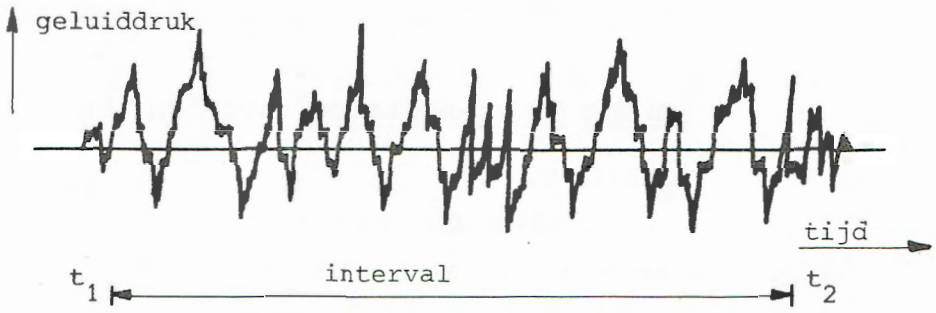
syllabus BOUWFYSICA

deel 2: GELUID

Rijksgebouwendienst
Hoofdafdeling Bouw
's-Gravenhage, december 1977

ir. A.C. van der Linden



figuur 1-1: Geluiddruk als funktie van de tijd van een "chaotisch" geluid

1 GELUID

Geluid bestaat uit drukschommelingen (trillingen) in de lucht. Deze trillingen planten zich als longitudinale golven voort door de lucht.

1.1 GELUIDDRUK (p)

Het menselijk oor is in staat de drukschommelingen ten opzichte van de stationaire (barometrische) luchtdruk waar te nemen. Deze variaties op de luchtdruk (1 atmosfeer is ca. 10^5 N/m^2) noemt men de momentane geluiddruk.
Als sterktemaat voor het geluid is de effectieve geluiddruk ingevoerd. Onder deze effektieve geluiddruk p_{eff} verstaat men: de wortel uit het gemiddelde kwadraat van de geluiddrukken.

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2 dt} = \sqrt{\overline{p^2}} \left[N/m^2\right] \qquad (1\text{-}1)$$

In figuur 1-1 is van een "chaotisch" geluid de geluiddruk p als funktie van de tijd getekend.
De gemiddelde druk $\overline{p} = 0$; p is even vaak positief als negatief; de effektieve druk daarentegen heeft een zekere waarde, die met formule (1-1) kan worden berekend.

1.2 GEHOORGRENZEN

De gehoorgrens, dat is de geluiddruk die een menselijk oor nog juist kan registreren, ligt voor een jong mens voor 1000 Hz bij 2.10^{-5} N/m^2, ofwel 2.10^{-10} atmosfeer.
De pijngrens, waarbij kans op gehoorbeschadiging optreedt, ligt bij 200 N/m^2, ofwel 2.10^{-3} atmosfeer.
Deze uitersten, gehoorgrens en pijngrens, liggen een faktor 10^7 uit elkaar. Omdat het moeilijk is om met getallen die zover uiteen liggen te werken, heeft men internationaal een andere grootheid ingevoerd, het geluiddrukniveau.

soort geluid	geluiddruk (p_{eff})	$\frac{p_{eff}}{p_o}$	$\frac{p_{eff}^2}{p_o^2}$	L_p (dB)
gehoordrempel	2.10^{-5} N/m^2	1	1	0
bladergeritsel	2.10^{-4} N/m^2	10	10^2	20
fluisteren op 1 m afstand	2.10^{-3} N/m^2	100	10^4	40
gesprek op 1 m afstand	2.10^{-2} N/m^2	1000	10^6	60
luide radio	2.10^{-1} N/m^2	10000	10^8	80
claxon dichtbij	2 N/m^2	100000	10^{10}	100
straalmotor	20 N/m^2	1000000	10^{12}	120
pijngrens	200 N/m^2	10000000	10^{14}	140

tabel 1-1: Voorbeeld verband tussen geluiddruk en geluiddrukniveau.

1.3 GELUIDDRUKNIVEAU (L_p)

Het geluiddrukniveau (in veel literatuur aangeduid als SPL, afkorting van Sound Pressure Level) is een logarithmische verhoudingsmaat tussen de effektieve geluiddruk p_{eff} en een vaste vergelijkingsdruk, overeenkomende met de onderste gehoorgrens, $p_o = 2.10^{-5}$ N/m^2.

$$L_p = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{p_o^2} \quad [dB] \qquad (1\text{-}2)$$

Wordt p_{eff}^2/p_o^2 tien (10) maal zo groot, dan wordt het geluiddrukniveau (L_p) 1 bel (10 decibel) hoger.
Wordt p_{eff}^2/p_o^2 duizend (1000) maal zo groot dat wordt L_p 3 bel (30 decibel) hoger. Zie ook het voorbeeld in tabel 1-1.

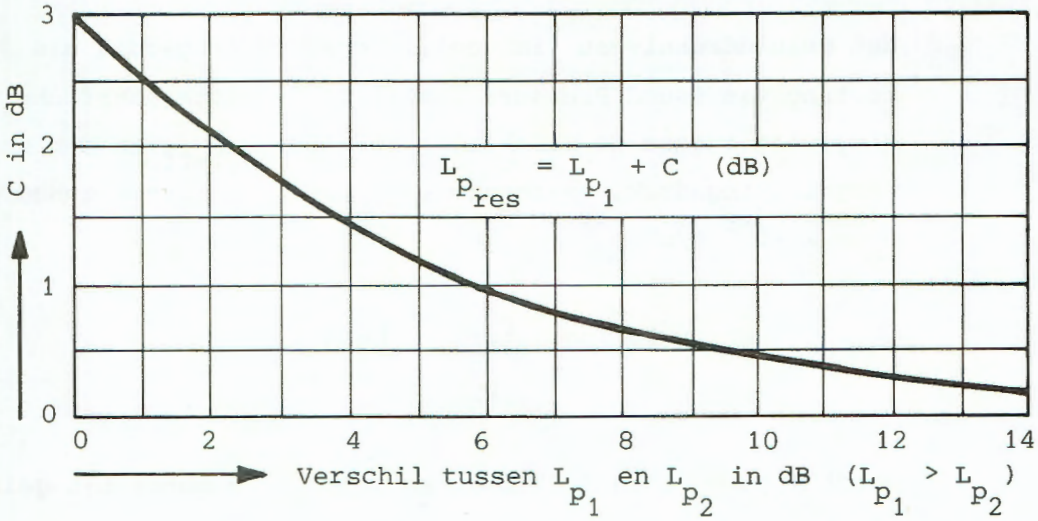
De akoestische energie is evenredig met het kwadraat van de geluiddruk. Verdubbelen van de akoestische energie betekent derhalve een 3 dB hoger geluiddrukniveau (immers 10 log 2 = 3). Het menselijk oor ervaart echter eerst 10 dB als een verdubbeling van de geluidsterkte.

1.4 OPTELLEN VAN GELUIDDRUKNIVEAUS

Geluiddrukniveaus kunnen niet zomaar worden opgeteld. Wat men op zou moeten tellen zijn de gekwadrateerde geluiddrukken. Via enkele wiskundige omwerkingen kan men komen tot de volgende formule voor het (logarithmisch) optellen van geluiddrukniveaus.

$$L_{p_{res}} = 10 \log \left[10^{L_{p_1}/10} + 10^{L_{p_2}/10} + 10^{L_{p_3}/10} + \ldots\ldots \right] \quad [dB] \qquad (1\text{-}3)$$

Wanneer twee gelijke gelijkdrukniveaus worden opgeteld betekent dit 3 dB stijging (verdubbeling van energie).
Zo geven twee geluiddrukniveaus van 60 dB bij elkaar opgeteld 63 dB. Evenzo is 40 dB + 40 dB = 43 dB.



figuur 1-2: Superponeren van geluiddrukniveaus

voorbeeld

$L_{p_1} - L_{p_2}$	C	L_{p_1}	L_{p_2}	$L_{p_1} + C = L_{p_{res}}$
0	3,0	60	60	60 + 3,0 = 63,0
0,5	2,8	60	59,5	60 + 2,8 = 62,8
1	2,5	60	59	60 + 2,5 = 62,5
2	2,1	60	58	60 + 2,1 = 62,1
3	1,8	60	57	60 + 1,8 = 61,8
4	1,5	60	56	60 + 1,5 = 61,5
5	1,2	60	55	60 + 1,2 = 61,2
7	0,8	60	53	60 + 0,8 = 60,8
10	0,4	60	50	60 + 0,4 = 60,4
20	0,04	60	40	60 + 0,04 = 60,0
30	0,004	60	30	60 + 0,004 = 60,0

tabel 1-2: Superponeren van geluiddrukniveaus

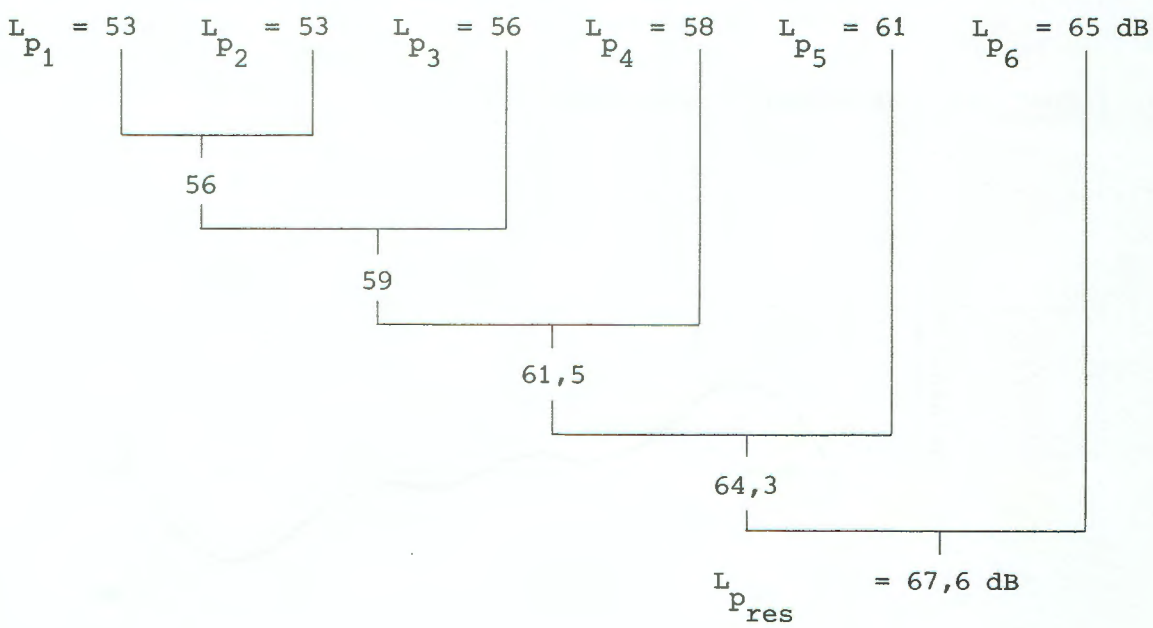
Het optellen van twee geluiddrukniveaus kan gebeuren met behulp van figuur 1-2.

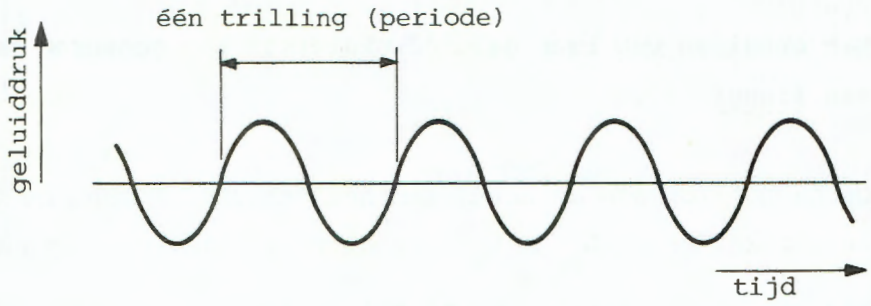
Op de horizontale as neemt men het verschil tussen de twee geluiddrukniveaus ($L_{p_1} - L_{p_2}$) en op de verticale as vindt men de bij het grootste (L_{p_1}) op te tellen waarde (C). Zie voor de getalwaarden tabel 1-2.

Wanneer twee ongelijke geluiddrukniveaus worden opgeteld, dan is het uiteindelijke resultaat niet veel meer dan het grootste van de twee (60 dB + 50 dB = 60,4 dB).
Als vuistregel kan men aanhouden dat, wanneer twee geluiddrukniveaus meer dan 10 dB verschillen, men het kleinste kan verwaarlozen. Zie hiervoor ook tabel 1-2.

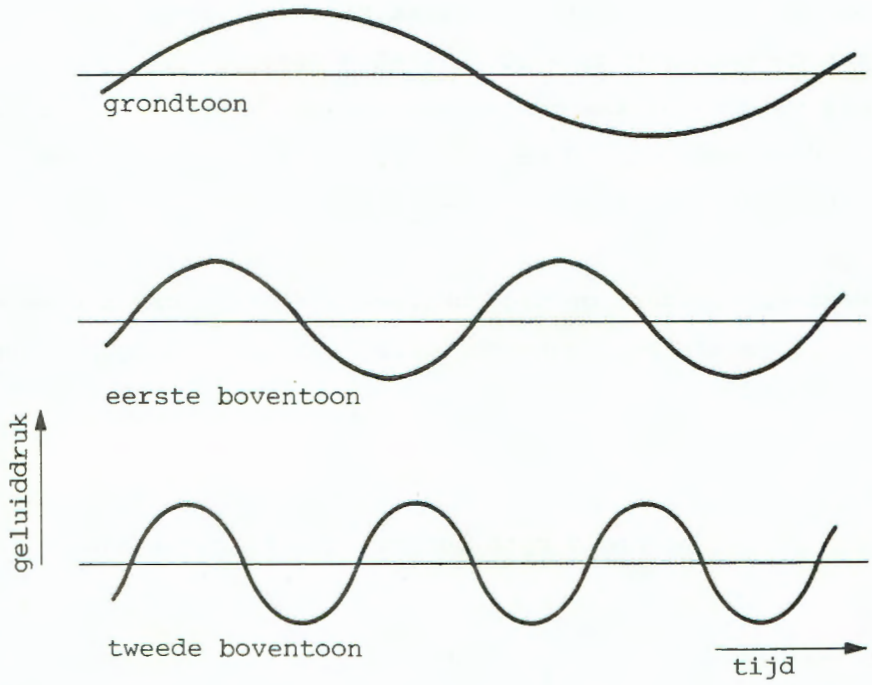
Wanneer meerdere geluiddrukniveaus moeten worden opgeteld kan dat twee aan twee gebeuren. Zie hiervoor het onderstaande voorbeeld.

Voorbeeld optellen van geluiddrukniveaus

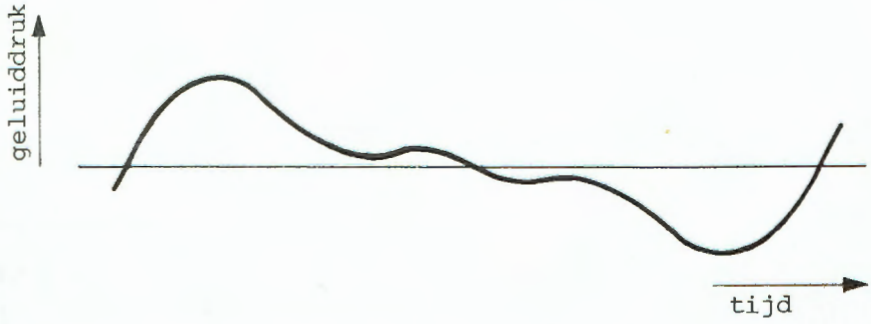




figuur 1-3: Verloop van de geluiddruk als functie van de tijd bij een zuivere toon



figuur 1-4: Grondtoon en boventonen



figuur 1-5: Resulterende geluiddruk grondtoon en boventonen

1.5 GELUIDINTENSITEIT (I) EN GELUIDINTENSITEITNIVEAU (L_I)

Naast de geluiddruk (p) en het geluiddrukniveau (L_p) kunnen ook een geluidintensiteit en een geluidintensiteitniveau worden gedefinieerd.
De geluidintensiteit (I) is gedefinieerd als de hoeveelheid geluidenergie die per tijdeenheid valt op de oppervlakte eenheid. De geluidintensiteit wordt derhalve uitgedrukt in W/m^2.

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_o} \quad [dB] \qquad (1\text{-}4)$$

Hierin is I_o de vergelijkingsintensiteit $I_o = 10^{-12}$ W/m^2.

Tussen geluiddruk en geluidintensiteit en tussen geluiddrukniveau en geluidintensiteitniveau heerst een bepaald verband dat afhankelijk is van het type geluidveld. Hierop wordt in dit bestek echter verder niet ingegaan.

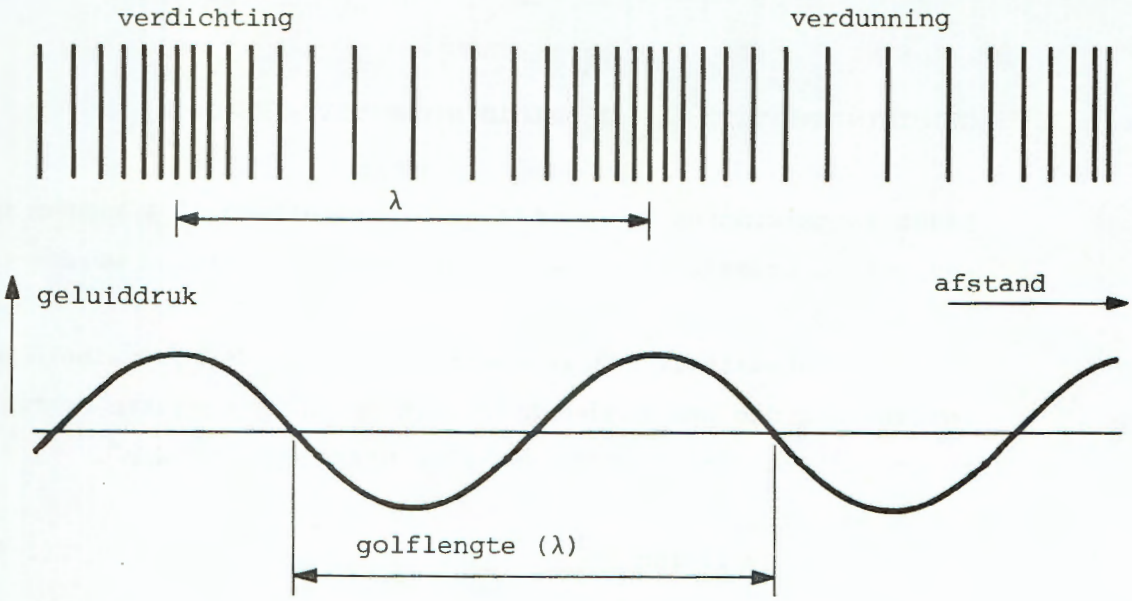
1.6 FREQUENTIE (f), GOLFLENGTE (λ)

Een zuivere toon bestaat uit een geluid waarvan de geluiddruk sinusvormig in de tijd verandert (zie figuur 1-3).

Het aantal trillingen per seconde noemt men de frequentie; deze wordt uitgedrukt in hertz (Hz).

Zuivere tonen komen weinig voor. Ook een toon, voortgebracht door een muziekinstrument is opgebouwd uit een grondtoon en diverse boventonen (zie figuur 1-4).
Het samengestelde geluid geeft dan een beeld te zien zoals dat is weergegeven in figuur 1-5.

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 1-6: Golflengte bij longitudinale golf

f (Hz)	(m)
63	5,40
125	2,72
250	1,36
500	0,68
1000	0,34
2000	0,17
4000	0,09
8000	0,04

tabel 1-3: Frequentie van het geluid en bijbehorende golflengte in lucht

$c_{aluminium}$ = 5100 m/s
c_{staal} = 4900 m/s
c_{beton} = 4000 m/s
$c_{metselwerk}$ = 2000 m/s
c_{water} = 1450 m/s

tabel 1-4: Voortplantingssnelheid van longitudinale trillingen in diverse materialen

Geluidgolven planten zich als longitudinale trillingen voort door de lucht. Dit houdt in dat de bewegingsrichting van de deeltjes en de voortplantingsrichting van de golf samenvallen. Een lopende longitudinale golf kan worden weergegeven als een reeks elkaar opvolgende verdichtingen en verdunningen van de lucht (zie figuur 1-6).

De golflengte bij een longitudinale golf is de afstand tussen twee verdichtingen (of twee verdunningen). In het algemeen is de golflengte de afstand tussen twee punten die in identieke toestand verkeren (in fase zijn).

De snelheid waarmee de geluidgolven zich voortplanten is voor alle frequenties gelijk. Hierdoor geldt het volgende verband

$$c = f.\lambda \qquad [m/s] \qquad (1\text{-}5)$$

waarin: c = de voortplantingssnelheid van het geluid in m/s
f = de frequentie in Hz
λ = de golflengte in m

De geluidsnelheid is onder andere afhankelijk van de temperatuur. In de bouwpraktijk zijn de temperatuurverschillen echter relatief klein, zodat met één voortplantingssnelheid gerekend kan worden.

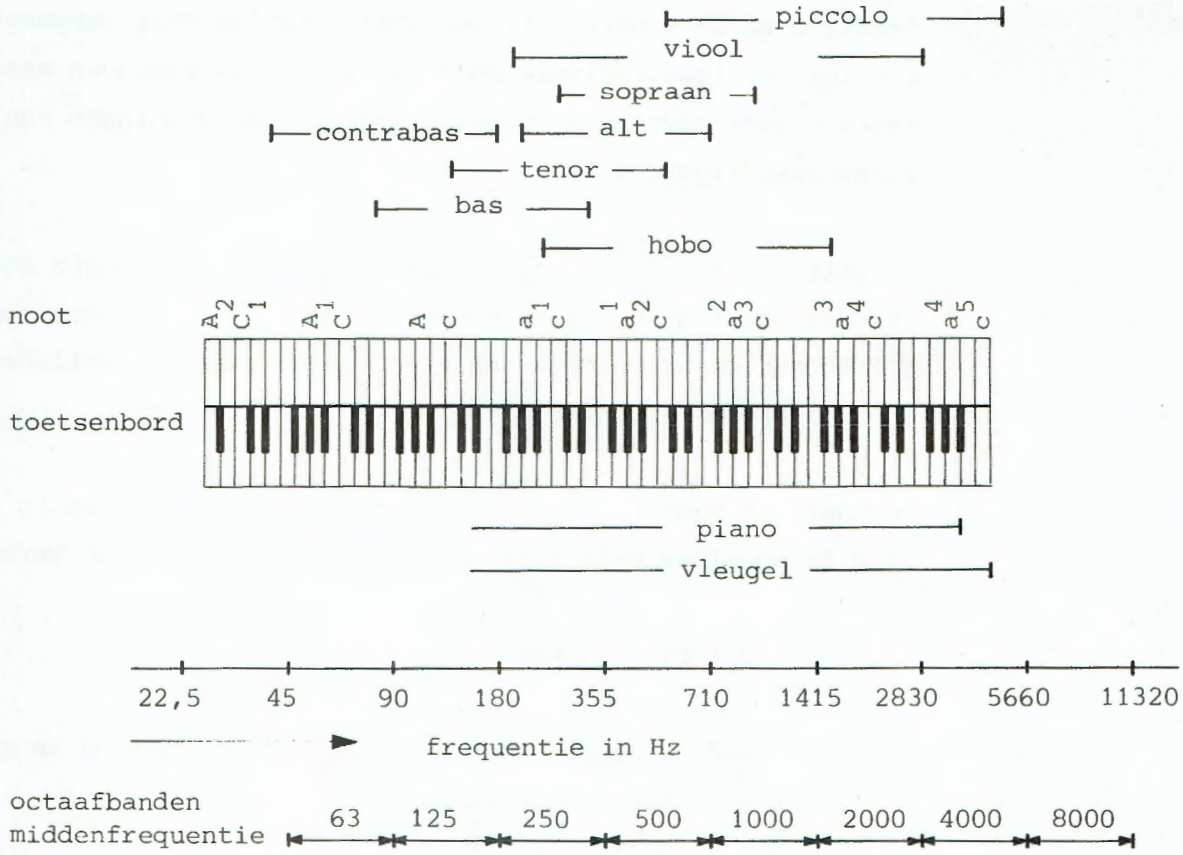
$$c_{lucht} = 340 \text{ m/s} \qquad (\text{bij ca. } 20^{o}\text{ C})$$

De golflengte bij een bepaalde frequentie kan worden uitgerekend volgens:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{340}{f} \qquad [m] \qquad (1\text{-}6)$$

Voor een aantal frequenties is dit in tabel 1-3 weergegeven.

Ook in andere materialen kunnen longitudinale trillingen voorkomen. De voortplantingssnelheid is afhankelijk van het soort materiaal (zie tabel 1-4). Vanzelfsprekend gelden dan ook voor de golflengten andere getallen.



figuur 1-7: Indeling van het frequentiegebied in octaafbanden

1.7 GELUIDSPECTRUM

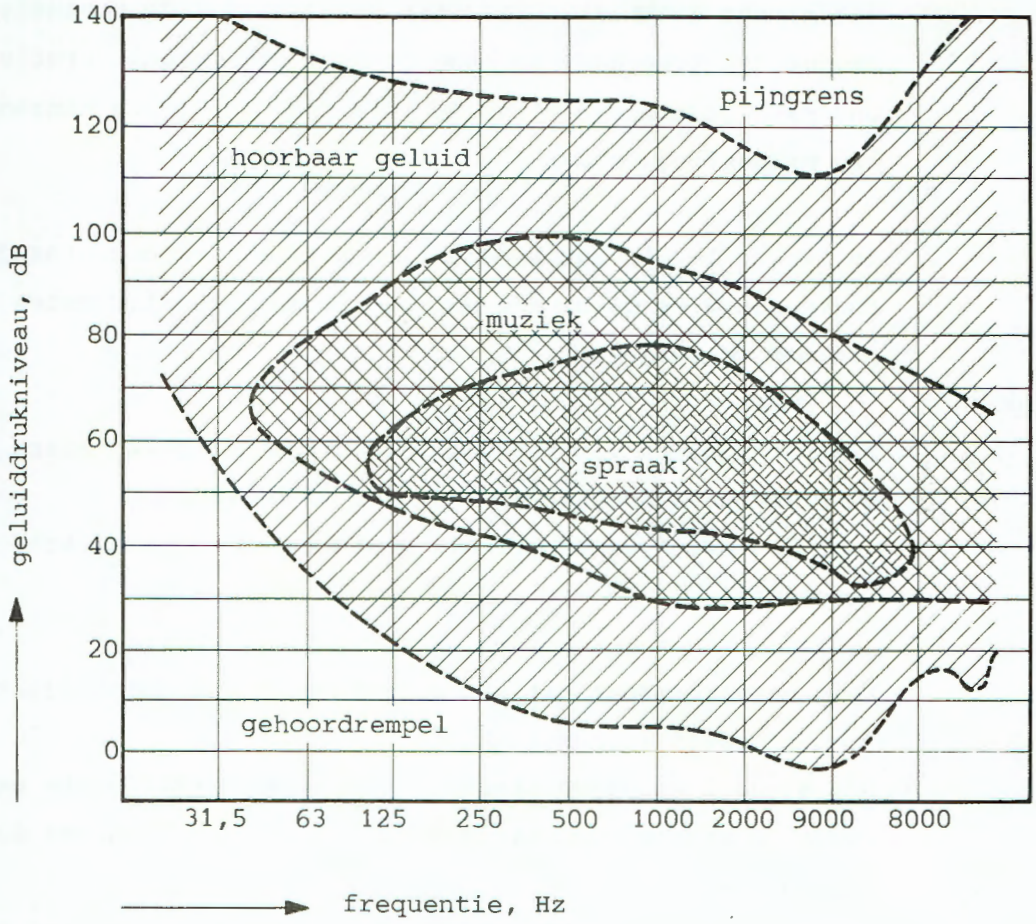
Wanneer men wil weten hoe de geluidenergie is verdeeld over het frequentiegebied, dan wordt meestal gebruik gemaakt van een stelsel van internationaal genormaliseerde octaafbanden. Een octaafband dankt zijn naam aan het feit dat de bovenste grensfrequentie twee maal zo hoog is dan (het octaaf vormt van) de onderste grensfrequentie. De octaafbanden worden aangeduid met hun middenfrequentie.

In figuur 1-7 is het frequentiegebied met de octaafbanden, een toetsenbord en de omvang van enkele muziekinstrumenten en zangstemmen weergegeven.

Bij het bepalen van het geluidspectrum wordt in iedere octaafband het geluiddrukniveau gemeten of berekend.
Voor het meten wordt gebruik gemaakt van elektronische meetinstrumenten.

Zo'n meter bestaat uit een microfoon die de geluiddrukken (trillingen) omzet in een elektrisch signaal.
Dit signaal wordt versterkt, en via een elektronisch netwerk wordt de effectieve waarde bepaald en vergeleken met de vergelijkingswaarde.
Het resultaat (in dB) wordt met behulp van een wijzer met schaalverdeling, of met behulp van een display (cijfers) zichtbaar gemaakt.

Wanneer men het spectrum van een geluid wil bepalen, de verdeling van de geluidenergie over het frequentiegebied, dan wordt in de geluidniveaumeter een elektronisch filter opgenomen.
Zo'n filter laat slechts een gedeelte van het frequentiegebied door.
Meestal wordt een zogenaamd octaaffilter gebruikt, dat werkt met de hiervoor genoemde, genormaliseerde, octaafbanden.



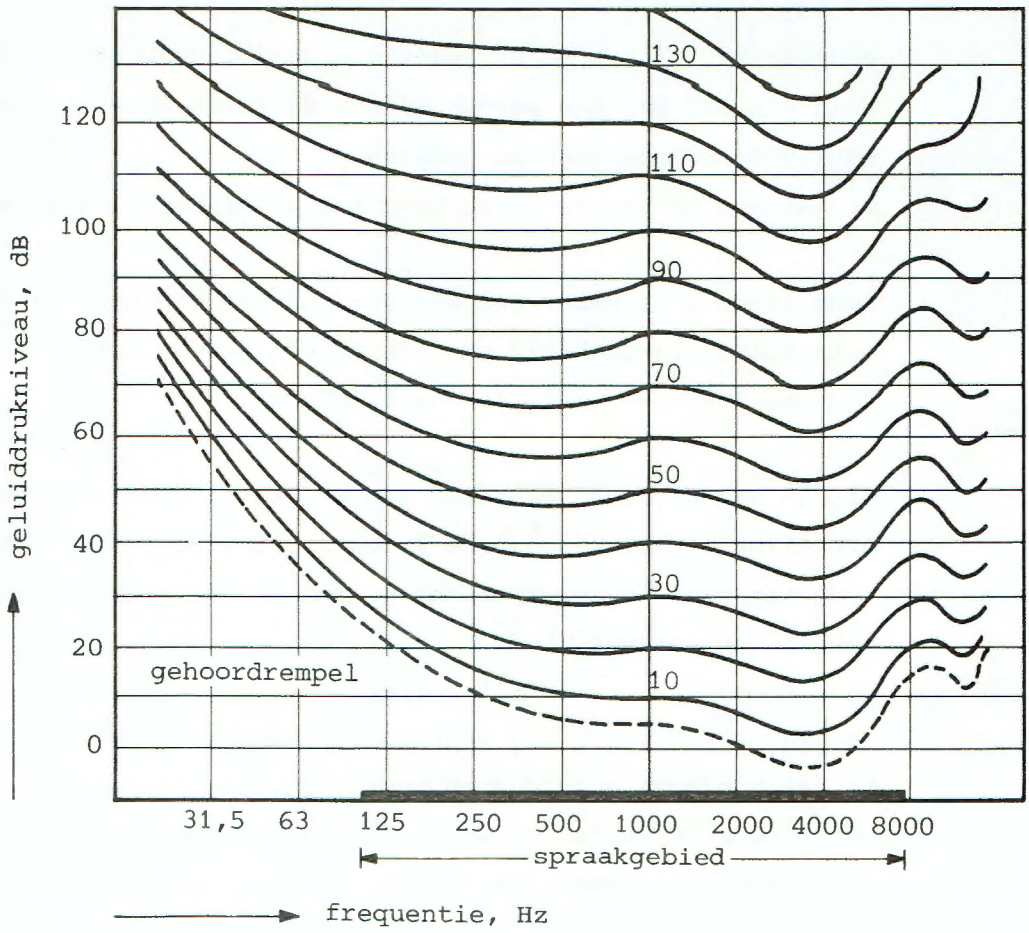
figuur 1-8: Globale weergave van het gebied waarin frequentie en geluidsterkte van het hoorbare geluid, de muziek en de menselijke spraak zijn gelegen

Wanneer het filter wordt ingesteld op (bijvoorbeeld) de octaafband van 500 Hz, dan worden alleen de frequenties tussen 355 Hz en 710 Hz doorgelaten en gemeten.
Zo kan men in iedere octaafband het geluiddrukniveau bepalen.

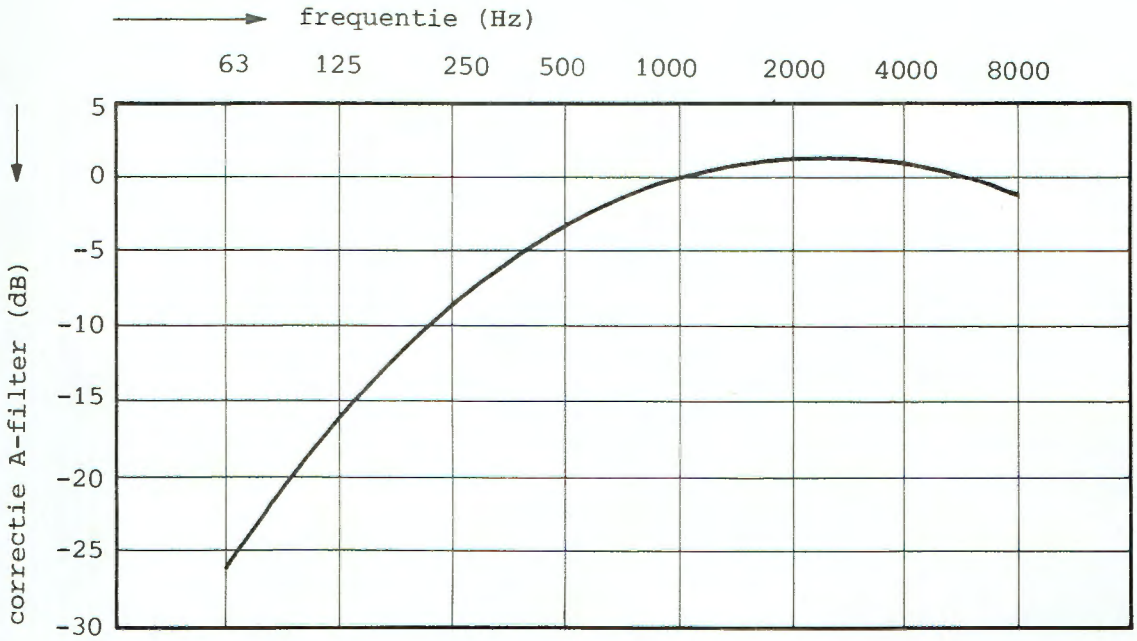
Voor een nog nauwkeuriger analyse kan met een ander filter iedere octaafband bijvoorbeeld weer in drieën worden verdeeld; en ook nog smallere frequentiebanden zijn mogelijk.

Uit de octaafbandniveaus kan men eventueel het totale geluiddrukniveau (over het gehele frequentiegebied) bepalen door ze twee aan twee te superponeren (zie 1-4) of op te tellen met behulp van formule (1-3).

In figuur 1-8 wordt nog weergegeven hoe groot het gebied is waarin het hoorbare geluid zich bevindt, welk deel globaal ingenomen wordt door de muziek en welke frequenties en geluiddrukniveaus voorkomen bij wenselijke spraak.



figuur 2-1: Isofonen (lijnen van gelijke luidheid) volgens ISO-R220 (1961)



figuur 2-2: Correctie van het geluiddrukniveau bij "A-weging"

2 BEOORDELING VAN EEN GELUIDSPECTRUM

2.1 GEVOELIGHEID VAN HET OOR VOOR VERSCHILLENDE TONEN

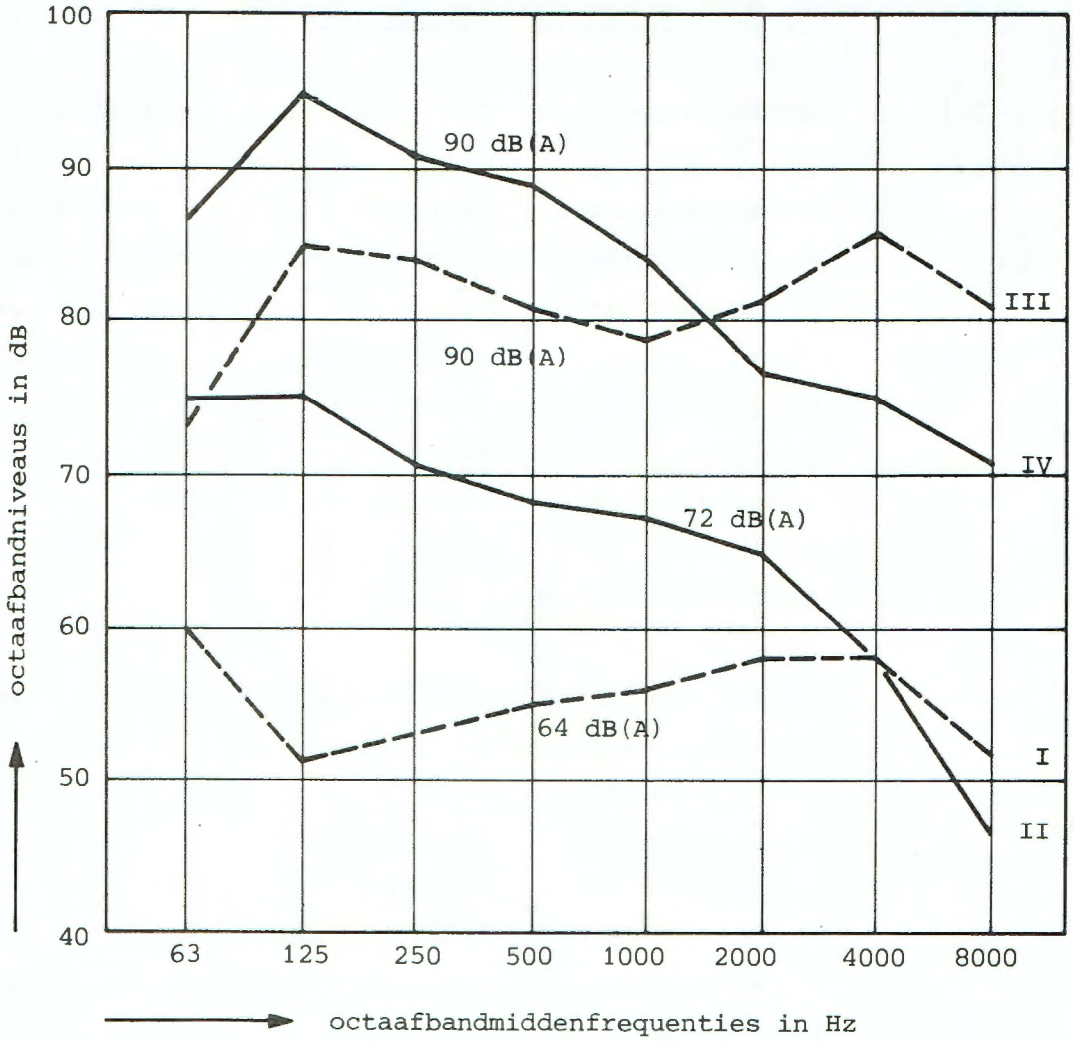
Het menselijk oor is niet voor alle tonen even gevoelig. Zo wordt bijvoorbeeld een toon van 1000 Hz en 30 dB als even luid gewaardeerd dan een toon van 63 Hz en 53 dB. Door middel van proeven zijn zogenaamde isofonen vastgesteld. Dat zijn lijnen van gelijke luidheid (zie figuur 2-1). De weergegeven krommen zijn geldig voor zuivere tonen bij vrije geluiduitbreiding, waargenomen door beide oren.

2.2 GEWOGEN NIVEAU, dB(A)

Wanneer men een geluidspectrum 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.
Hiervoor wordt bij het meetinstrument een filter toegepast dat de gevoeligheid van het menselijk oor nabootst. Het gehele frequentie gebied wordt dan in één keer (gewogen) gemeten.
Het aldus bepaalde geluidniveau wordt uitgedrukt in dB(A).
In figuur 2-2 is het verloop van de "A-weging" over het frequentie gebied weergegeven.

Wanneer het A-filter wordt uitgeschakeld worden alle frequenties tegelijk en onverzwakt gemeten. Het resultaat van zo'n "lineaire" meting geeft men ook wel aan als dB(Lin).

In figuur 2-3 worden enige voorbeelden van spectra gegeven.
In deze figuur valt op dat, hoewel de octaafbandniveaus bij de lage frequenties (63, 125, 250, 500 Hz) bij spectrum IV (stijgend straalvliegtuig) zo'n 10 dB hoger zijn dan bij spectrum III (landend straalvliegtuig) het totale geluidniveau (L_A) voor beide spectra 90 dB(A) is.



figuur 2-3: Voorbeeld van enige geluidspectra

I telexruimte III landend straalvliegtuig

II stadsverkeer IV opstijgend straalvliegtuig

Middenfrequenties van de octaafbanden

63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Hz
-26,1	-16,1	-8,6	-3,6	0	+1,2	+1,0	-1,0	dB

tabel 2-1: Correctie A-weging per octaafband

Dit wordt veroorzaakt door de in de A-waardering ingebrachte gevoeligheid van het menselijk oor, waarbij de lage frequenties verzwakt worden gemeten.

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 geluidisolatie van een gevel, is de vorm van het spectrum echter wel belangrijk.
Zo is de geluidisolatie van alle constructies (dus ook van glas) bij lage frequenties het kleinst (zie verderop).
Het geluid van spectrum IV zal daarom meer problemen geven dan het geluid van spectrum III, ondanks het feit dat beide een geluidniveau van L_A = 90 dB(A) vertegenwoordigen.

Gelukkig is echter van veel soorten geluid de vorm van het spectrum bekend, zodat bij metingen meestal kan worden volstaan met het vastleggen van L_A in dB(A).

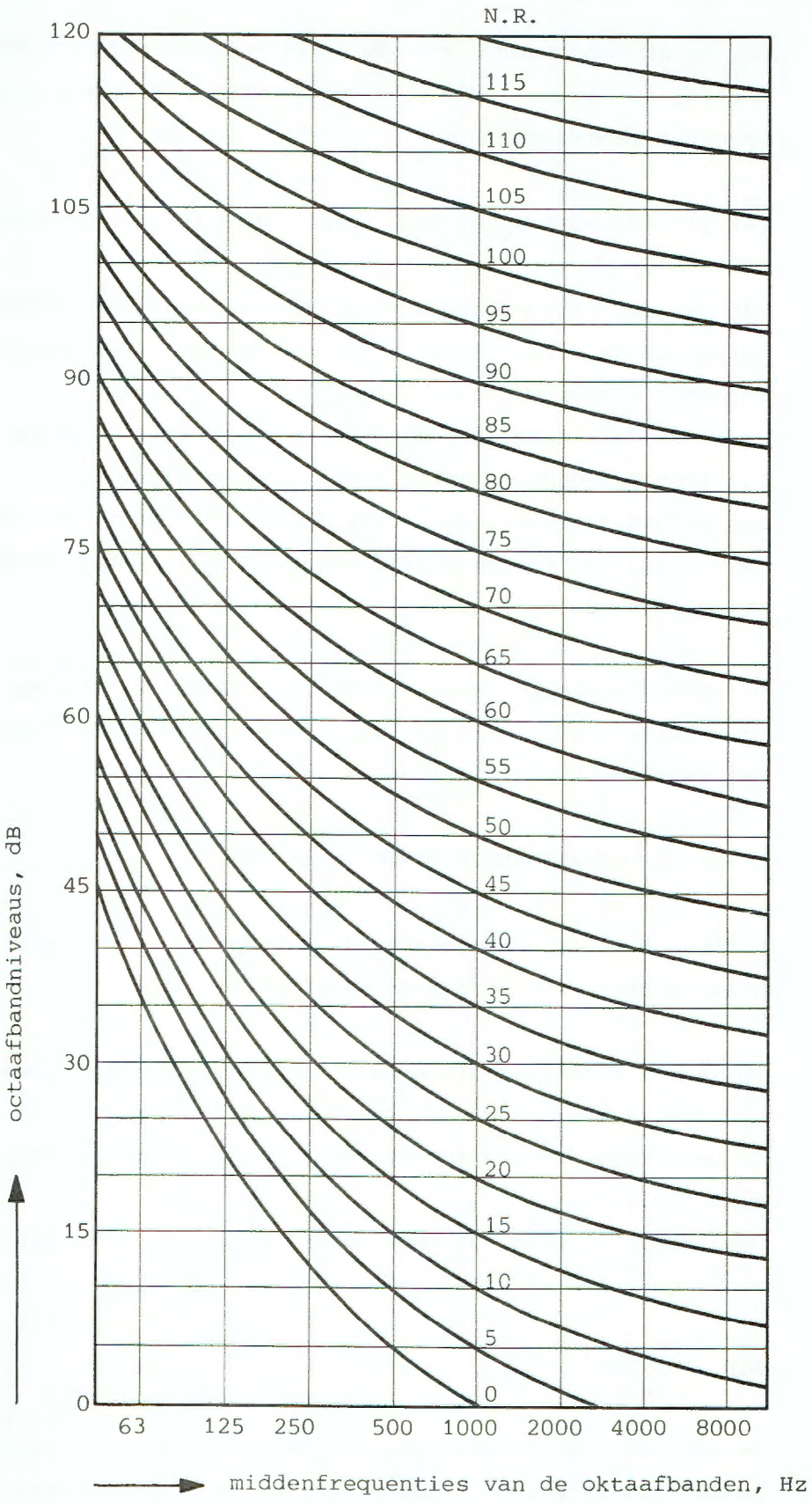
2.3 OMREKENEN OCTAAFBANDSPECTRUM IN dB(A)

Wanneer men uit een octaafbandspectrum het totale geluiddruknivеau in dB(A) wil berekenen gaat dit als volgt.

Op iedere octaafbandniveau wordt de "A-correctie" toegepast zoals die is weergegeven in tabel 2-1.
De gecorrigeerde niveaus worden nu opgeteld met behulp van formule (1-3).
Ook kunnen ze twee aan twee worden gesuperponeerd met behulp van figuur 1-2 of tabel 1-2.

2.4 N.R.-KROMMEN

Om het geluiddrukniveau bij verschillende frequenties te kunnen beoordelen zijn zogenaamde N.R.(noise rating)-krommen ontwikkeld.
Een internationaal genormaliseerd systeem is aangegeven in de



figuur 2-4: N.R.-krommen

ISO recommendation R 1996 (zie figuur 2-4 en tabel 2-2).
Voor het gebruik van de N.R.-krommen moet het geluid worden geanalyseerd naar geluiddrukniveaus in de genormaliseerde octaafbanden.

Bij het beoordelen van het gevonden octaafbandspectrum geeft men het nummer aan van de N.R.-kromme die nog juist niet wordt overschreden.
Tussen de krommen, die met tussenruimten van 5 dB zijn gegeven, kan worden geïnterpoleerd.
Het voordeel van een beoordeling van het geluid op deze wijze is gelegen in het feit dat men direct kan zien bij welke frequentie het mis gaat. Dat laatste is erg belangrijk met betrekking tot de eventueel te nemen maatregelen.
De N.R.-krommen hebben in afwijking van de isofonen (figuur 2-1) een continu dalend verloop. Dit komt voort uit het feit dat de hoge tonen relatief meer bijdragen tot de hinderlijkheid van een geluid dan tot de luidheid. De N.R.-krommen zijn lijnen van constante hinder; de isofonen zijn lijnen van constante luidheid.

Het voordeel van meten in dB(A) is dat met één enkele meting kan worden volstaan, terwijl voor het bepalen van een N.R.-waarde het geluid in een aantal octaafbanden moet worden gemeten.
Uit een octaafbandspectrum kan men wel het geluiddrukniveau L_A in dB(A) bepalen; andersom is dit niet mogelijk.
Tussen L_A en N.R.-waarde is geen vast verband. Dit is afhankelijk van het spectrum.
Bij het stellen van eisen kan men echter uitgaan van de relatie

$$L_A = \text{N.R.} + 5 \qquad (2\text{-}1)$$

Zo stelt men bijvoorbeeld dat het achtergrondgebied ten gevolge van de technisch installatie in een bepaald vertrek niet hoger mag zijn dan N.R. 30 ofwel 35 dB(A).

NR	oktaafbandniveaus (dB)							
	Middenfrequenties van de oktaafbanden (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0	35,5	22,0	12,0	4,8	0	-3,5	-6,1	-8,0
5	39,4	26,3	16,6	9,7	5	+1,6	-1,0	-2,8
10	43,4	30,7	21,3	14,5	10	6,6	+4,2	+2,3
15	47,3	35,0	25,9	19,4	15	11,7	9,3	7,4
20	51,3	39,4	30,6	24,3	20	16,8	14,4	12,6
25	55,2	43,7	35,2	29,2	25	21,9	19,5	17,7
30	59,2	48,1	39,9	34,0	30	26,9	24,7	22,9
35	63,1	52,4	44,5	38,9	35	32,0	29,8	28,0
40	67,1	56,8	49,2	43,8	40	37,1	34,9	33,2
45	71,0	61,1	53,6	48,6	45	42,2	40,0	38,3
50	75,0	65,5	58,5	53,5	50	47,2	45,2	43,5
55	78,9	69,8	63,1	58,4	55	52,3	50,3	48,6
60	82,9	74,2	67,8	63,2	60	57,4	55,4	53,8
65	86,8	78,5	72,4	68,1	65	62,5	60,5	58,9
70	90,8	82,9	77,1	73,0	70	67,5	65,7	64,1
75	94,7	87,2	81,7	77,9	75	72,6	70,8	69,2
80	98,7	91,6	86,4	82,7	80	77,7	75,9	74,4
85	102,6	95,9	91,0	87,6	85	82,8	81,0	79,5
90	106,6	100,3	95,7	92,5	90	87,8	86,2	84,7
95	110,5	104,6	100,3	97,3	95	92,9	91,3	89,8
100	114,5	109,0	105,0	102,2	100	98,0	96,4	95,0
105	118,4	113.3	109,6	107,1	105	103,1	101,5	100,1
110	122,4	117,7	114,3	111,9	110	108,1	106,7	105,3
115	126,3	122,0	118,9	116,8	115	113,2	111,8	110,4
120	130,3	126,4	123,6	121,7	120	118,3	116,9	115,6
125	134,2	130,7	128,2	126,6	125	123,4	122,0	120,7
130	138,2	135,1	132,9	131,4	130	128,4	127,2	125,9

tabel 2-2: oktaafbandniveaus en N.R.-krommen

2.5 BEOORDELEN VAN EEN IN STERKTE VARIËREND GELUID (VERKEERSLAWAAI EN DERGELIJKE)

Bij het beoordelen van een geluid waarvan het geluiddrukniveau sterk varieert in de tijd, zoals langs een autoweg, kan niet met een eenvoudige meting worden volstaan.
Hier is het nodig om over langere tijd het verloop van het geluiddrukniveau vast te leggen, zodat hieruit een soort gemiddelde kan worden bepaald.
Het meest gebruikt wordt het zogenaamde equivalente geluiddrukniveau (L_{eq}). Dat 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. Wanneer het equivalente geluiddrukniveau wordt bepaald in dB(A) spreekt men van een equivalent geluidniveau.
Ook is het mogelijk te bepalen welk geluiddrukniveau gedurende een bepaald percentage van de tijd wordt overschreden.
Zo betekent L_{10} het geluiddrukniveau 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".

2.6 TOELAATBARE GELUIDNIVEAUS

In 12.1 wordt aangegeven aan welke waarden de geluidniveaus in verschillende ruimten moeten voldoen.

Het is duidelijk dat de eis voor verkeerslawaai in een slaapkamer strenger is dan in een typekamer, enz.
Ook maakt het verschil of een geluid erg continu is (mechanische ventilatie en dergelijke) of wisselend in sterkte (verkeerslawaai, fabrieken), dan wel sterke pieken vertoont (vliegtuigen, treinen).

Met betrekking tot woonhuizen wordt een en ander hieronder besproken.

Aard van de woonomgeving	Aanbevolen grenswaarde, dB(A)		
	dag	avond	nacht
1. landelijke omgeving	40	35	25
2. rustige woonwijk	45	40	30
3. woonwijk in stad	50	45	35
4. woonwijk nabij hoofdweg, drukke spoorlijn of in stad met enkele werkplaatsen enz.	55	50	40
5. stadscentrum (bedrijven, handel, kantoren, vermaakcentra)	60	55	45
6. gebied met voornamelijk zware industrie	65	60	50

tabel 2-3: Aanbevolen grenswaarden van het geluidniveau voor de woonomgeving

Geluid afkomstig van installaties voor de aan- en afvoer van water:

in dezelfde woning 40 dB(A) *)

niet in dezelfde woning 35 dB(A)

Geluid afkomstig van overige installaties (ventilatie enz.):

al of niet in dezelfde woning 30 dB(A)

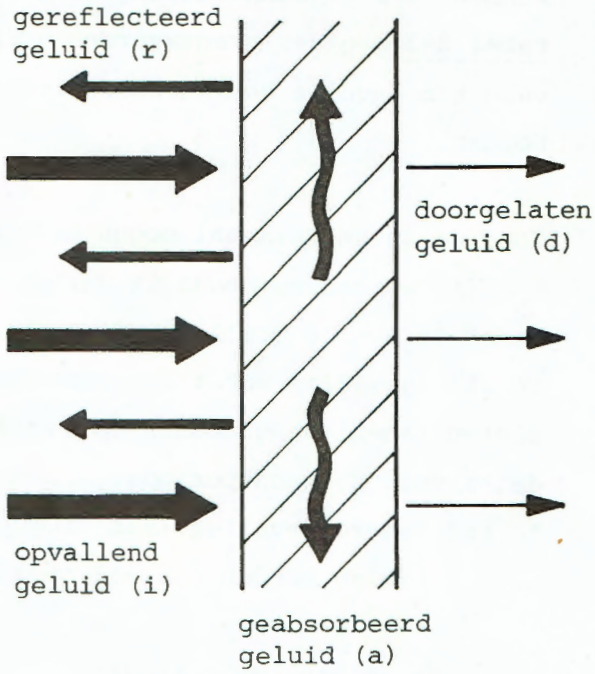
*) Deze eis geldt niet voor de ruimte waarin het geluidproducerende toestel is geplaatst.

tabel 2-4: Eisen voor achtergrondgeluid door installaties in woningen (NEN 1070)

Naar aanleiding van de bestaande en op handen zijnde wetgeving kunnen voor de woonomgeving (dus buiten de woningen) de in tabel 2-3 gegeven grenswaarden voor het equivalente geluidniveau ten gevolge van verkeer, industrie, enz. worden aangehouden.

Voor wegverkeerslawaai mogen deze grenswaarden tijdelijk met 5 dB(A) worden verhoogd in verband met het feit dat in de toekomst de auto's stiller zullen worden.
In alle gevallen wordt de grenswaarde voor binnenshuis (met gesloten ramen) aangehouden op 35 dB(A) voor de dagperiode en 25 dB(A) voor de nachtperiode.
In bijzondere gevallen (saneringssituaties en dergelijke) mogen deze getallen worden gesteld op 45 dB(A) respectievelijk 35 dB(A).

Voor het geluid, veroorzaakt door installaties in woningen worden in de NEN 1070 eisen gesteld. De getallen gelden zowel voor het continu geluid als voor de maximale (top) niveaus in kamers (tabel 2-4).



figuur 3-1: Opvallende en doorgelaten, geabsorbeerde en gereflecteerde geluidenergie

3 GELUIDABSORPTIE

3.0 INLEIDING

Wanneer geluid op een constructie valt wordt een gedeelte gereflecteerd, een gedeelte wordt doorgelaten en een gedeelte blijft in de constructie achter (zie figuur 3-1).

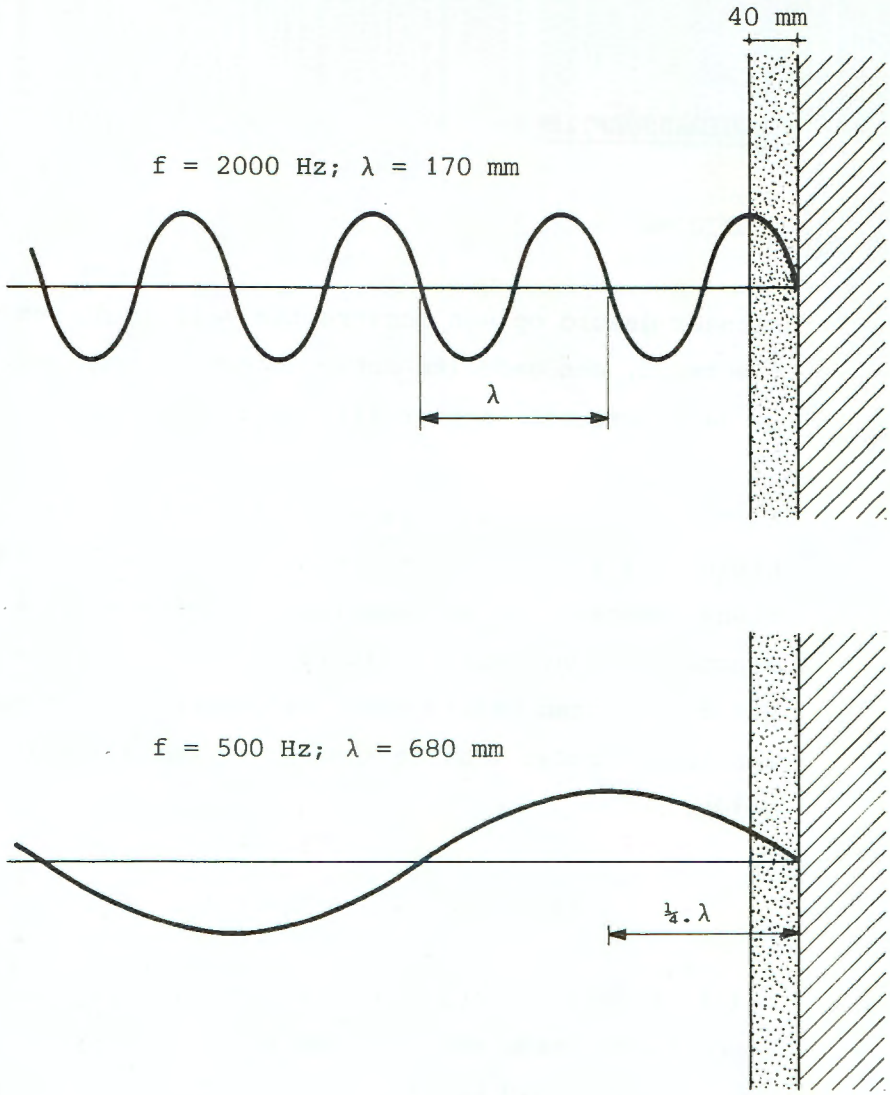
De hoeveelheid geluid die wordt doorgelaten is doorgaans erg klein. Bij een normale halfsteens muur is dit slechts ca. één tienduizendste van de opvallende geluidenergie en zelfs bij een eenvoudige boarddeur is dit toch nog maar ca. één honderdste. Het doorgelaten geluid wordt bij absorptieproblemen daarom verwaarloosd, zodat voor de absorptie- en reflectiecoëfficiënten geldt:

$$a + r = 1 \quad \text{of} \quad a = 1 - r \qquad (3\text{-}1)$$

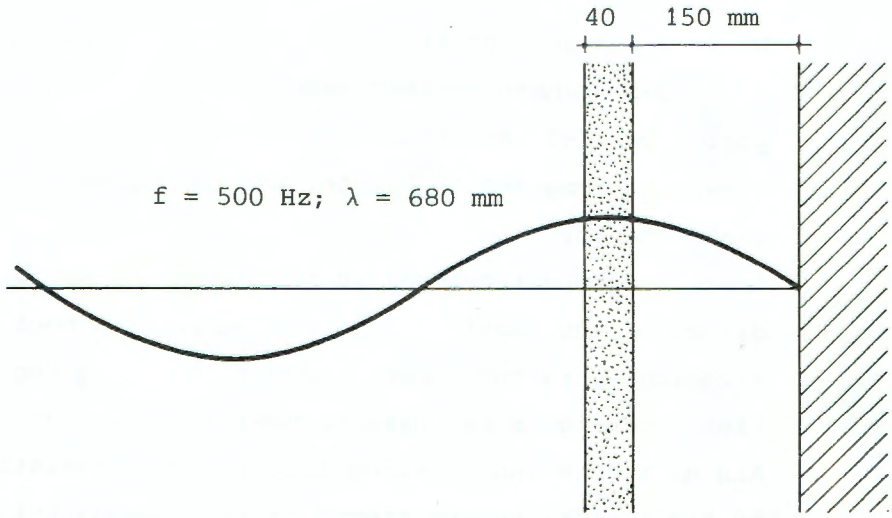
Wat niet wordt gereflecteerd wordt geabsorbeerd, en andersom. Goed absorberende constructies kunnen absorptiecoëfficiënten van a = 0,7 - 0,9 behalen over het frequentiegebied van 500 - 2000 Hz (zie 12.2).

3.1 ABSORPTIE IN POREUZE MATERIALEN

Wanneer een geluidgolf in een poreus materiaal binnendringt ondervinden de heen en weer gaande luchtdeeltjes wrijving in de poriën van het materiaal. Door deze wrijving wordt geluidenergie (beweging) omgezet in warmte. Het geluid wordt door het materiaal geabsorbeerd.
Om te zorgen dat het geluid het materiaal kan binnendringen moet dit zo poreus mogelijk zijn. Het 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.



figuur 3-2: Invloed golflengte en laagdikte (poreus materiaal) op geluidabsorptie



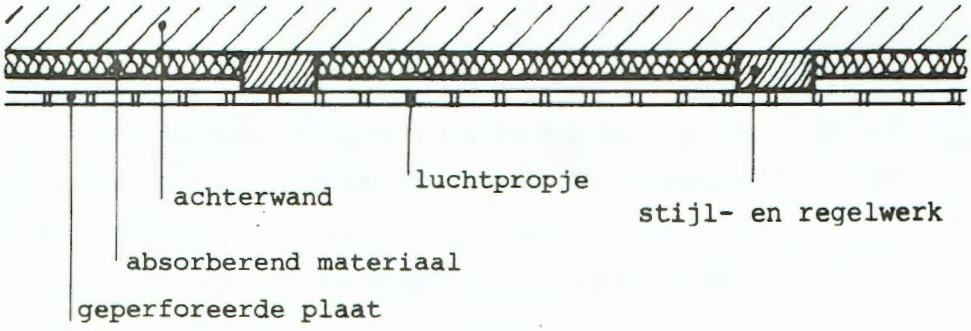
figuur 3-3: Schijnbare vergroting laagdikte geeft betere geluidabsorptie

Verder is ook de dikte van het materiaal belangrijk. Om goed te absorberen moet een laag materiaal feitelijk minstens een kwart golflengte van het te absorberen geluid dik zijn (figuur 3-2).

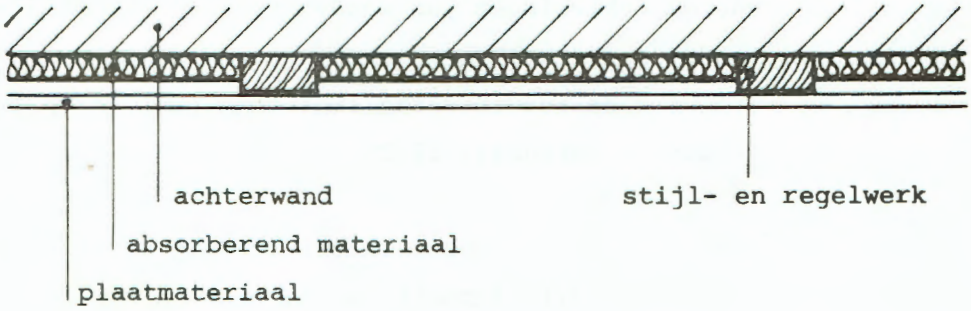
Dit valt als volgt in te zien.
Het geluid dat op de constructie valt vormt hierin een soort staande golf. Dicht bij de muur is de snelheid van de luchtdeeltjes zeer gering, op het muuroppervlak is deze zelfs nul. De deeltjessnelheid is maximaal op een afstand van $\frac{1}{4}.\lambda$ van de muur; daar treden dus de grootste wrijvingsverliezen op.
Nu is het natuurlijk niet altijd goed mogelijk om absorberende lagen in zo'n grote dikte aan te brengen. Dit is echter ook niet nodig. Door het materiaal op een spouw aan te brengen kan men zorgen dat het zich juist bevindt op de plaats van de grootste deeltjessnelheid (figuur 3-3).

Van het bovenbeschreven effect wordt dankbaar gebruik gemaakt bij bijvoorbeeld verlaagde plafonds. Evenzo vormt het de reden waarom bekledingen van wanden vaak op een stijl- en regelwerk worden aangebracht.
Zie voor de absorberende eigenschappen van de verschillende constructies paragraaf 12.2.

Vaak zijn absorberende materialen erg zacht en kwetsbaar (minerale wol enz.) en moeten ze tegen mechanische beschadigingen worden beschermd. Dit kan gebeuren met geperforeerde plaat van metaal, hardboard, gips, asbestcement, enz. Om de absorberende eigenschappen niet te beïnvloeden moet het perforatiepercentage echter wel groter zijn dan ca. 20% en mag de onderlinge afstand van de openingen niet groter zijn dan 20 mm.
Ook bekleding met houten latten waartussen een opening wordt gehouden is mogelijk. De latten dienen echter wel zo smal mogelijk te worden gehouden.
Verder is het mogelijk het materiaal af te dekken met een poreus weefsel of vlies, of met een heel dunne kunststoffolie.



figuur 3-4: Geperforeerde panelen, goede absorptie in een frequentiegebied van ca. 300-1500 Hz



figuur 3-5: Niet geperforeerde panelen, absorptie in het frequentiegebied van ca. 50-500 Hz

Het is duidelijk dat men door verven het oppervlak van absorberende materialen zodanig dicht kan maken dat de geluidgolven het materiaal niet meer kunnen binnendringen. Hiermee moet bij de materiaalkeuze terdege rekening worden gehouden.
Grof vezelige materialen kan men soms met een roller verven, waarbij de poriën niet verstopt behoeven te raken en slechts het buitenoppervlak een kleurtje krijgt.
In het andere geval moet men materialen kiezen die of niet zo snel vervuilen, of goed kunnen worden schoongemaakt.

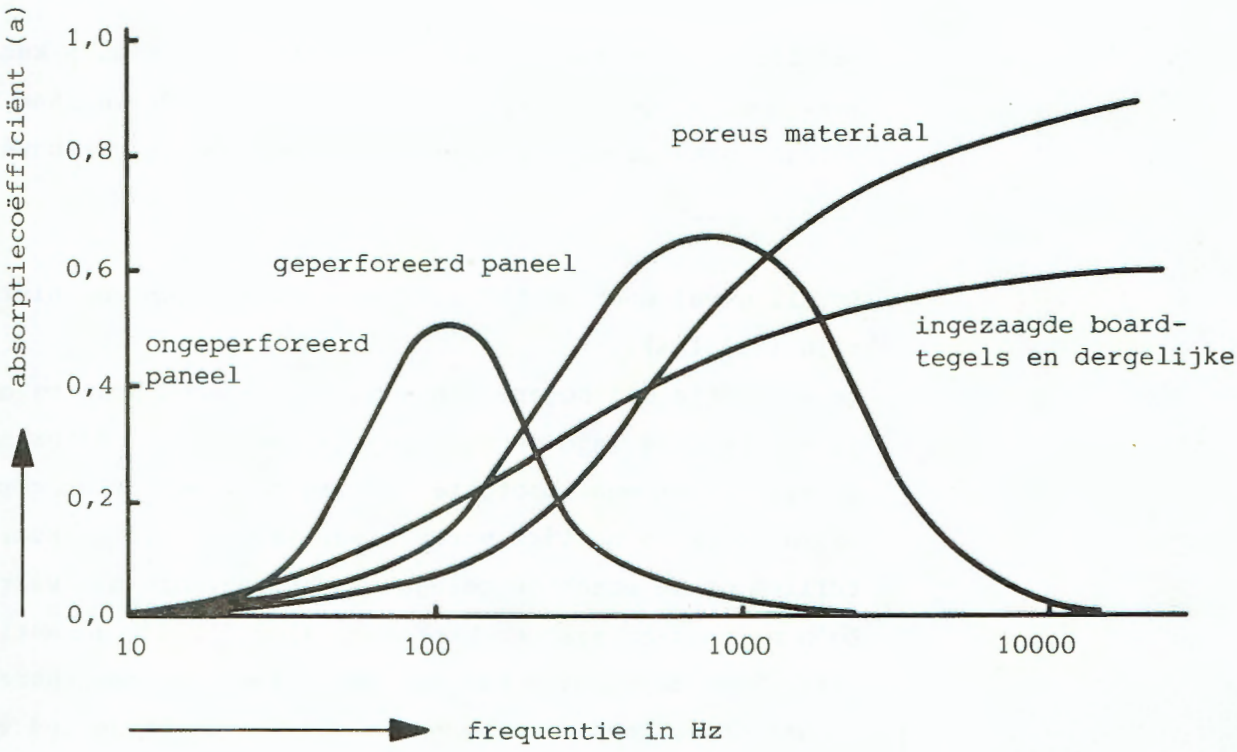
3.2 GEPERFOREERDE PANELEN

De hiervoor genoemde geperforeerde plaatmaterialen kunnen ook heel goed worden toegepast om de absorberende werking van de poreuze materialen naar lagere frequenties te verschuiven (figuur 3-4).

In dit geval moet echter het perforatiepercentage niet te groot zijn (5 à 10%).
De absorptie bij hogere frequenties (van het poreuze materiaal) gaat door deze lage perforatiegraad weliswaar verloren, maar hiervoor komt een absorptie bij lagere frequenties terug.
De lucht in de gaatjes vormt namelijk een soort massa, die kan trillen op de erachter gelegen luchtlaag, 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.

3.3 ABSORPTIE DOOR NIET GEPERFOREERDE PANELEN

Ook plaatmaterialen zoals triplex, spaanplaat, metaal, enz. kunnen geluidabsorberend werken wanneer ze worden aangebracht op een luchtspouw (figuur 3-5). De plaat vormt met de erachter gelegen luchtlaag een massa-veer systeem. De eigenfrequenties van deze trillingen liggen in het gebied van ca. 50 - 500 Hz.
Daarnaast treden in de plaat nog allerlei buiggolven op, met bepaalde eigenfrequenties.



figuur 3-6: Absorptie karakteristieken

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. Door de spouw te vullen met absorberend materiaal (minirale wol) daalt de absorptiecoëfficiënt tot a = 0,25 à 0,50 maar het gebied waarover wordt geabsorbeerd wordt veel breder.
Absorptie door dit soort panelen vindt altijd plaats bij lagere frequenties (50 - 500 Hz).

3.4 ABSORPTIE DOOR INGEZAAGDE (BOARD)TEGELS

De vele soorten ingeboorde of ingezaagde zachtboardtegels of combinatietegels van hardboard en zachtboard of andere vezelmaterialen vormen een soort absorptiemateriaal dat de eigenschappen van de twee voorgaande typen combineert.
Het vezelmateriaal (board) is feitelijk niet poreus genoeg om zonder meer als absorptiemateriaal te dienen. Door de resonantie in de gaatjes of sleuven treedt een goede absorptie op in het gebied van de middenfrequenties. Tevens fungeert de plaats als een ongeperforeerd paneel, waardoor ook de lage tonen wat meer worden geabsorbeerd.
Dit soort platen kunnen rustig worden geverfd (met de roller) omdat het buitenoppervlak toch niet mee doet in het absorptiegedrag. De absorptie vindt plaats in de gaten of sleuven en het achterliggende materiaal.

3.5 ABSORPTIE KARAKTERISTIEKEN

In figuur 3-6 is aangegeven hoe het absorptiegedrag van de verschillende hiervoor beschreven constructies er uit ziet.
Tevens is duidelijk dat, wil men over het gehele frequentiegebied een gelijkmatige absorptie hebben, dit slechts kan worden bereikt door een combinatie van de verschillende mogelijkheden.
Opgemerkt wordt nogmaals dat de absorptiecoëfficiënt van een materiaal voor iedere frequentie anders is.
Zie voor gegevens van materialen en constructies paragraaf 12.

4 GELUIDABSORPTIE EN GELUIDDRUKNIVEAU IN EEN RUIMTE

4.0 INLEIDING

Een bepaalde geluidbron (machine) klinkt in een galmende ruimte, waarin weinig geluidabsorptie aanwezig is veel harder (geeft een hoger geluiddrukniveau) dan in een ruimte met veel geluidabsorptie.

4.1 OPEN RAAM

Als eenheid van geluidabsorptie wordt de "vierkante meter open raam" (m^2 o.r.) gebruikt. 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.

4.2 TOTALE GELUIDABSORPTIE IN EEN VERTREK

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).

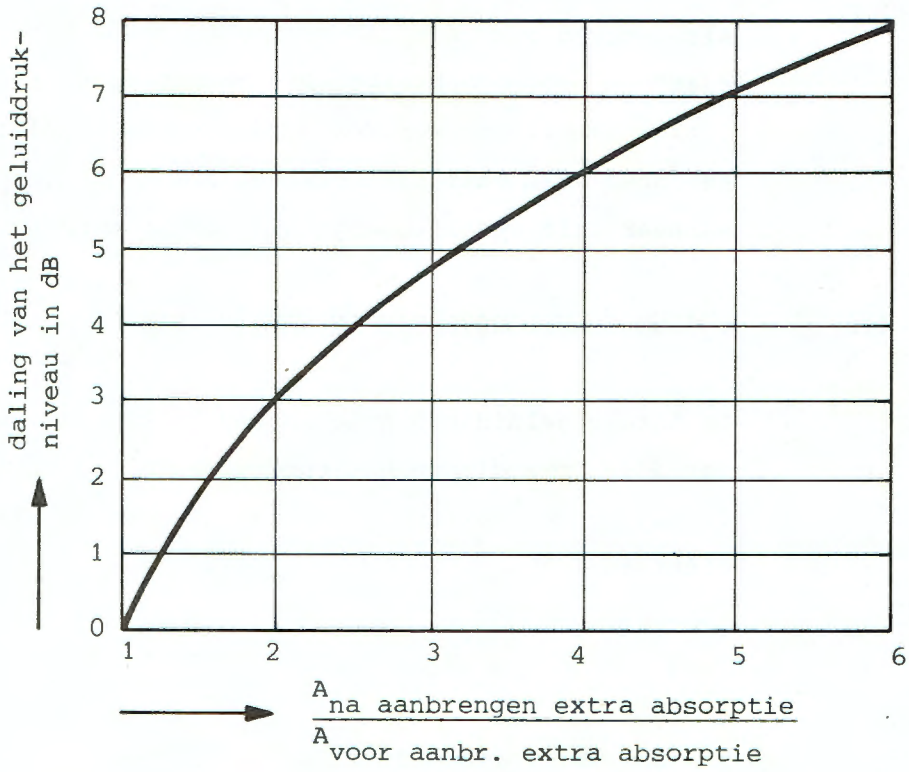
$$A = a_1.S_1 + a_2.S_2 + a_3.S_3 + \ldots\ldots \quad \left[m^2 \text{ o.r.}\right] \quad (4\text{-}1)$$

Zie ook het voorbeeld van het berekenen van de nagalmtijd in 5.1.

Overigens dragen ook personen en voorwerpen (meubilair enz.) in het vertrek bij tot de absorptie van geluid.

4.3 GELUIDINTENSITEIT IN EEN RUIMTE

Als in een gesloten ruimte lawaai wordt geproduceerd zal zich na verloop van tijd een min of meer stationaire toestand instellen.



figuur 4-1: Daling van het geluiddrukniveau in een vertrek door aanbrengen van extra absorptie

Het geproduceerde vermogen zal dan gelijk zijn aan het geabsorbeerde vermogen. Er geldt dan:

$$P = \bar{I}/A \quad \text{of} \quad \bar{I} = P/A \qquad (4\text{-}2)$$

Waarin: P = het geleverde (akoestisch) vermogen in watt
$\bar{I}$ = de gemiddelde geluidintensiteit in W/m^2
A = de totale geluidabsorptie in de ruimte in m^2 o.r.

Het is duidelijk dat de absorptie in de ruimte de geluidintensiteit beïnvloedt en daarmee ook het geluiddrukniveau (zie 1.5).

4.4 VERLAGING VAN HET GELUIDDRUKNIVEAU DOOR EXTRA ABSORPTIE

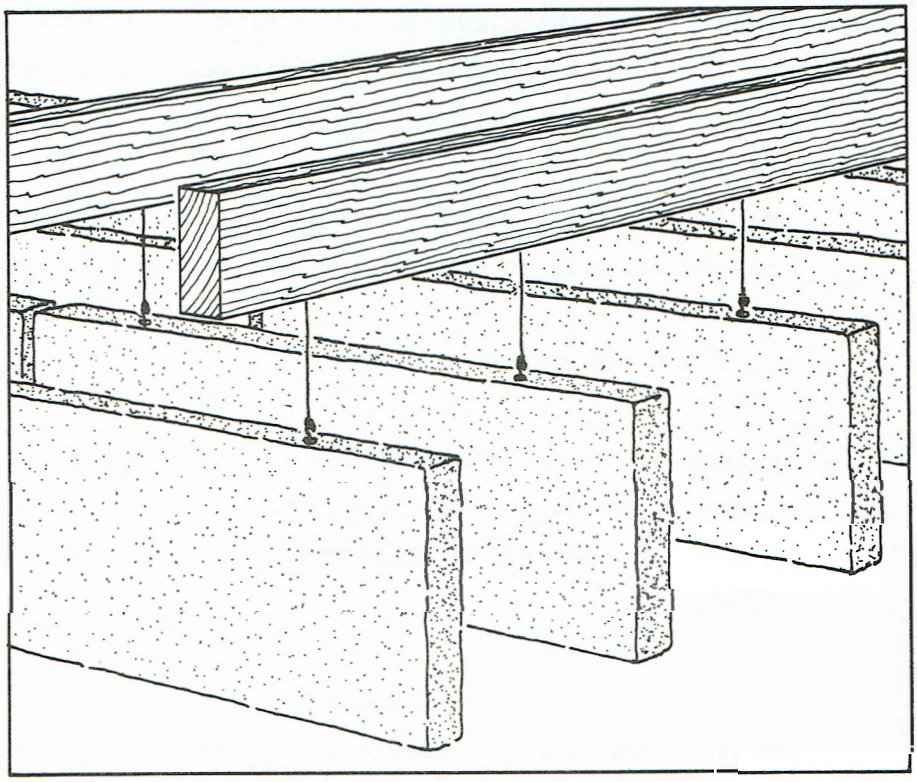
Wanneer in een ruimte veel lawaai wordt geproduceerd (telexruimte, reproductie-afdeling, enz.) kan men trachten het geluiddrukniveau te verlagen door het aanbrengen van extra geluidabsorptie.

De grootte van deze verlaging kan worden gevonden met behulp van de volgende formule, die in figuur 4-1 grafisch is weergegeven.

$$\Delta L = 10 \log \frac{A_{na}}{A_{voor}} \quad [dB] \qquad (4\text{-}3)$$

Waarin: ΔL = daling van het geluiddrukniveau in dB
A_{na} = totale geluidabsorptie in m^2 o.r. na het aanbrengen van de extra absorptie
A_{voor} = idem voor het aanbrengen van de extra absorptie

Bij verdubbelen van de hoeveelheid absorptie wordt twee maal zoveel geluid geabsorbeerd.
Dit betekent een verlaging van het geluiddrukniveau van 3 dB.
Wil men het geluiddrukniveau 6 dB verlagen dan moet de hoeveelheid aanwezige geluidabsorptie worden verviervoudigd. Slechts in gevallen waar het gaat om zeer "kale", galmende ruimten, kan een redelijke niveaudaling worden bereikt.



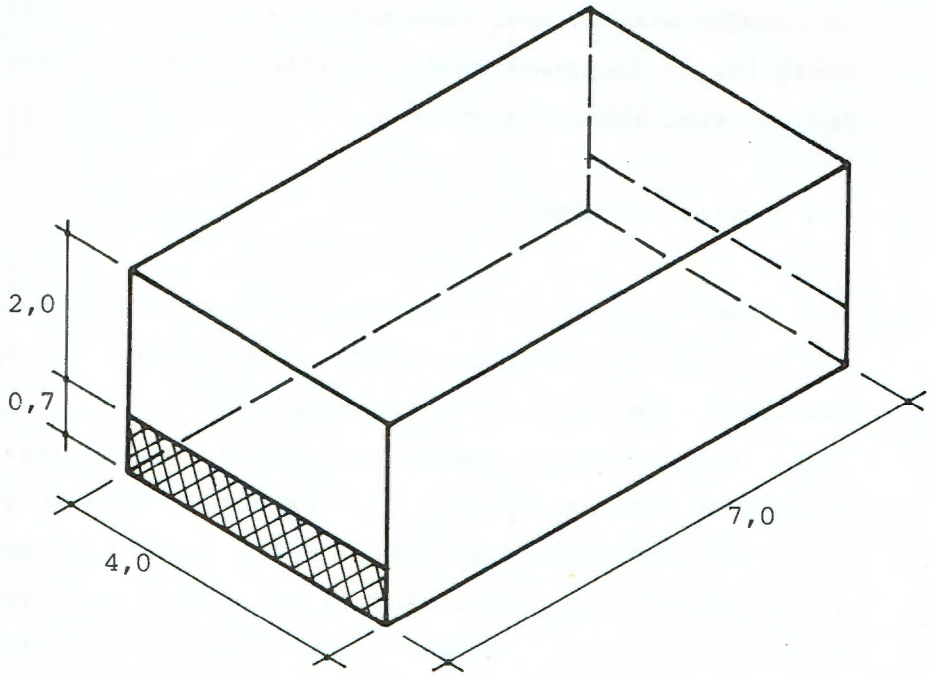
figuur 4-2: Funtionele absorbers (baffles)

In ruimten waar al meer absorptie (verlaagde plafonds enz.) aanwezig is, is doorgaans geen plaats voor nog weer twee of vier keer zo veel absorptiemateriaal.

4.5 FUNCTIONELE ABSORBERS

Voor toepassing in grotere zalen en hallen kan voor de verlaging van het geluiddrukniveau gebruik worden gemaakt van functionele absorbers, ook wel baffles genaamd.
In de meest eenvoudige vorm, voor industriële toepassing, bestaan deze bijvoorbeeld uit in dunne kunststoffolie gehulde dikke platen minerale wol met een breedte van ca. 0,5 meter die verticaal in banen onder het plafond komen te hangen (figuur 4-2).
Op deze manier kan, berekend op de m^2 plafondoppervlak, een absorptiecoëfficiënt van ca. a = 1,6 worden bereikt.

voorbeeld berekening nagalmtijd



Het volume van het vertrek is: $V = 4 \times 7 \times 2{,}7 = 75{,}6\ m^3$

vlak	S	frequentie, Hz											
		125		250		500		1000		2000		4000	
	m^2	a	a.S	a	a.S	a	a.S	a	a.S	a	a.S	a	a.S
plafond	28,0	0,25	7,0	0,29	8,1	0,79	22,1	0,76	21,3	0,74	20,7	0,93	26,0
vloer	28,0	0,02	0,6	0,02	0,6	0,03	0,8	0,03	0,8	0,04	1,1	0,04	1,1
pleisterw.	43,4	0,01	0,4	0,01	0,4	0,02	0,9	0,02	0,9	0,02	0,9	0,04	1,7
glas	16,0	0,10	1,6	0,04	0,6	0,03	0,5	0,02	0,3	0,02	0,3	0,02	0,3
A (m^2 o.r.)			9,6		9,7		24,3		23,3		23,0		29,1
$T = \frac{1}{6}\frac{V}{A} = \frac{1}{6}\frac{75{,}6}{A}$ (s)			1,3		1,3		0,5		0,5		0,5		0,4

5 AKOESTIEK VAN DE RUIMTE

5.1 NAGALMTIJD

De nagalmtijd (T) is een van de belangrijkste akoetische eigenschappen van een ruimte.
Voor ruimten waaraan hoge eisen worden gesteld in verband met muziek of bespreekbaarheid enz. komen daarbij nog zaken als diffusiteit van de ruimte en het juiste gebruik van reflecties tegen wanden of speciaal aangebrachte panelen.

De nagalmtijd is gedefinieerd als de tijd die verloopt voordat, als een geluidbron wordt uitgeschakeld, het geluiddrukniveau 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).
Deze kan worden berekend met de formule van Sabine.

$$T = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{A} \quad [s] \qquad (5\text{-}1)$$

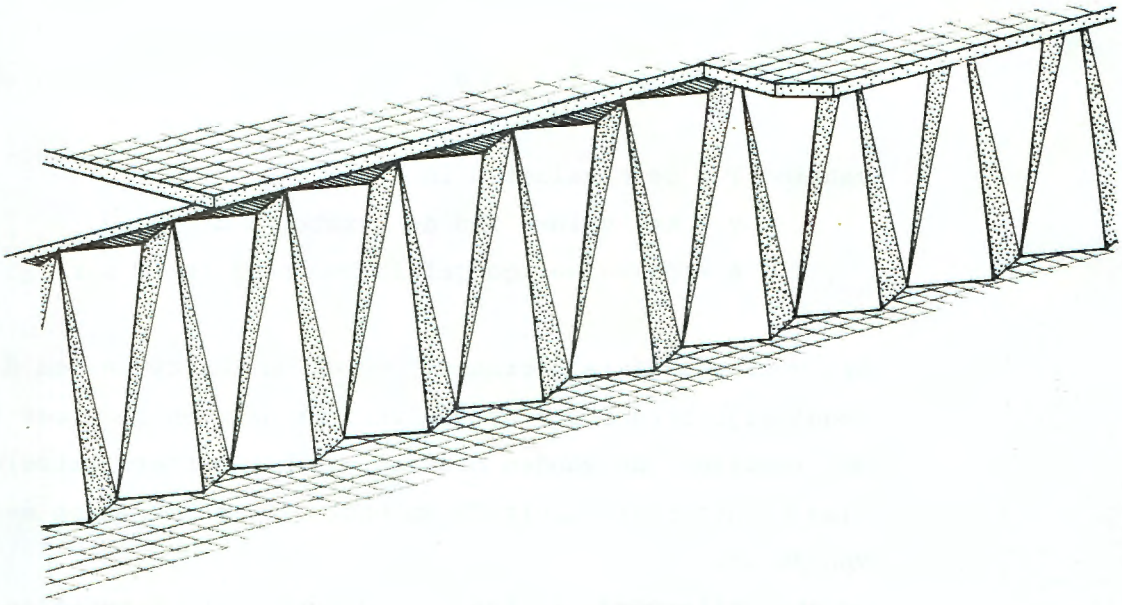
waarin: T = de nagalmtijd in s
V = het volume van de ruimte in m^3
A = de aanwezige geluidabsorptie in m^2 o.r.

Als voorbeeld (zie hiernaast) wordt de absorptie, en daaruit de nagalmtijd berekend voor een vertrek waarvan de vloer is belegd met linoleum, de wanden bestaan uit bepleisterd metselwerk en glas en het plafond uit 25 mm houtwolcementplaat op een spouw van 30 mm.
De absorptiecoëfficiënten van de toegepaste materialen zijn te vinden in de in 12.2 opgenomen tabel.

Omdat de absorptiecoëfficiënt (a) van de materialen afhankelijk is van de frequentie, is ook de nagalmtijd (T) van het vertrek een functie van de frequentie.

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 5-1: Richtwaarden voor de nagalmtijd in ruimten



figuur 5-1: Verstrooiende vlakken moeten dezelfde orde van grootte in afmetingen hebben als de golflengte van het geluid

De werkzaamheden die in een ruimte plaatsvinden bepalen welke nagalmtijd voor die ruimte het beste is.

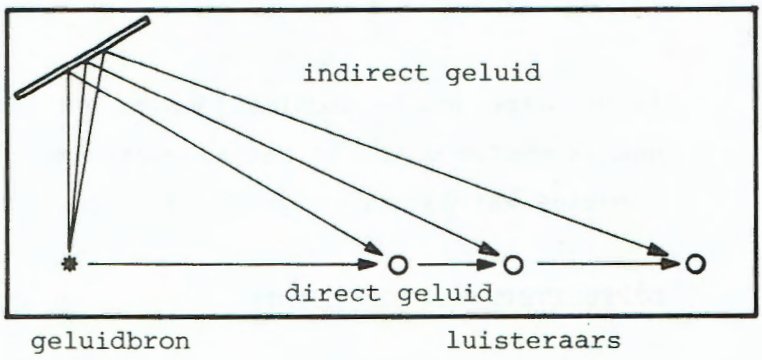
De in tabel 5-1 genoemde getallen zijn richtwaarden.
De grootte van het vertrek (de zaal) speelt bij het bepalen van de gewenste nagalmtijd ook nog een rol, evenals de diffusiteit van de ruimte.

In principe zou de nagalmtijd over het gehele frequentiegebied gelijk moeten zijn. In het algemeen laat men bij de lagere frequenties wat langere nagalmtijden toe en bij de hogere wat kortere.

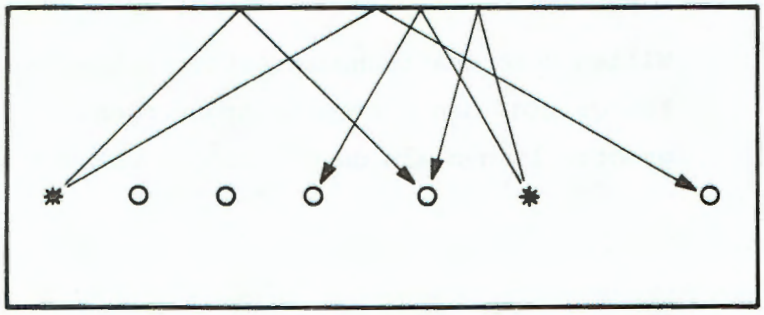
5.2 DIFFUSITEIT VAN EEN RUIMTE

Een andere belangrijke eigenschap van een ruimte is de diffusiteit. Dat betekent, de mate waarin het geluid regelmatig 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 is het nuttig als de wanden niet haaks op elkaar staan (dit voorkomt ook "flutter-echo's", zie verderop) en een gelede opbouw hebben.
Vaak worden daarom een of meer van de wanden of het plafond voorzien van schuine vlakken of andere oneffenheden (figuur 5-1).

Willen deze oneffenheden effect hebben voor de verstrooiing van het geluid, dan moeten de afmetingen wel in dezelfde orde van grootte liggen als de golflengte van het geluid (zie 1.6).



figuur 5-2: Ondersteuning van het directe geluid door nuttige reflecties



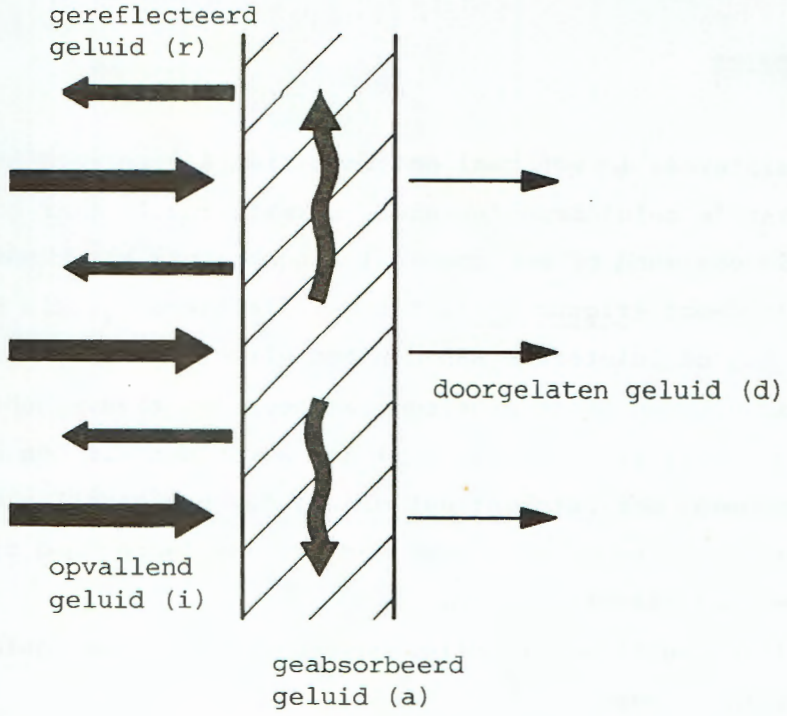
figuur 5-3: Reflecterend plafond (vergaderzaal)

5.3 REFLECTIES

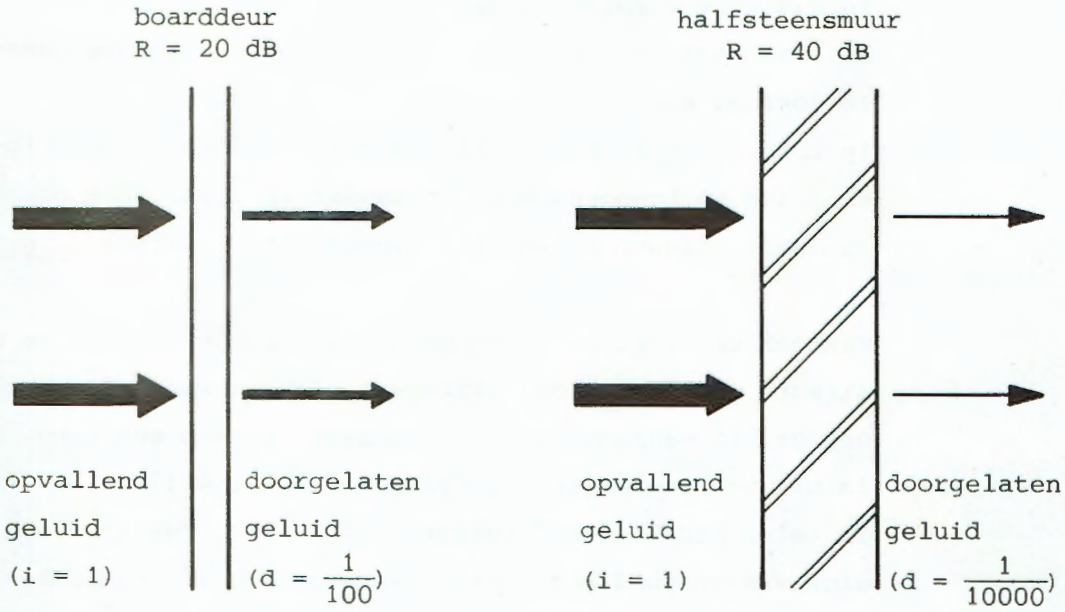
Een luisteraar in een zaal ontvangt niet alleen rechtstreeks geluid van de geluidbron (spreker, orkest, enz.), maar ook geluid dat via een wand of een speciaal aangebrachte klankkaatser wordt gereflecteerd (figuur 5-2). Het gereflecteerde geluid komt iets later bij de luisteraar aan dan het directe geluid, omdat het een langere weg heeft afgelegd. Wanneer dit tijdverschil minder is dan 20 milliseconde (0,02 s) dan wordt het als één geluid waargenomen. Dit betekent dat de weg die het gereflecteerde geluid af moet leggen niet meer dan ca. 7 m langer mag zijn dan de weg van het directe geluid.
Dergelijke nuttige reflecties bevorderen een goede geluidoverdracht in de zaal.

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, 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.
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 wanden en vloer. Het plafond wordt dan hard uitgevoerd en doet dienst als reflector (figuur 5-3).

Wanneer een gereflecteerd geluid later dan 30 à 50 ms dan het directe geluid bij de luisteraar aankomt wordt het niet meer als een geluid waargenomen. Men spreekt dan van een echo. Dit houdt in dat het weglengteverschil meer dan 11 à 17 m is.
In zalen kunnen ook "flutter-echo's" optreden als twee evenwijdige wanden goed reflecteren en meer dan 7 m van elkaar zijn verwijderd. Tussen deze wanden kan het geluid meerdere keren heen en weer kaatsen. In zo'n geval moet één van de wanden, of beide, met absorberend materiaal worden bekleed.



figuur 6-1: Opvallende en doorgelaten, geabsorbeerde en gereflecteerde geluidenergie



figuur 6-2: Luchtgeluidisolatie

6 GELUIDISOLATIE

6.0 INLEIDING

Bij geluidisolatie moet onderscheid worden gemaakt tussen luchtgeluid en contactgeluid.
Een menselijke stem, een toeter, een luidspreker brengen rechtstreeks lucht in beweging; zij veroorzaken luchtgeluid.
Een motor op een betonvloer, een in de wand aangebrachte leiding een menselijke voetstap op een vloer brengen de constructie in trilling. De trillende constructie op zijn beurt straalt weer luchtgeluid af. Dit luchtgeluid kan worden waargenomen. Naar de ontstaansoorzaak noemt men dit geluid echter contactgeluid.

6.1 LUCHTGELUIDISOLATIE VAN EEN CONSTRUCTIE

In 3.0 (Geluidabsorptie) werd het doorgelaten geluid verwaarloosd omdat het zo weinig is vergeleken met het geabsorbeerde en gereflecteerde geluid (figuur 6-1).
Wanneer de geluidisolatie wordt bekeken wordt juist dit deel echter belangrijk, ook al is het maar $\frac{1}{100}$ of $\frac{1}{10000}$ deel van het opvallende geluid (zie figuur 6-2).

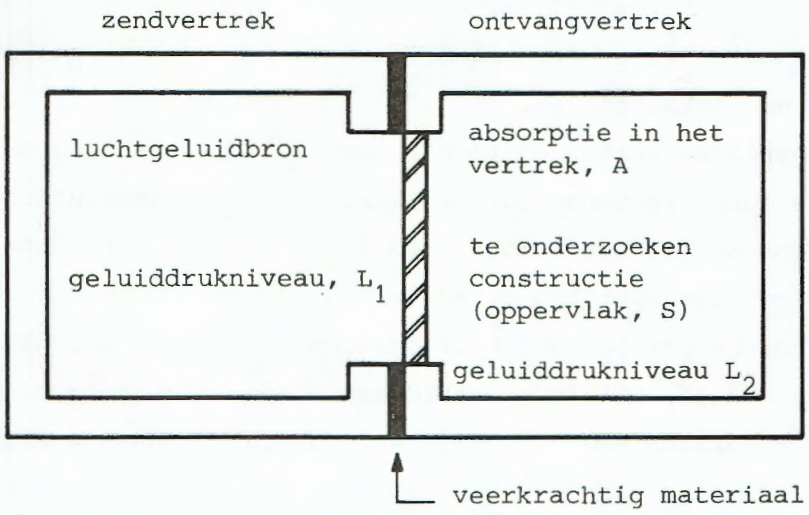
Er geldt: $r + a + d = 1$ (6-1)

ofwel: wat niet wordt gereflecteerd of geabsorbeerd wordt doorgelaten en andersom.

De luchtgeluidisolatie van een scheidingsconstructie is te definiëren als het verschil (in dB) tussen de opvallende geluidintensiteit (I_i) en de doorgelaten geluidintensiteit (I_d).

$$R = 10 \log \frac{I_i}{I_d} \quad [dB] \qquad (6\text{-}2)$$

Waarin: R = de geluidisolatie in dB
I_i = de opvallende geluidintensiteit in W/m^2
I_d = de doorgelaten geluidintensiteit in W/m^2



figuur 6-3: Akoestische meetruimten

$\frac{S}{A}$	$10 \log \frac{S}{A}$ (dB)
¼	-6
½	-3
1	0
2	3
4	6

tabel 6-1: Grootte van de term $10 \log \frac{S}{A}$ voor enkele waarden van $\frac{S}{A}$

Zoals al eerder vermeld (3.0) is het gedeelte van het geluid dat wordt doorgelaten bij een normale boarddeur ca. d = 0,01.
Dat houdt in dat de geluidisolatie (R) gelijk is aan R = 20 dB.
Immers $10 \log \frac{1}{0,01} = 10 \log 100 = 20$.
Evenzo is bij een halfsteensmuur d = 0,0001 en de geluidisolatie R = 40 dB (10 log 10000 = 40). Zie ook figuur 6-2.

6.2 METEN VAN DE LUCHTGELUIDISOLATIE (R) VAN EEN CONSTRUCTIE

Voor het bepalen van de luchtgeluidisolatie van een constructie worden in het laboratorium speciale proefkamers gebruikt (figuur 6-3).

Twee kamers worden zodanig naast elkaar gebouwd (gescheiden fundering enz.) dat er geen flankerende geluidoverdracht mogelijk is (zie 6.8).
In één kamer (het zendvertrek) wordt met behulp van een geluidbron (luidsprekers) luchtgeluid opgewekt.
In beide kamers wordt dan het geluiddrukniveau gemeten.
Met behulp van de formule (6-3) wordt dan de geluidisolatie berekend.

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad [dB] \qquad (6\text{-}3)$$

Waarin: L_1 = het geluiddrukniveau in het zendvertrek (dB)
L_2 = het geluiddrukniveau in het ontvangvertrek (dB)
R = de geluidisolatie van de scheidingsconstructie (dB)
S = het oppervlak van de scheidingsconstructie (m^2)
A = de totale geluidabsorptie in het ontvangvertrek (m^2 o.r.)

De grootte van de term $10 \log \frac{S}{A}$ is voor een aantal waarden van S/A weergegeven in tabel 6-1.

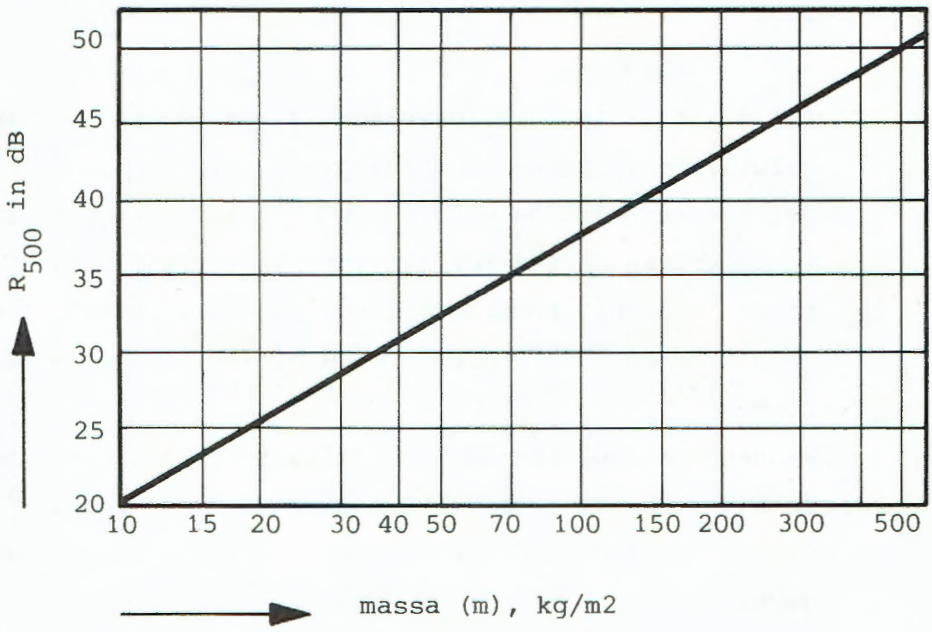
De correctieterm $10 \log \frac{S}{A}$ is nodig om de werkelijk doorgelaten hoeveelheid geluid van de wand te bepalen. Immers, het geluiddrukniveau in het ontvangvertrek wordt mede bepaald door de geluidabsorptie in dat vertrek en het oppervlak van de wand.

Voor de geluidisolatie, die een eigenschap is van de te onderzoeken constructie, moet altijd dezelfde waarde worden gevonden, onafhankelijk van de ruimten waartussen hij de scheiding vormt. Wanneer de wand 2 maal zo groot zou worden, wordt er twee maal zo veel geluidenergie doorgelaten naar het ontvangvertrek, waardoor daar een 3 dB hoger geluiddrukniveau zou worden gemeten. Wanneer in het ontvangvertrek 2 maal zo veel geluidabsorptie aanwezig is wordt een 3 dB lager geluiddrukniveau gemeten (zie 4.4).
In het eerste geval zou zonder de correctieterm een 3 dB te lage geluidisolatie worden gemeten, in het tweede geval een 3 dB te hoge.

Bij de afleiding van formule (6-3) is uitgegaan van een diffuus geluidveld in zend- en ontvangvertrek.
Dat betekent dat de geluidgolven in alle richtingen even sterk en onderling onafhankelijk zijn. In een afgesloten ruimte (en zeker in de als zodanig ingerichte proefkamers) is het geluidveld door de reflecterende omwandingen doorgaans diffuus te noemen.
Wanneer het geluidveld niet diffuus is, maar wanneer (zoals veelal bij verkeerslawaai) het geluid uit één richting invalt op de constructie gelden andere formules, zie 6.10 (Isolatie van gevels).

6.3 MASSAWET

Voor homogene constructies (één laag beton, steen, hout, enz.) kan theoretisch worden afgeleid wat de geluidisolatie zou moeten zijn. Deze blijkt afhankelijk van de massa van de constructie, en van de frequentie van het geluid. De invloed van de stijfheid komt in de volgende paragraaf ter sprake.
Door allerlei randeffecten worden in de praktijk andere waarden gevonden dan de theoretische massawet aangeeft. Proefondervindelijk is zo een "praktijkmassawet" tot stand gekomen waarmee de geluidisolatie bij 500 Hz (R_{500}) kan worden berekend.



figuur 6-4: Praktijk massawet voor de geluidisolatie bij 500 Hz

$$R_{500} = 17{,}5 \log m + 3 \quad [dB] \qquad (6\text{-}4)$$

Waarin: R_{500} = de geluidisolatie bij 500 Hz
m = de massa van de muur in kg/m^2

Deze formule is grafisch weergegeven in figuur 6-4.

Vooral bij massa's beneden de 100 kg/m^2 is de waarde volgens de bovenstaande formule slechts een zeer globale richtwaarde. Vaak treden bijzondere effecten op, zoals coïncidentie (zie verderop), die de geluidisolatie sterk beïnvloeden.

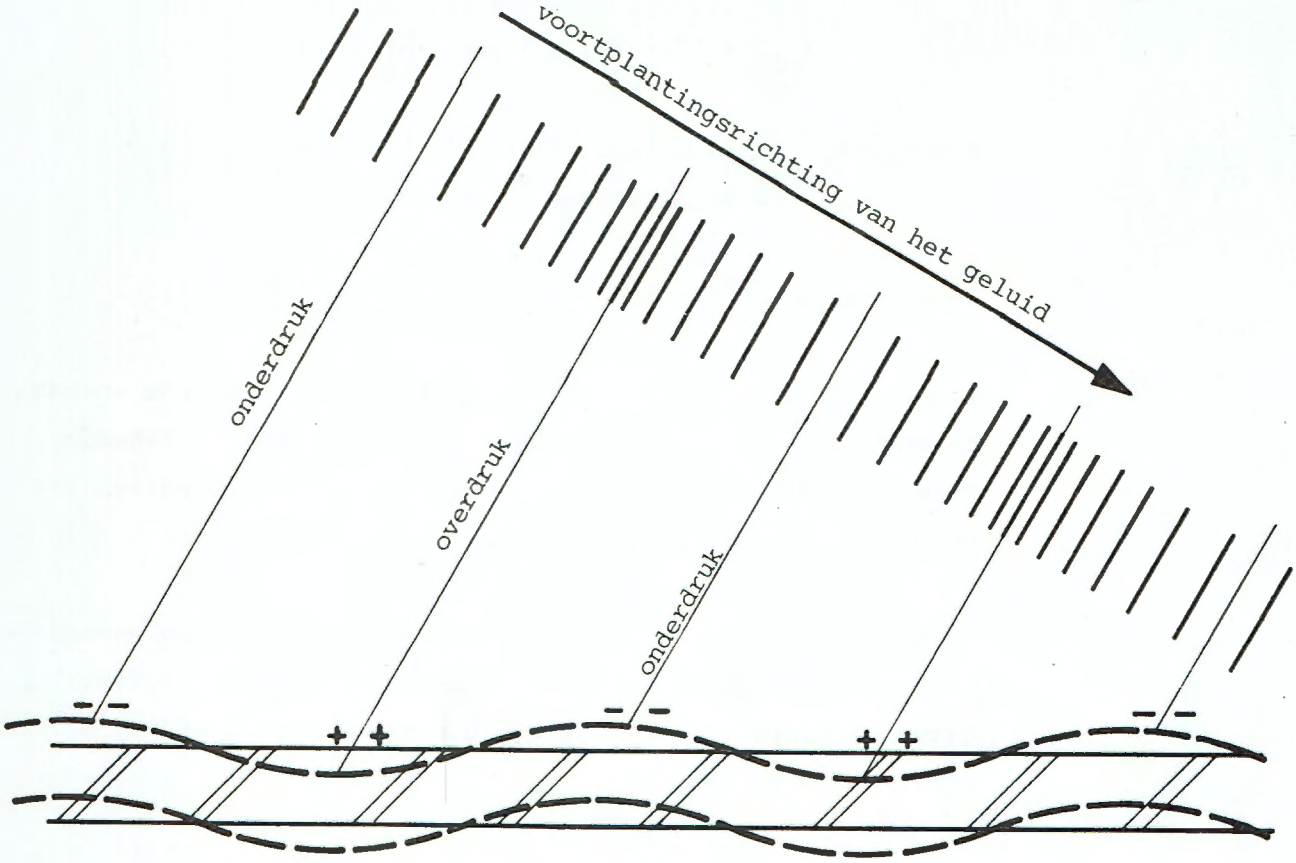
De geluidisolatie bij andere frequenties kan worden gevonden door per frequentieverdubbeling 5 dB op te tellen bij de voor R_{500} gevonden waarde. Voor lagere frequenties moet 5 dB per octaaf worden afgetrokken.

Globaal valt het isolatiemechanisme als volgt in te zien. De opvallende geluidenergie brengt de wand in trilling. Aan de andere zijde van de wand wordt de lucht weer in trilling gebracht.
De geluiddruk, die bestaat uit snelle drukwisselingen, vormt een kracht die op de wand wordt uitgeoefend.

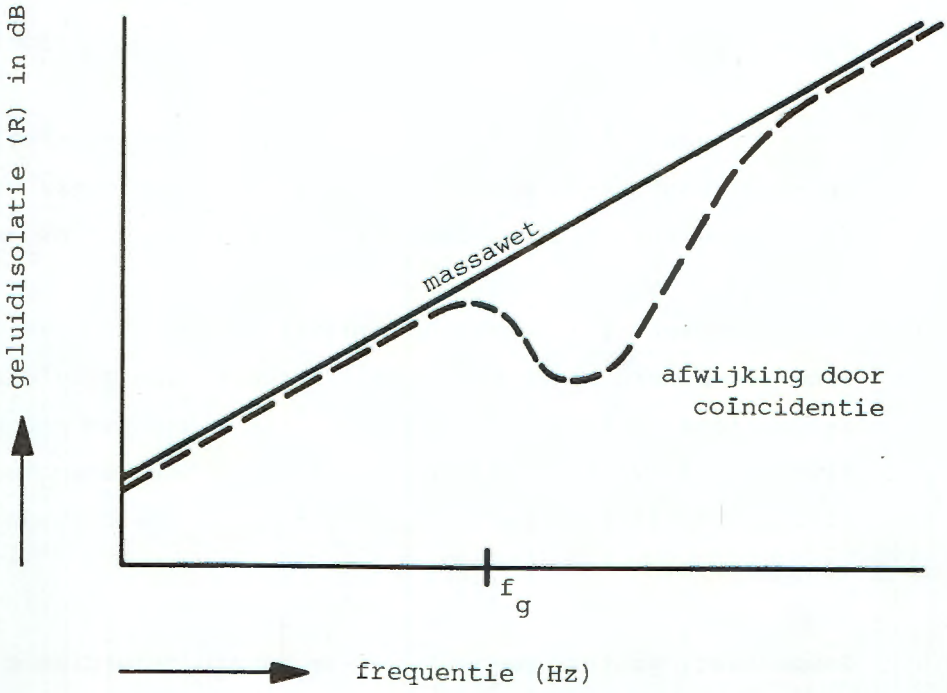
Volgens de "mechanica" geldt: kracht = massa x versnelling.

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 minder makkelijk in trilling gebracht.
Een kleinere trilling van de wand veroorzaakt in het ontvangvertrek (de andere zijde van de wand) een kleine geluiddruk.
Net zo iets geldt voor het aantal trillingen per seconde (de frequentie). Veel trillingen per seconde betekenen veel, maar kleinere trillingen en dus een kleinere geluiddruk in het ontvangvertrek.

Samengevat: grotere massa ⟶ hogere geluidisolatie
hogere frequentie ⟶ grotere geluidisolatie



figuur 6-5: Opwekken van een gedwongen buiggolf door invallend geluid



figuur 6-6: Beïnvloeding van de geluidisolatie door coïncidentie

6.4 COÏNCIDENTIE

Wanneer een geluidgolf schuin op een muur invalt wordt in die muur een buiggolf opgewekt door de onder- en overdrukken (verdunningen en verdichtingen) van de geluidgolf in de lucht (figuur 6-5).

Wanneer de frequentie van deze golfbeweging overeenstemt met de eigenfrequentie van de wand (de frequentie waarbij de wand erg gemakkelijk in trilling komt), dan wordt de geluidenergie zeer gemakkelijk doorgelaten. Deze zogenaamde coïncidentiefrequentie is afhankelijk van de stijfheid van de wand, dus van de dikte en het soort materiaal, en van de invalshoek van het geluid. De grensfrequentie voor coïncidentie (f_g) bij "scherend" invallend (invalshoek $\theta = 90^o$) geluid wordt gevonden uit formule (6-5). Beneden de grensfrequentie treedt geen coïncidentie op.

$$f_{g,coïncidentie} = \frac{f_g.d}{d} \quad [Hz] \qquad (6\text{-}5)$$

Waarin: $f_g.d$ = een van het materiaal afhankelijke constante

d = de dikte van de constructie in mm

Voor andere invalshoeken wordt de coïncidentiefrequentie gevonden uit:

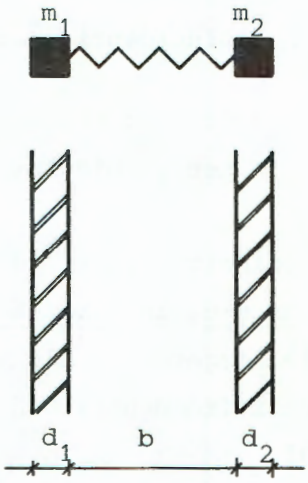
$$f_{coïncidentie} = \frac{f_g}{\sin\theta} \quad [Hz]$$

Waarin: θ = de hoek met de normaal op de constructie waaronder het geluid invalt

Door de coïncidentie treedt een afwijking van de massawet op, zie figuur 6-6. In tabel 6-2 is de constante $f_g.d$ voor diverse materialen gegeven en als voorbeeld de grensfrequentie voor coïncidentiefrequentie bij twee veel toegepaste dikten van het materiaal.
Uit deze tabel blijkt duidelijk dat bijvoorbeeld 50 - 90 mm poriso en 50 - 70 mm gips een zeer ongunstig isolatiegedrag hebben omdat het gebied waarin de coïncidentiefrequentie valt

materiaal	$f_g.d$	voorbeeld		voorbeeld	
		d (mm)	f_g (Hz)	d (mm)	f_g (Hz)
aluminium	12500	2	6250	5	2500
staal	12800	1	12800	3	4267
glas	12800	4	3200	8	1600
beton	17300	120	144	200	87
gasbeton	38000	80	475	200	190
kalkz. st.	21400	105	204	210	102
poriso	26000	50	520	90	289
lichtbeton	32000	80	400	200	160
gips	35500	50	710	70	507
gipskarton	35500	9	3944	15	2367
hout	25000	12	2083	22	1136
spaanplaat	25000	8	3125	18	1389
lood	51200	0,5	102400	2	25600

tabel 6-2: Grensfrequentie voor coïncidentie bij verschillende materialen



figuur 6-7: Massa-veer systeem bij een spouwconstructie

loopt van 300 tot 700 Hz, waardoor juist in het frequentiegebied van de menselijke stem een slechte isolatie optreedt. Vergroten van dikte (bijvoorbeeld het glas in een tussenwand van 5 mm, f_g = 2500 Hz naar 10 mm, f_g = 1250 Hz) behoeft door het verschuiven van de coïncidentiefrequentie niet altijd een betere geluidisolatie op te leveren.
Bij zware wanden is de invloed van de coïncidentie vaak minder merkbaar.
Voor lichte wanden kan men stellen dat de grensfrequentie voor coïncidentie boven de 3000 Hz zou moeten liggen, omdat anders de "dip" in de isolatie juist in het midden van het frequentiegebied valt (menselijke stem enz.).

6.5 CONSTRUCTIES OPGEBOUWD UIT MEERDERE LAGEN

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.
In het gunstigste geval (volledige ontkoppeling van de spouwbladen, spouwbreedte een meter of meer 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.

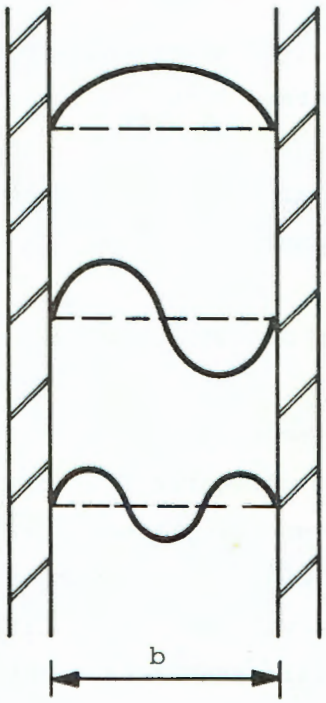
6.6 MASSA-VEER RESONANTIE EN SPOUWRESONANTIES

De twee spouwbladen (massa's) kunnen op de tussen gelegen luchtlaag (veer) een trilling uitvoeren (zie figuur 6-7).
Zoals eerder gezegd hebben alle massaveersystemen een eigen-(resonantie)frequentie, waarbij het systeem heel gemakkelijk in trilling wordt gebracht, waardoor de isolatiewaarde sterk vermindert. Bij één frequentie theoretisch zelfs tot nul.
Bij loodrecht invallend geluid wordt deze resonantiefrequentie (f_o) gevonden met behulp van formule (6-6).

$$f_o = 60 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 . m_2} . \frac{1}{b}} \quad [Hz] \qquad (6\text{-}6)$$

	$m_1 = m_2$ (kg/m^2)	b (m)	f_o (Hz)
gips (12 mm)	14	0,080	80
glas (6 mm)	15	0,012	200
glas (6 mm)	15	0,100	69
poriso (70 mm)	85	0,030	53

tabel 6-3: Resonantiefrequentie (massa-veersysteem) van enkele spouwconstructies



$$f_{sp} = \frac{1.170}{b} \quad [Hz] \qquad (6\text{-}7a)$$

$$f_{sp} = \frac{2.170}{b} \quad [Hz] \qquad (6\text{-}7b)$$

$$f_{sp} = \frac{3.170}{b} \quad [Hz] \qquad (6\text{-}7c)$$

b in meter

figuur 6-8: Spouwresonanties (staande golven in spouw)

Waarin: f_o = de resonantiefrequentie bij loodrecht invallend geluid

m_1 = massa van het ene spouwblad in kg/m^2

m_2 = idem tweede spouwblad

b = breedte van de spouw in m

Voor enige constructies wordt in tabel 6-3 de resonantiefrequentie aangegeven. Gemakshalve wordt uitgegaan van twee evendikke spouwbladen.

Door dit resonantieeffect is de isolatie van een dubbele ruit, wanneer het de bedoeling is verkeerslawaai tegen te houden, vaak slechter dan de isolatie van een enkele ruit. Het verkeerslawaai is juist maximaal bij frequenties van 100 - 200 Hz.

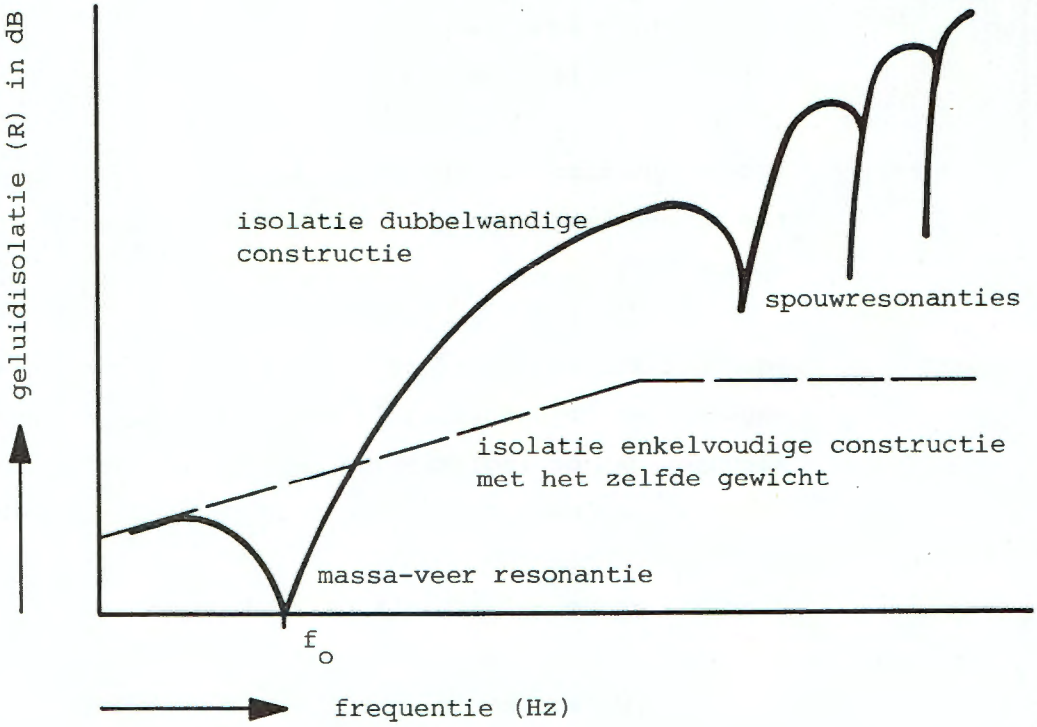
Voor een goede geluidisolatie geldt de eis:

massa-veer resonantie $f_o < 80$ Hz

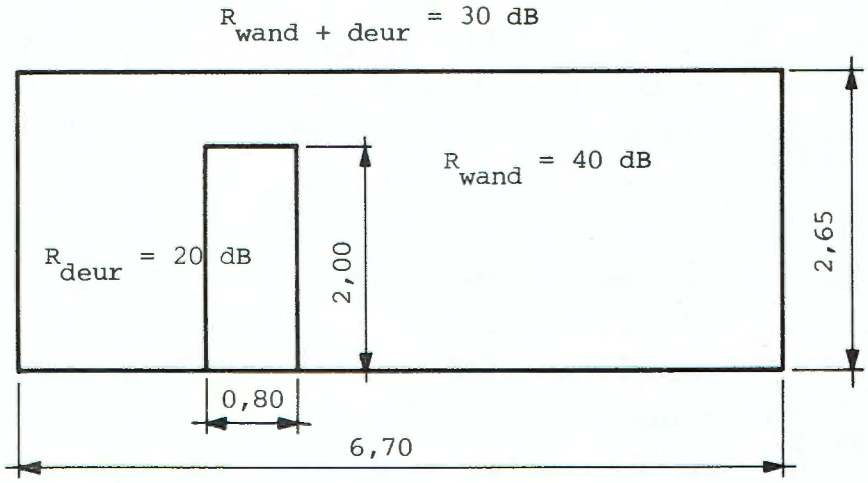
De spouwresonanties worden veroorzaakt door staande golven in de spouw.
De frequentie is afhankelijk van de breedte van de spouw (figuur 6-8).

Zo wordt als laagste spouwresonantiefrequentie gevonden voor een spouw met een breedte van 12 mm, f_{sp} = 14000 Hz. Voor een spouw met een breedte van 120 mm is dit f_{sp} = 1400 Hz.
Bij een resonantiefrequentie is de geluidisolatie zeer gering.

Voor spouwresonanties kan een zelfde grens worden getrokken als bij coïncidentie.
Spouwresonanties mogen feitelijk niet beneden de 3000 Hz voorkomen.
Om toch van het nuttig effect van brede spouwen gebruik te kunnen maken moeten de resonanties worden onderdrukt door in de spouw absorberend materiaal aan te brengen.



figuur 6-9: Algemene isolatiekromme van een spouwconstructie



figuur 6-10: Wand opgebouwd uit delen met verschillende geluidisolatie

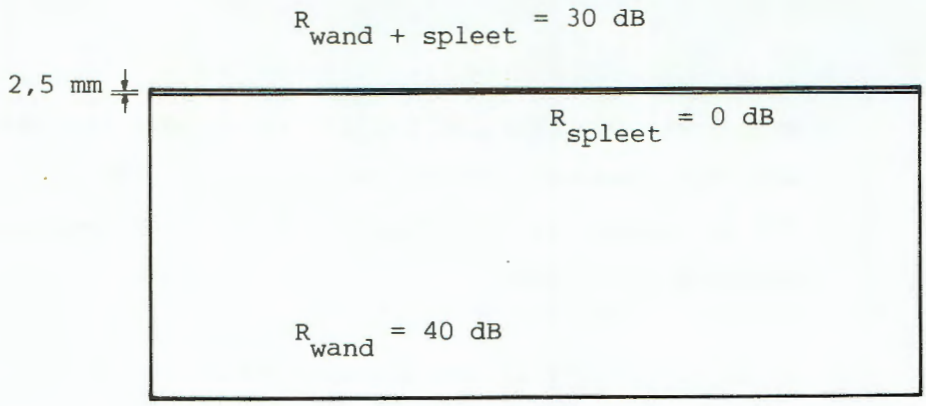
Bij dichte constructies kan dit in de vorm van platen minerale wol, bij glasconstructies kan dit in de vorm van randabsorptie (in de dagkant van de spouw). Ook de massa-veer resonantie wordt hierdoor onderdrukt.

In de figuur 6-9 is een algemeen beeld van de geluidisolatie van een spouwconstructie weergegeven.
Beneden de frequentie van de massa-veer resonantie heeft de dubbele wand ongeveer dezelfde isolatiewaarde als een enkelvoudige wand met dezelfde massa als de samengestelde wand. Bij de resonantiefrequentie is de isolatie zeer gering. Ver daarboven is de geluidisolatie bij benadering gelijk aan de som van de isolatiewaarden van de beide spouwbladen afzonderlijk. In het tussengebied fungeert de luchtlaag nog enigszins als koppeling tussen de beide spouwbladen, maar treedt toch een aanzienlijke winst op ten opzichte van een enkelvoudige constructie.

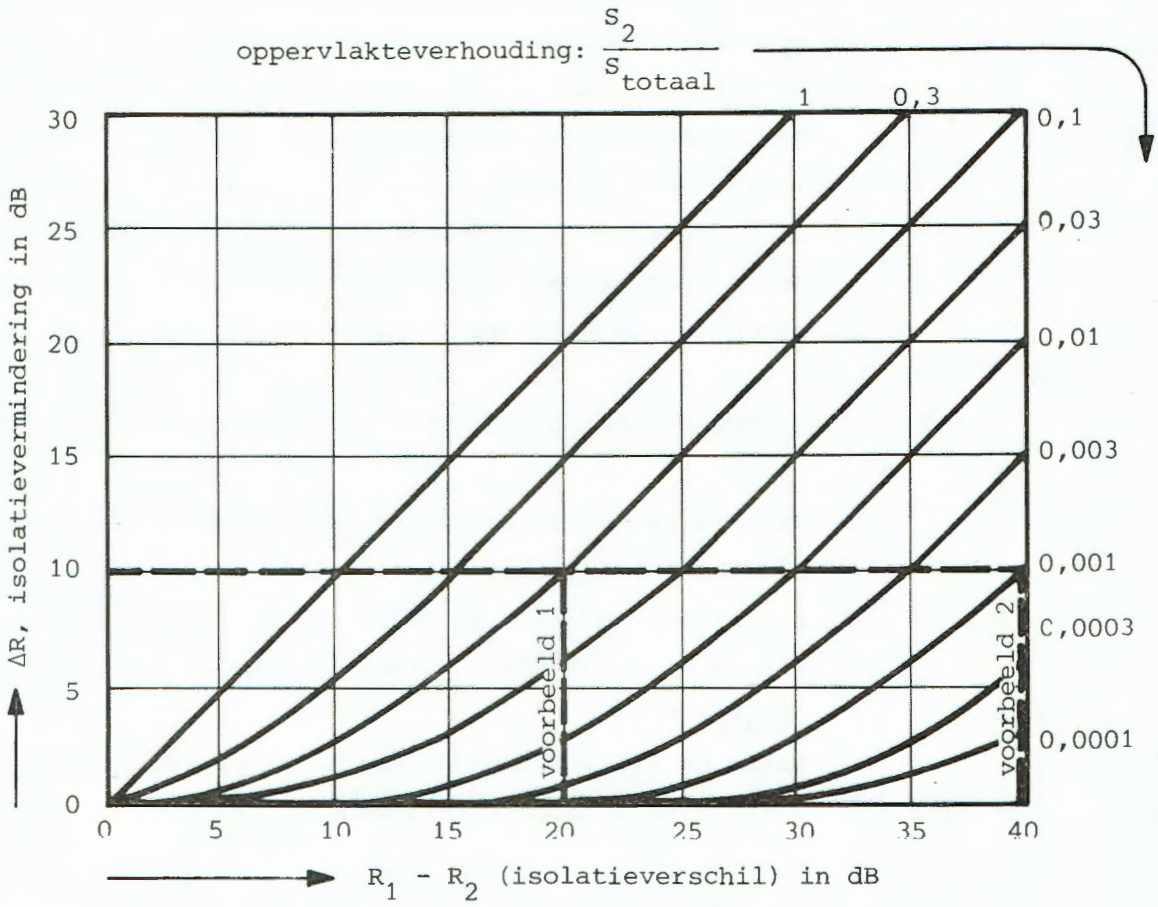
6.7 SAMENGESTELDE CONSTRUCTIES (OPPERVLAKKEN MET VERSCHILLENDE ISOLATIE)

Vaak is een wandconstructie opgebouwd uit delen met een verschillende geluidisolatie, bijvoorbeeld een deur (R = 20 dB) in een halfsteenswand (R = 40 dB).
Wat is nu de gemiddelde isolatie van de wand met de deur (figuur 6-10).
Naast de isolatiewaarden van de samenstellende delen is ook de verhouding in oppervlakte van belang.

Het isolatieverschil van 20 dB tussen wand (1) en deur (2) betekent dat per m^2 door de deur 100 maal meer geluidenergie gaat dan door de rest van de wand (10 log 100 = 20).
In het getekende voorbeeld is de oppervlakteverhouding van deur en wand zodanig dat door de deur ongeveer 9 maal zoveel geluidenergie komt dan door de rest van de wand. Door de combinatie wand + deur komt dus 10 maal zo veel energie dan door een geheel dichte wand, en dat betekent een 10 dB slechtere geluidisolatie (10 log 10 = 10).



figuur 6-11: Geluidisolatie wand met spleet bij aansluiting



Hierin is: ΔR de van R_1 af te trekken waarde

R_1 de isolatie van het best isolerende gedeelte

R_2 de isolatie van het zwakste gedeelte

S_2 de oppervlakte van het slechtst isolerende gedeelte

S_{totaal} het totale oppervlak van de wand

De verschillende lijnen gelden voor verschillende oppervlakteverhoudingen.

figuur 6-12: Isolatievermindering van een wand ten gevolge van een gedeelte met kleinere isolatie

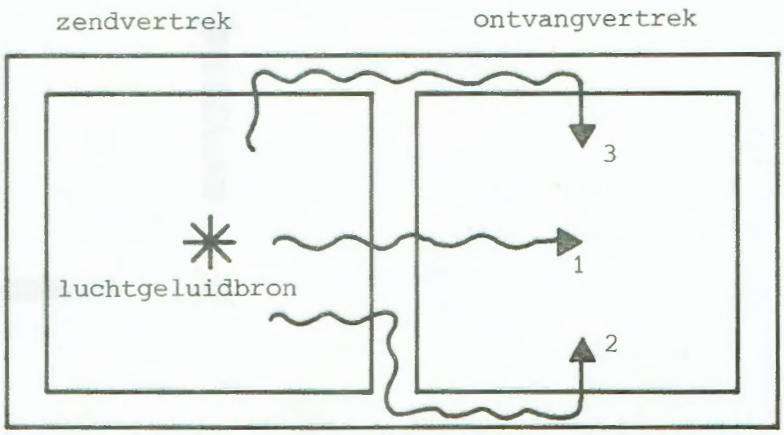
Evenzo kan een voorbeeld worden bekeken van een wand waarbij bij de plafondaansluiting een kier is overgebleven van ca. 2,5 mm (figuur 6-11).

Door de spleet komt per m^2 10000 maal zo veel geluidenergie dan door de wand (isolatieverschil 40 dB, 10 log 10000 = 40). Door de spleet waarvan de oppervlakte ongeveer 0,0009 maal die van de wand is komt ca. 9 maal zo veel geluidenergie dan door de rest van de wand. Ook in dit voorbeeld wordt de isolatie van de wand met 10 dB verminderd.
Bij een wand met een nog hogere isolatiewaarde is de invloed van zo'n kier nog veel groter.
Er zij echter op gewezen dat bij kieren en spleten ook nog andere effecten optreden die hier niet aan de orde komen.

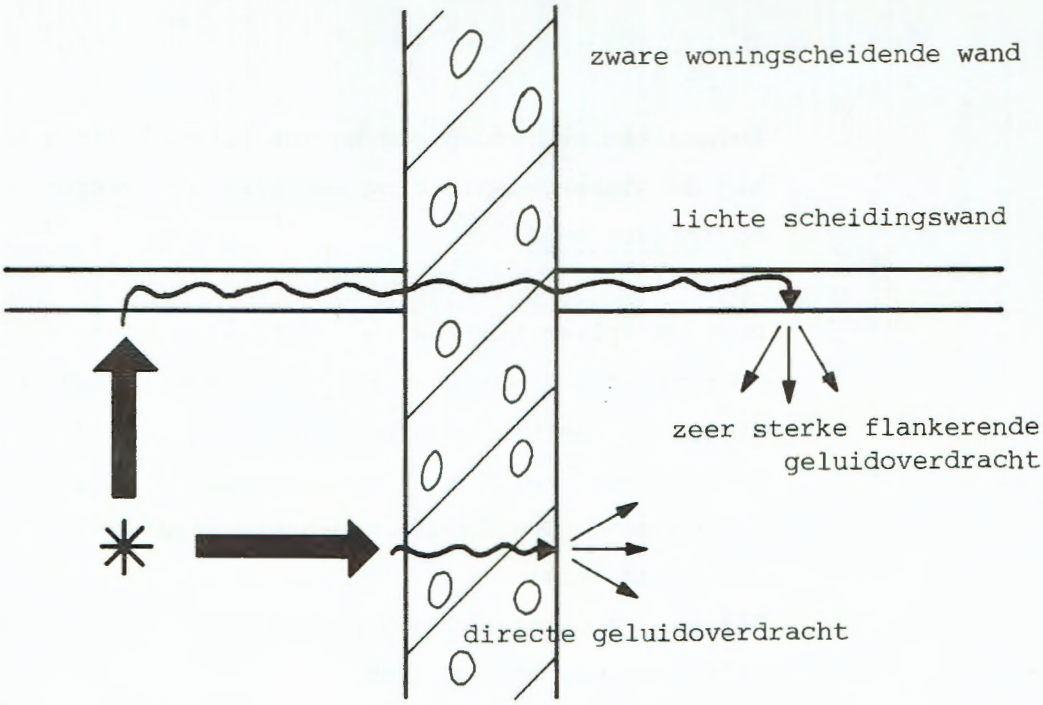
Met behulp van figuur 6-12 kan de gemiddelde geluidisolatie van een samengestelde wand worden bepaald.

6.8 FLANKERENDE GELUIDOVERDRACHT

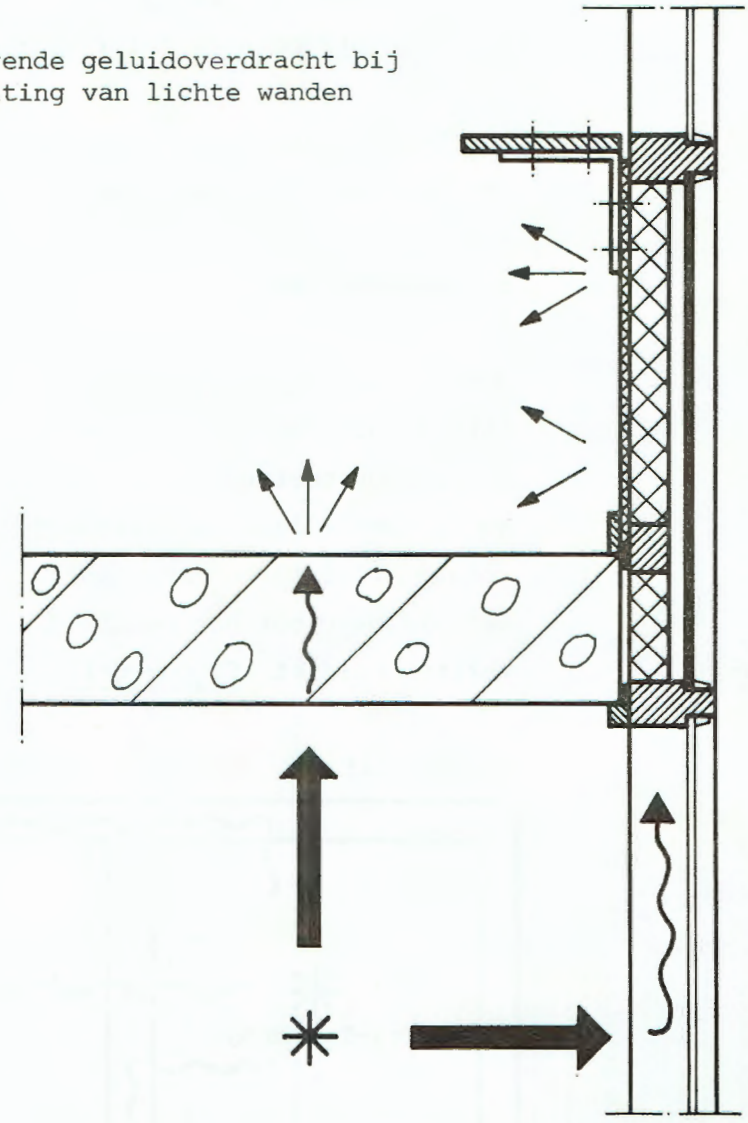
Wanneer men de geluidreductie tussen twee ruimten bekijkt is dit iets anders dan de hiervoor beschouwde geluidisolatie van een scheidingsconstructie.
Nu is niet alleen de directe geluidoverdracht van belang (het geluid (1) dat rechtstreeks door de scheidingswand wordt doorgelaten), maar ook het geluid dat op andere manieren het ontvangvertrek bereikt (figuur 6-13).



figuur 6-13: Flankerende geluidoverdracht



figuur 6-14: Flankerende geluidoverdracht bij aansluiting van lichte wanden



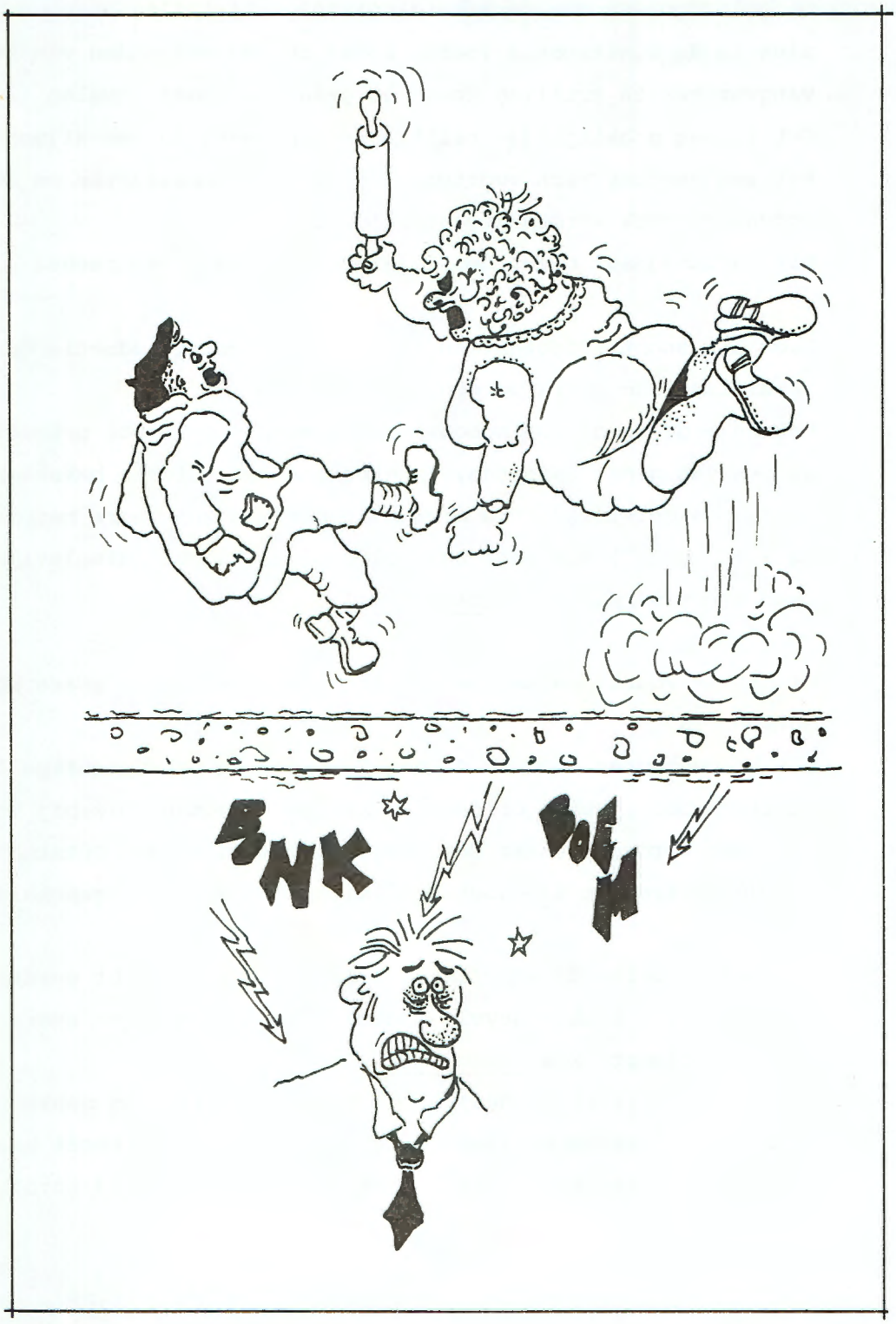
figuur 6-15: Flankerende geluidoverdracht bij doorgaande gevelpuien

De geluidgolven die de scheidingswand in trilling brengen planten zich in de constructie voort, zodat ook de zijwanden van het ontvangvertrek in trilling komen en geluid af gaan stralen (2).
Ook is het mogelijk dat trillingen, opgewekt in een zijwand van het zendvertrek zich voortplanten door de constructie en in het ontvangvertrek worden afgestraald (3).
Dit verschijnsel noemt men flankerende geluidoverdracht.

Door dit soort effecten kan de verwachte geluidreductie door een scheidingswand sterk worden beïnvloed.
Met name de in de woningbouw veel toegepaste lichte scheidingswanden van gips, gasbeton, lichtbetonsteen, lichte baksteen, enz. kunnen de geluidreductie door bijvoorbeeld een zware betonwand ($m > 400$ kg/m^2) die zelf een voldoend grote geluidisolatie heeft, zeer sterk verminderen (figuur 6-14).

Om dit te voorkomen moeten de lichte wanden van de zware worden ontkoppeld.
Dit kan gebeuren door in de aansluiting een veerkrachtige laag (cellenrubber, kurk, of dergelijke) op te nemen. Hierbij moet er wel voor worden gewaakt dat er geluidlekken zouden ontstaan tussen de vertrekken die door de lichte wanden worden gescheiden.

Een ander voorbeeld van flankerende geluidoverdracht wordt gevonden in een lichte gevel (houten pui) die voor een zware betonvloer doorloopt. Zie figuur 6-15.
In het zendvertrek (onder) wordt de pui in trilling gebracht.
Door de doorgaande stijlen plant de trilling zich voort naar het bovengelegen vertrek, waar hij in de vorm van geluid wordt afgestraald.



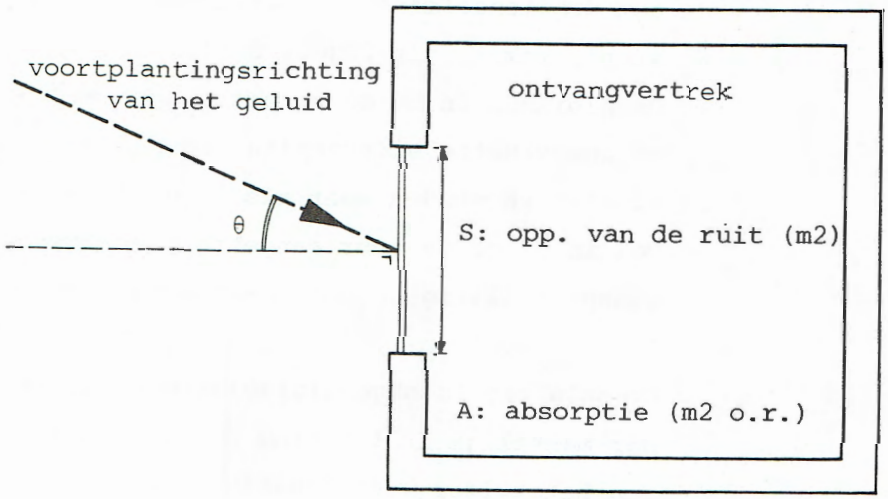
figuur 6-16: rechtstreeks aanstoten van de constructie

6.9 CONTACTGELUIDISOLATIE

Hiervoor is de luchtgeluidisolatie behandeld. Dat wil zeggen de isolatie voor geluidtrillingen die, opgewekt door één of andere geluidbron (luidspreker, stem, enz.), in de lucht aanwezig zijn.

Het is echter ook mogelijk geluid op te wekken door de gebouwconstructie rechtstreeks aan te stoten (lopen, trillingen van een draaiende machine, slaan van een deur, schuiven met een stoel, enz.), zie figuur 6-16.
De hierdoor in de constructie opgewekte trillingen worden door de constructie voortgeplant en kunnen elders in het gebouw door vloeren en wanden weer als luchtgeluid worden afgestraald.
Ook in of op de muur aangebrachte waterleidingen en dergelijke kunnen trillingen in de gebouwconstructie opwekken.

Evenals bij luchtgeluidisolatie geldt dat zware constructies minder makkelijk in trilling worden gebracht dan lichtere.
Een betonvloer van redelijke dikte ($m > 400\ kg/m^2$) biedt doorgaans reeds voldoende isolatie tegen loopgeluiden.
Bij strengere eisen, of bij lichte constructies moeten dikke tapijten, zwevende dekvloeren of verlaagde plafonds worden toegepast.
Machines moeten met de geëigende trillingdempers worden bevestigd en voor leidingen moeten bevestigingsmiddelen met rubber manchetten en dergelijke worden gekozen.



figuur 6-17: geluidisolatie van de gevel en absorptie in het ontvangvertrek

6.10 ISOLATIE VAN GEVELS

In 6.1 en 6.2 werd bij het beschouwen van de geluidisolatie uitgegaan van een diffuus geluidveld aan weerszijden van de scheidingsconstructie.
Bij het beschouwen van de isolatie van een gevel tegen verkeerslawaai bijvoorbeeld, treft een geluidgolf uit een bepaalde richting de gevel (zie figuur 6-17).
Zo heeft men buiten te maken met een geluidgolf die onder een bepaalde hoek invalt en binnen met een diffuus geluidveld.
Wanneer het geluiddrukniveau voor de gevel en de geluidisolatie van de gevel (het glas) bij de bepaalde hoek van inval bekend zijn wordt het geluiddrukniveau binnen gevonden met behulp van de formule:

$$L_2 = L_1 - R_\theta + 10 \log \frac{4.S.\cos\theta}{A} \quad [dB] \qquad (6\text{-}8)$$

Waarin: L_2 = het geluiddrukniveau in het vertrek in dB
L_1 = het geluiddrukniveau buiten voor de gevel in dB
R_θ = de geluidisolatie van de gevel (het glas) voor de bepaalde hoek van inval van het geluid in dB
S = het oppervlak van de ruit (het beschouwde deel van de gevel) in m^2
θ = de hoek met de normaal op de gevel waaronder het geluid invalt
A = de absorptie in het ontvangvertrek in m^2 o.r.

Vanzelfsprekend geldt deze formule niet alleen voor gevels, maar voor alle gevallen waarin een geluidgolf onder een bepaalde hoek invalt op een constructie en waarbij aan de andere kant een diffuus geluidveld ontstaat.

7 HET BEOORDELEN VAN DE GELUIDISOLATIE IN DE PRAKTIJK

7.0 INLEIDING

Bij het stellen van eisen voor de luchtgeluidreductie tussen twee ruimten in praktijksituaties is feitelijk alleen het verschil in geluiddrukniveau tussen zend- en ontvangvertrek ($L_1 - L_2$) van belang; hier moet juist geen correctie plaatsvinden. Ook is in de praktijk vrijwel altijd enige flankerende geluidoverdracht aanwezig.

In de norm NEN 1070 (1976) "Geluidwering in woongebouwen" wordt een beoordelingsmethode gegeven voor de geluidreductie tussen twee ruimten en de overdracht van contactgeluid. Tevens worden eisen gesteld waaraan deze twee dienen te voldoen.

7.1 LUCHTGELUIDISOLATIE-INDEX (I_{lu})

In een vijftal octaafbanden (middenfrequenties 125, 250, 500, 1000 en 2000 Hz) wordt een genormeerde luchtgeluidisolatie (D_{nT}) bepaald.
De metingen vinden op dezelfde wijze plaats als is omschreven onder 6.2 (meten van de luchtgeluidisolatie van een constructie).

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_o} \quad [dB] \qquad (7\text{-}1)$$

Waarin: D_{nT} = de genormeerde luchtgeluidisolatie in dB
L_1 = het geluiddrukniveau in het zendvertrek in dB
L_2 = idem in het ontvangvertrek
T = de nagalmtijd in het ontvangvertrek in s
T_o = de genormeerde nagalmtijd (= 0,5 s)

Hier wordt niet gecorrigeerd voor de geluidabsorptie in het ontvangvertrek, maar genormeerd naar een voor woningen gebruikelijke nagalmtijd. Bij dezelfde nagalmtijd is in een grote kamer immers meer geluidabsorptie aanwezig dan in een kleine (zie de formule van Sabine 5.1).

T in s	B in dB	T in s	B in dB
0,20	- 4,0	0,8	2,1
0,25	- 3.0	0,9	2,6
0,30	- 2,2	1,0	3,0
0,35	- 1,5	1,2	3,8
0,40	- 1,0	1,4	4,5
0,45	- 0,5	1,6	5,1
0,50	0,0	1,8	5,6
0,60	0,8	2,0	6,0
0,70	1,5	2,5	7,0

$$B = 10 \log \frac{T}{T_o}$$

tabel 7-1: Grootte van de term $10 \log \frac{T}{T_o}$ voor enkele nagalmtijden (T_o = 0,5 s)

octaafband met middenfrequentie, in Hz	125	250	500	1000	2000
Normwaarde voor de genormeerde luchtgeluidisolatie (D_{nT}), in dB	34	43	50	53	54

tabel 7-2: Normwaarden voor de genormeerde luchtgeluidisolatie (D_{nT})

In tabel 7-1 wordt voor enige nagalmtijden de grootte van de term $10 \log \frac{T}{T_o}$ gegeven.

Uit de waarden voor D_{nT} wordt in de NEN 1070 een isolatie-index (I_{lu}) bepaald.
Hiertoe worden de vijf isolatiewaarden vergeleken met een vijftal normwaarden (zie tabel 7-2).

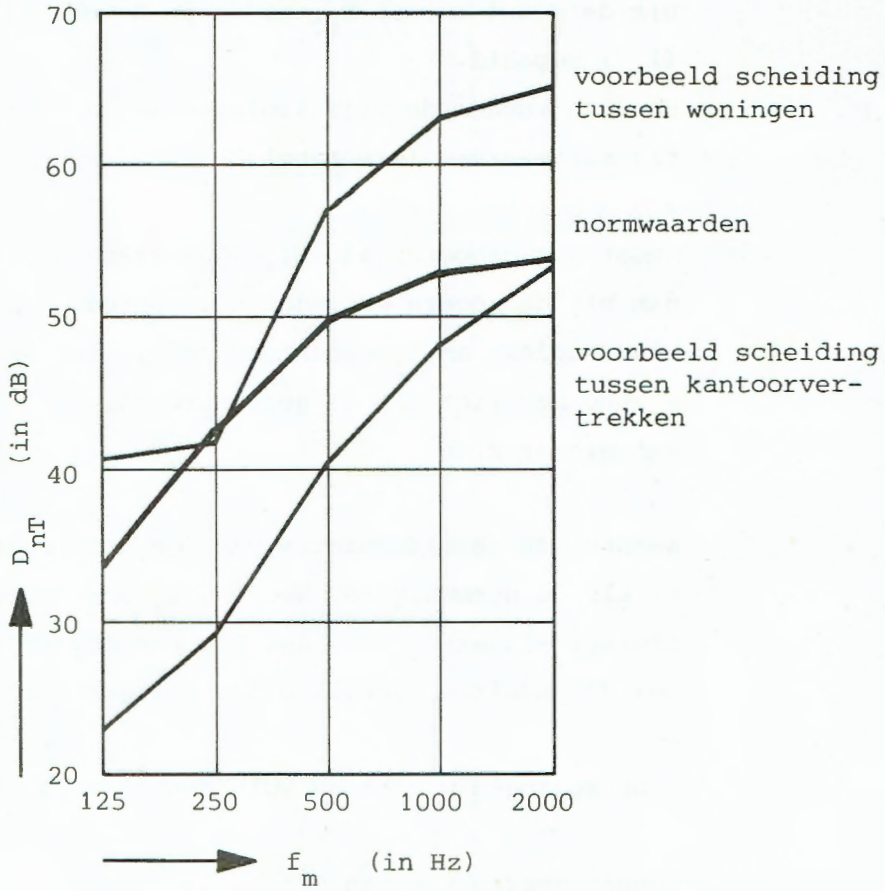
Omdat het gehoororgaan bij lage frequenties minder gevoelig is dan bij de hogere en omdat het geproduceerde geluid (menselijke stem, telex- en typemachines enz.) vaak in het middengebied (500 - 2000 Hz) ligt mag de geluidisolatie bij de lagere frequenties wat minder zijn.

Wanneer de geluidisolatie van een constructie precies hetzelfde is als de normwaarden, heeft die constructie een luchtgeluid-isolatie-index I_{lu} = 0 dB, bij een hogere isolatie wordt de index een positief getal, bij een lagere isolatie een negatief.

Voor woningen worden de volgende eisen gesteld aan de I_{lu}:

Tussen vertrekken van verschillende woning	$I_{lu} > 0$ dB
Tussen vertrekken binnen dezelfde woning	$I_{lu} > -15$ dB

Deze getallen vormen echt de minimale eisen. Vooral wanneer er veel verschil is tussen het leefpatroon van de verschillende bewoners kan nog best hinder optreden, ook al wordt aan de eisen voldaan.
Hierbij moet men denken aan hinder door radio, televisie, het bespelen van muziekinstrumenten, het beoefenen van luidruchtige hobby's en het lopen met hard schoeisel (klompschoenen, kleppers, enz.) op een harde vloerafwerking (plavuizen, natuursteen, parket, enz.) zonder dat speciale voorzieningen zijn getroffen.
Men moet bedenken dat door een constructie een bepaald gedeelte van het geluid wordt doorgelaten. Als we meer geluid gaan maken komt er natuurlijk ook meer doorheen.



figuur 7-1: Voorbeeld geluidisolatie van een tweetal wanden (in octaafbanden)

Wanneer men de hinder verder wil beperken moeten hogere eisen worden gesteld.
In eerste instantie zou men de eisen met 5 dB kunnen verzwaren. In de NEN 1070 wordt dit dan ook aanbevolen.

Als voorbeeld wordt de luchtgeluidisolatie-index voor een woningscheidende wand en voor een kantoorwand bepaald uit de per octaafband gemeten geluidisolatie (D_{nT}), zie figuur 7-1.

Voor iedere octaafband wordt het verschil bepaald tussen de gemeten waarde (D_{nT}) en de normwaarde (zie tabel 7-3 en 7-4).

De isolatie-index (I_{lu}) is nu de kleinste van de volgende drie getallen.

a. Het gemiddelde van de vijf isolatieverschillen, afgerond op het dichtsbijzijnde gehele getal.

b. Het gemiddelde van de twee (algebraïsch kleinste isolatieverschillen, vermeerderd met twee.

c. Het (algebraïsch) kleinste isolatieverschil vermeerderd met 4.

Bij het afronden wordt overigens een halve eenheid afgerond naar het dichtstbijzijnde even getal. Zo wordt 5,5 afgerond op 6, maar ook 6,5 wordt afgerond op 6.

In het voorbeeld van de woningscheidende wand worden zo de volgende waarden gevonden:

a. 1/5 . (6,5 -0,5 +7,0 +10,0 +11,0) = 6,8 afgerond +7
b. ½ . (-0,5 +6,5) +2 = 5,0 afgerond +5
c. -0,5 +4 = 3,5 afgerond +4

De isolatie-index is hier dus: I_{lu} = +4 dB.

octaafband met midden-frequentie, in Hz	125	250	500	1000	2000
D_{nT} (gemeten) in dB	40,5	42,5	57,0	63,0	65,0
normwaarde in dB	34	43	50	53	54
isolatieverschil	6,5	-0,5	7,0	10,0	11,0

tabel 7-3: Bepaling verschillen van de gemeten waarde (D_{nT}) van de geluidisolatie met de normwaarden voor de in figuur 7-1 aangegeven woningscheidende wand

octaafband met midden-frequentie, in Hz	125	250	500	1000	2000
D_{nT} (gemeten), in dB	23,0	29,5	40,5	48,5	53,5
normwaarde in dB	34	43	50	53	54
isolatieverschil	-11,0	-13,5	-9,5	-4,5	-0,5

tabel 7-4: Bepaling verschillen van de gemeten waarde (D_{nT}) van de geluidisolatie met de normwaarden voor de in figuur 7-1 aangegeven kantoorwand

Hiermee voldoet de wand en elk geval aan de mininale eisen.
Dat de wand niet voldoet aan de gewenste waarde van I_{lu} = 5 dB komt door de slechte isolatie in de octaafband van 250 Hz.
Zo'n "slechte plek" in de isolatie heeft, hoewel de "gemiddelde isolatie" goed is, een grote invloed op de isolatie zoals die door de mens wordt ervaren. Vandaar ook dat in het voorbeeld de isolatie bij 250 Hz (onder c) bepalend wordt voor de isolatie-index.

Voor de scheidingswand tussen de kantoorvertrekken uit het voorbeeld wordt gevonden:

a. 1/5 . (-11,0 -13,5 -9,5 -4,5 -0,5) = 7,8 afgerond -8
b. ½ . (-13,5 -11,0) +2 = -10,25 afgerond -10
c. -13,5 +4 = -9,5 afgerond -10

Hier is de isolatie-index voor luchtgeluid dus: I_{lu} = -10 dB.

De "moeilijke wijze" van het bepalen van de isolatie-index (drie getallen uitrekenen en de slechtste van de drie kiezen) is gekozen om allerlei vreemde uitschieters in het isolatie-spectrum op de juiste wijze in rekening te kunnen brengen.
In paragraaf 12.3 worden voor de vereiste (gewenste) geluidisolatie tussen vertrekken (ook voor kantoorgebouwen en dergelijke) richtgetallen gegeven.

7.2 GEMIDDELDE ISOLATIE

Vaak wordt door fabrikanten de gemiddelde isolatie ($\overline{R}$) van een wand, of dergelijke opgegeven.
Meestal betreft het een meetkundig gemiddelde van de isolatiewaarden (R) in 16 tertsbanden (1/3-octaafbanden) van 100 Hz tot 3200 Hz.
Het gebruik van deze gemiddelde isolatie wordt niet aanbevolen, omdat een dip (slechte plek) in het isolatiespectrum vaak nauwelijks tot uitdrukking komt in de gemiddelde isolatie, terwijl deze toch wel degelijk van invloed is op de kwaliteit van de constructie.

Naast de hiervoor genoemde gemiddelde isolatie wordt ook wel de gemiddelde isolatie over de octaafbanden van 125 Hz tot 4000 Hz gegeven ($\overline{R}_{125-4000}$) wanneer, zoals bij praktijkmetingen meestal het geval is niet in terts-, maar in octaafbanden wordt gemeten.

In het voorbeeld van de kantoorverscheidende wand uit figuur 7-1 wordt zo gevonden:

$$\overline{R}_{125-4000} = \sqrt[6]{23,0.29,5.40,5.48,5.53,5.56.0} = 39,8 \text{ dB}$$

Heel globaal kan men stellen dat een I_{lu} = 0 dB overeenkomt met een gemiddelde isolatie van $\overline{R}$ = 50 dB. Een en ander is echter in sterke mate afhankelijk van het spectrum.

7.3 DE ISOLATIE-INDEX VOOR CONTACTGELUID (I_{co})

Voor het meten van contactgeluidisolatie wordt gebruik gemaakt van een genormaliseerde contactgeluidgenerator.
Dit is een apparaat waarin een aantal stalen of messing hamers van 500 gram in totaal 10 maal per seconde na een vrije val over een hoogte van 40 mm een klap op de vloer geven.

De op deze wijze in de vloer opgewekte trillingen planten zich in de bouwconstructie voort en kunnen in andere ruimten worden afgestraald in de vorm van luchtgeluid.

In het ontvangvertrek wordt het geluiddrukniveau (L_{co}) gemeten in de hiervoor genoemde vijf octaafbanden.
Dit ontvangvertrek kan de onder de aangestoten vloer gelegen ruimte zijn, maar ook een kamer naast die waarin het hamerapparaat is opgesteld.

Het gemeten geluiddrukniveau (L_{co}) wordt weer genormeerd naar een nagalmtijd T_o = 0,5 s; dit leidt tot de volgende formule:

$$L_{nT} = L_{co} - 10 \log \frac{T}{T_o} \quad [\text{dB}] \qquad (7\text{-}2)$$

octaafband met middenfrequentie, in Hz	125	250	500	1000	2000
normwaarden voor het genormeerde contactgeluidniveau (L_{nT}) in dB	70	66	66	66	70

tabel 7-5: Normwaarden voor het genormeerde contactgeluidniveau (L_{nT})

Waarin: L_{nT} = het genormeerde contactgeluidniveau in dB
L_{co} = het in het ontvangvertrek gemeten geluiddrukniveau in dB
T = de nagalmtijd in het ontvangvertrek in s
T_o = de genormeerde nagalmtijd (= 0,5 s)

De isolatie-index I_{co} wordt gevonden door de gemeten contactgeluidniveaus (L_{nT}) te vergelijken met een vijftal normwaarden (tabel 7-5).

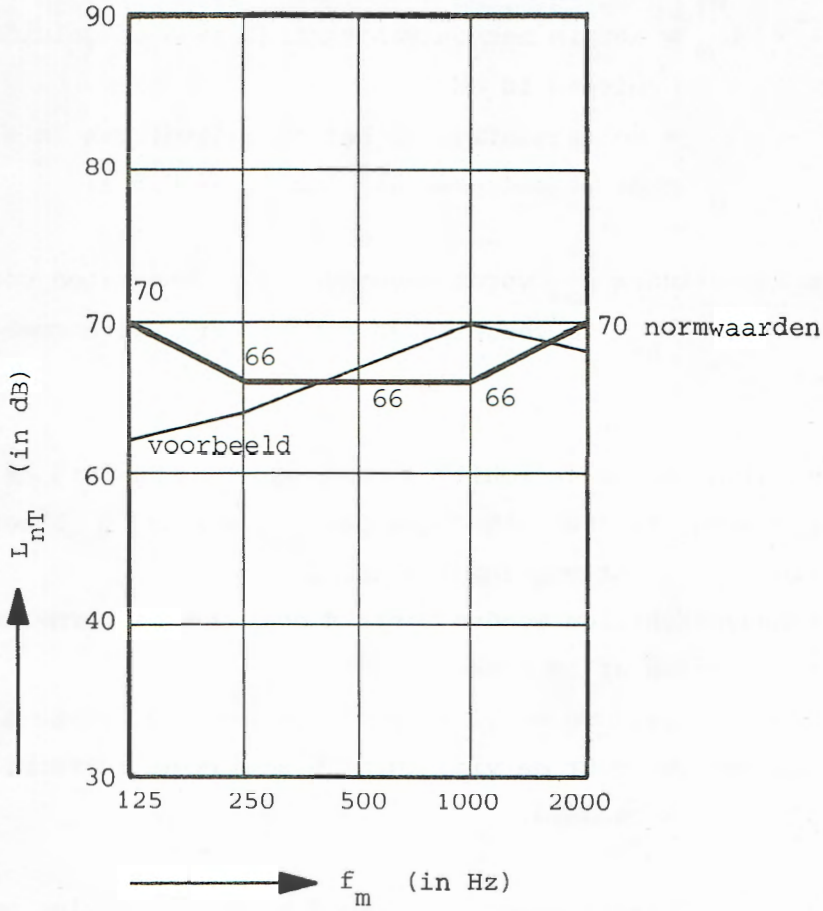
Het bepalen van de verschillen gaat andersom dan bij de luchtgeluidisolatie. Immers, een hoger gemeten niveau (L_{nT}) betekent een slechtere contactgeluidisolatie.
De niveauverschillen worden bepaald door van de normwaarden de gemeten waarden af te trekken.
Uit de vijf niveauverschillen wordt op dezelfde wijze als hiervoor beschreven voor de vijf luchtgeluidisolatieverschillen, de isolatie-index bepaald.

De isolatie-index voor contactgeluid heeft betrekking op de bescherming van een ruimte tegen contactgeluiden die op een vloer, trap of ander voor belopen bestemd oppervlak kunnen ontstaan. Een en ander geldt niet alleen voor boven elkaar gelegen ruimten, maar ook voor vertrekken die naast elkaar gelegen zijn enz.

Aan de I_{co} worden de volgende eisen gesteld:

Voor geluid afkomstig uit andere woningen of niet tot een woning behorende ruimten zoals trappehuizen enz.	$I_{co} > 0$ dB
Voor geluid afkomstig uit ruimten binnen dezelfde woning	$I_{co} > -15$ dB

Voor verder beperken van de hinder wordt weer een verhoging van de waarden met 5 dB aanbevolen.
Voor woningen moet de I_{co} overigens worden bepaald op de kale vloer zonder vloerbedekking en dergelijke.



figuur 7-2: Voorbeeld gemeten van contact-geluidniveau (L_{nT})

Hiernaast wordt een voorbeeld gegeven van de berekening van de isolatie-index I_{co} (figuur 7-2; tabel 7-6).

Hierbij worden de volgende waarden gevonden:

a. 1/5 . (8 +2 -4 +2) = +1,2 afgerond +1

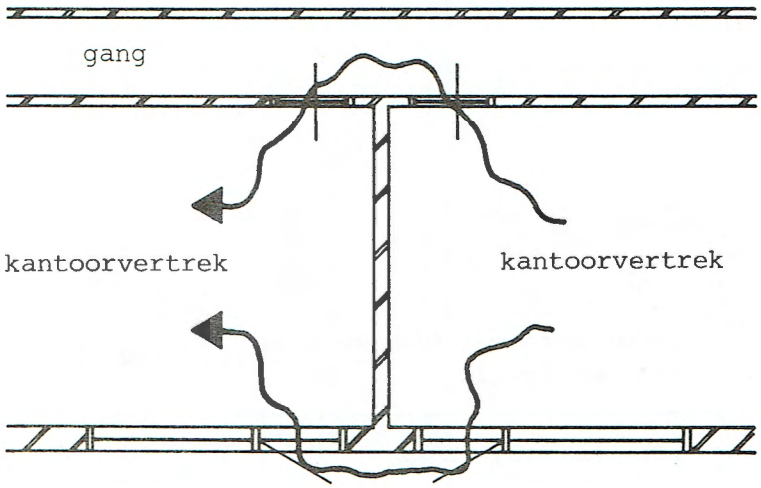
b. ½ . (-4 -2) +2 = -1.0 afgerond -1

c. -4 +4 = 0,0 afgerond 0

De isolatie-index voor contactgeluid is de (algebraïsch) kleinste van de drie uitkomsten, dus: I_{co} = -1 dB.

octaafband met middenfrequentie, in Hz	125	250	500	1000	2000
normwaarden, in dB	70	66	66	66	70
L_{nT} (gemeten), in dB	62	64	68	70	68
niveauverschillen	8	2	-2	-4	2

tabel 7-6: Uit gemeten L_{nT} en normwaarden bepaalde niveauverschillen voor het berekenen van de isolatie-index voor contactgeluid bij de constructie uit figuur 7-2



figuur 8-1: Omloopgeluid via ramen en deuren

8 OMLOOPGELUID

8.0 INLEIDING

Naast de flankerende geluidoverdracht die beschreven is onder 6.8 bestaat er ook zogenaamd omloopgeluid.
Hierbij moet men denken aan:

- geluid via andere ruimten
- geluid via aansluitdetails
- geluid via een verlaagd plafond
- geluid via koven, (unit)omkastingen, enz.
- geluid via luchtkanalen

8.1 GELUID VIA ANDERE RUIMTEN

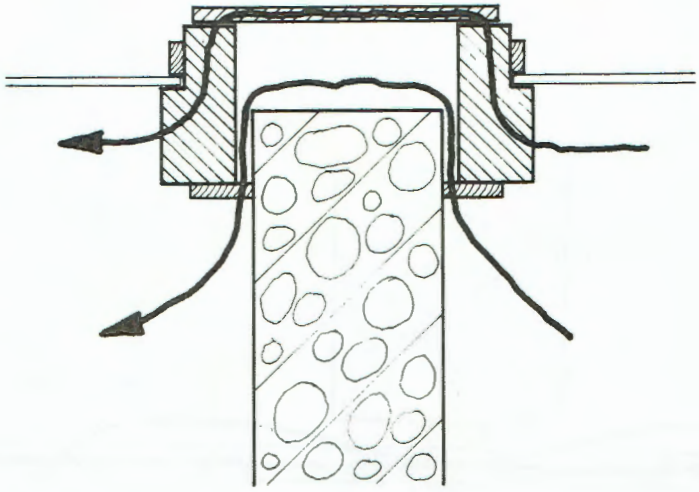
In figuur 8-1 is aangegeven hoe geluid via omwegen toch de naast gelegen ruimte kan bereiken.

Een goede scheidingswand tussen twee kantoorvertrekken heeft weinig nut als er in ernstige mate sprake is van omloopgeluid. Twee dicht bij elkaar geplaatste deuren in de gangwand kunnen, wanneer ze niet van een redelijke kierafdichting zijn voorzien (vaak worden ook geen benedendorpels toegepast) een goede geluidisolatie te niet doen.
Hetzelfde geldt voor dicht bij elkaar gelegen te openen ramen in de gevel.
Hierdoor is het vaak mogelijk van kamer naar kamer een gesprek te voeren zonder stemverheffing.

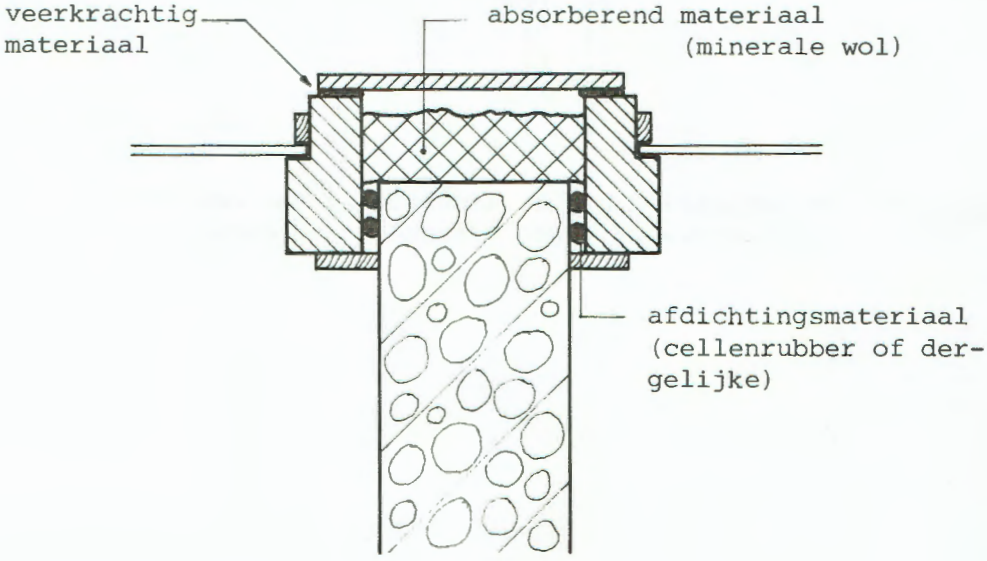
8.2 GELUID VIA AANSLUITDETAILS

Aansluitdetails geven vaak aanleiding tot allerlei geluidlekken.

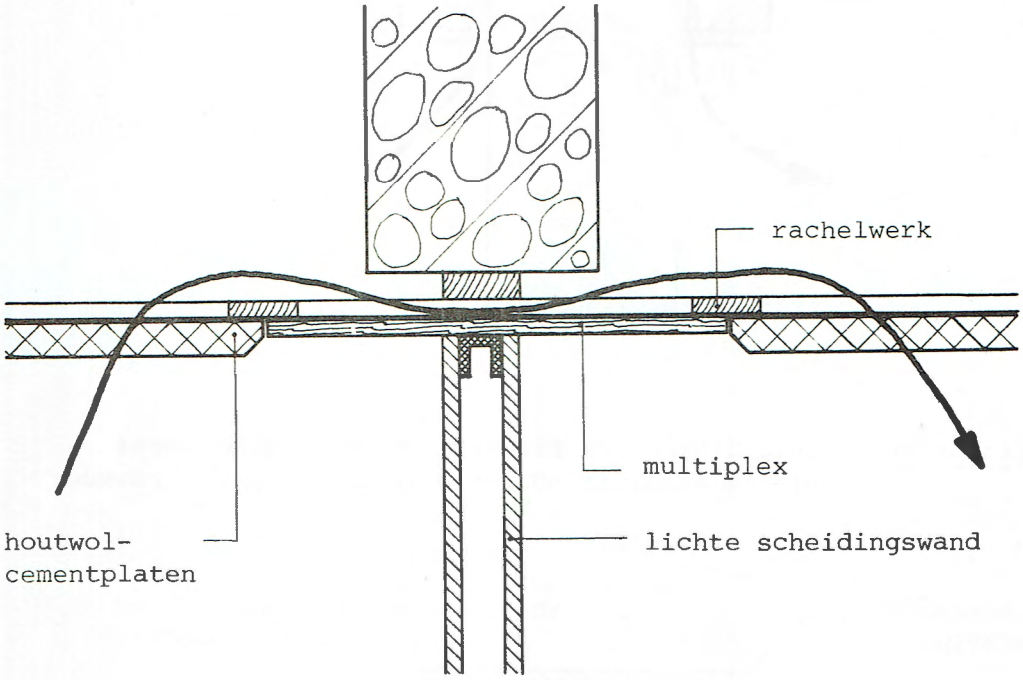
Een veel voorkomende tekortkoming wordt gevonden bij de aansluiting bouwmuur-gevel (figuur 8-2 en 8-3).



figuur 8-2: Geluidlekken en flankerende geluidoverdracht bij de aansluiting van gevelpuien op de bouwmuur

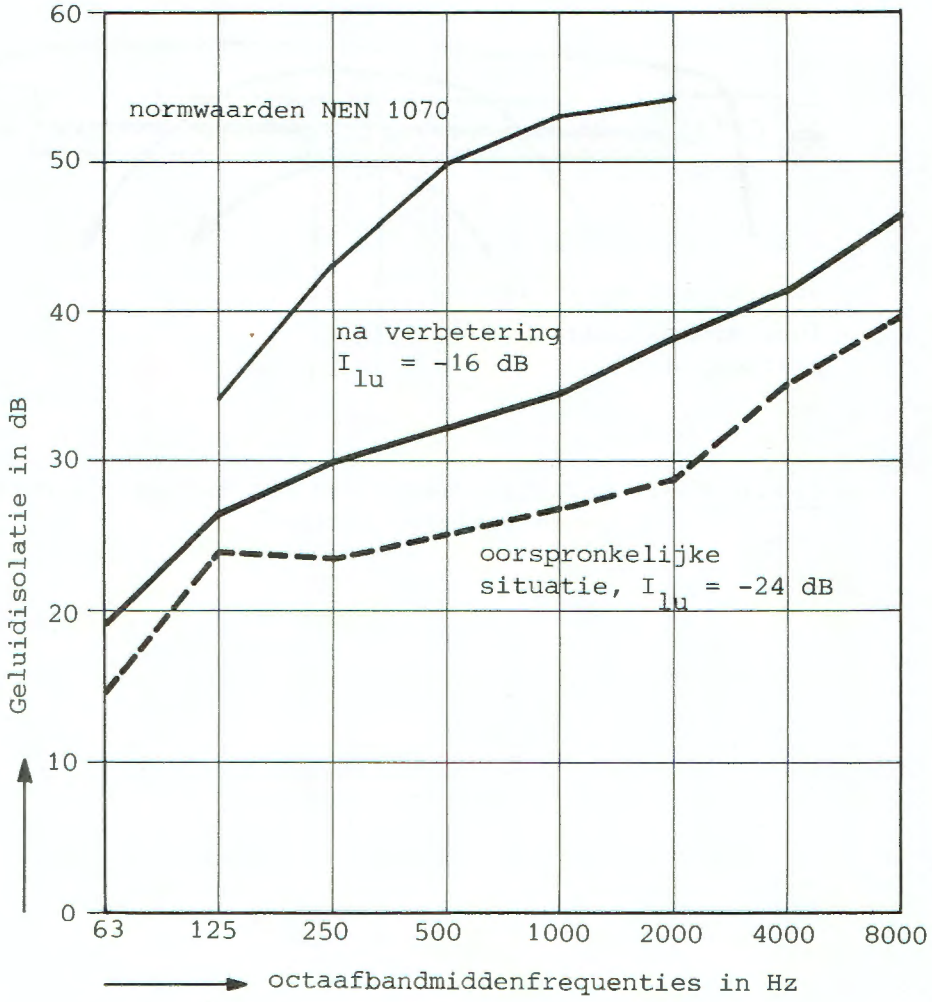


figuur 8-3: Verbeterde situatie van figuur 8-2

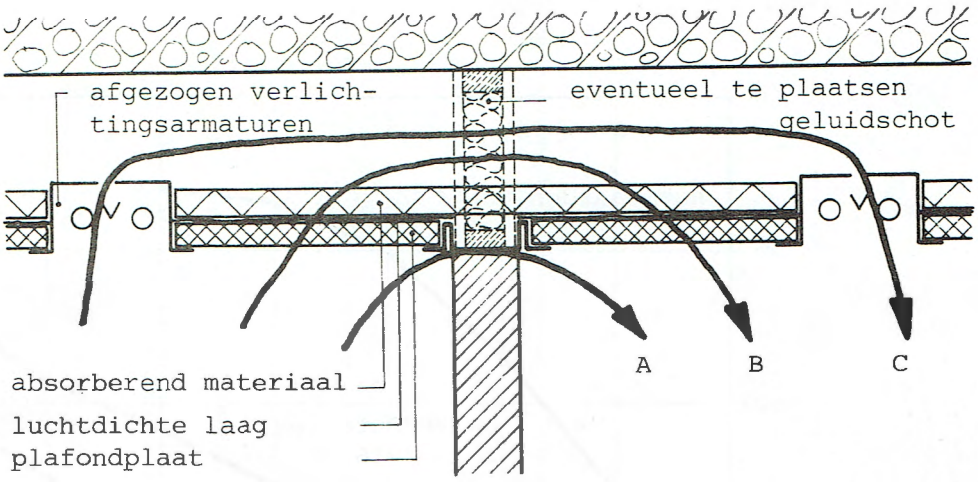


figuur 8-4: Omloop geluid bij de aansluiting van een lichte scheidingswand tegen plafond en betonbalk

Een ander voorbeeld is de aansluiting van een lichte scheidingswand tegen een betonbalk (figuur 8-4).
Via een strook multiplex is een goede aansluiting van wand en plafond gecreëerd. Het geluid dat door de zeer poreuze houtwolcementplaten dringt vindt echter een gemakkelijke weg naar de andere kamer door de overgebleven kier.
Figuur 8-5 laat zien welke verbetering in de geluidisolatie optreedt als dit lek provisorisch wordt gedicht.



figuur 8-5: Verbetering van de geluidisolatie in de situatie van figuur 8-4 door provisorisch dichten van het lek



figuur 8-6: Mogelijke wegen van het geluid via de ruimte boven verlaagd plafond

8.3 GELUID VIA VERLAAGD PLAFOND

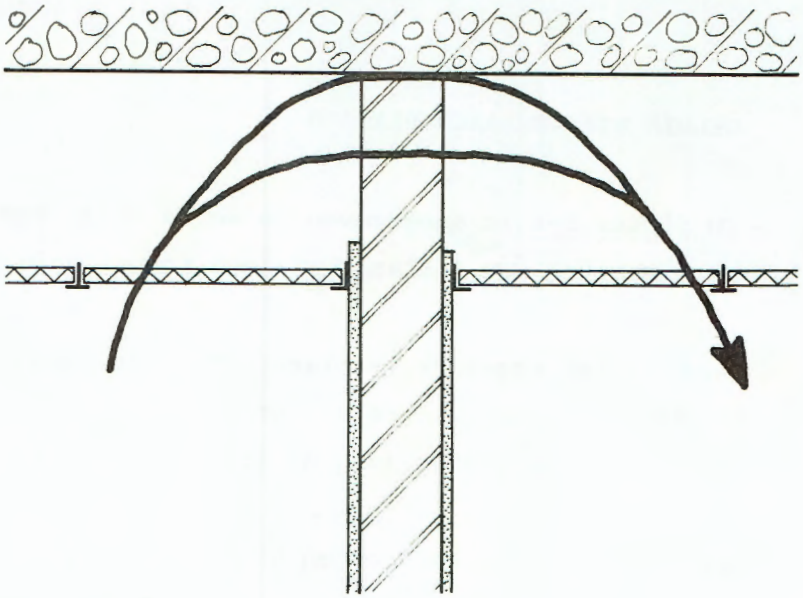
In figuur 8-6 is aangegeven op welke wijze een geluid via de ruimte boven een verlaagd plafond in het andere vertrek kan komen.

Soms is het mogelijk verplaatsbare scheidingswanden tegen een verlaagd plafond aan te sluiten.
Rechtstreekse kieren (weg A) dienen in de eerste plaats te worden voorkomen.
Het binnen de perken houden van het omloopgeluid via weg B is niet zo eenvoudig. Slechts bij vrij zware plafondplaten die ook goed in de oplegprofielen aansluiten is een redelijke geluidisolatie haalbaar. Daarbij moet wel de spouw niet hoger zijn dan dan ca. 0,3 m en moet daarin veel absorberend materiaal worden aangebracht. Verder is een luchtdichte laag, die gecombineerd kan worden met de plafondplaat of met het absorberende materiaal, noodzakelijk.
Het blijft echter vrijwel onmogelijk om aan eisen van $I_{lu} > -15$ dB te voldoen.

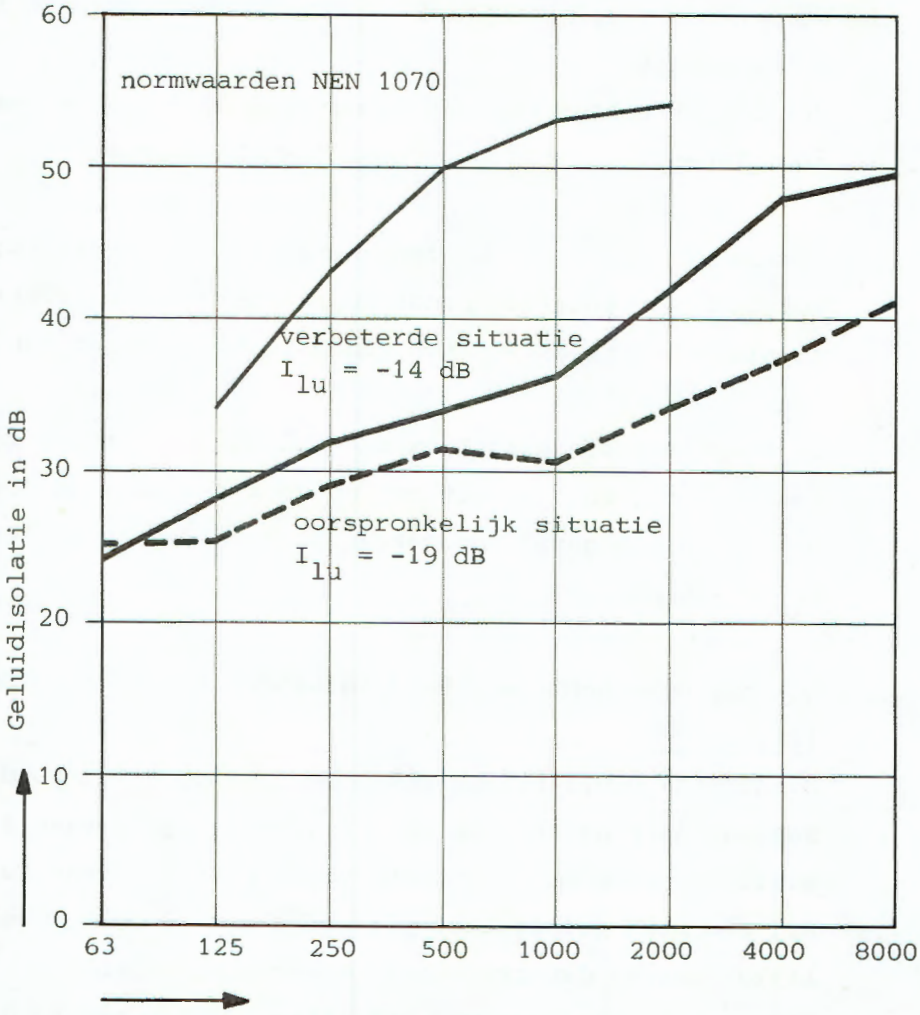
Geluid via weg C kan worden voorkomen door de lichtarmaturen te voorzien van geluiddempende kappen of door ze rechtstreeks aan te sluiten (via akoestisch gedempte slangen) op een luchtkanaal.

De beste methode blijft om de wand door te zetten tot de onderkant van de constructievloer of door een geluidschot te plaatsen. Dat is in elk geval noodzakelijk als er eisen worden gesteld van $I_{lu} > -10$ dB.

Ook bij steenachtige scheidingswanden kunnen problemen optreden (figuur 8-7).
Wanneer de pleisterlaag boven het plafond niet wordt doorgezet bestaat daar grote kans op een poreuze wand. Vaak is ook de aansluiting tegen de constructievloer niet blijvend luchtdicht.
Bij een niet geluiddicht plafond (houtwolcementplaten of dergelijke) kunnen dan grote geluidlekken optreden.
Figuur 8-8 toont aan wat het effect is van het bepleisteren van het bovenste wandgedeelte in een praktijkgeval waar dit eerst achterwege was gelaten.



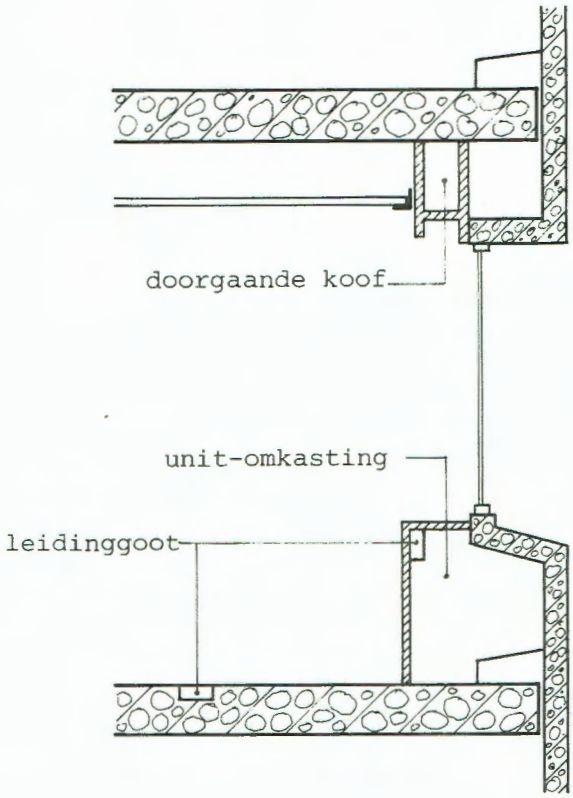
figuur 8-7: Geluidlekken bij de aansluiting van een steenachtige wand tegen de bovenliggende vloer



figuur 8-8: Verhoging van de geluidisolatie na verbeteren van de situatie in figuur 8-7

8.4 GELUID VIA KOVEN, (UNIT)OMKASTINGEN, ENZ.

Een bekend geluidlek is dat via van het ene naar het andere vertrek doorlopende koven, kabelgoten, (unit)omkastingen, enz. (figuur 8-9).



figuur 8-9: Geluidwegen via koven, unitomkastingen, enz.

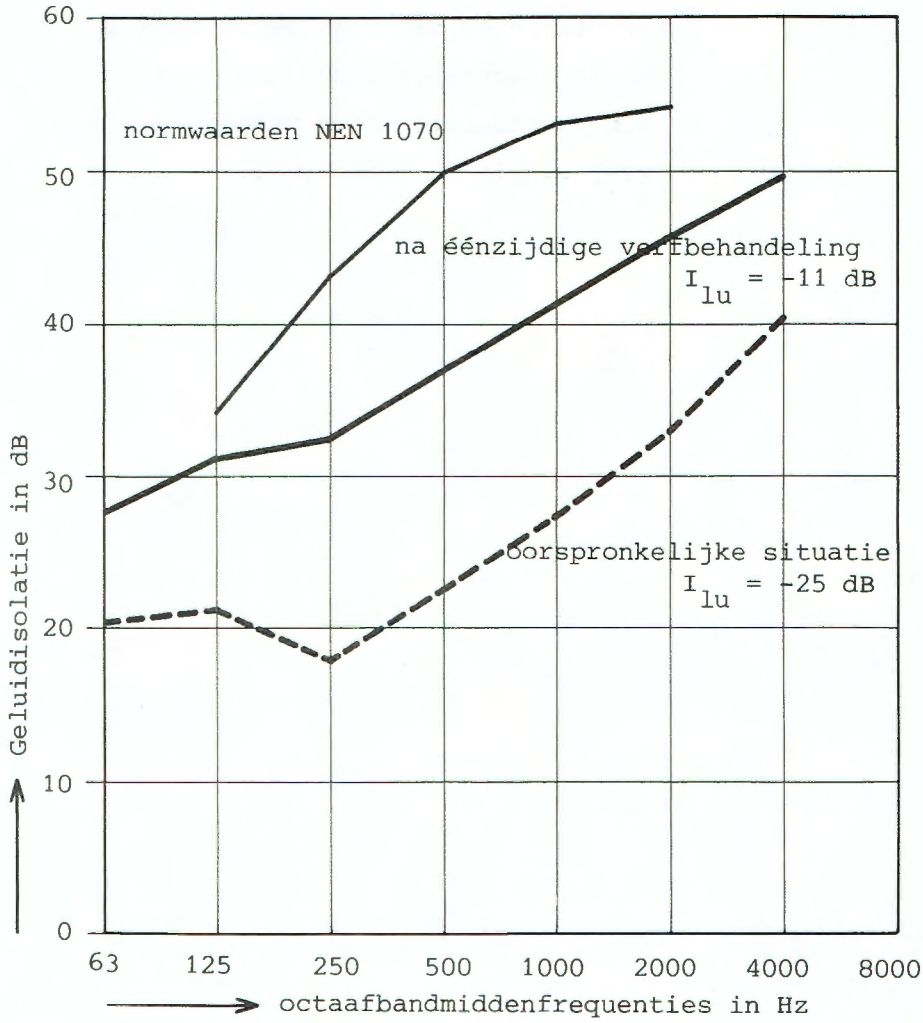
Bij iedere scheidingswand dienen dit soort doorgaande kanalen door een schot te worden afgedicht. In geval van een leidinggoot is het soms mogelijk een stuk van ongeveer 0,5 m te vullen met minerale wol.
Ook is het noodzakelijk de beplating ter plaatse van de wand te onderbreken. Trillingen in de platen kunnen ernstige flankerende geluidoverdracht geven.

8.5 GELUID VIA LUCHTKANALEN

Wanneer een ruimte is aangesloten op een luchtkanaal kan via dit kanaal geluidoverdracht naar het aangrenzende vertrek optreden. Veelal moeten de roosters daarom door middel van akoestisch gedempte slangen op de kanalen worden aangesloten of moeten geluiddempers in het systeem worden opgenomen.

8.6 ALGEMEEN

De hierboven aangehaalde voorbeelden zijn zeker niet volledig. Er is slechts getracht aan te geven dat een goede geluidisolatie een voortdurende zorg vraagt voor het detail, zowel bij het ontwerp als in de uitvoering.



figuur 9-1: Verbetering luchtgeluidisolatie van een poreuze betonsteenwand door éénzijdige verfbehandeling

9 UITVOERING VAN WANDEN

9.0 INLEIDING

In de volgende hoofdstukken zal van een aantal constructies worden besproken hoe ze in de praktijk voldoen en welke fouten bij de uitvoering moeten worden voorkomen.

9.1 STEENACHTIGE WANDEN MET I_{lu} > -10 dB

In het navolgende worden enige wandtypen genoemd die bij goede uitvoering en zorg voor de details een luchtgeluidisolatie van I_{lu} > -10 dB kunnen geven.

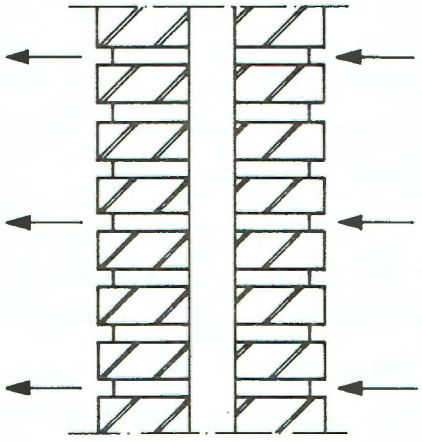
Halfsteens metselwerk (baksteen) één- of tweezijdig bepleisterd; eventueel in schoon werk, maar dan wel zeer zorgvuldig (vol en zat) gemetseld en nauwkeurig gevoegd.

Poriso-metselwerk, 90 mm dik één- of tweezijdig bepleisterd. Doordat deze constructie zich op de grens bevindt van de isolatie eis kan door kleine tekortkomingen in de aansluitingen reeds een te geringe geluidisolatie ontstaan. Schoon werk is niet mogelijk.

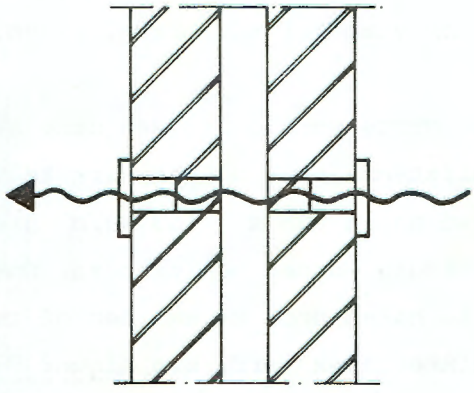
Poriso-metselwerk, twee maal 70 of 90 mm met daartussen een specievoeg. Deze specievoeg dient om de luchtdichtheid van de wand te waarborgen, zodat de buitenzijden in schoon werk kunnen worden uitgevoerd. In de praktijk leidt dit, door verkeerde of onzorgvuldige uitvoering, echter vaak tot teleurstellingen.

Lichtbetonsteen. Door de grote porisoteit van deze stenen is het niet mogelijk in een halfsteens muur schoon werk te verwezenlijken. Deze wanden, die een massa van m > 150 kg/m^2 dienen te hebben, moeten één of tweezijdig worden bepleisterd. Ook is het mogelijk ze luchtdicht te maken door ze aan één of twee zijden te behandelen met een dikke latex verf, zie figuur 9-1.

Voor het verwezenlijken van schoon werk in betonsteen dienen ook dubbele wanden met een specievoeg in het midden te worden gebruikt.



Bijna altijd zijn bij schoon metselwerk kieren en gaten aanwezig, die geluidlekken kunnen vormen



Tegenover elkaar gelegen inbouwdozen kunnen aanleiding zijn tot ernstige geluidlekken

figuur 9-2: Geluidlekken bij spouwmuren

Bouwblokken (beton, kalkzandsteen, enz.) met een minimale massa van m = 150 kg/m^2, één- of tweezijdig bepleisterd of behandeld met latexverf. Schoon werk is niet mogelijk omdat door de grote afmetingen van de blokken niet is te garanderen dat bij het metselen alle voegen afdoende met specie worden gedicht.

Voor de dubbele wanden met een specievoeg ertussen geldt dat ze werkelijk als één massa moeten werken. Het is dus zaak zodanige specie te gebruiken dat een zeer sterke hechting wordt verkregen. Ook het toepassen van ankers is noodzaak.
Bij loskrimpen van de beide muurhelften ontstaat namelijk een spouwconstructie met een zeer smalle spouw, die een heel ongunstige (massa-veer) resonantiefrequentie kan hebben.

Bij wanden die gepleisterd worden, of zorgvuldig gevoegd, is het zaak deze behandeling ook boven een verlaagd plafond door te zetten, daar anders de kans bestaat op omloopgeluid (zie 8.3).

9.2 STEENACHTIGE WANDEN MET EEN I_{lu} > 0 dB

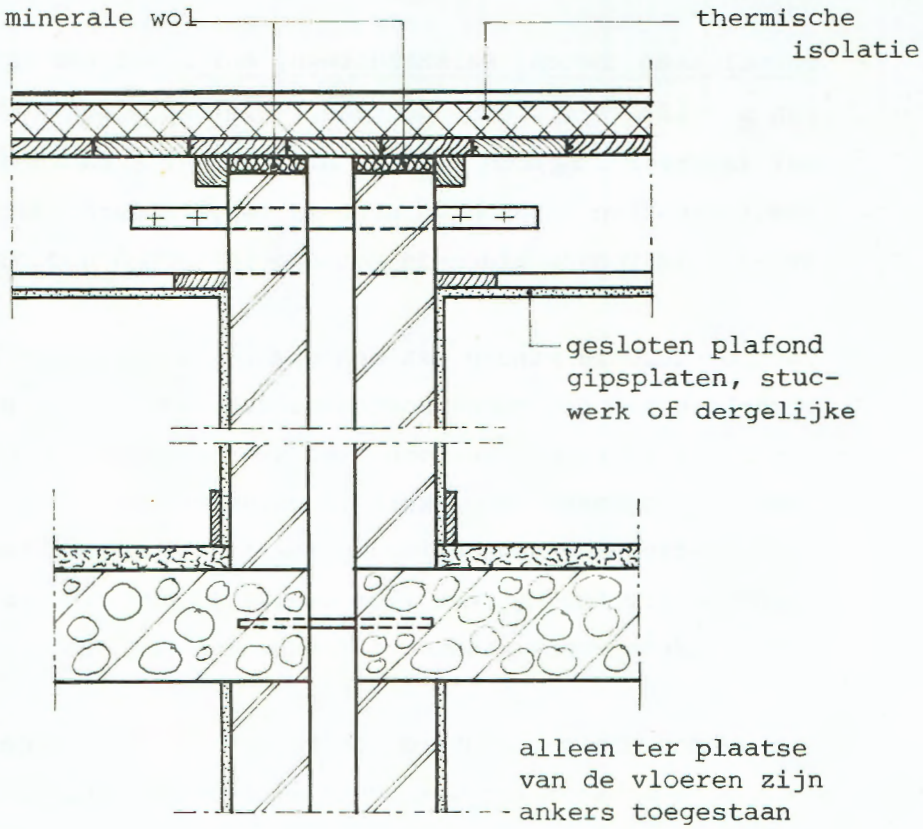
Constructies die aan een I_{lu} > 0 dB voldoen kunnen onder meer de volgende zijn.

Monoliet wand van beton of steen met een minimale massa van m = 400 kg/m^2. Schoon metselwerk is niet mogelijk.

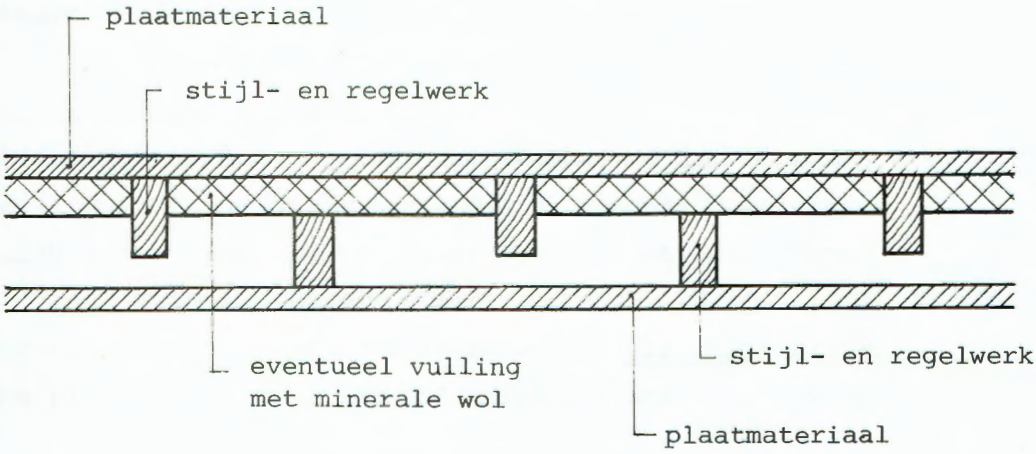
Spouwmuur van porisosteen, lichtbetonsteen enz. met bladen van ongelijke dikte aan de binnen- of buitenzijde bepleisterd (beraapt), waarvan de spouw wordt gevuld met minerale wol.

Spouwconstructie van baksteen metselwerk of zware betonsteen, waarbij minstens één spouwblad aan de binnenzijde is beraapt.

Soms wordt de fout gemaakt dat aan weerszijden van de muur tegenover elkaar wandcontactdozen voor bijvoorbeeld radio en televisie of telefoon worden ingebouwd, waardoor een geluidlek ontstaat (figuur 9-2).



figuur 9-3: Ankerloze spouwmuur



figuur 9-4: Lichte wand met gescheiden stijl- en regelwerk

Ook de al eerder genoemde flankerende geluidoverdracht kan bij aansluiting van lichte scheidingswanden tegen de zware muur de geluidisolatie sterk verminderen.

9.3 ANKERLOZE SPOUWMUUR

Voor het bereiken van zeer goede resultaten (I_{lu} > +5 dB) biedt de ankerloze spouwmuur goede mogelijkheden. De spouwbladen dienen beide goed luchtdicht te zijn en de spouw moet, ter voorkoming van flankerende geluidoverdracht tot in de fundering doorlopen; in ieder geval mogen de vloeren niet doorlopen.
Ook bij de aansluiting van het dak moet worden gewaakt voor flankerende geluidoverdracht en geluidlekken.
De dakbalken mogen niet doorlopen en het plafond moet goed gesloten worden uitgevoerd (figuur 9-3).

Zie voor ankerloze spouwmuren ook Stichting Bouwresearch, publicatie nr. 43.

9.4 LICHTE WANDEN EN VOORZETWANDEN

Alleen wanden uitgevoerd met een spouw geven een redelijke geluidisolatie.
Deze wanden ontlenen hun geluidisolatie niet aan massa, maar aan de eigenschappen van spouwconstructies, zoals omschreven in 6.5.

Om een goed resultaat te bereiken dienen de spouwbladen onderling geen (starre) koppelingen te hebben, om het rechtstreeks overdragen van trillingen van het ene naar het andere spouwblad te voorkomen.

In het werk gemaakte wanden

Bij in het werk gemaakte wanden kan het meest eenvoudig met een gescheiden stijl- en regelwerk worden gewerkt (figuur 9-4).

Voor de bekleding kunnen gipsplaten in een verschillende dikte worden genomen. Ter onderdrukking van resonanties kan de spouw worden opgevuld met minerale wol. Tempex of andere "gesloten cellige" materialen zijn niet geschikt omdat ze niet poreus zijn en daardoor geen geluidabsorberende werking hebben.
Het is ook mogelijk de stijl- en regelwerken te bekleden met houtwolcementplaten die worden bepleisterd. De houtwolcementplaat neemt, door zijn poreuze structuur, een deel van de absorberende werking van de minerale wol over.
Met dit soort constructies kunnen in elk geval luchtgeluidisolatie-indices van $I_{lu} > -15$ dB worden behaald.
Bij zorgvuldige uitvoering en grotere plaatdikten (of meer lagen) zijn nog betere waarden mogelijk.

Fabrieksmatig vervaardigde wanden

Het voert te ver om alle voorkomende typen systeemwand hier te behandelen.
Het principe is gelijk aan het hiervoor behandelde.

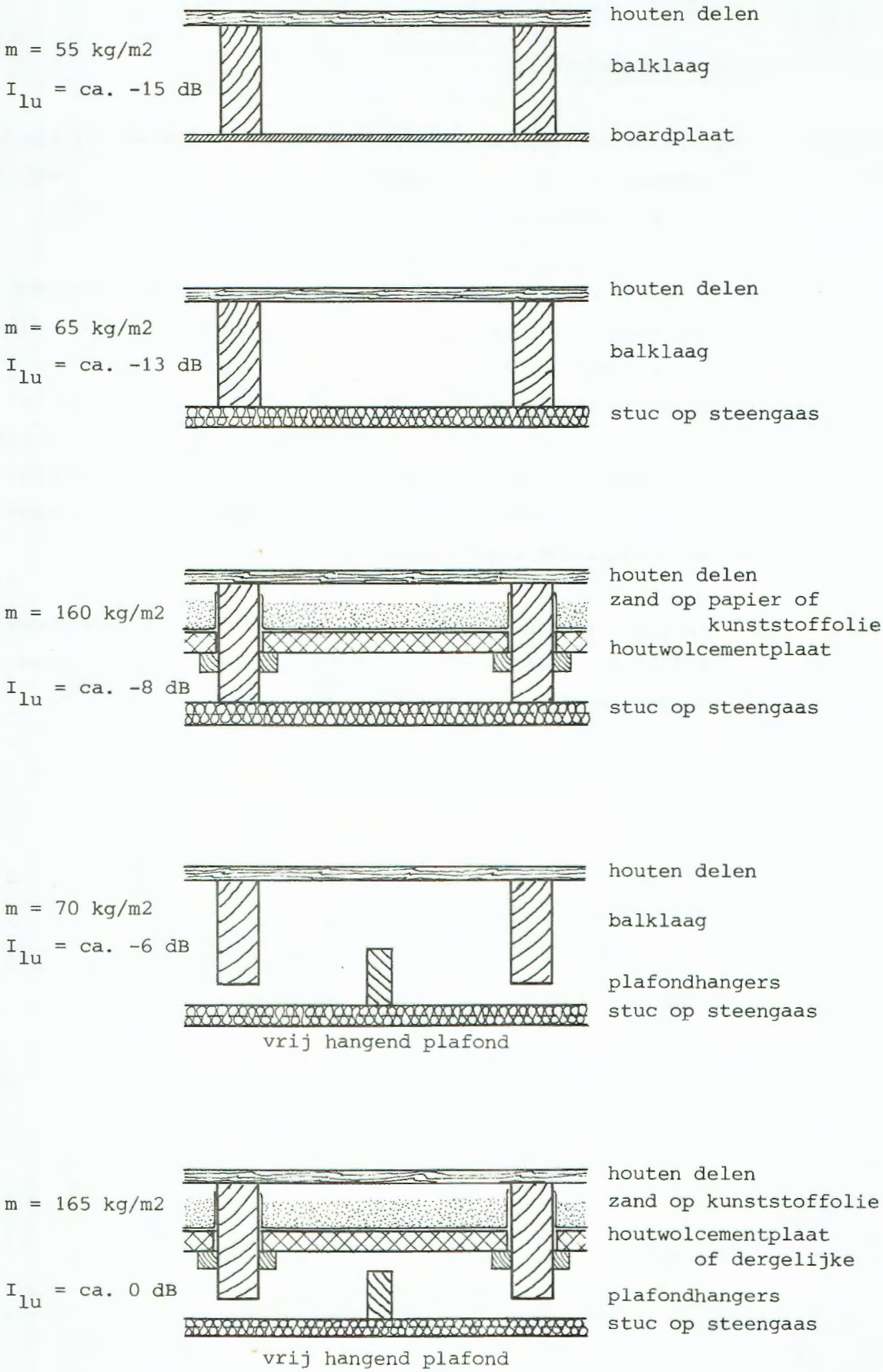
Bij het kiezen van een wand dient men niet alleen uit te gaan van de door de fabrikant vaak opgegeven waarde voor de gemiddelde isolatie tussen 100 en 3200 Hz.
Het is zaak meetrapporten met de isolatie bij verschillende frequenties aan te vragen, zodat hieruit de luchtgeluidisolatie-index (I_{lu}) kan worden berekend.
Verder dient men zich te realiseren dat de meetgegevens laboratoriumwaarden vertegenwoordigen. Door flankerende geluidoverdracht, omloopgeluid en niet correct uitgevoerde aansluitingen wordt in de praktijk al gauw een ca. 5 dB lagere waarde gevonden.
In het algemeen geldt dat de wanden zelf voldoende mogelijkheden in zich hebben voor een goede geluidreductie van kamer naar kamer.
Het uiteindelijke resultaat staat of valt met het ontwerp en de uitvoering van de aansluitdetails.

Voorzetwanden

Voorzetwanden worden gebruikt om aan bestaande wanden een hogere luchtgeluidisolatie te geven of om het afstralen van contactgeluid te beperken.

De wanden kunnen bestaan uit platen op stijl- en regelwerk. Hiervoor kunnen de gebruikelijke materialen (gipskarton, bepleisterd houtwolcement, enz.) worden toegepast.
Vanzelfsprekend worden de beste resultaten bereikt als het stijl- en regelwerk los wordt gehouden van de wand, of althans niet star, maar via veerkrachtig materiaal daartegen wordt bevestigd. Het vullen van de spouw met minerale wol voorkomt het optreden van hinderlijke resonanties.

Bij plaatsen van een buigslappe voorzetwand voor een monolietwand (metselwerk, beton) met een massa van $m > 200$ kg/m^2 kunnen al waarden van $I_{lu} = +3$ dB worden verkregen.



figuur 10-1: Voorbeelden luchtgeluidisolatie houten vloeren

10 UITVOERING VAN VLOEREN

10.1 ZWARE VLOEREN

In het algemeen treden bij de normaal toegepaste vloeren (beton) weinig problemen op. Een betonvloer met een massa m > 400 kg/m^2 bereikt doorgaans een I_{lu} > 0 dB.
Wanneer een hogere I_{lu} is vereist kan gebruik worden gemaakt van een verlaagd plafond, dat bij goede uitvoering (zie verderop) dezelfde werking heeft als een buigslappe voorzetwand. Hiervan mag echter alleen effect worden verwacht als er geen sprake is van flankerende geluidoverdracht.

10.2 LICHTE STEENACHTIGE VLOEREN

Bij lichte vloeren (m = 200 à 300 kg/m^2), die kunnen bestaan uit dunne betonplaten, lichtbeton, holle elementen van beton en baksteen enz., moeten indien hoge eisen worden gesteld (I_{lu} > 0 dB) verlaagde plafonds worden toegepast.
Bij toepassing binnen één woning (I_{lu} > -15 dB) is dit niet nodig. Flankerende geluidoverdracht is niet, of niet in ernstige mate aanwezig als de aansluitende wanden ongeveer dezelfde of een grotere massa (m in kg/m^2) hebben dan de vloer, of als de wanden zijn vrijgehouden van de vloeren.

10.3 HOUTEN VLOERCONSTRUCTIES

Als indicatie worden hier enige voorbeelden gegeven (figuur 10-1).

Hoewel in principe juist (akoestisch gezien) is het verzwaren van een vloerconstructie met zand geen aantrekkelijke zaak, en ook vaak niet mogelijk in verband met de toelaatbare belasting van de balklaag.
In bestaande situaties lijkt het aanbrengen van een vrij zwaar, vrij hangend verlaagd plafond de meest aantrekkelijke oplossing. Wanneer de naden van de vloer goed worden gedicht (hardboardplaten, randen afkitten enz.) en wanneer in de spouw nog absorberend

materiaal wordt aangebracht zijn wellicht nog enkele dB's hogere waarden dan hier genoemd te verkrijgen.
Een houten vloer is overigens ook uit oogpunt van contactgeluidisolatie niet aantrekkelijk. Beide aspecten van geluidisolatie houden in dat een houten vloer niet kan voldoen aan de eisen voor een woningscheidende vloer (I_{lu} > 0 dB).
Zelfs voor ruimten binnen een woning is een vrijhangend plafond feitelijk vereist.
Door kieren tussen de vloerdelen en bij de aansluiting van de vloer aan de wanden kunnen namelijk in de praktijk ook nog wel lagere waarden dan hier aangegeven worden aangetroffen.

10.4 VERLAAGDE PLAFONDS

Van de hiervoor genoemde verlaagde plafonds mogen bij diverse uitvoeringsvormen de volgende verbeteringen worden verwacht. De getallen gelden bij afwezigheid van flankerende geluidoverdracht en andere lekken.

Poreuze platen (houtwolcement, minerale wol, enz.) kunnen een verbetering geven van 3 - 5 dB.

Systeemplafonds met wat dichtere platen, die goed sluitend in de ophangconstructie worden bevestigd geven een verbetering van 3 - 8 dB.

Gesloten plafonds, vrij hangend, niet of verend bevestigd aan de vloer en met een voldoend grote massa (m = 5 à 10 kg/m^2) geven bij een redelijke spouwhoogte (> 0,2 m) een verbetering van 10 à 15 dB).

Bij een te smalle spouw (bijvoorbeeld een gipsplaat op een spouw van 30 à 50 mm) kunnen resonanties ontstaan die bij enkele frequenties de geluidisolatie juist verminderen (zie 6.6).

Houten balkvloer met plafond tegen balklaag	I_{co} = ca. -12 dB
kale betonvloer, m = 300 kg/m^2	I_{co} = ca. -4 dB
kale betonvloer, m = 410 kg/m^2	I_{co} = ca. 0 dB
kale betonvloer, m = 490 kg/m^2	I_{co} = ca. +2 dB
kale betonvloer, m = 525 kg/m^2	I_{co} = ca. +4 dB

tabel 10-1: Contactgeluidisolatie van enkele typen vloer

10.5 CONTACTGELUIDISOLATIE

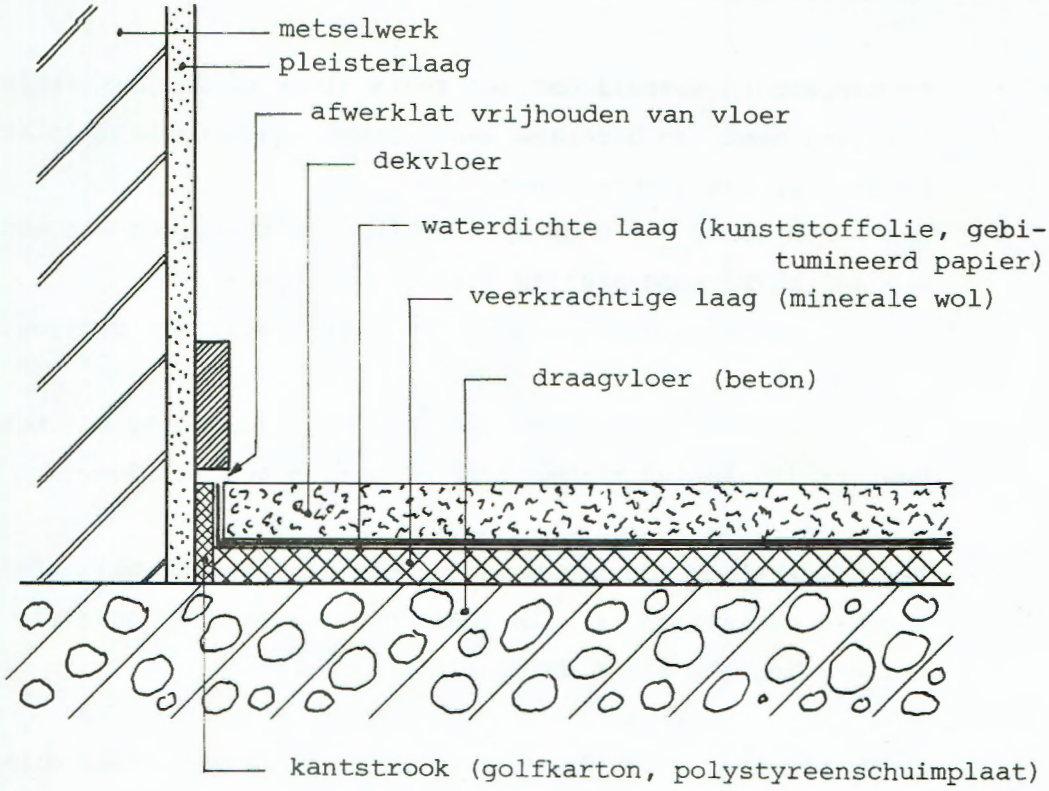
Er kan worden gesteld dat een zware vloer minder makkelijk in trilling komt, en derhalve een grotere contactgeluidisolatie zal hebben dan een lichte vloer.
Bij eisen van I_{co} > 0 dB zijn echter reeds vloeren met een massa m > 400 kg/m^2 noodzakelijk (ca. 160 mm beton).
Als indicatie worden in tabel 10-1 enige getallen gegeven.

Van ribben- of kassettenvloeren kan bij benadering het totaal gewicht (inclusief ribben) per m^2 worden aangehouden.

Een afwerkvloer kan ook enige verbetering geven. Bij asfaltdekvloeren of estrich met als toeslagstof kurk of houtvezels is een verbetering van 5 - 8 dB mogelijk.

De verbetering door vloerbedekking is beperkt, alleen dikke en speciale soorten geven een aanmerkelijke verbetering.
Dunne vloerbedekkingen (linoleum, pvc, naaldvilt. enz.) geven slechts een geringe verbetering (0 - 5 dB).
Dit geldt voor de I_{co} en voor loopgeluiden.
Voor geluid tengevolge van het schuiven met stoelen enz. kan bijvoorbeeld naaldvilt toch al een grote verbetering geven.
Vloerbedekkingen zoals kurklinoleum, tapijt of kunststof op een dikke rug (schuimrubber, wafelrug, enz.) kunnen een verbetering tot ca. 15 dB geven.
Dikke, hoogpolige tapijten, met onderlaag kunnen een even grote verbetering geven als een zwevende dekvloer (ca. 25 dB).

De in de NEN 1070 gestelde eisen gelden echter voor vloeren zonder vloerbedekking. Vandaar dat bij hogere eisen, of lichtere vloerconstructies men zijn toevlucht zal moeten nemen tot buigslappe verlaagde plafonds of zwevende dekvloeren.



figuur 10-2: Zwevende dekvloer

zwevende dekvloer, verbetering	ca. 25 dB
met één geluidbrug, verbetering	ca. 15 dB
met 10 geluidbruggen, verbetering	5-10 dB

tabel 10-2: Invloed geluidbruggen op verbetering contactgeluidisolatie door een zwevende dekvloer

10.6 ZWEVENDE DEKVLOEREN

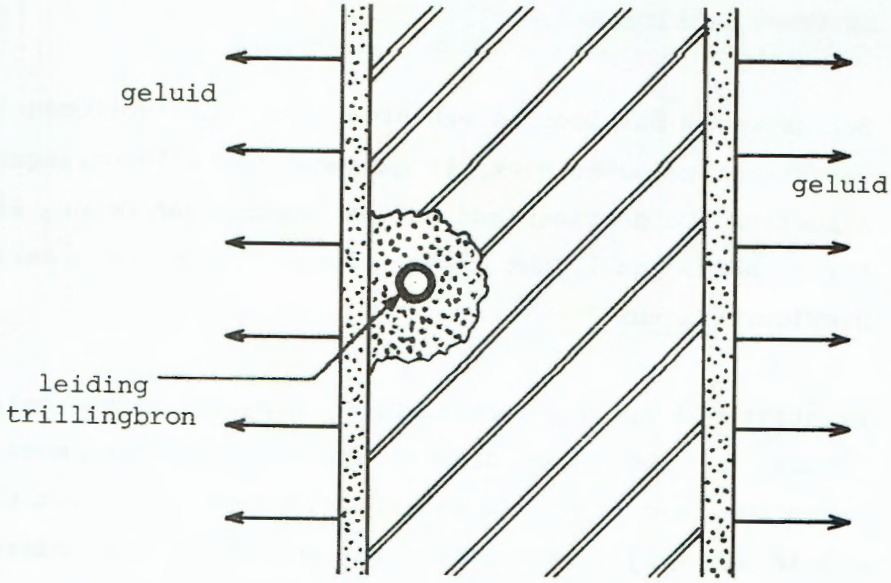
Een zwevende dekvloer is een afwerkvloer die volkomen vrij (via veerkrachtige materialen) is gehouden van alle omringende constructies. De dekvloer kan worden gemaakt van beton, asfalt, estrich, hout, enz.). Het meest toegepast wordt de steenachtige dekvloer (figuur 10-2).

De stijfheid van de veerkrachtige laag is een zeer belangrijke factor. Hoe lichter de draagvloer, des te slapper moet de veerkrachtige laag zijn. Als materialen komen platen van minerale wol in een vrij zware persing in aanmerking. Ook andere vezelmaterialen kunnen worden toegepast.

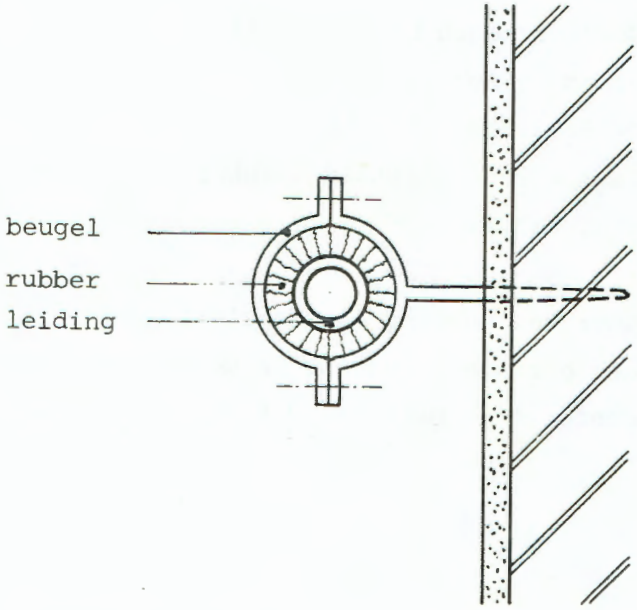
De waterdichte laag is van groot belang om te voorkomen dat cementwater in de veerkrachtige laag dringt. Hierdoor kunnen namelijk geluidbruggen ontstaan.
De invloed hiervan is gegeven in de tabel 10-2.

Geluidbruggen bij de aansluiting tegen de wanden hebben hun invloed in het frequentiegebied vanaf ca. 1000 Hz.
Om deze reden kan hier met een dunnere (stijvere) veerkrachtige laag worden volstaan (ribkarton, polystyreenschuimplaat 2 à 3 mm dik, enz.).

Door veroudering van de elastische lagen ontstaat op den duur een geringe teruggang in de isolatie. Deze blijkt in de praktijk echter niet meer dan 3 à 4 dB te bedragen.



figuur 11-1: Afstraling van geluid door in de muur aangebrachte leiding



figuur 11-2: Akoestisch goede bevestiging van leidingen aan een muur

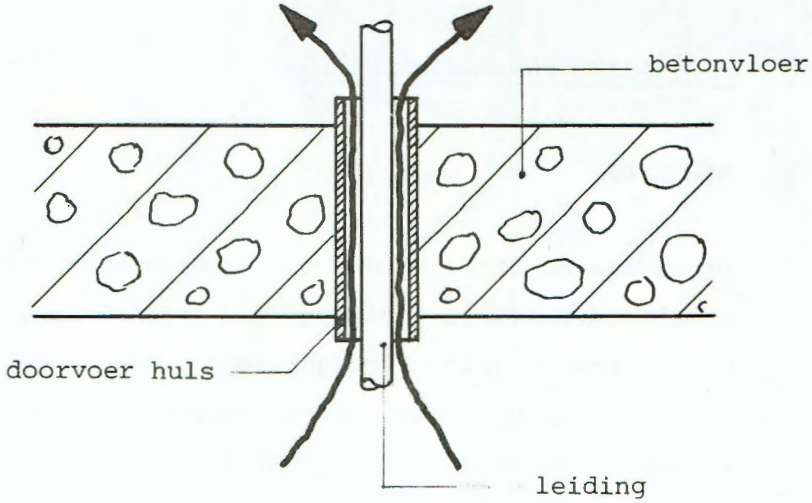
11 UITVOERING VAN INSTALLATIES

11.1 MACHINES

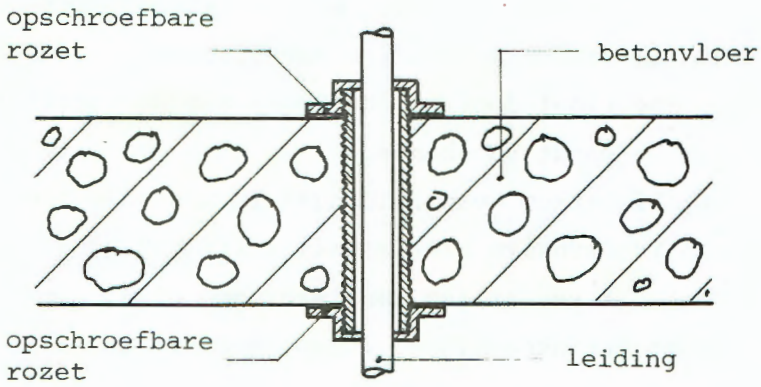
De meeste machines worden van fabriekswege voorzien van geëigende trillingdempers om contactgeluid te voorkomen.
Om te bepalen welke luchtgeluidisolatie-eisen gesteld moeten worden aan de omwandingen van de ruimten waarin deze machines worden opgesteld moeten gegevens over de geluidproductie worden opgevraagd.

11.2 LEIDINGEN EN SANITAIRE TOESTELLEN

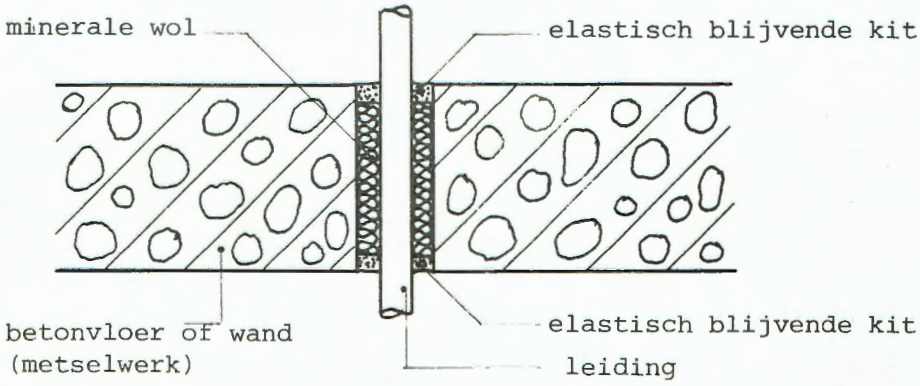
Watervoerende leidingen en sanitaire toestellen moeten zodanig aan de wanden en overige constructies worden bevestigd dat geluidoverlast door rechtstreeks aan de constructie afgegeven trillingen wordt voorkomen.
Het "inhakken" van leidingen in wanden van geluidgevoelige ruimten is derhalve niet mogelijk (figuur 11-1).
Voor het bevestigen van leidingen dient gebruik te worden gemaakt van akoestisch gedempte bevestigingsmiddelen (figuur 11-2).



figuur 11-3: Slechte leidingdoorvoer



figuur 11-4: Akoestisch redelijke leidingdoorvoer met opschroefbaar rozet



figuur 11-5: Akoestisch goede leidingdoorvoer met minerale wol en kit

11.3 HET DOORVOEREN VAN LEIDINGEN (GELUIDLEKKEN)

Het doorvoeren van leidingen door vloeren en wanden veroorzaakt vaak geluidlekken (luchtgeluid) en overdracht van contactgeluid (figuur 11-3).
De buis mag niet in contact staan met de vloer, maar er mag ook geen lek optreden.

Losse rozetten geven vanzelfsprekend nauwelijk een afdichting. De opening tussen leiding en mantelbuis kan worden afgedicht door in te storten doorvoerhulzen te nemen waar een afdekrozet opgeschroefd kan worden (figuur 11-4).

Ook is het mogelijk met kit en minerale wol een blijvende afdichting te verzekeren (figuur 11-5).

Dit zijn enkele typen van akoestisch goede leidingdoorvoeren. Er zijn echter nog meer oplossingen denkbaar; in de handel zijn allerlei speciale doorvoerhulzen verkrijgbaar.

12 BEREKENINGSGRONDSLAGEN, MATERIAALGEGEVENS, RICHTLIJNEN

12.0 INLEIDING

In dit hoofdstuk worden de in 2.6 genoemde eisen voor het toelaatbare geluidniveau in verschillende vertrekken verder uitgewerkt.
Van een aantal materialen en constructies worden de absorptiecoëfficiënten gegeven (zie ook 3).
De in 7.1 behandelde eisen voor de luchtgeluidisolatie tussen verschillende vertrekken worden gedifferentieerd naar ruimte en soort werk weergegeven.

Met nadruk wordt gesteld dat de genoemde eisen moeten worden gezien als een soort richtgetallen.
Omdat de officiële normen en voorschriften op dit punt nog lang niet volledig zijn is het heel goed mogelijk dat andere instellingen of personen enigszins afwijkende getallen hanteren.

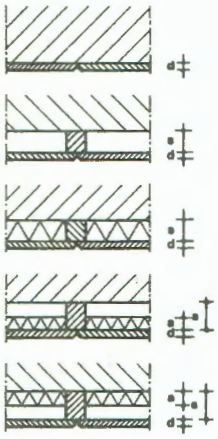
12.1 TOELAARBARE GELUIDNIVEAUS IN WERKVERTREKKEN

Vertrek/arbeid	Stoorgeluid van buiten e.d. L_{eq} in dB(A)		Achtergrondgeluid installaties e.d. L_{95} in dB(A)	
	voorkeur	max	voorkeur	max
in éénpersoonsvertrekken bij studie, denkarbeid enz. in leeszalen	30 - 35	40	30 - 35	40
in één- of meerpersoonskamers bij ontwerpwerk, redactioneel werk enz. in vergaderzaal in leslokaal	35 - 40	45	30 - 35	40
in grotere kantoorruimten bij administratieve werkzaamheden, tekenwerk, enz.	40	45	35	40
in grote kantoorzalen bij typen, mechanische administratie enz.	45	50	40	45
in telex- en computerruimten enz.	45 - 55	60	45 - 55	60

opmerking: In grote kantoorzalen (kantoortuinen) is het vaak wenselijk een achtergrondgeluidniveau te hebben van 50 - 55 dB(A). Door dit vrij hoge geluidniveau worden andere geluiden gemaskeerd en wordt de privacy vergroot. Voor kantoortuinen gelden verder nog allerlei aparte voorwaarden.

12.2 AKOESTISCHE ABSORPTIECOEFFICIENTEN

Bron: Bouwfysisch Tabellarium t.b.v. de colleges van Prof. ir. A.C. Verhoeven, TH-Delft, vakgroep Bouwfysica, augustus 1974.



A materiaal direct tegen harde ondergrond

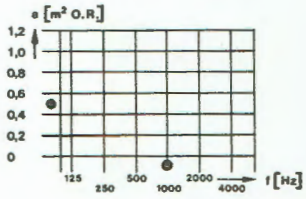
B materiaal op regelwerk, luchtspouw

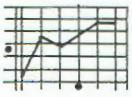
C materiaal op regelwerk, spouw geheel gevuld met akoestisch materiaal

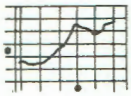
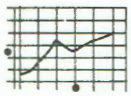
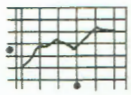
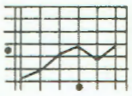
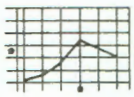
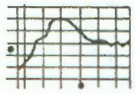
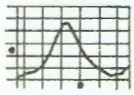
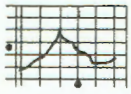
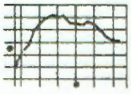
D materiaal op regelwerk, spouw gedeeltelijk gevuld met akoestisch materiaal

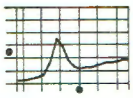
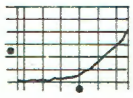
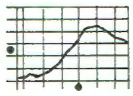
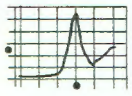
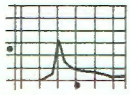
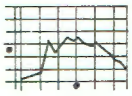
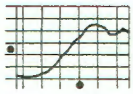
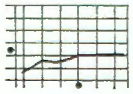
E materiaal op regelwerk, spouw gedeeltelijk gevuld met akoestisch materiaal

REFERENTIEKARAKTERISTIEK



nr.	MATERIAAL (maten in mm)	TYPE	absorptiecoëfficiënten a [m² O.R.] bij de middenfrequenties 125	250	500	1000	2000	4000	KARAKTERISTIEK
	STEENACHTIGE MATERIALEN								
1	grindbeton, ca. 500 kg/m²		0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	
2	gasbeton, 70 kg/m²		0,14	0,19	0,24	0,32	0,41	-	
3	bimsbeton		0,15	0,40	0,60	0,60	0,60	0,60	
4	schoon baksteenmetselwerk		0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	
	PLEISTERS								
5	kalkcement pleisterwerk, direct op steenachtige ondergrond	A	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	
6	akoestische pleister, in enige lagen aan te brengen	A	0,15	0,20	0,35	0,60	0,6	0,5	
7	spuitasbest	A	0,29	0,24	0,65	0,79	0,88	0,65	
	AKOESTISCHE MATERIALEN								
8	zachtboard (ongeverfd), d = 19, s = 23	B	0,13	0,72	0,59	0,76	0,90	0,92	
9	halfhardboard (ongeverfd), d = 6,2; s = 50	B	0,24	0,20	0,09	0,04	0,04	0,12	
10	spaanplaat, 5,0 kg/m², d = 8, s = 30	B	0,25	0,22	0,04	0	0,03	0,08	

nr.	MATERIAAL (maten in mm)	TYPE	absorptiecoëfficiënten a [m^2 O.R.] bij de middenfrequenties 125	250	500	1000	2000	4000	KARAKTERISTIEK
11	spaanplaat (lichtgewicht), 6,4 kg/m^2, d = 19, s = 50	B	0,16	0,58	0,75	0,53	0,54	0,42	
12	houtwolcementplaat, akoestisch d = 25	A	0,15	0,23	0,23	0,51	0,73	0,75	
13	houtwolcementplaat, akoestisch d = 25, s = 10	B	0,30	0,26	0,51	0,91	0,79	0,95	
14	houtwolcementplaat, akoestisch d = 25, s = 30	B	0,25	0,29	0,79	0,76	0,74	0,93	
15	houtwolcementplaat, akoestisch d = 25, s = 50	B	0,11	0,33	0,67	0,53	0,64	0,80	
16	houtwolcementplaat, akoestisch d = 25, s = 80	B	0,23	0,55	0,64	0,57	0,81	0,80	
17	houtwolcementplaat, akoestisch d = 25, s = 30	C	0,43	0,80	1,00	0,79	0,80	0,98	
18	houtwolcementplaat, akoestisch d = 25, s = 80, a = 30	D	0,76	1,00	0,90	0,73	0,94	0,95	
19	kurkplaten, akoestisch met verflaag d = 20, s = 25	B	0,08	0,15	0,44	0,54	0,38	0,60	
20	kunststofschuimplaat (polystyreen) d = 10, s = 4	B	0,05	0,11	0,31	0,73	0,58	0,47	
21	houtcellulose, gesaust, d = 22	A	0,07	0,20	0,60	1,00	1,13	1,13	
	GEPERFOREERDE PLATEN								
22	gipskarton, ongeperforeerd d = 9,5, s = 100, a = 30	D	0,28	0,14	0,09	0,06	0,05	0,10	
23	gipskarton, geperforeerd 6%, d = 9,5, s = 100, a = 30, gaatjes Ø8, Ø15, Ø20	D	0,39	0,81	0,68	0,44	0,25	0,20	
24	gipskarton, geperforeerd 19,6%, d = 9,5, s = 100, a = 30, gaatjes Ø15	D	0,30	0,69	1,01	0,81	0,66	0,62	
25	gipskarton met zaagsleuven, d = 9,5, s = 30, a = 20, sleuven 2,3	D	0,10	0,26	0,92	0,55	0,20	0,10	
26	asbestcementplaat, ongeperforeerd d = 4, s = 50	B	0,43	0,15	0,10	0,05	0,04	0,02	
27	asbestcementplaat, geperforeerd 16% d = 4, s = 50	C	0,13	0,65	0,90	0,82	0,82	0,77	
	SCHROOTJES								
28	houten latten, breed 85, tussenruimte 25 mm, d = 12, s = 200, a = 25	E	0,60	0,85	0,80	0,82	0,70	0,62	
29	houten latten, breed 45, tussenruimte 16 mm, minerale wol op bitumenpapier in de spouw. d = 25, s = 50, a = 20	E	0,19	0,36	0,73	0,50	0,25	0,31	
30	aluminium lamellen, breed 50, tussenruimte 12,5 mm. d = 0,3, s = 176, a = 20	D	-	0,89	1,00	0,88	0,88	0,61	

nr.	MATERIAAL (maten in mm)	TYPE	absorptiecoëfficiënten a [m^2 O.R.] bij de middenfrequenties 125	250	500	1000	2000	4000	KARAKTERISTIEK
	VLOERBEDEKKING								
31	linoleum, gelijmd op ondergrond	A	0,02	-	0,03	-	0,04	-	
32	parket, gelijmd op ondergrond	A	0,04	0,04	0,06	0,12	0,10	0,15	
33	tapijt, 1,87 kg/m^2, d = 4,5	A	0	0,02	0,04	0,15	0,36	0,32	
34	tapijt, 1,87 kg/m^2, met onderlaag (8 mm vilt), d = 4,5	A	0,05	0,13	0,60	0,24	0,28	0,32	
35	tapijt, 1,98 kg/m^2, d = 5,3	A	0	0,03	0,05	0,11	0,31	0,58	
36	tapijt, 1,98 kg/m^2, met onderlaag (8 mm vilt), d = 5,3	A	0,04	0,10	0,31	0,70	0,93	0,74	
37	kokosvloerbedekking, los op ondergrond, 2 kg/m^2, d = 10	A	0,03	0,03	0,07	1,13	0,28	0,55	
	DIVERSEN								
38	glas		0,1	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	
39	kunststoffolie, strak gespannen, PVC 0,2 kg/m^2, d = 0,2, s = 20	B	0	0	0,64	0,19	0,12	0,04	
40	kunststoffolie, geplooid 3:1, PVC 0,2 kg/m^2, d = 0,2, s = 20	B	0	0,13	0,51	0,66	0,59	0,30	
41	gordijn, katoen, strak gespannen s = 50, ca. 0,4 kg/m^2	B	0,04	0,09	0,37	0,68	0,89	0,72	
42	gordijn, katoen, geplooid 3:1 s = 50, ca. 0,4 kg/m^2	B	0,15	0,45	0,96	0,91	1,06	1,02	
43	één zittend persoon		0,15	0,30	0,45	0,45	0,45	0,45	
44	één persoon in ruimte met veel nagalm (bijv. kerk)		0,65	0,75	0,85	0,95	0,95	0,80	
45	publiek (incl. orkest) per m^2		0,52	0,68	0,85	0,97	0,93	0,85	
46	houten stoel (onbezet)		0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03	
47	beklede stoel (onbezet)		0,15	0,30	0,30	0,40	0,40	0,40	

Opmerking: Bovenstaande tabel geeft slechts globale waarden ontleend aan de literatuur. Vollediger gegevens met nauwkeuriger waarden met produktomschrijving, leveranciers, enz. zijn te vinden in:

- Bobran, H.W.: Handbuch der Bauphysik. Berlin, Ullstein, 1967.
- Bouwcentrum/Ratiobouw: Akoestische materialen. Uitgave NL 1962.
- Deutscher Normenausschuss (DNA): Schallabsorptionsgrad-Tabelle. Berlin, Beuth-Vertrieb, 1968.
- Furrer, W.: Room and building acoustics and noise abatement. London, Butterworths, 1964.
- Hartmann, G.: Praktische Akustik; Band 2: Raum- und Bauakustik. München, Oldenbourg, 1968.

12.3 LUCHTGELUIDISOLATIE (EISEN)

scheiding	luchtgeluidisolatie-index I_{lu} in dB	
	minimale eis	voorkeur
tussen vertrekken van verschillende woningen	0	+5
tussen kantoorvertrekken waarbij grotere privacy (vertrouwelijke gesprekken) gewenst is	0	+5
tussen ruimten met hoge geluidproductie (typekamers, meerpersoonskamers) en stillere vertrekken (éénpersoonskamers)	-5	0
tussen leslokalen	-10	-5
tussen vertrekken binnen dezelfde woning	-15	-10
tussen gelijksoortige, normale kantoorvertrekken	-15	-10
tussen vertrekken en gangen	-20	-15