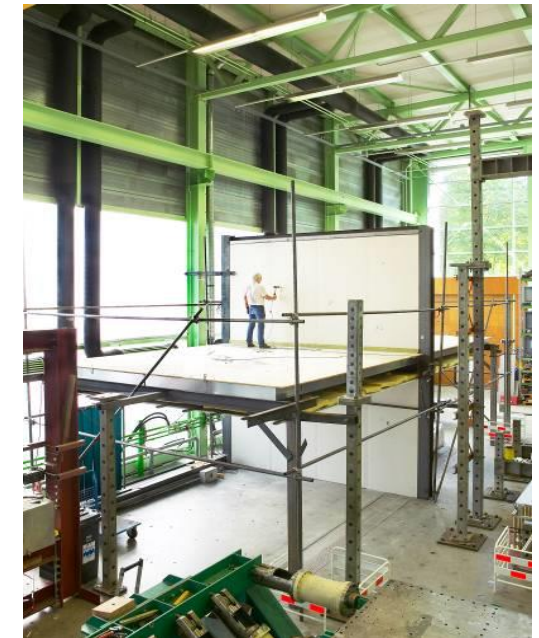
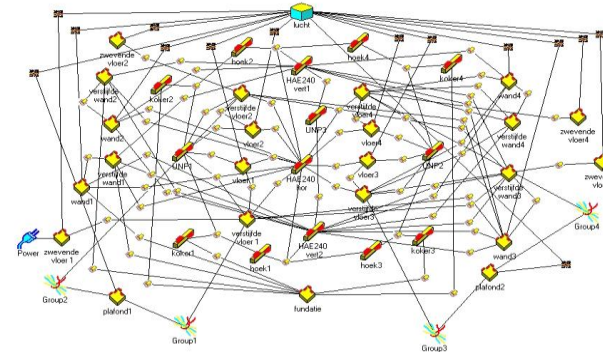
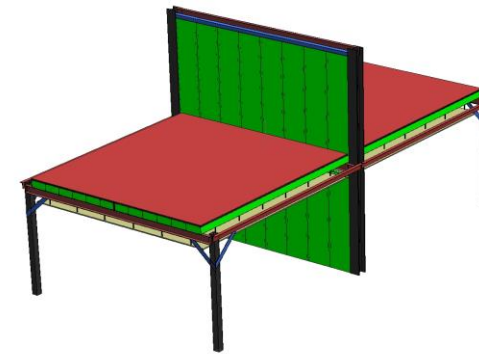
>



onderzoek aan knooppunten bij lichte bouwsystemen (2015)

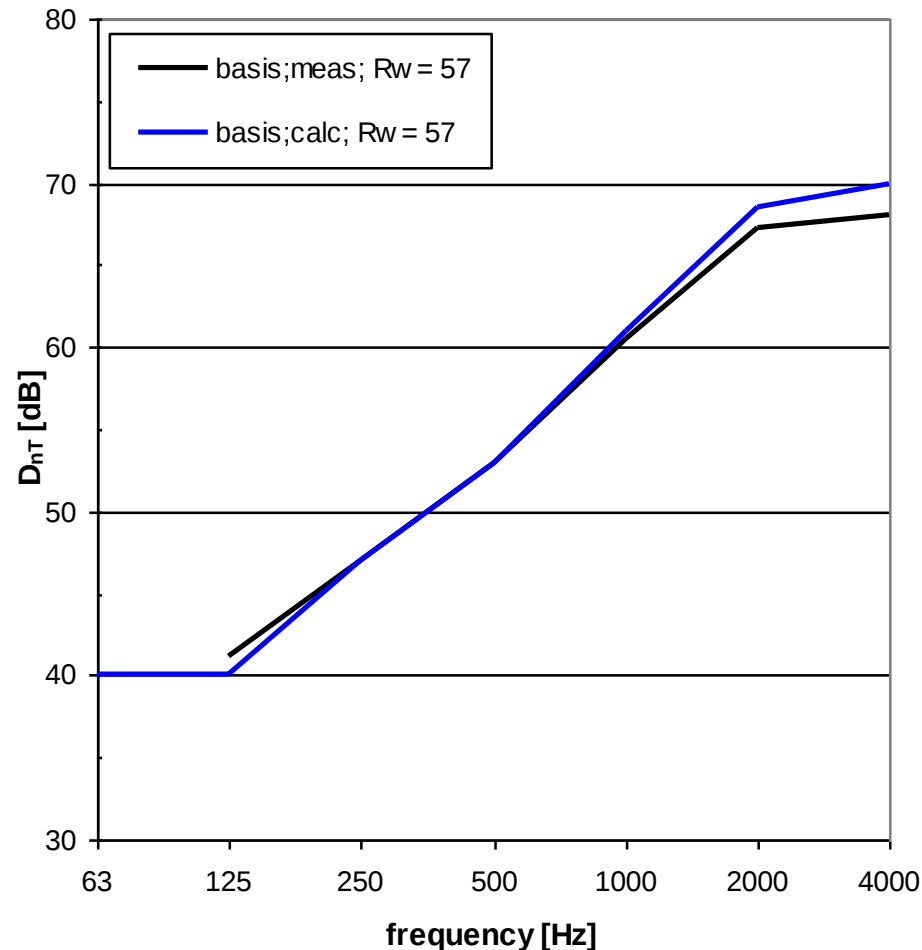


$$K_{ij} = \overline{D_{ij}} + 10 \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{S_i S_j}}$$

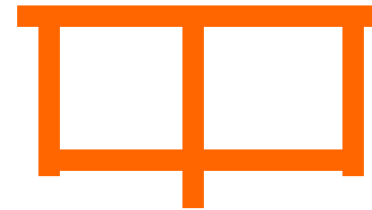


meten en modelleren (FEM, SEA)

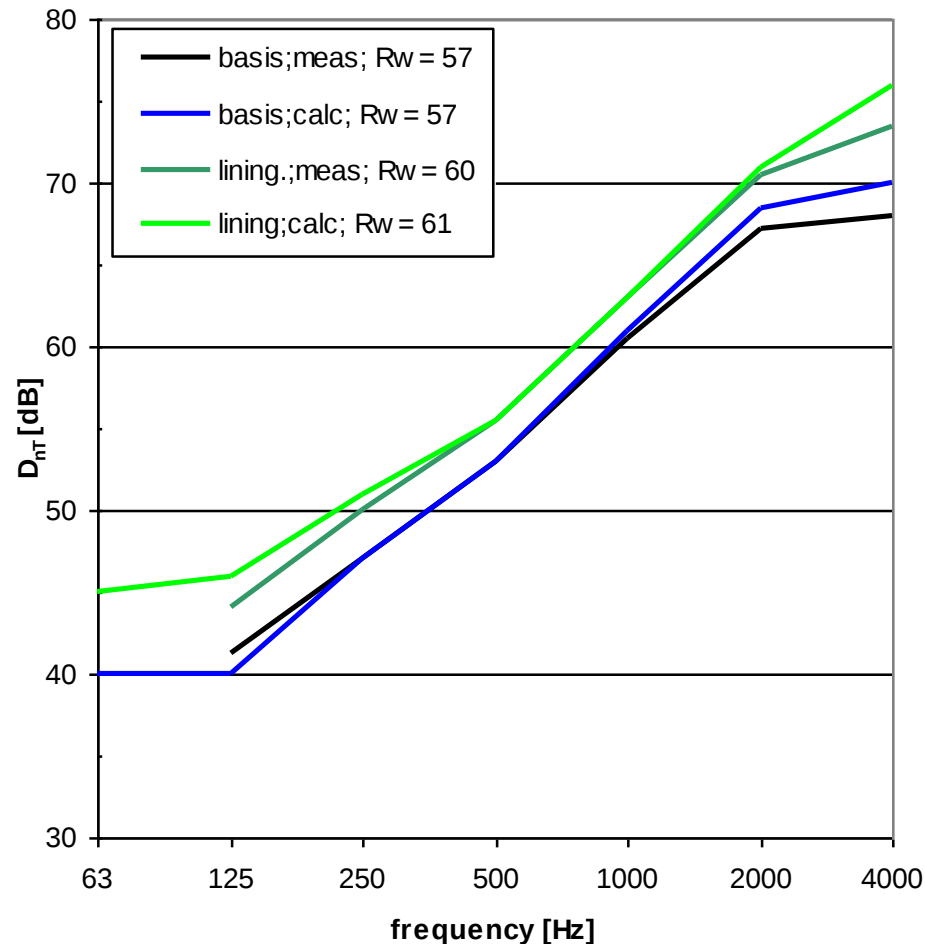
Berekening volgens EN 12354:2000 cq EN-ISO 12354:2017 (BASlucO)



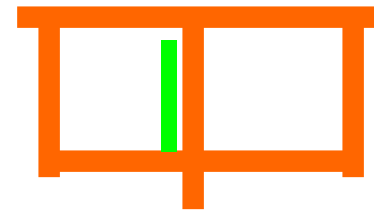
woonkamers;
wand 465 kg/m²



Berekening volgens EN 12354:2000 cq EN-ISO 12354:2017 (BASlucO)



woonkamers;
wand 465 kg/m²



voorzetwand,
 $\Delta R_w = 16$ dB