

Luchtgeluidisolatie van spouwconstructies

Kennisbank Bouwfysica

Auteur: ir. L. Nederlof, prof.ir. J.J.M. Cauberg

Figuur 1 toont schematisch het akoestisch model voor geluidtransmissie bij een spouwconstructie, bij loodrecht invallend geluid, zodat coïncidentie hier genegeerd kan worden. Het model is sterk vereenvoudigd door aan te nemen dat in de (lucht-)spouw geen drukgradiënt optreedt. Impliciet veronderstellen we daarmee, dat de breedte van de spouw veel kleiner zal zijn dan de golflengte van het beschouwde geluid !!

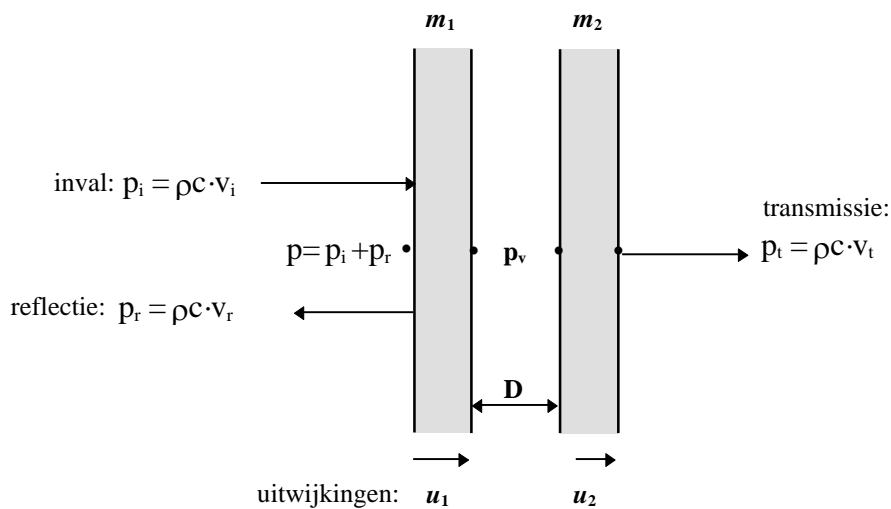
Echter, de druk in de spouw kan wel variëren: de spouwlucht fungeert als een veer, die met de uitwijking van de spouwbladen wordt samengedrukt, dan wel ontspannen.

Volgens de “wet van Hooke” vinden we voor deze drukverandering:

$$p_v = -K \frac{\Delta D}{D} = \frac{K}{D} (u_1 - u_2) \quad (1a)$$

Waarin:

- D veerlengte \equiv spouwbreedte [m]
- K elasticiteitsmodulus [N/m^2]; voor lucht $1,4 \cdot 10^5$
- $u_{1,2}$ uitwijking van de spouwbladen



figuur 1. spouwmodel bij loodrecht invallend geluid

De bewegingsvergelijkingen voor de spouwbladen zijn:

Linker spouwblad:

$$p - p_v = m_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (1b)$$

Rechter spouwblad:

$$p_v - p_t = m_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} \quad (1c)$$

De spouwbladen worden volledig star verondersteld, zodat:

linker spouwblad:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = v_i - v_r = \frac{1}{\rho c} (p_i - p_r) = \frac{1}{\rho c} (2p_i - p) \quad (1d)$$

rechter spouwblad:

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = v_t = \frac{p_t}{\rho c} \quad (1e)$$

Uit voorgaande vergelijkingen kunnen $u_{1,2}$, p en p_v geëlimineerd worden, waardoor de volgende differentiaalvergelijking ontstaat:

$$p_i = p_t + \left(\frac{m_1 + m_2 + (\rho c)^2 \frac{D}{K}}{2\rho c} \right) \frac{\partial p_t}{\partial t} + \frac{(m_1 + m_2)D}{2K} \cdot \frac{\partial^2 p_t}{\partial t^2} + \frac{m_1 m_2 D}{2\rho c K} \cdot \frac{\partial^3 p_t}{\partial t^3} \quad (2)$$

waarbij de term $(\rho c)^2 \frac{D}{K}$ ($=\rho D$ bij lucht!) verwaarloosbaar is ten opzichte van $m_1 + m_2$.

Op dezelfde wijze als voor enkelvoudige constructies kan nu de amplitudeverhouding tussen p_i en p_t berekend worden bij een bepaalde frequentie:

$$\frac{1}{t} = \frac{\hat{p}_i^2}{\hat{p}_t^2} = \left(1 - (2\pi f)^2 \cdot (m_1 + m_2) \frac{D}{2K} \right)^2 + \left(\frac{\pi f}{\rho c} \right)^2 \left(m_1 + m_2 - (2\pi f)^2 m_1 m_2 \frac{D}{K} \right)^2 \quad (3)$$

Hieruit blijkt, dat de transmissiecoëfficiënt een maximum vertoont en wel bij die frequentie, waarbij de laatste term in het rechterlid van (3) gelijk aan nul wordt.

Dit is de zogenaamde resonantie-frequentie bij loodrechte inval:

$$f_{R\perp} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(m_1 + m_2) \cdot K}{m_1 m_2 \cdot D}} \stackrel{\text{bij luchtsponw}}{\cong} 60 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2 \cdot D}} \text{ [Hz]} \quad (4)$$

Waarin:

$m_{1,2}$	massa van de spouwbladen [kg/m ²]
D	spouwbreedte [m]
K	elasticiteitsmodulus [N/m ²] = 1,4 · 10 ⁵ voor lucht

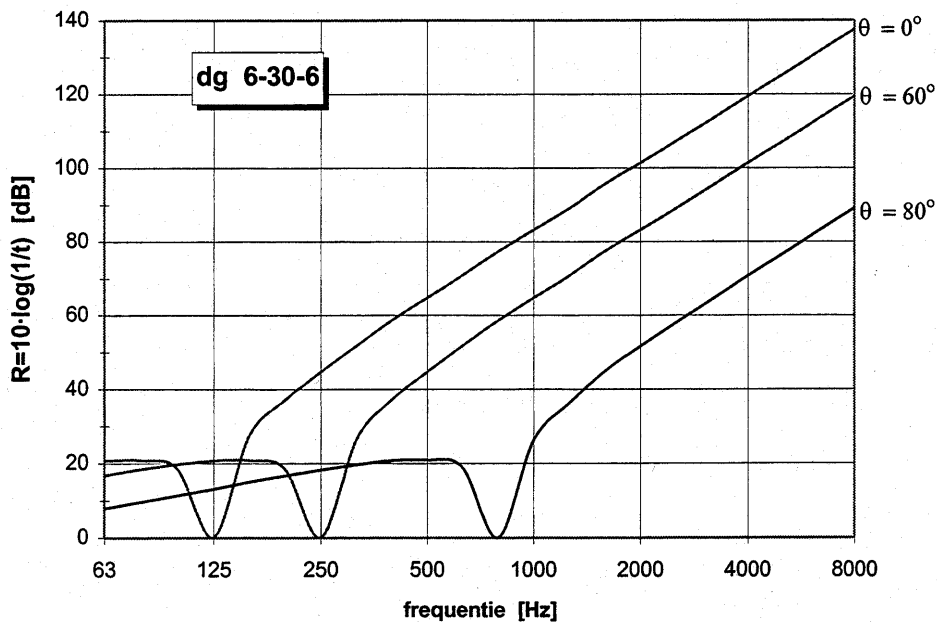
Voor geluid dat invalt onder een hoek θ met de normaal, wordt in formule (1d+e) de component van v_i , v_r en v_t langs de normaal genomen. Formule (3) wijzigt zich dan zodanig, dat daarin voor de frequentie $f \cdot \cos(\theta)$ komt te staan.

Dit algemene geval kan elegant geschreven worden als:

$$\frac{1}{t} = \left(1 - \frac{(m_1 + m_2)^2 f^2 \cdot \cos^2 \theta}{2m_1 m_2 f_{R\perp}^2} \right)^2 + \left(\frac{\pi(m_1 + m_2) f \cdot \cos \theta}{\rho c} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{f^2 \cdot \cos^2 \theta}{f_{R\perp}^2} \right)^2 \quad (5)$$

Bij toenemende invalshoek blijkt de resonantie dus op te schuiven naar een hogere frequentie, namelijk $f_R = f_{R\perp} / \cos(\theta)$.

Figuur 2 brengt een en ander in beeld voor een dubbelglasconstructie: de grafiek lijkt sterk op die voor coïncidentie (figuur 2a; module A-17; Luchtgeluidisolatie – coïncidentie-effect), maar het betreft hier een totaal ander fenomeen, dat zich bij veel lagere frequenties afspeelt. Buiggolven en coïncidentie kunnen in het resonantiegebied daarom vooralsnog buiten beschouwing gelaten worden.



figuur 2. verschuiving resonantiegebied t.g.v. invalshoek (dubbelglas constructie 6-30-6 mm)

In principe zouden we nu een massawet voor spouwconstructies bij alzijdige inval kunnen formuleren door te middelen over alle invalshoeken. Formule (5) laat duidelijk zien, dat voor frequenties $f \ll f_R$ een spouwstelsel zich gedraagt als een enkelvoudige constructie met massa $m_1 + m_2$ en daarvan is het gedrag bij alzijdige inval: $R = R_{\perp} - 5$.

We kunnen ons daarom beperken tot een benadering in het frequentiegebied $f \gg f_{R\perp}$. In formule (5) is dan alleen de term met de hoogste ($=6^e$) macht van f relevant.

De gemiddelde waarde van $\cos^6 \theta$ over alle invalsrichtingen bedraagt:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\text{halve bol}} \cos^6 \theta \, d\Omega = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} 2\pi \cdot \sin \theta \cdot \cos^6 \theta \, d\theta = \frac{1}{7} \quad (6)$$

Voor hoge frequenties zal de isolatie bij alzijdige inval dus $10 \cdot \log(7) = 8,5$ dB lager uitkomen dan bij loodrechte inval volgens de formule:

$$R = R_{\text{spouw},\perp} - 8,5 \text{ [dB]}$$

De vraag is hier wel waar en in welke mate coïncidentie alsnog in de beschouwing moet worden betrokken. Daartoe is het zinvol om nog eens kritisch naar het model te kijken en het volgende te constateren:

1. Voor hogere frequenties ($f \gg f_{R,\perp}$) komen we in een gebied, waar de golflengte van het geluid en de spouwbreedte van dezelfde grootte-orde zijn. De modelaannname dat er geen drukgradiënt in de spouw aanwezig is, wordt dan erg twijfelachtig.

De spouw zal hier in toenemende mate lijken op een normale ruimte en de totale geluidisolatie bestaat dan uit de sommatie van de geluidisolaties per spouwblad volgens de enkelvoudige massawet. Hierdoor is een helling van de isolatiecurve met circa $2 \times 5 = 10$ dB/octaaf (praktische massawet) te verwachten. Een waarde die goed overeenstemt met meetresultaten, althans zolang er geen duidelijke plateau-vorming optreedt.

Deze overgang kan gemarkeerd worden door de volgende gelijkstelling:

$R_{\text{spouw}} = R_{\text{spouw},\perp} - 8,5 \approx R_{m1} + R_{m2} = R_{m1,\perp} - 5 + R_{m2,\perp} - 5 \Rightarrow R_{\text{spouw},\perp} \approx R_{m1,\perp} + R_{m2,\perp}$
 Aangezien optellen van isolatiewaarden overeenkomt met vermenigvuldigen van transmissiecoëfficiënten, volgt hieruit met behulp van de definitie van $f_{R,\perp}$:

$$\left(\frac{\pi(m_1 + m_2)f}{\rho c} \right)^2 \cdot \frac{f^4}{f_{R,\perp}^4} = \left(\frac{\pi m_1 f}{\rho c} \right)^2 \cdot \left(\frac{\pi m_2 f}{\rho c} \right)^2 \Rightarrow f = \frac{K}{4\pi \rho c D} \quad (7)$$

Voor een luchtspouw geldt $c = \sqrt{K/\rho}$ en ligt dit transitiepunt bij:

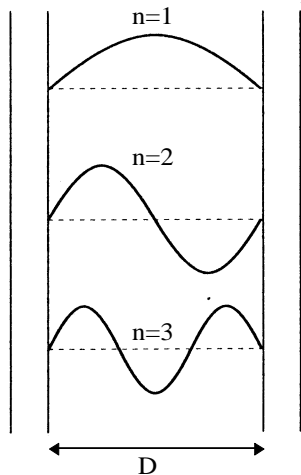
$$f_T = \frac{c}{4\pi D} \text{ ofwel bij een golflengte } \lambda_T = 4\pi D \quad (8)$$

2. Bij hogere frequenties kan de spouwbreedte ook precies een geheel aantal malen de halve golflengte bedragen, waardoor zogenaamde staande golven optreden. De spouw gedraagt zich in dit gebied dus al min of meer als een normale ruimte (zie punt 1). In deze gevallen bestaat er geen druk(verschil) meer tussen de uiteinden van de spouwveer en modelmatig komt dat overeen met $u_1 = u_2$ in formule (1a). Het stelsel formules (1b t/m 1e) onttaardt daarmee in dat voor een enkelvoudige constructie met massa $m_1 + m_2$ en de geluidisolatie zakt navenant terug.

De voorwaarde voor staande golven is:

$$D = n \cdot \frac{\lambda}{2} = n \cdot \frac{c}{2f}; \text{ zodat ze optreden bij } f_N = n \cdot \frac{c}{2D} \text{ [Hz]} (n=1,2,\dots) \quad (9)$$

en dus voorbij het transitiepunt (zie hiervoor) liggen.



figuur 3. staande-golf-voorwaarde

Staannde golven kunnen goed bestreden worden door enig absorberend materiaal in de spouw aan te brengen. Dat hoeft niet noodzakelijk op de spouwbladen zelf; zo kan bij dubbelglas de absorptie aan de spouwranden geplaatst worden. In de praktijk zal overigens nooit door alle in het geluid aanwezige frequenties aan de voorwaarde voor staannde golven kunnen worden voldaan; isolatieverlies door staannde golven kan daardoor wat minder geprononceerd aanwezig zijn.

3. Het spouwmodel is opgezet voor oneindig uitgestrekte spouwbladen, met als enige koppeling een (lucht)veer. In werkelijkheid bestaat aan de rand van de spouw ook een koppeling, maar dan een zeer starre. Het resulterend effect hiervan is een stijvere constructie, wat in het model tot uitdrukking gebracht zou kunnen worden via een grotere waarde van de (veer)constante K .

Naarmate die koppeling tussen de spouwbladen stijver is, zal de constructie zich meer (langer) als een enkelvoudige constructie gedragen. Echter, starre koppelingen zijn bij uitstek de plaats waar buiggolven direct kunnen doordringen van het ene naar het andere spouwblad; om die reden spreekt men ook wel van geluidbruggen. Bij intensieve koppeling komt een en ander in feite neer op een extra kleine verliesfactor voor buiggolven. Inmiddels weten we, dat dit gepaard zal gaan met een lager plateau in de isolatiecurve, i.c. verminderde geluidisolatie.

Praktische consequenties van het voorgaande zijn onder andere:

Kanaalplaten en andere holle bouwelementen isoleren 3 à 6 dB slechter dan even zware massieve constructies.

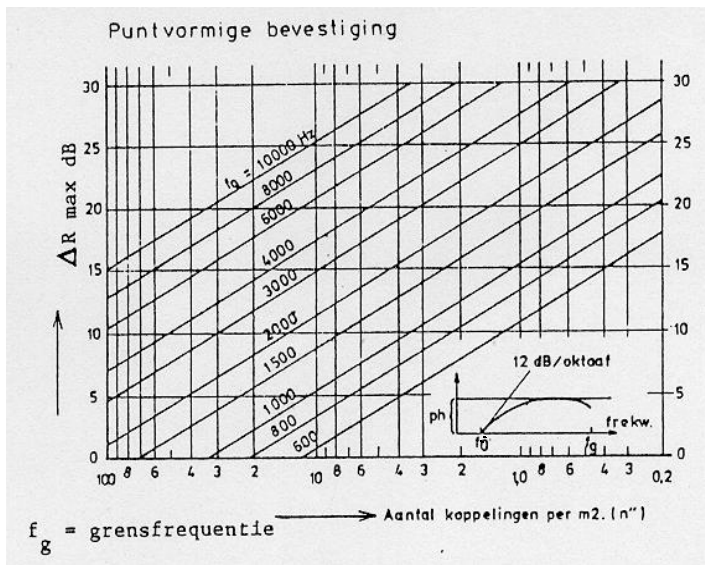
Normaal geankerde spouwmuren isoleren nagenoeg als enkelvoudige constructies van dezelfde massa.

Spouwvulling dient zodanig te zijn dat:

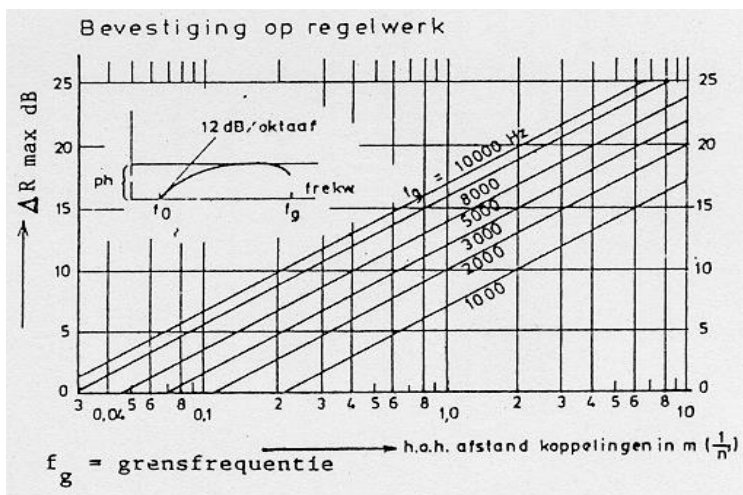
- de spouwbladen niet onder spanning komen;
- het materiaal minder stijf is dan de luchtlaag;
- het materiaal geluidabsorberend is;
- de effectieve spouwruijnte niet verkleind wordt.

Gebruik daarom licht en poreus materiaal zoals glas- of steenwol.

Voorzetwanden hebben koppelingen die - naar de aard van bevestiging - lijnvormig (regelwerk) of puntvormig zijn. De maximaal haalbare isolatieverbetering ΔR_{\max} hangt samen met het type en het aantal koppelingen per strekkende of vierkante meter en de grensfrequentie van de voorzetwand. ΔR_{\max} volgt uit figuur 4a of 4b en wordt bereikt bij de frequentie f , waar $20 \cdot \log(f/f_{R.L.}) = \Delta R_{\max}$ met helling 6 dB/oct.



figuur 4a. f_0 = resonantiefrequentie
 f_g = grensfrequentie
 ph = plateauhoogte van de voorzetwand



figuur 4b. invloed bevestiging voorzetwand op isolatiewaarde

voorbeeld isolatieverbetering door buigslappe voorzetwand
 Wand bestaat uit gipsblokken ($m_1=84 \text{ kg/m}^2$); er wordt een voorzetwand aangebracht, bestaande uit 12mm gipskartonplaat ($m_2=10 \text{ kg/m}^2$) op regelwerk ($D_{\text{spouw}}=50 \text{ mm}$). Hieruit volgt $f_R=90 \text{ Hz}$, terwijl voor deze gipskartonplaat $f_{\text{grens}}=2300 \text{ Hz}$. Stel aantal puntkoppelingen per m^2 op $n=3 \Rightarrow \Delta R_{\text{max}} \approx 18 \text{ dB}$. Maximum isolatieverbetering wordt bereikt als $20\log(f/f_R)=\Delta R_{\text{max}} \Rightarrow$ dus $f=715 \text{ Hz}$.
 In gebied 90-715Hz neemt de isolatieverbetering lineair toe met ca. 6 dB/octaaf; voor 715-2300Hz blijft de verbetering 18 dB t.g.v. plateauvorming in gipskartonplaat en boven 2300Hz verdwijnt de verbetering (coïncidentie en staande golven).

Vanwege de onder punt 1 t/m 3 genoemde aspecten, vertoont een spouwconstructie in de praktijk een vrij gecompliceerde isolatiecurve. Trachten de isolatiewaarden exact te voorspellen (=berekenen), kan nogal eens tot teleurstelling leiden. Niettemin levert voorgaande theorie wel een nuttige indicatie omtrent het gedrag, c.q. de bovengrens van de geluidisolatie.

Daartoe wordt hier volstaan met een opsomming van de globale spouw-wetten:

- mate van koppeling tussen de spouwbladen is bepalend

- laagfrequentgebied: $f < f_R/2$

Spouwconstructie gedraagt zich als enkelvoudige constructie met massa m_1+m_2

- resonantiegebied: $f_R/2 < f < 2f_R$

Bij de resonantiefrequentie f_R zakt de geluidisolatie weg tot $20 \cdot \log\left(\frac{m_1}{2m_2} + \frac{m_2}{2m_1}\right)$

Voor alzijdige inval en met absorptiemateriaal in de spouw kan deze isolatiedip wat minder scherp ("uitgesmeerd") blijken. Het minimum komt dan ongeveer bij $f=f_R\sqrt{2}$ te liggen, overeenkomend met een gemiddelde invalshoek van 45° .

f_R moet zo ver mogelijk onder het te weren geluidsspectrum liggen.

- hoogfrequentgebied $f > 2f_R$

De isolatiecurve herstelt zich aanvankelijk met 18 dB/octaaf (asymptoot);

benadering voor alzijdige inval is hier: $R \approx R_{\text{spouw},\perp} - 8,5$, eveneens overeenkomend met het verloop bij een invalshoek van ca. 45° .

Vanaf het transitiepunt $f_T=c/4\pi D$ gaat de spouw zich gedragen als de isolatie door twee afzonderlijke massa's, met een stijging van hooguit 10-12 dB/oct. Buiggolven kunnen echter zodanig overheersen, dat plateaus ontstaan en de stijging van de resulterende isolatiecurve plaatselijk lager uitvalt.

Spouwbladen met een groot verschil in grensfrequentie zijn daarom gunstig.

Isolatievermindering bij frequenties waar staande golven op kunnen treden, maximaal tot die van een enkelvoudige constructie met massa m_1+m_2 .

Geluidabsorberend materiaal in de spouw heeft hier een positief effect.