



## Akoestiek

1. Waaruit bestaat geluid en hoe plant het zich voort?
2. Hoe noemen we de beweging van geluid?
3. Hoe valt een geluidsgolf in lucht nader te omschrijven?
4. Licht dit toe met een tekening.
5. Hoe groot is de barometrische luchtdruk ten opzichte waarvan drukschommelingen optreden?
6. Op welke wijze bepaalt het gehoororgaan uit de geluiddruk  $p$  de sterkte-indruk van het geluid en hoe geven we die aan?
7. Wat bedraagt die waarde bij een luid spelende radio?
8. Hoe noemen we de ondergrens m.b.t. geluidwaarneming en welke geluiddruk hoort daarbij? Evenzo voor de bovengrens.
9. Wanneer kan reeds gehoorbeschadiging optreden?
10. Waarom gebruiken we logaritmen bij berekening van het geluiddrukkniveau  $L_p$ ?
11. Waarom werken we met kwadraten van de effectieve en de vergelijkingsdruk?
12. Met welke waarde zou het geluiddrukkniveau  $L_p$  toenemen indien we twee gelijkgerichte, even grote, in fase zijnde geluiden zouden optellen?
13. En hoe als het geen gelijkgerichte, maar tegengestelde geluiden betreft?
14. Wat is deze toename in de praktijksituatie?
15. Wat is de invloed van een op te tellen geluiddrukkniveau  $L_p$  dat meer dan 10 dB kleiner is dan het eerste?
16. Hoe luidt de formule om geluidbronnen bij elkaar op te tellen?
17. Vereenvoudig de formule m.b.t. de geluidintensiteit  $I$  in een vertrek.
18. Volgens welke formule kunnen we het geluidvermogensniveau  $L_w$  van een luchtkanaalsysteem berekenen?
19. Teken het verloop van een zuivere toon en geef daarbij de trilling aan. Evenzo voor het in de samenleving meest voorkomende geluid.
20. Wat is de voor alle frequenties geldende voortplantingssnelheid van geluidgolven in lucht, waarmee we in de bouwpraktijk werken?
21. Bereken de golflengte  $\lambda$  voor een frequentie van  $f = 1000$  Hz.
22. Bereken de onderste en bovenste grensfrequentie van de octaafband van 63 Hz.



23. Bereken de middenfrequentie van de octaafband met als onderste grensfrequentie 180 Hz en als bovenste 355 Hz.
24. Bij welke frequentie komt ons gehoor overeen met de geluiddrukmeter?
25. Welke middenfrequenties begrenzen het spraakgebied?
26. Wat wordt met een geluidsspectrum bedoeld?
27. Welke frequenties laat een octaaffilter in de stand voor 63 Hz door?
28. Op welke wijze kunnen we het totale geluidrukniveau over het gehele frequentiegebied bepalen?
29. Met welk doel schakelen we de geluid meter in de A-stand?
30. Bepaal aan de hand van tabel 10.4 de versterking resp. de verzwakking bij  $f = 4000$  Hz en  $f = 125$  Hz.
31. In welk geval is de vorm van het spectrum (lineair gemeten waarden dus) wel belangrijk?
32. Wat kan over de geluidisolatie van constructies worden opgemerkt?
33. Op welke wijze dient autoverkeerslawaai te worden gemeten?
34. Wat verstaan we onder het equivalente geluidrukniveau  $L_{eg}$ ?
35. En wat onder equivalent geluidniveau?
36. Wat betekenen  $L_{10}$  en  $L_{90}$ ?
37. Licht met voorbeelden toe hoe in het dagelijks leven geluidhinder kan optreden.
38. Welke geluidniveaus mogen overeenkomstig de Wet geluidhinder in zones langs wegen worden toegelaten voor woningen resp. kantoren?
39. Welke eisen worden er t.a.v. de geluidwering van de gevel gesteld indien in sommige gevallen ontheffing wordt verleend?
40. Zijn die waarden absoluut?
41. Bestaan er ook eisen t.a.v. industrielawaai en lawaai van vliegtuigen?
42. Waarin zijn de eisen voor het binnengeluid geregeld?
43. Welke bepalingen gelden t.a.v. het meten van het geluidniveau?
44. In de NEN 1070 zijn de eisen t.a.v. installaties in woningen gesteld. Welke waarde mag voor waterleiding en riolering worden toegelaten en welke meetconditie wordt er gesteld?
45. Welke waarde mag volgens de NEN 1070 worden toegelaten en welke meetconditie wordt er gesteld voor mechanische ventilatie?



46. Geef met een tekening aan hoe een en ander verloopt als er geluid op een wand valt.
47. Welk deel van de geluidintensiteit  $I$  in  $W/m^2$  wordt bij een halfsteensmuur resp. een eenvoudige boarddeur doorgelaten?
48. Wat houden we derhalve aan als praktische regel t.a.v. de absorptie- en reflectiecoëfficiënt?
49. Licht het begrip absorptie in poreuze materialen toe.
50. Welke eis wordt er aan de luchtstromingsweerstand van het materiaal gesteld?
51. Aan welke voorwaarde moet verder ook de dikte van het materiaal voldoen? Teken een 'goede' situatie. Licht deze situatie toe.
52. Om de akoestiek van een ruimte te verbeteren wordt er tegen de wanden absorberend materiaal, dik 20 mm, op stijl- en regelwerk aangebracht. De frequentie die de geluidbron het meest storend produceert is  $f = 2000$  Hz. De regels dienen op 10 mm vilt te worden gemonteerd. Geef in een duidelijke schets de constructie met de gegevens weer.
53. Wat zal ongeveer de afstand moeten zijn tussen de plafondplaten van een verlaagd plafond en de onderzijde van een betonvloer bij  $f = 250$  Hz?
54. Om welke redenen moeten we voorzichtig omgaan met de meeste absorberende materialen?
55. Noem een aantal constructieve voorzieningen die kunnen worden getroffen.
56. Kunnen we deze materialen zonder meer schilderen?
57. Omschrijf de werking van geperforeerde panelen. In welk frequentiegebied zijn ze functioneel?
58. Als de vorige vraag maar nu voor niet-geperforeerde panelen.
59. Op welke wijze kunnen we in harde ruimten het geluidniveau verlagen? Welke materialen kunnen we hiervoor gebruiken?
60. Waarop berust het begrip 'vierkante meter open raam' ( $m^2$  o.r.) ofwel 'perfect absorberend materiaal'?
61. Op welke wijze vinden we de totale geluidabsorptie  $A$ ?
62. Waaruit volgt de gemiddelde geluidintensiteit  $I$ ?
63. En waaruit het geluidniveau  $L_p$  (in het nagalmveld)?
64. Wat nemen we in de onmiddellijke nabijheid van een geluidbron waar?
65. Als we met extra absorptie het geluidniveau in een ruimte met 7 dB willen verlagen, welke maatregelen dienen we dan te treffen en welke beperkingen zijn er (figuur 10.25)?



66. Geef met een schets aan op welke wijze door middel van functionele absorbers, per  $\text{m}^2$  plafondoppervlakte een absorptiecoëfficiënt van  $a = 1,6$  kan worden bereikt.
67. Op welke wijze wordt het begrip nagalmtijd  $T$  omschreven? Waarvan is die afhankelijk?
68. Hoe luidt de formule van Sabine?
69. Waardoor wordt de beste nagalmtijd in een ruimte bepaald?
70. Welke waarden gelden voor een woonkamer resp. een schoollokaal?
71. Een vertrek lang 8 m, breed 5 m en 2,6 m hoog heeft de volgende afwerkingen: vloer van parket gelijmd op de ondergrond, plafondschraven breed 85 mm, tussenruimte 25 mm. Een lange wand schoon metselwerk van baksteen. De twee korte wanden van kalkcement pleisterwerk. Een lange wand met  $17,8 \text{ m}^2$  glaspui  $a = 0,01$  en het overige deel van deze wand katoenen gordijnen, geplooid 3: 1. In het vertrek staan 14 stoelen, onbezet. Bereken de nagalmtijd van dit vertrek bij de frequenties  $f = 250$  en  $f = 500 \text{ Hz}$ .
72. Bereken de nagalmtijd van hetzelfde vertrek als in opgave 71 bij de frequenties  $f = 250$  en  $f = 500 \text{ Hz}$ , maar nu op de vloer: tapijt  $1,87 \text{ kg/m}^2$  met een onderlaag dik 4,5 mm. De stoelen zijn nu bezet.
73. Hoe wordt de nagalmtijd voor lagere en hogere frequenties bijgesteld?
74. Wat verstaan we onder diffusiteit van een ruimte?
75. Wat is het verschil tussen een diffuus geluidveld en een direct geluidveld?
76. Wat geldt voor grote zalen t.a.v. de plaatsing van de wanden?
77. Op welke wijze dient er verband te zijn tussen rechtstreeks (direct) geluid en gereflecteerd (indirect) geluid?
78. Geef in een schets weer welke maatregelen in een grote zaal getroffen kunnen worden. Licht een en ander toe.
79. Als de vorige opgave, maar nu in een kleine zaal (weer toelichten).
80. In welk geval treedt echo op?
81. Wat bedoelen we met bijv. in sporthallen optredende flutter-echo's?
82. Op welke wijze wordt geluidisolatie onderscheiden? Licht dit toe.
83. Hoe wordt de geluidisolatie gedefinieerd en in een formule weergegeven?
84. Door welke aspecten wordt de isolatie van een homogene wand bepaald?
85. Met welk voorbehoud dient de praktijk-massawet te worden gehanteerd?
86. Bepaal aan de hand van deze wet de isolatie van een wand van  $70 \text{ kg/m}^2$  bij een frequentie van  $f = 1000 \text{ Hz}$ . 87
87. Evenzo bij een wand van  $500 \text{ kg/m}^2$  bij  $f = 250 \text{ Hz}$ .



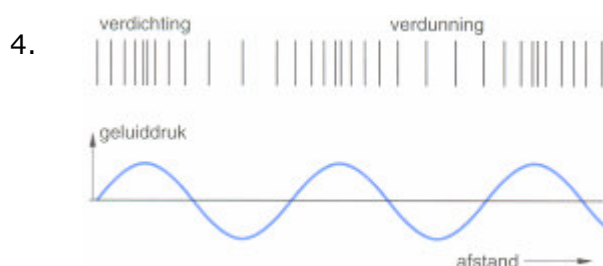
88. Licht de regel 'grotere massa leidt tot hogere geluidisolatie' toe.
89. Evenzo de regel 'hogere frequentie leidt tot grotere geluidisolatie'.
90. Welke formule geldt voor de coïncidentiefrequentie?
91. Wat valt over de in de hedendaagse bouw veelvuldig toegepaste 70 mm dikke gipswanden op te merken?
92. Wat is de invloed van het gewicht op een en ander?
93. Welk voordeel kunnen constructies hebben die uit meerdere lagen zijn opgebouwd t.o.v. homogene wanden?
94. Omschrijf zo'n ideale constructie mede in relatie tot de praktische toepasbaarheid.
95. Wat wordt onder een massa-veer resonantie m.b.t. een spouwconstructie verstaan?
96. Met welke formule wordt bij loodrecht invallend geluid de resonantiefrequentie  $f_0$  gevonden?
97. Bereken de resonantiefrequentie  $f_0$  van dubbel glas 4-20-6 mm (massa glas = 2500 kg/m<sup>3</sup>).
98. Evenzo van 4-80-6 mm dubbel glas.
99. Wat valt over beide uitkomsten op te merken?
100. Is dubbele beglazing in alle gevallen een verbetering als het gaat om isolatie tegen verkeerslawaai? Welke eis geldt hier?
101. Op welke wijze ontstaat spouwresonantie  $f_{sp}$ ? Licht dit met een schets toe.
102. Wat is de invloed hiervan op de geluidisolatie?
103. Hoe kunnen we een ongewenst gebied in de resonantiefrequenties omschrijven?
104. Op welke wijze kunnen we spouwresonanties onderdrukken bij dichte constructies resp. glasconstructies?
105. Licht de grafiek m.b.t. de algemene isolatiekromme van een spouwconstructie toe.
106. Welke gegevens zijn van belang m.b.t. de geluidisolatie R van een wand waarin een deur is aangebracht?
107. Wat betekent een isolatieverschil van 20 dB tussen wand en deur?
108. Welk effect heeft een deur van 1,6 m<sup>2</sup> en geluidisolatie R = 20 dB in een wand van 17 m<sup>2</sup> en R = 40 dB?
109. Bereken de situatie van figuur 10.35 als de wand 10 meter lang is.
110. Welk effect heeft een spleet van 0,017 m<sup>2</sup> met geluidisolatie R = 0 dB in een wand van 17 m<sup>2</sup> met R = 40 dB?



- 
111. Is de invloed van zo'n kier op een wand met een nog hogere isolatiewaarde groter of kleiner?
  112. Bepaal uit figuur 10.36 de isolatievermindering van figuur 10.35 voor het geval dat voor de wandisolatie  $R = 60$  dB zou gelden.
  113. Wat wordt de isolatiewaarde voor de combinatie wand + deur als voor de wandisolatie  $R = 50$  dB zou gelden?
  114. Geef in een schets weer op welke wijze flankerende geluidoverdracht kan plaatsvinden.
  115. Wat is het verschil tussen de geluidisolatie van een wand tussen twee ruimten en de totale geluidreductie tussen de twee ruimten?
  116. Geef in een schets weer hoe lichte steenachtige scheidingswanden die loodrecht op een wand met voldoende leverend vermogen zijn geplaatst, de isolatie sterk kunnen verminderen.
  117. Geef met duidelijke schetsen aan hoe een en ander verbeterd kan worden (denk aan geluid lekken).
  118. Geef in een schets weer hoe bij over de verdiepingen doorgaande gevelpuien de optredende flankerende geluidoverdracht en geluidlekken de isolatie ongunstig beïnvloeden.
  119. Schets mogelijke verbeteringen.
  120. Op welke manieren kan contactgeluid optreden?
  121. Vanaf welke dikte is de isolatie van een betonvloer doorgaans voldoende tegen loopgeluiden?

## Uitkomsten

1. Geluid is energie die in de vorm van trillingen (drukschommelingen) door een bron wordt voortgebracht en die zich als geluidgolven in een medium (zoals lucht) verplaatst en die door een waarnemer wordt opgevangen.
2. Bij een geluidsgolf gaat het iets anders. Hier is de bewegingsrichting van de deeltjes gelijk aan de voortplantingsrichting (*longitudinale golfbeweging*)
3. Een geluidsgolf in de lucht treden verdunningen en verdichtingen op (negatieve en positieve geluidsdrukken): de luchtdeeltjes voeren een trilling uit om een evenwichtsstand. De luchtdeeltjes blijven op hun plaats, de golf plant zich voort.



figuur 10.3 Voortplanting van een geluidsgolf in de lucht

5. Het gehoororgaan is in staat deze trillingen waar te nemen en bepaalt uit de geluidsdruk ( $p$ ) de sterkte-indruk van het geluid door de snelle drukwisselingen op een bepaalde manier te middelen.
6. Dit (kwadratisch) gemiddelde noemt men de *effectieve geluidsdruk*. Wanneer in deze paragraaf de effectieve geluidsdruk wordt bedoeld, wordt deze aangegeven als  $p_{\text{eff}}$ .  

$$p_{\text{eff}} = \sqrt{\rho^2} \text{ [Pa]}$$
7. Ten opzichte van de barometerdruk is de geluidsdruk maar heel klein. Een luid spelende radio bijvoorbeeld veroorzaakt een effectieve geluidsdruk van  $p_{\text{eff}} = 0,2 \text{ p}_a$ . Dat is 500 000 maal zo klein als de barometerdruk.
8. Er is dus een soort *gehoordrempel*. Deze ligt bij een geluidsdruk van  $\rho = \text{ca. } 2 \cdot 10^{-5} \text{ (0,00002) p}_a$ . Dat is  $5 \cdot 10^9$  maal zo klein als de barometerdruk. Zo is er ook een *bovenste gehoorgrens* waarbij de geluidsdruk zo groot wordt dat het gehoororgaan wordt beschadigd. Deze 'pijngrens' ligt op  $\rho = \text{ca. } 200 \text{ p}_a$ . Dat is altijd nog 500 maal zo klein als de barometerdruk.
9. Ook beneden de pijngrens kan echter, afhankelijk van de tijd gedurende welke men aan de geluidsdruk wordt blootgesteld, kans op gehoorbeschadiging bestaan.
10. Het menselijk oor heeft dus een 'meetbereik' voor geluidsdrukken van  $2 \cdot 10^5$  tot  $200 \text{ p}_a$ . Deze uitersten liggen een factor  $10^7$  uit elkaar. Omdat het moeilijk is met getallen die zover uiteen liggen te werken, is de geluidsdruk niet rechtstreeks bruikbaar als maat voor de geluidsterkte. Daarom is een logaritmische maat ingevoerd: het geluidsdrukkniveau ( $L_p$ ).
11. Omdat het kwadraat van de effectieve geluidsdruk een maat is voor de sterkte van het geluid, gebruikt men voor het bepalen van het geluidsdrukkniveau ( $L_p$ ) de term:  

$$p_{\text{eff}}^2 / p_0^2$$
Het geluidsdrukkniveau is de logaritme van deze verhouding vermenigvuldigd met 10.  

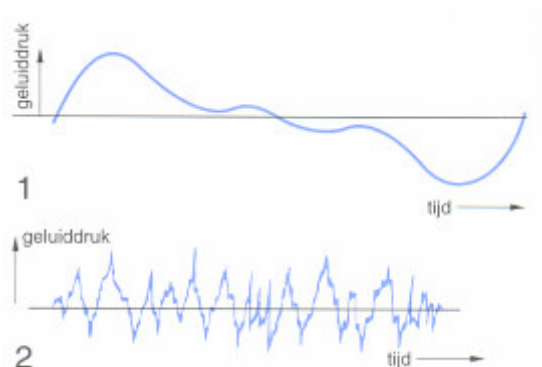
$$L_p = 10 \log p_{\text{eff}}^2 / p_0^2 \text{ [dB]}$$

12. Als vuistregel kan men aanhouden dat:
- twee gelijke (onafhankelijk) geluidrukniveaus bij elkaar opgeteld een verhoging van 3 dB geven ( $\log 2$ ),
  - wanneer twee (onafhankelijke) geluidrukniveaus meer dan 10 dB verschillen, men het kleinste kan verwaarlozen en het geluidrukniveau gelijk is aan de grootste.
- 13.
- 14.
15. Wanneer twee (onafhankelijke) geluidrukniveaus meer dan 10 dB verschillen, men het kleinste kan verwaarlozen en het geluidrukniveau gelijk is aan de grootste.
16. In de formulevorm kan het optellen van geluidrukniveaus als volgt worden uitgedrukt:  
 $L_{p \text{ tot}} = 10 \log (10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10} + \dots) \text{ [dB]}$   
 Hierin is:  
 $L_{p1}$  het geluidrukniveau van geluid 1  
 $L_{p2}$  het geluidrukniveau van geluid 2  
 enz.
17. Diffuus geluidveld. Deze veronderstelling geldt met name voor niet al te grote omsloten ruimten.  
 $I = W/A \text{ [W/m}^2\text{]}$   
 Hierin is:  
 W geluidvermogen van de bron in watt  
 A totale geluidabsorptie in een vertrek in  $\text{m}^2$  o.r.
18. Vanwege de werkbaarheid wordt voor de geluiddruk gebruik gemaakt van een logaritmische schaal.  
 Vermogen:  $L_w = 10 \log W/W_0$
19. Een *zuivere toon* bestaat uit een geluid waarvan de geluiddruk sinusvormig in de tijd verandert, figuur 10.4



figuur 10.4 Verloop van de geluiddruk als functie van de tijd bij een zuivere toon

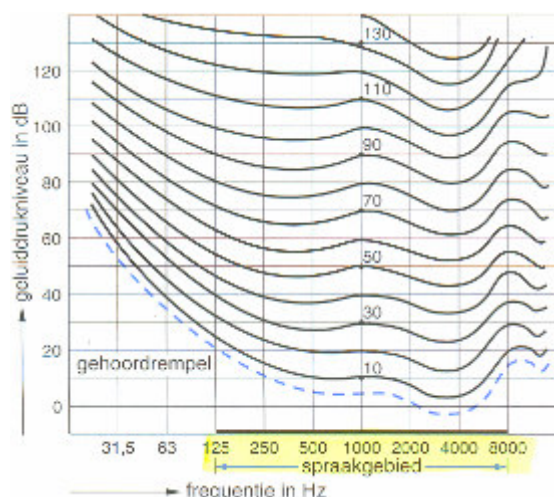
De meeste in de samenleving voorkomende geluiden zijn opgebouwd uit zoveel verschillende tonen dat het verloop van de geluiddruk in de tijd zeer grillig wordt, figuur 10.6-2



figuur 10.6 Samengestelde geluiden



20. In de bouwpraktijk zijn de temperatuurverschillen echter relatief klein, zodat met één voortplantingssnelheid gerekend kan worden. Voor lucht is de voortplantingssnelheid ca. 340 m/s (20°C)
21.  $\lambda = c/f$   $f = 1000$  [Hz]  
 $\lambda = 340/1000$  [m]  $\lambda = 0,34$  [m]
22. octaafband 63 [Hz]  
onderste grens:  $63/\sqrt{2} = 45$  [Hz]  
bovenste grens:  $63*\sqrt{2} = 90$  [Hz]
23. Onderste grensfrequentie is 180 Hz } 254 } 250 Hz  
Bovenste grensfrequentie is 355 Hz } 251 }
24. Dit is bij 1000 [Hz]  
Verzwakking of versterking volgens de A weging is 0 [dB]
25. Het spraakgebied ligt tussen de 125 en 8000 [Hz]

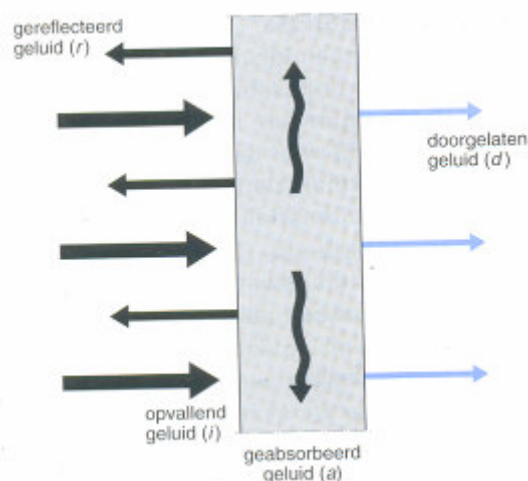


26. Wanneer men het spectrum van een geluid wil bepalen (de verdeling van de geluidenergie over het frequentiegebied), dan wordt in de geluidsniveaumeter een elektronische filter opgenomen.
27. Octaafband 63 [Hz]  
frequentiegebied  $63/\sqrt{2} = 45$  Hz  $63*\sqrt{2} = 90$  Hz  
45 – 90 {Hz}
28. Uit de octaafbandniveaus kan men eventueel het totale geluidsdruk niveau (over het gehele frequentiegebied) bepalen door ze logaritmisch op te tellen.
29. Wanneer men een geluidsspectrum wil beoordelen, zou men bij iedere octaafband de gevoeligheid van het menselijk oor in rekening moeten brengen. Om met één enkele meting te kunnen volstaan is een geluidniveau A (aangeduid met  $L_A$ ) ingevoerd.
30.  $f = 4000$  [Hz] versterking 1,0 [dB]  
 $f = 125$  [Hz] verzwakking -16,1 [dB]
31. Het geluidniveau  $L_A$  in dB(A) geeft geen informatie over de vorm van het spectrum. Wanneer het gaat om het treffen van maatregelen zoals het verbeteren van de geluidsisolatie van een gevel, is de vorm van het spectrum echter wel belangrijk.



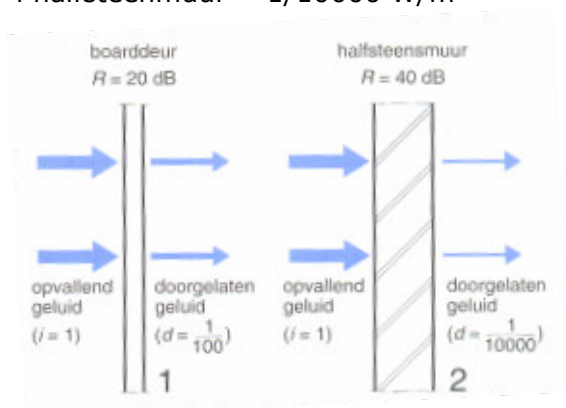
32. Zo is de *geluidisolatie* van alle constructies (dus ook van glas) bij lage frequenties het kleinst.
33. Hier is het nodig om over langere tijd het verloop van het geluiddrukkniveau vast te leggen, zodat hieruit een soort gemiddelde kan worden bepaald. Het meest gebruikt wordt het zogenaamde *equivalente geluiddrukkniveau* ( $L_{eq}$ )
34. Het equivalente geluiddrukkniveau ( $L_{eq}$ ) is het niveau van een geluid van constante sterkte dat over een bepaalde tijd genomen evenveel akoestische energie vertegenwoordigt, als het in sterkte variërende geluid over diezelfde periode.
35. Wanneer het equivalente geluiddrukkniveau ( $L_{eq}$ ) wordt bepaald in dB(A) spreekt men van een *equivalent geluidniveau*.
36. Zo betekent  $L_{10}$  het geluiddrukkniveau dat gedurende 10% van de tijd wordt overschreden.  $L_5$  en  $L_{10}$  vormen een maat voor de 'herkenbare geluidpieken',  $L_{90}$  en  $L_{95}$  vormen een maatstaf voor het 'achtergrondgeluid'.
- 37.
38. In de Wet geluidhinder worden ten aanzien van verkeerslawaai zones langs wegen aangegeven waarbinnen moet worden aangetoond dat het equivalente geluidniveau niet hoger is dan 50 dB(A). Alleen voor kantoren geldt een grenswaarde van 55 dB(A).
39. De geluidwering van de gevel dient dan echter zodanig te zijn dat binnen in geluidgevoelige ruimten (woningen) een niveau van 35 dB(A) niet wordt overschreden.
40. Voor geluidgevoelige ruimten waarin bijzonder geluidgevoelige activiteiten plaatsvinden (leslokalen van scholen) geldt een niveau van 30 dB(A). Voor kantoren wordt een niveau van 40 dB(A) genoemd. In enkele gevallen kunnen tot 10 dB(A) hogere waarden worden toegelaten.
41. Soortgelijke eisen gelden voor industrielawaai. In de Luchtvaartwet is een en ander geregeld omtrent zones rond vliegvelden.
42. De eisen voor het binnengeluid zijn in het Bouwbesluit verwerkt in een minimaal vereiste geluidwering van de gevel. In hoofdstuk 11 wordt aangegeven aan welke waarden de geluidniveaus in verschillende ruimten moeten voldoen.
43. Het equivalente geluidniveau moet volgens de Wet geluidhinder worden bepaald over het gehele etmaal. Tijdens de avond- en nachtperiode moeten de gemeten waarden echter met 5 respectievelijk 10 dB(A) worden verhoogd.
44. NEN 1070: tabel 4  
BB. Art. 23  
De eisen gelden voor elke installatie afzonderlijk. De eisen gelden voor lege, ongestoffeerde ruimten. In gemeubileerde ruimten zijn de eisen ten minste 5 dB(A) lager dan vermeld.
45. Er mag maximaal een geluidniveau optreden van  $L_{I:A:K} = 30$  dB(A). Het MV systeem moet zodanig zijn ingesteld dat aan de eisen voor luchtverversing volgens de bouwvoorschriften wordt voldaan.

46.



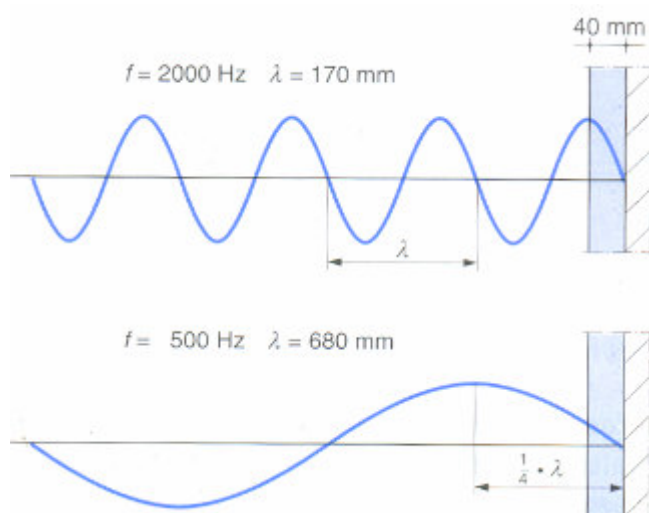
*Figuur 10.28 Opvallende en doorgelaten, gereflecteerde en geabsorbeerde geluidenergie*

47.  $i = 1 \text{ W/m}^2$   
 $i \text{ boarddeur} = 1/100 \text{ W/m}^2$   
 $i \text{ halfsteenmuur} = 1/10000 \text{ W/m}^2$



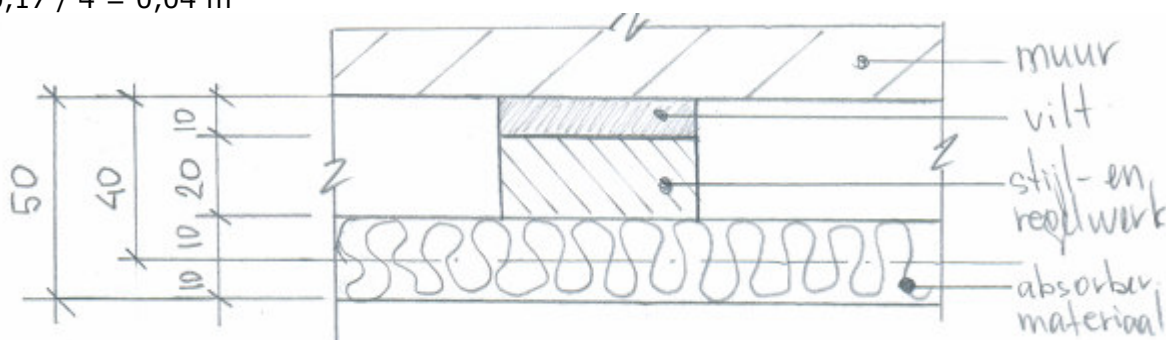
*Figuur 10.29 Luchtgeluidisolatie*

48.  $r + a + d = 1$   
 $r + a = 1$ , als  $d$  heel klein is
49. Absorptie in poreuze materialen. Wanneer een geluidsgolf in een poreus materiaal binnendringt, ondervinden de heen en weer gaande luchtdeeltjes wrijving in de poriën van het materiaal. Door deze wrijving wordt geluidenergie omgezet in warmte. Het geluid wordt door het materiaal geabsorbeerd.
50. Ter plaatse van de overgang tussen lucht en materiaal mag niet te veel geluid worden gereflecteerd. We geven dat aan door de luchtstromingsweerstand van het materiaal. Absorberend materiaal moet een lage luchtstromingsweerstand hebben, opdat de overgang van lucht naar materiaal zodanig is dat niet te veel geluid wordt gereflecteerd. Aan de andere kant moet de luchtstromingsweerstand ook weer niet te klein zijn, anders treedt er niet genoeg wrijving op en is de absorptie niet voldoende.
51. Verder is ook de dikte van het materiaal belangrijk, Zoals hierboven al is vermeld moet een laag materiaal minstens een kwart golflengte ( $1/4\lambda$ ) van het te absorberen geluid dik zijn om goed te absorberen, zie figuur 10.14.

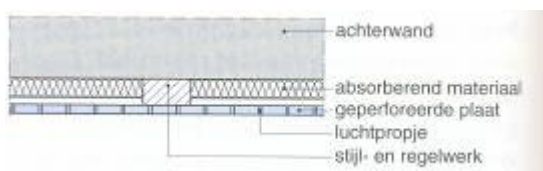


figuur 10.14 Invloed golflengte en laagdikte (poreus materiaal) op geluidabsorptie

52.  $f = c / \lambda = 340 / 2000 = 0,17$  m  
 Een laag materiaal moet minstens  $\frac{1}{4}$  golflengte van het absorberend geluid dik zijn om goed te absorberen.  
 $0,17 / 4 = 0,04$  m



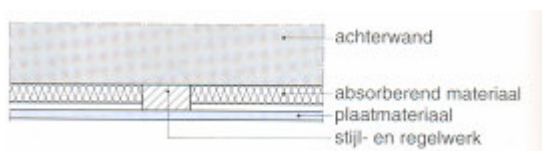
53.  $\lambda = c / f \rightarrow 1,36 = 340 / 250$   
 $1 / \lambda = 0,34$  m is de afstand van het hart van het verlaagd plafond tot onderkant vloer.
54. Vaak zijn absorberende materialen erg zacht en kwetsbaar en moeten ze tegen mechanische beschadigingen worden beschermd.
55. Dit kan gebeuren met geperforeerde plaat van metaal, hardboard, gips, enz. Ook bekleding met houten latten waartussen een opening wordt gehouden is mogelijk. Verder is het mogelijk het materiaal af te dekken met een poreus weefsel of vlies of met een heel dunne kunststoffolie.
56. Het is duidelijk dat men door verven het oppervlak van absorberende materialen zodanig dicht kan maken dat de luchtstromingsweerstand wordt verhoogd en geluidgolven het materiaal niet meer kunnen binnendringen.
57. De werking van de geperforeerde panelen berust op het resonantie principe. De lucht in de gaatjes vormt namelijk een soort massa, die kan trillen op de erachter gelegen luchtlaaf, die als veer fungeert. Zo'n *massa-veer systeem* heeft bepaalde eigen (resonantie)frequenties. Door de werking van het massa-veer systeem kunnen deze constructies goed absorberen in een frequentiegebied van ca. 300-1500 Hz (figuur 10.16).



*Figuur 10.16 Geperforeerde panelen, goede absorptie in een frequentiegebied van ca. 300-1500 Hz.*

58. Ook plaatmaterialen zoals triplex, spaanplaat, metaal, enz. kunnen geluidsabsorberend werken wanneer ze worden aangebracht op een luchtspouw. De plaat vormt met de erachter gelegen luchtlaag een massa-veer systeem, figuur 10.17. De *eigen frequenties* van deze trillingen liggen in het gebied van ca. 50-500 Hz. Daarnaast treden in de plaat nog allerlei buiggolven op, met bepaalde eigenfrequenties.

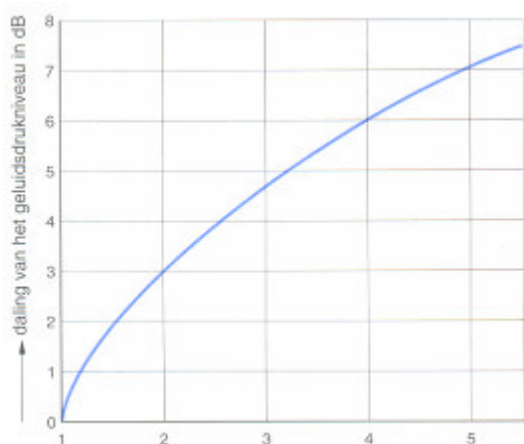
Wanneer de plaat wordt aangestoten door geluidgolven met zijn eigenfrequenties, dan komt hij gemakkelijk in trilling. Door deze trilling wordt de geluidenergie in de bevestigingspunten van de plaat omgezet in warmte. De absorptie vindt plaats in een beperkt frequentiegebied, maar heeft wel een hoge absorptiecoëfficiënt.



*Figuur 10.17 Niet geperforeerde panelen, absorptie in het frequentiegebied van ca. 50-500 Hz.*

59. Wil men in een 'harde' ruimte, met veel steenachtige wanden en plafond en/of veel glas, het geluidniveau verlagen, dan moeten tegen plafond en wanden de hiervoor besproken geluidsabsorberende bekledingen worden aangebracht. Ook stofferingen, zoals zware gordijnen en hoogpolige tapijten kunnen, evenals gestoffeerde meubilering, hiertoe bijdragen.
60. Als eenheid van geluidabsorptie gebruikt men de 'vierkante meter open raam' ( $m^2$  o.r.). Dit berust op het volgende. Gezien vanuit een vertrek verdwijnt alle geluidenergie die op een open raam valt naar buiten. Dit komt op hetzelfde neer als wanneer alle opvallende geluidenergie wordt geabsorbeerd.
61. De *totale geluidabsorptie* in een vertrek (A) wordt gevonden door van alle omwandingen het oppervlak (S) te vermenigvuldigen met de bij het betreffende materiaal behorende absorptiecoëfficiënt (a).
- $$A = a_1 * S_1 + a_2 * S_2 + a_3 * S_3 + \dots [m^2 \text{ o.r.}]$$
- Hierin is
- |                   |  |
|-------------------|--|
| A                 | totale hoeveelheid absorptie in $m^2$ o.r. |
| $a_{1,2,3,\dots}$ | absorptiecoëfficiënt materiaal             |
| $S_{1,2,3,\dots}$ | oppervlakte van de constructie in $m^2$    |
62.  $I = k/A [W/m^2]$
63.  $L_p = L_I + 10 \log 4$      $L_p = L_w + 10 \log 4/A$
64. Indien men in de ruimte een duidelijk herkenbare bron heeft zal in de onmiddellijke nabijheid van de bron echter niet het diffuus geluidveld heersen maar het directe geluidveld. De geluidgolven hebben nog niet de kans gekregen tegen de constructie te reflecteren. In de onmiddellijke nabijheid van een geluidbron geldt dus dat het geluidrukniveau hoger is, omdat het directe geluid overheerst.

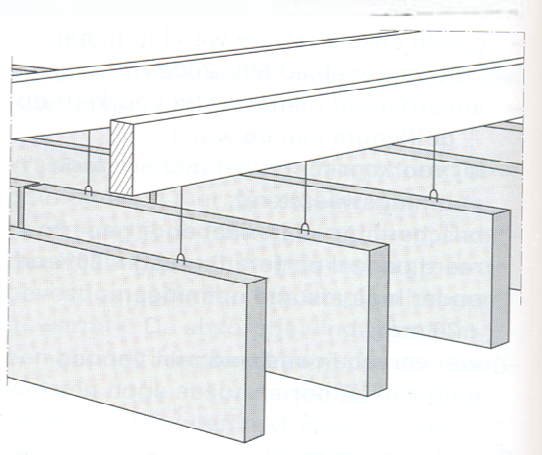
65. Bij verdubbelen van de hoeveelheid absorptie wordt twee maal zoveel geluid geabsorbeerd, zie de grafiek van figuur 10.25. Dit betekent een verlaging van het geluidsdrukkniveau van 3 dB. Wil men het geluidsdrukkniveau 6 dB verlagen dan moet de hoeveelheid aanwezige geluidabsorptie worden verviervoudigd.



Figuur 10.25 Daling van het geluidniveau door aanbrengen extra geluidabsorptie in een ruimte

66. *Functionele absorbers*. Voor toepassing in grotere ruimten en hallen kan voor de verlaging van het geluidsdrukkniveau gebruik worden gemaakt van functionele absorbers, ook wel *baffies* genaamd.

In de meest eenvoudige vorm, voor industriële toepassing, bestaan deze bijvoorbeeld uit in dunne kunststoffolie gehulde dikke platen steenwol met een breedte van ca. 0,5 meter die verticaal in banen onder het plafond komen te hangen, figuur 10.19. Op deze manier kan, een berekend op de  $m^2$  plafondoppervlak, een absorptiecoëfficiënt van ca.  $a=1,6$  worden bereikt.



Figuur 10.19 Functionele absorbers (*baffles*)

67. De *nagalmtijd* is gedefinieerd als de tijd die verloopt voordat, als een geluidbron wordt uitgeschakeld, het geluidsdrukkniveau 60 dB is gedaald. De *nagalmtijd* is afhankelijk van de *absorptie* in de ruimte. Hoe meer geluidabsorptie aanwezig is, des te korter is de nagalmtijd ( $T$ ).



68. De nagalmtijd kan worden berekend met de formule van Sabine:

$$T = (1/6) * (V/A) \quad [s]$$

$$\text{waarbij } A = a_1 * S_1 + a_2 * S_2 + \dots$$

Hierin is:

T de nagalmtijd in s

V het volume van de ruimte in m<sup>3</sup>

A de aanwezige geluidabsorptie in m<sup>2</sup> o.r.

69. De werkzaamheden die in een ruimte plaatsvinden bepalen welke nagalmtijd voor die ruimte het beste is, tabel 10.7

goed gemeubileerde kamer	T = ca. 0,5 s
kantoorvertrek	T = 0,5 - 0,7 s
kantoortuin	T = 0,7 - 0,9 s
schoollokaal	T = 0,6 - 0,8 s
muzieklokaal	T = 0,8 - 1,2 s
schouwburg	T = 0,9 - 1,3 s
kamermuziekzaal	T = 1,2 - 1,5 s
opera	T = 1,2 - 1,6 s
concertzaal	T = 1,7 - 2,3 s
kerk (orgelmuziek)	T = 1,5 - 2,5 s

Tabel 10.7 Richtwaarden voor de nagalmtijd in verschillende ruimten

70. De getallen uit tabel 10.7 zijn richtwaarden. De grootte van het vertrek (de zaal) speelt bij het bepalen van de gewenste nagalmtijd ook nog een rol, evenals de *diffusiteit* van de ruimte. In principe zou de nagalmtijd over het gehele frequentiegebied gelijk moeten zijn.

71.

			Akoestische berekening											
			Hoofdstuk 10				vraagstuk 71							
			tabelboek											
			frequentie											
vlak	materiaal	S m2	125		250		500		1000		2000		4000	
			a	a * S	a	a * S	a	a * S	a	a * S	a	a * S	a	a * S
vloer	parket	40	0	0	0,04	1,6	0,06	2,4	0	0	0	0	0	0
wand lang	sch.m.w.	20,8	0	0	0,03	0,624	0,03	0,624	0	0	0	0	0	0
wand kort	kl pleister	13	0	0	0,01	0,13	0,02	0,26	0	0	0	0	0	0
wand														
gevel	ramen	17,8	0	0	0,01	0,178	0,01	0,178	0	0	0	0	0	0
	gordijnen	3	0	0	0,45	1,35	0,96	2,88	0	0	0	0	0	0
wand kort	kl pleister	13	0	0	0,01	0,13	0,02	0,26	0	0	0	0	0	0
plafond	plschroten	40	0	0	0,85	34	0,8	32	0	0	0	0	0	0
interieur	bekl. stoel	14	0	0	0,3	4,2	0,3	4,2	0	0	0	0	0	0
	A in m2													
	o.r.		0		42,212		42,802		0		0		0	
	T in													
V in m3	104,00	sec	#DEEL/0!		0,41		0,40		#DEEL/0!		#DEEL/0!		#DEEL/0!	
Nagalmtijd	#DEEL/0!													



72.

		Akoestische berekening												
project gegevens		Hoofdstuk 10				vraagstuk				72				
		tabelboek												
		frequentie												
vlak	materiaal	S m <sup>2</sup>	125		250		500		1000		2000		4000	
			a	a * S	a	a * S	a	a * S	a	a * S	a	a * S	a	a * S
vloer	tapijt 1,87	40	0	0	0,13	5,2	0,6	24	0	0	0	0	0	0
wand lang	sch.m.w.	20,8	0	0	0,03	0,624	0,03	0,624	0	0	0	0	0	0
wand kort	kl pleister	13	0	0	0,01	0,13	0,02	0,26	0	0	0	0	0	0
wand														
gevel	ramen	17,8	0	0	0,01	0,178	0,01	0,178	0	0	0	0	0	0
	gordijnen	3	0	0	0,45	1,35	0,96	2,88	0	0	0	0	0	0
wand kort	kl pleister	13	0	0	0,01	0,13	0,02	0,26	0	0	0	0	0	0
plafond	plschroten	40	0	0	0,85	34	0,8	32	0	0	0	0	0	0
	zit													
interieur	persoon	14	0	0	0,3	4,2	0,45	6,3	0	0	0	0	0	0
	A in m <sup>2</sup>													
	o.r.		0		45,812		66,5		0		0		0	
	T in													
V in m <sup>3</sup>	104,00	sec	#DEEL/0!		0,38		0,26		#DEEL/0!		#DEEL/0!		#DEEL/0!	
Nagalmtijd	#DEEL/0!													

73. In het algemeen laat men bij de lagere frequenties een wat langere nagalmtijd toe en bij de hogere een wat kortere, zie tabel 10.8

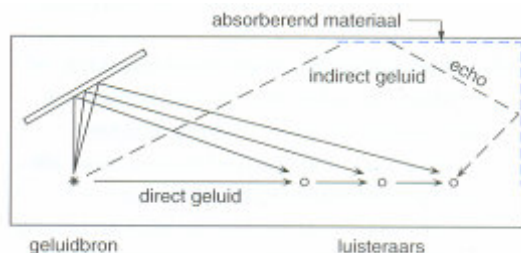
	frequentiegebied (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
afwijking t.o.v. 500 Hz	1,4	1,15	1,0	0,9	0,9	0,9

Tabel 10.8 Geoorloofde afwijkingen t.o.v. 500 Hz.

Na het inschakelen van de geluidbron ontstaat na korte tijd een evenwichtssituatie waarin alle door de bron afgegeven geluidenergie wordt geabsorbeerd in het vertrek.

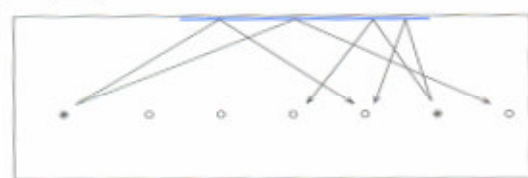
74. Onder *diffusiteit* verstaat men de mate waarin het geluid regelmatig (even sterk) over de ruimte wordt verdeeld. In plaats vanuit enkele hoeken bereikt het geluid de luisteraar vanuit alle richtingen. In kleinere ruimten is dit vrijwel nooit een probleem. Bij grotere zalen kan de diffusiteit wel een probleem vormen. In dit soort zalen dient men zeer veel aandacht te besteden aan de loop van het geluid en het mogelijk optreden van nuttige en ongewenste reflecties.
75. Indien de afstand tot de bron kleiner is dan  $r_{\text{galm}}$  overheerst het directe geluidveld. Indien de afstand tot de bron  $> r_{\text{galm}}$  overheerst het indirecte, diffuse geluidveld.
76. Zalen waarvan de wanden zodanig geknikt zijn dat zij een goede bijdrage leveren aan de nuttige reflectie bereiken juist een betere spraakverstaanbaarheid. In zalen kunnen ook *flutter-echo's* optreden las twee evenwijdige wanden goed reflecteren en meer dan 7 m van elkaar zijn verwijderd
77. Voor spraak geldt dat indien het looptijdverschil niet meer bedraagt dan 17 m (50 ms), het indirecte geluid (de reflectie) als een nuttige bijdrage aan het directe geluid wordt waargenomen. Voor muziek geldt een langer looptijdverschil van ca. 27 m (80 ms).

78. In een zaal waar het geluid altijd vanaf een bepaalde plaats (spreekgestoelte, toneel, enz.) in de gehele zaal terecht moet komen, kan van speciaal aangebrachte panelen, (klankkaatsers) gebruik worden gemaakt, figuur 10.22. Dergelijke nuttige reflecties bevorderen een goede geluidsoverdracht in de zaal.



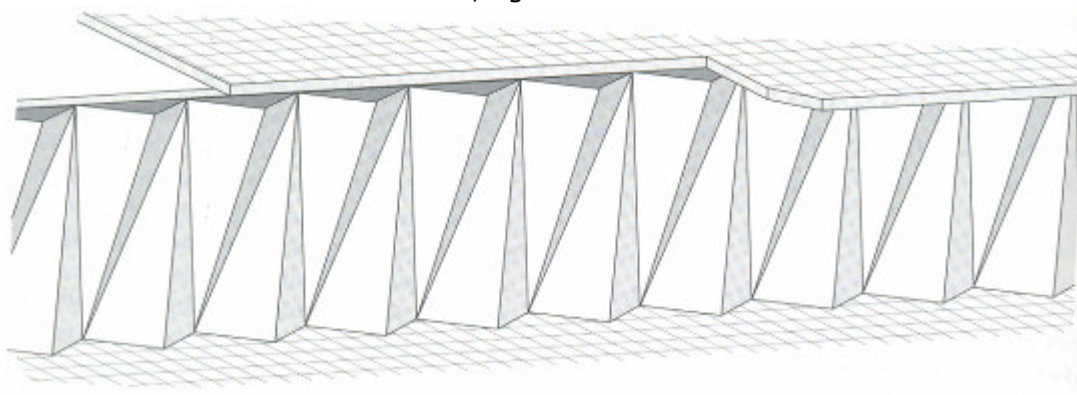
*Figuur 10.22 Ondersteuning van het directe geluid door nuttige reflecties en het voorkomen van echo's door het aanbrengen van absorberend materiaal.*

79. In kleinere ruimten is het vaak anders. Alle aanwezigen moeten elkaar kunnen verstaan (vergaderzaal, leslokaal, enz.). In zo'n geval is het nuttig de geluidabsorptie niet in het plafond aan te brengen, maar op de wanden en de vloer. Het plafond wordt dan hard uitgevoerd en doet dienst als *reflector*, figuur 10.23.



*Figuur 10.23 Reflecterend plafond (vergaderzaal)*

80. Om te voorkomen dat het *indirecte* geluid met een te grote vertraging ten opzichte van het *directe* geluid bij de toehoorder terecht komt en als echo wordt waargenomen, worden gedeelten van het betreffende plafond en de achterwand met geluidabsorberend materiaal bekleed.
81. Tussen deze wanden kan het geluid meerdere keren heen en weer kaatsen. In zo'n geval kan één van de onderstaande mogelijkheden een oplossing bieden:
- één van de wanden, of beide, met absorberend materiaal bekleden;
  - de wanden niet haaks op elkaar zetten en een gelede opbouw geven. Vaak worden daarom één of meer van de wanden of het plafond voorzien van schuine vlakken of andere oneffenheden, figuur 10.24.



*Figuur 10.24 Sterk geplooid wanden ter verstrooiing van het geluid*

82. Bij geluidisolatie kan men onderscheid maken in lucht- en contactgeluidisolatie. In het eerste geval gaat het over isolatie tegen in de lucht opgewekte geluidgolven (praten, etc.). In het tweede geval gaat het om de mate waarin constructies trillingen voortplanten en als geluid weer afgeven aan de lucht, wanneer ze rechtstreeks worden aangesloten (lopen, slaan van deuren, etc.) (figuur 10.26).



*Figuur 10.26 Luchtgeluid brengt een constructie aan het trillen waardoor deze ook aan de andere kant geluid afgeeft: een constructie kan ook mechanisch in trilling worden gebracht en daardoor geluid gaan afstralen (contactgeluid)*

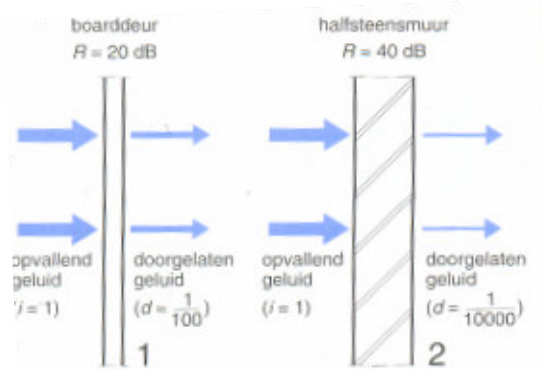
83. De geluidisolatie is gedefinieerd als de verhoudingen tussen opvallend en doorgelaten geluid. Deze verhouding wordt uitgedrukt in dB. Dat betekent dat de logaritme van de verhouding moet worden doorgenomen.

$$R = 10 \log (1/d) \text{ [dB]}$$

Hierin is:

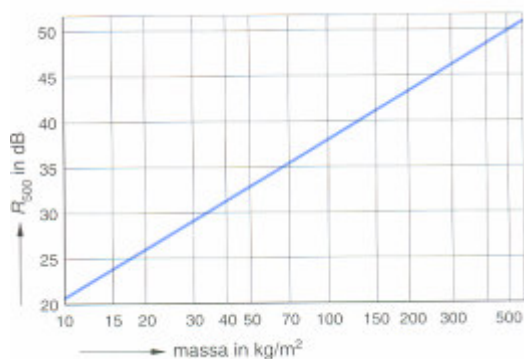
R de luchtgeluidsisolatie in dB

d doorgelaten deel van het opvallend geluid



*Figuur 10.29 Luchtgeluidisolatie*

84. Voor homogene constructies (één laag beton, steen, hout, enz.) kan theoretisch worden afgeleid wat de geluidisolatie zou moeten zijn. Deze is afhankelijk van de massa van de constructie en van de frequentie van het geluid. Door allerlei randeffecten worden in de praktijk andere waarden gevonden dan de theoretische massawet aangeeft.
85. Hoe zwaarder de constructie hoe beter dus de geluidisolatie. Maar vooral bij massa's beneden de  $100 \text{ kg/m}^2$  is de waarde volgens de grafiek van figuur 10.30 slechts een zeer globale rechtwaarde. Vaak treden bijzondere effecten op, zoals coïncidentie, die de geluidisolatie sterk beïnvloeden.



**Figuur 10.30** Praktijk massawet voor de geluidisolatie 500 Hz  
 $F = 3 * a$  (kracht = massa \* versnelling)

86. Wand 70 [kg/m<sup>2</sup>]  $f = 100$  [Hz]  
 $R_{1000} = 17,5 \log m + 17,5 \log f/500 + 3$  [dB]  
 $= 17,5 \log 70 + 17,5 \log 1000/500 + 3$  [dB]  
 $= 32,29 + 5,26 + 3$   
 $= 40,55 \approx 41$  [dB]
87. Wand 500 [kg/m<sup>2</sup>]  $f = 250$  [Hz]  
 $R_{250} = 17,5 \log 500 + 17,5 \log 250/500 + 3$  [dB]  
 $= 47,23 + (-5,26) + 3$   
 $= 44,97 \approx 45$  [dB]
88. De op de wand uitgeoefende kracht (in het zendvertrek) geeft aan de wand (massa) een bepaalde versnelling. Een zware wand krijgt een kleine versnelling. Een zware wand wordt dus minder makkelijk in trilling gebracht.
89. Net zo iets geldt voor het aantal trillingen per seconde (de frequentie) van het opvallend geluid. Een hoge frequentie (dus veel kleine trillingen per seconde) geeft een kleinere geluidsdruk in het ontvangvertrek.
90. De grensfrequentie voor coïncidentie ( $f_g$ ) wordt gevonden uit de volgende formule:  
 $f_{g \text{ coïncidentie}} = (f_g * d) / d$  [Hz]  
 Hierin is:  
 $f_g * d$  een van het materiaal afhankelijke constante  
 $d$  de dikte van de constructie in mm

In tabel 10.9 is de constante  $f_g * d$  voor diverse materialen gegeven en als voorbeeld de coïncidentiefrequentie bij twee veel toegepaste dikten van het materiaal.

materiaal	$f_g * d$	voorbeeld		voorbeeld	
		$d$ (mm)	$f_g$ (Hz)	$d$ (mm)	$f_g$ (Hz)
aluminium	12 500	2	6 250	5	2 500
staal	12 800	1	12 800	3	4 267
glas	12 800	4	3 200	8	1 600
beton	17 300	120	144	200	87
gasbeton	38 00	80	475	200	190
kalkzandsteen	21 400	105	204	210	102
poriso	26 100	50	520	90	289
lichtbeton	32 00	80	400	200	160
gips	35 500	50	710	70	507
gipskarton	35 500	9	3 944	15	2 367
hout	25 000	12	2 083	22	1 136
spaanplaat	25 000	8	3 125	18	1 389
lood	51 200	0,5	102 400	2	25 600

**Tabel 10.9** Grensfrequentie voor coïncidentie bij verschillende materialen



91. Uit deze tabel is duidelijk te zien dat bijvoorbeeld 50-90 mm poriso en 50-70 mm gips een zeer ongunstig isolatiegedrag hebben, omdat het gebied waarin de coïncidentiefrequentie valt (300-700 Hz) juist in het frequentiegebied van de menselijke stem ligt en er slechte isolatie optreedt.
92. Bij zware wanden is de invloed van de coïncidentie vaak minder merkbaar.
93. Door een wand (of andere constructie) op te bouwen uit twee delen met lucht ertussen (spouwconstructie) kan door het ontbreken van rechtstreekse trillingoverdracht van het ene spouwblad op het andere, een grote geluidisolatie worden bereikt bij relatief lage massa.
94. In het gunstigste geval (volledige ont koppeling van de spouwbladen, spouwbreedte 100 mm of meer, voldoende absorptie in de spouw, enz.) mogen de isolatiewaarden van de beide spouwbladen bij elkaar worden opgeteld. Bij spouwen van normale afmetingen gaat dat echter niet op. Ook zijn er nog enkele bijzondere effecten.
95. De twee spouwbladen (massa's) kunnen op de tussengelegen luchtlaag (veer) een trilling uitvoeren.
96. Bij loodrecht invallend geluid wordt deze resonantiefrequentie ( $f_0$ ) gevonden met behulp van de volgende formule:  
$$f_0 = 60 \sqrt{\{(m_1+m_2) / (m_1*m_2) * 1/b\}} \text{ [Hz]}$$
Hierin is:  
 $f_0$  de resonantiefrequentie bij loodrecht invallend geluid in Hz  
 $m_1$  de massa van het eerste spouwblad in  $\text{kg/m}^2$   
 $m_2$  de massa van het tweede spouwblad in  $\text{kg/m}^2$   
 $b$  de breedte van de spouw in m
97.  $f_0 = 60 \sqrt{\{(10+15) / (10*15) * (1/0,02)\}}$   
 $f_0 = 60 \sqrt{0,166 * (1/0,02)}$   
 $f_0 = 173,2 \text{ [Hz]}$
98.  $f_0 = 60 \sqrt{\{(10+15) / (10*15) * (1/0,08)\}}$   
 $f_0 = 86,60 \text{ [Hz]}$
99. Door dit *resonantie-effect* is de isolatie van een dubbele ruit, wanneer het de bedoeling is verkeerslawaai tegen te houden, soms slechter dan de isolatie van een enkele ruit. Het verkeerslawaai is juist maximaal bij frequenties van 100-200 Hz. Voor een goede geluidisolatie geldt de eis: massa-veer resonantie  $f_0 < 80 \text{ Hz}$ .
100. Nee, de isolatiewaarde van dubbele beglazing kan slechter zijn dan de isolatiewaarde van een enkele ruit.  
Voor een goede geluidsisolatie geldt de eis  $f_0 < 80$   
 $m_1 = 0,004 * 2500 = 10 \text{ kg/m}^2$   
 $m_2 = 0,006 * 2500 = 15 \text{ kg/m}^2$   
 $f_{o \text{ glas}} = (60/\sqrt{b}) * \sqrt{\{(1/m_1) + (1/m_2)\}} = (60 / \sqrt{0,88}) * \sqrt{\{(1/10) + (1/15)\}} = 86,6 \text{ Hz}$
101. figuur 10.33
- 102.
103.  $f_0 < 80 \text{ Hz}$   $f_0 > 3000 \text{ Hz}$
- 104.

105. 10.34

106.

107.

108.

109.

110.

111.

112.

113.

114.

115.  $R_w = 50 \text{ dB}$      $S_w = 16,2 \text{ m}^2$   
 $R_d = 20 \text{ dB}$      $S_d = 0,8 * 2,0 = 1,6 \text{ m}^2$   
 $\Delta R = 30 \text{ dB}$      $S_{\text{tot}} = 17,8 \text{ m}^2$   
 $R_{\text{res}} = -10 \log (1,6 / 17,8 * 10^{(-20/10)} + 16,2 / 17,8 * 10^{(-50/10)}) = 20 \text{ dB}$

116.

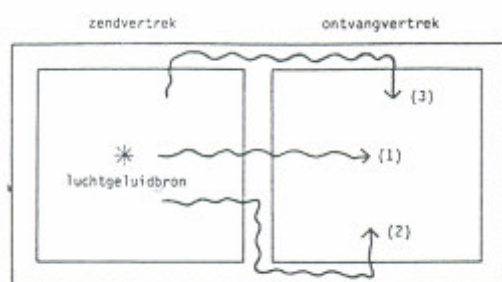


Fig. 10.37 Flankerende geluidsoverdracht

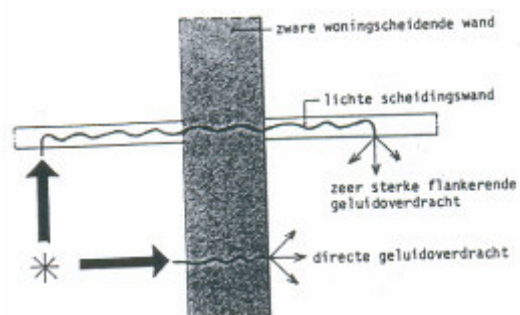
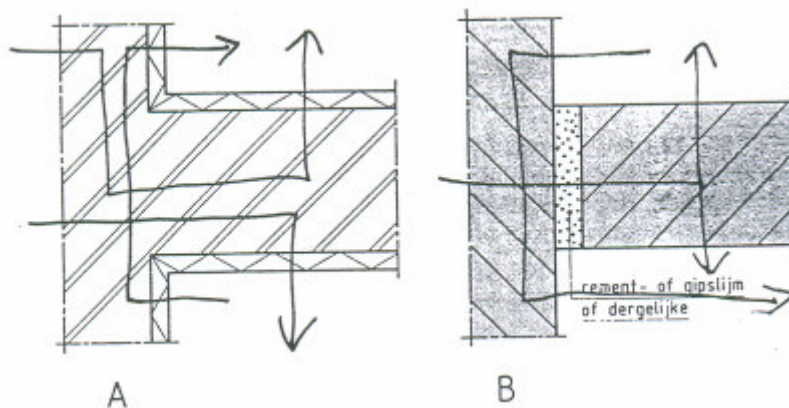


Fig. 10.38 Flankerende geluidsoverdracht bij aansluiting van lichte wanden

117.

118.



A

B



---

119.