SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
ARHITEKTONSKI FAKULTET

ZORAN VERŠIĆ

ARHITEKTONSKA AKUSTIKA

Zagreb, 2017.

ZORAN VERŠIĆ: ARHITEKTONSKA AKUSTIKA
ACTA ARHITECTONICA
DIGITALNI UDŽBENICI

NAKLADNIK:
Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet
Kačićeva 26, 10000 Zagreb, Hrvatska
www.arhitekt.hr

ZA NAKLADNIKA
Dekan Fakulteta
Prof.dr.sc. Krunoslav Šmit

UREDNIK
pred. Tajana Jaklenec

RECENZENTI
Prof.dr.sc. Kristian Jambrošić
Doc. Mateo Biluš

LEKTURA
Mirjana Ostoja, prof.

Publikaciju je za objavu prihvatilo Povjerenstvo za nakladničku djelatnost Arhitektonskog fakulteta na sjednici održanoj 6.2.2017.

ISBN 978-953-8042-26-3

Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet
Zagreb, 2017.

Sadržaj:

Predgovor 4

ARHITEKTONSKA AKUSTIKA 5

ZVUK 5

Priroda zvučnog vala 6
Brzina širenja zvuka 7
Frekvencija 7
Valna dužina (λ) 8
Zvučni tlak 8
Pomak čestica i titrajna brzina 10
Jakost ili intenzitet zvuka 10
Gustoća zvučne energije 11
Zvučna snaga 11
Kuglasti valovi 11
Decibel 13
Razina zvučnog tlaka 14
Razina intenziteta zvuka 14
Razina zvučne snage 14
Energetsko zbrajanje razina 15
Zvučni spektar 16

PSIHOFIZIOLOŠKE (SUBJEKTIVNE) KARAKTERISTIKE ZVUKA 17

Uho 17
Visina tona 18
Čujno područje ljudskog uha 18
Glasnoća 19
Krivulje A, B i C 20
„Noise rating“ (NR) krivulje 21

POJAVE PRILIKOM ŠIRENJA ZVUKA 22

Refleksija zvučnih valova 22
Difrakcija zvučnih valova 22
Refrakcija zvučnih valova 24
Apsorpcija zvuka 25
Apsorpcija zvuka u slobodnom polju (na otvorenom) 25
Apsorpcija zvuka u zatvorenom prostoru 26

ZVUK U ZATVORENOM PROSTORU 30

Prostorna akustika 31
Volumen 31
Oblik 32
Jeka i flater-jeka 35
Difuzori 37
Dozvuk i odjek 38
Izračunavanje vremena odjeka 40
Akustička kvaliteta prostorija 41

BUKA 44

Izvori buke 44
Zaštita od vanjske buke 45
Buka prometa 45
Barijere za zaštitu od buke 45
Smanjenje buke i njena utjecaja kroz urbanističko planiranje 46
Smanjenje buke i njena utjecaja kroz arhitektonsko projektiranje 47
Zaštita od zračne i udarne buke unutar zgrade 48
Prenošenje zračnog zvuka iz prostorije u prostoriju 48
Razlika razina 49
Zaštita od buke ugrađene opreme u zgradi 50
Zaštita okoliša od buke za zgradu vezanih izvora buke 51
Zaštita od buke povećane odječnosti 51
Smanjenje razine zvuka u prostoriji pomoću apsorpcije 52

IZOLACIJSKA MOĆ PREGRADE 53

Zračni zvuk 53
Jednostruke pregrade 56
Utjecaj površinske mase 56
Utjecaj elastičnosti 57
Utjecaj bočnih građevinskih pregrada 58
Utjecaj propustljivosti pregrade na zrak 59
Dvostruke pregrade 60
Lagane predstijenke 63
Pregrade sastavljene od više dijelova različite izolacijske moći 69
Udarni zvuk 70
Međukatna konstrukcija bez slojeva poda i spuštenog stropa 72
Meki završni sloj poda 72
Plivajući pod 73
Spušteni strop 76
Zvučna izolacija prozora 78
Zvučna izolacija ostakljenja 78
Zvučna izolacija doprozornika i okvira prozorskog krila 79
Zvučna izolacija spojeva i preklopa 79
Zvučna izolacija uređaja i elemenata za provjetravanje prostorija 80
Utjecaj rolete na zvučnu izolaciju prozora 80
Sveukupnost utjecaja komponenata na zvučnu izolaciju prozora 81
Zvučna izolacija vrata 87
Zvučna izolacija vratnog krila 87
Zvučna izolacija dovratnika 88
Zvučna izolacija spojeva i preklopa 88

Prilozi 91

Literatura 105

Predgovor

Udžbenik „Arhitektonska akustika“ proizašao je iz nastavnog materijala kolegija Kabineta za arhitektonske konstrukcije, fiziku zgrade, materijale i tehnologiju građenja Arhitektonskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Prva inačica udžbenika pripremljena je i korištena u nastavi 2004. godine.

Udžbenik je ponajprije namijenjen studentima arhitekture, ali i ostalima koji žele upoznati osnovne karakteristike zvuka, njegova širenja u prostoru, te ući u područje akustike i zvučne izolacije u zgradarstvu.

U udžbeniku se na sažet, ali cjelovit način obrađuju teme iz područja akustike - od teorijskih postavki, psihofizioloških karakteristika zvuka, principa širenja zvuka u prostoru do akustičkih karakteristika prostora i zvučnoizolacijskih karakteristika građevnih dijelova i elemenata. Prikazani primjeri i pravila izvedbe namijenjeni su rješavanju praktičnih problema akustike prostorija i zvučne izolacije u zgradarstvu.

Prvo poglavlje knjige obrađuje fizikalne osnove akustike i pruža neophodno znanje za upoznavanje sa zvukom i fizikalnim zakonitostima vezanim za zvuk.

U drugom poglavlju objašnjene su psihofiziološke karakteristike zvuka, iz kojih proizlazi subjektivni doživljaj i slušanje zvuka.

Treće poglavlje obrađuje pojave prilikom širenja zvuka, dok su u četvrtom poglavlju obrađene pojave vezane za zvuk u zatvorenom prostoru. Iznesene su osnove prostorne akustike i prikazana su pravila izvedbe kako bi se osigurala tražena akustička svojstva prostorija.

Peto poglavlje posvećeno je temi neželjenog zvuka, buci. Ovdje su obrađeni izvori buke i moguće mjere zaštite od buke iz različitih izvora.

Šesto poglavlje obrađuje temu zvučne izolacije pregrada i građevnih elemenata s obzirom na zračni i udarni zvuk. U ovome poglavlju prikazani su različiti primjeri, rješenja i izvedbe za postizanje kvalitetne zvučne izolacije te navedene osnove za dokazivanje zvučne izolacije pregrada. Obrađena je također zvučna izolacija prozora i vrata te njena ovisnost o komponentama od kojih su prozori i vrata izvedeni, kao i o načinu ugradnje ovih elemenata u pregradu.

U prilogu udžbenika prikazani su tehnički podaci i detalji izvedbe suhomontažnih sustava za vertikalne pregrade i spuštene stropove, te podaci o koeficijentima apsorpcije zvuka.

Obrađenim temama kroz poglavlja ovoga udžbenika dan je sažet, ali cjelovit pregled akustike u zgradarstvu. Upoznavanje s ovim osnovama osigurava podlogu za nadogradnju znanja i istraživanja na području arhitektonske akustike.

S obzirom na malo literature na hrvatskom jeziku iz ovoga područja, nadam se da će udžbenik pomoći širemu krugu zainteresiranih za uvod u područje zvuka i arhitektonske akustike.

Autor

ARHITEKTONSKA AKUSTIKA

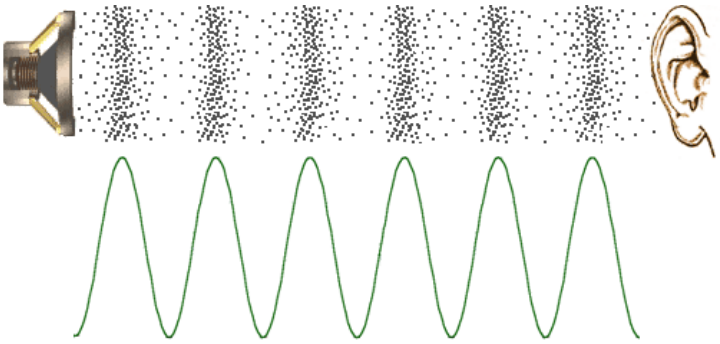
Riječ zvuk ima dva značenja:

- subjektivno ili psihološko,
- objektivno ili fizikalno.

U prvom smislu zvuk je vezan za slušni osjet, tako da tamo gdje nema uha, nema ni zvuka. U drugom značenju zvuk je energija koja se širi i onda kad nema uha koje bi ju otkrilo. U arhitektonskoj akustici razmatraju se jedino zvučne pojave koje čuje normalno uho, a i konačan sud o akustičkoj kvaliteti nekog prostora donosi se na temelju slušanja.

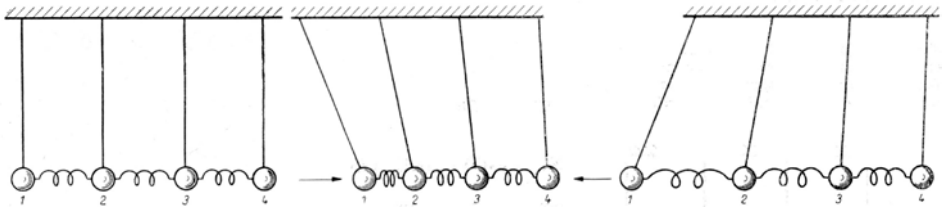
ZVUK

Zvuk je fiziološka pojava koja se utvrđuje organom sluha, a posljedica je naizmjeničnih promjena zračnog tlaka. Zvuk nastaje kad u elastičnom mediju postoji titrajuće tijelo ili kad čestice elastičnog medija dođu u stanje titranja zbog neke pobuđujuće sile. Posljedice tog titranja jesu zvučni valovi (izmjenični predtlak i podtlak) koji se šire medijem.



Sl. 1. Zvuk i zvučni valovi
(Izvor:www.pinterest.com)

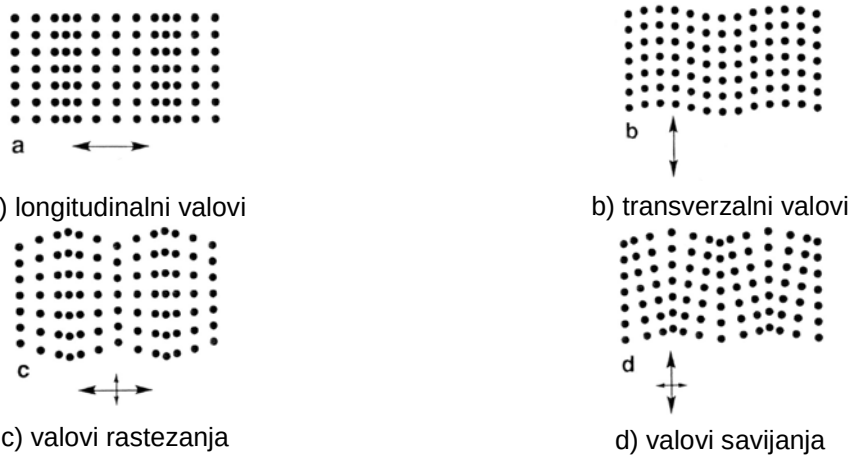
Pojedine čestice neke tvari međusobno su vezane elastičnim silama. Pomak jedne čestice prenijet će se preko elastičnih veza na okolne čestice. Ovaj novi pomak uzrokovat će pomak drugih okolnih čestica pa će se na taj način početni pomak prenijeti na cijelu sredinu.



Pomakom kuglice 1 udesno stisne se opruga između kuglica 1 i 2 i gibanje prenese na kuglicu 2, od ove na isti način na kuglicu 3, i tako redom. Modelom se udesno širi val zgušćivanja. Pomakom kuglice 1 ulijevo rastegne se opruga između kuglica 1 i 2 i pomak prenese na kuglicu 2, odavde na isti način na kuglicu 3, i tako dalje. Modelom se udesno proširi val razrjeđivanja.

Sl. 2. Mehanički model kojim se može prikazati nastajanje longitudinalnog vala
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 11)

Valovi, koji su rezultat gibanja čestica u istom smjeru u kojem se val širi, nazivaju se longitudinalni valovi. Kroz kruta tijela može se zvuk širiti i na način da čestice titraju okomito na smjer širenja vala (transverzalni valovi). U štapovima se zvuk može širiti ne samo pomoću tih dviju vrsta valova nego i pomoću valova savijanja (torzioni valovi).

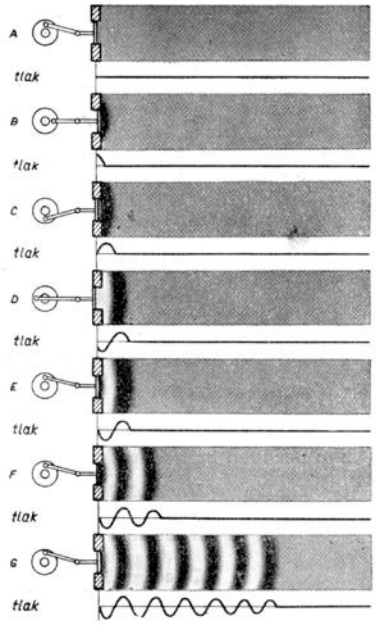


a) longitudinalni valovi
b) transverzalni valovi
c) valovi rastezanja
d) valovi savijanja

Sl. 3. Vrste valova
(Izvor: Fasold W.; Veres E., 1998: 19)

Priroda zvučnog vala

Tijelo koje titra proizvodi u okolnoj atmosferi zvučne valove. Na primjer, na slici je prikazano titranje ploče. Svaki titraj ploče proizvede jedan zvučni val. Kako titranje traje kontinuirano, valovi slijede jedan nakon drugoga i šire se u prostor.
0



Zvučni val proizveden osciliranjem stapa. Dijagram prikazuje zvučni tlak. Svaki titraj stapa proizvede jedan zvučni val. Amplituda zvučnog tlaka opada s udaljenošću od izvora (prema Olsonu).

Sl. 4. Zvučni tlak
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 15)

Brzina širenja zvuka

Brzina širenja zvuka ovisi o mediju kojim se zvuk širi. Brzina širenja zvuka (*c*) u zraku (ili plinovima općenito) iznosi:

$$c = \sqrt{\frac{p_o \times \gamma}{\rho_o}} \text{ (m/s)}$$

p_o – atmosferski tlak (Pa)
γ – konstanta (za zrak γ=1.4)
ρ_o – gustoća zraka (kg/m^3)

Na brzinu zvuka u velikoj mjeri utječe temperatura, tako se brzina zvuka u zraku računa prema približnoj formuli:

$$c = 330 + 0.6\, t \text{ (m/s)}$$

t – temperatura zraka (^{o}C)

Brzina širenja zvuka u krutim tijelima:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho^o}} \text{ (m/s)}$$

E – modul elasticiteta (Pa)
ρ^o - gustoća (kg/m^3)

Brzina zvuka u različitim medijima:

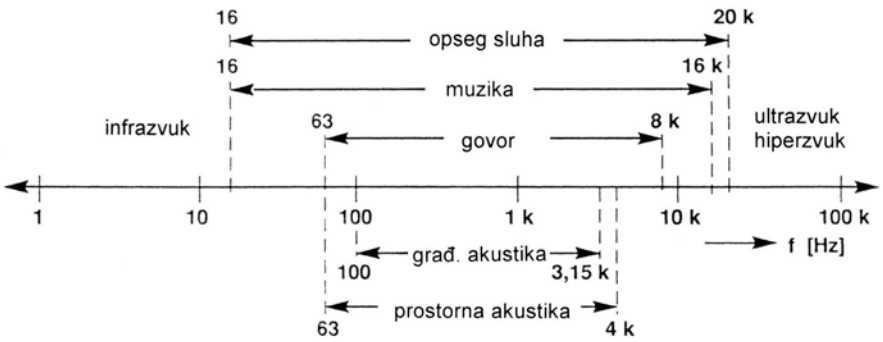
guma	40 m/s
zrak 0°C	330 m/s
zrak 20°C	342 m/s
pluto	500 m/s
voda 10°C	1440 m/s
jelovo drvo	3320 m/s
staklo	3490 m/s
zid od opeke	3600 m/s
beton	4000 m/s
željezo	5000 m/s

Frekvencija

Broj periodičkih promjena gustoće zraka u jednoj točki zvučnog polja u jedinici vremena zove se frekvencija zvuka (*f*).

$$f = 1/\text{sek (Hz)}$$

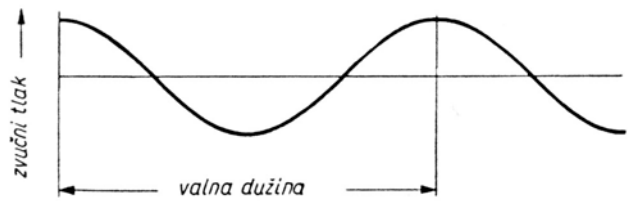
Prosječno ljudsko uho čuje kao zvuk ona titranja koja imaju frekvenciju između 16 Hz i 20.000 Hz (čujni zvuk). Titranja frekvencije niže od 16 Hz zovu se infrazvuk, a titranja frekvencije više od 20.000 Hz ultrazvuk, odnosno hiperzvuk s frekvencijom iznad 10^{10} Hz.



Sl. 5. Frekvencije zvuka
(Izvor: Fasold W.; Veres E., 1998: 16)

Valna dužina (λ)

Razmak između dviju susjednih točaka najvećeg zgušnjenja ili između dviju točaka najvećeg razrjeđenja sredine u kojoj se zvučni val širi naziva se valnom dužinom.



Valna dužina je razmak između dva susjedna najveća razrjeđenja, odnosno između dva susjedna najveća zgušnjenja.

Sl. 6. Valna dužina
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 17)

$$\lambda = c / f \text{ (m)}$$

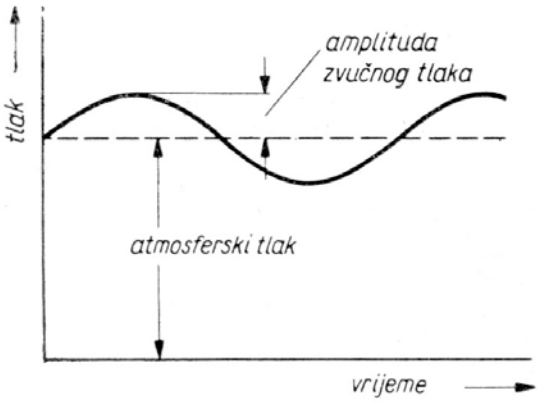
c – brzina zvuka (m/s)
f - frekvencija (Hz)

f = 16 Hz λ > 20 m
f = 20 kHz λ < 2 cm

Zvučni tlak

Prilikom širenja zvučni se val superponira atmosferskom tlaku, tako da se u jednom poluperiodu ukupni tlak diže iznad atmosferskog, a u sljedećem poluperiodu spušta ispod atmosferskog tlaka.

Atmosferski tlak iznosi cca 100 kPa (10^5 Pa) i on ne izaziva slušni osjet. Mehanizam čula sluha takav je da uho osjeća samo promjenjivi tlak koji se superponira atmosferskom tlaku.



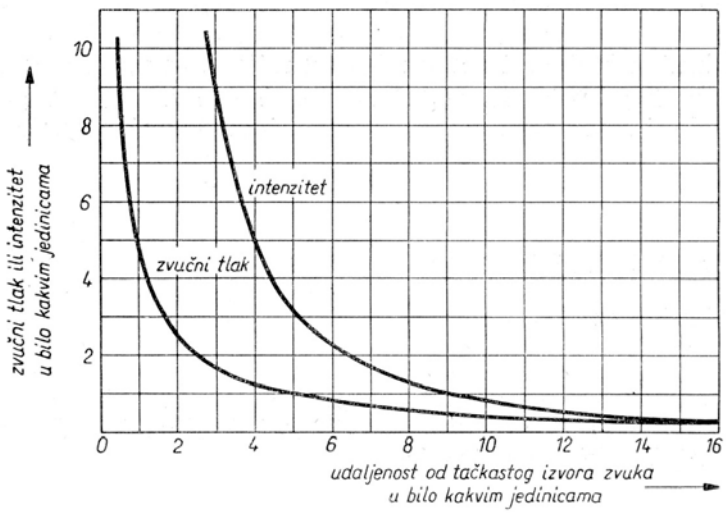
Zvučni tlak je izmjenična komponenta tlaka superponirana atmosferskom tlaku.

Sl. 7. Zvučni tlak
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 18)

Najniži zvučni tlak koji zamjećuje prosječno ljudsko uho iznosi $2x10^{-5}$ Pa, a zvučni tlak koji izaziva bol u uhu iznosi 20 Pa.

U praktičnoj se akustici od veličina zvučnog polja mjeri jedino zvučni tlak, zato što je mjerenje zvučnog tlaka jednostavno i stoga što uho zvuk osjeća kao promjene tlaka.

Porastom udaljenosti od izvora zvuka zvučni tlak opada obrnuto s udaljenošću. To vrijedi za «točkaste» izvore zvuka, kao što su npr. zvučnik, usta…, koji proizvode zvučne valove kuglastog oblika.

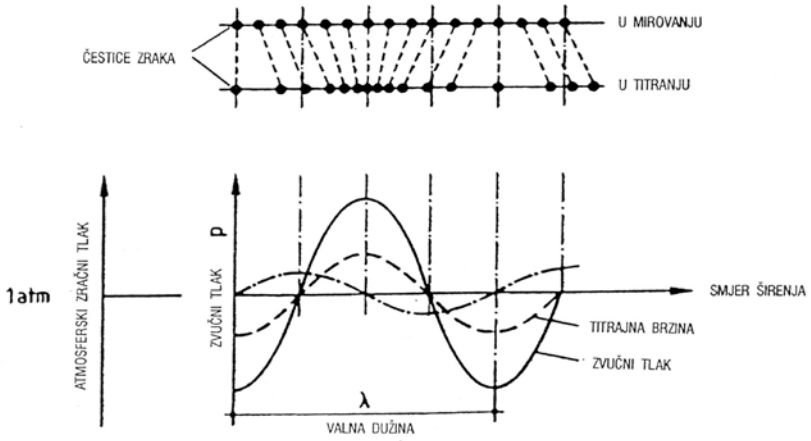


Zvučni tlak opada obrnuto razmjerno s kvadratom udaljenosti od izvora, a zvučni intenzitet obrnuto razmjerno s udaljenosti.

Sl. 8. Odnos zvučnog tlaka i intenziteta ovisno o udaljenosti izvora
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 19)

Pomak čestica i titrajna brzina

Prilikom širenja zvučnog vala pojedine čestice zraka titraju oko svoga srednjeg položaja. Pomak od položaja mirovanja čine čestice stanovitom brzinom. Ova brzina nije konstantna već se mijenja od nule (u krajnjem položaju) do neke maksimalne vrijednosti (u središnjem položaju). Titrajne brzine čestica vrlo su malene. U zraku pri zvučnom tlaku od 20 Pa njezina maksimalna vrijednost iznosi svega 0.05 m/s.



Sl. 9. Pomak čestica i titrajna brzina
(Izvor: Freymuth H., Jenisch R., Klopfer H., Petzold K., Stohrer, Fischer H. M., Richter E., 2002: 4)

Između zvučnog tlaka (*p*) i titrajne brzine (*v*) postoji sljedeći odnos:

$$p = \rho_0 \times c \times v$$

ρ° - gustoća (kg/m^3)
c – brzina zvuka(m/s)
v – titrajna brzina (m/s)

Produkt ρ_0 x *c* naziva se *specifičnim akustičkim otporom* kojem je vrijednost za zrak (*t*=20°C) jednaka 430 Ns/m^3.

Jakost ili intenzitet zvuka (*I*)

Zvučnim valom prenosi se mehanička energija. U vezi s titrajnom brzinom zvučni val sadrži kinetičku energiju, a u vezi sa zvučnim tlakom potencijalnu energiju. Količina akustičke energije koja u jedinici vremena prostruji kroz plohu okomito postavljenu na smjer širenja zvučnog vala naziva se jakošću ili intenzitetom zvuka.

$$I = \frac{p^2}{\rho^0 \times c} \left(\frac{W}{m^2}\right)$$

p – zvučni tlak (Pa)
ρ° - gustoća (kg/m^3)
c – brzina zvuka (m/s)

Gustoća zvučne energije (*E*)

Energija zvučnog vala nije jednoliko raspoređena u prostoru. Na mjestima najvećeg tlaka i brzine gustoća energije je najveća, dok je na mjestima na kojima su tlak i brzina jednaki nuli i gustoća energije jednaka nuli.

Zvučna snaga (*W*)

Zvučna snaga – zvučna energija koja u jedinici vremena prostruji kroz plohu bilo koje veličine (*S*).

$$W = I \times S \text{ (W)}$$

Zvučni izvor	Jakost	Snaga (W)
ljudski glas	maksimalna jačina	$2 \cdot 10^{-3}$
ljudski glas	normalan razgovor	$7 \cdot 10^{-6}$
klavir	fortissimo	$2 \cdot 10^{-1}$
truba	fortissimo	$3 \cdot 10^{-1}$
bubanj	fortissimo	10
običan zvučnik	srednje snage	15
veliki zvučnik	najveće snage	10^2

Tabl. I. Zvučna snaga nekih izvora
(Izvor: prema Jelaković, T., 1962: 23)

Kuglasti valovi

Izvori zvuka kojih su dimenzije malene u odnosu na valnu duljinu zovu se točkasti izvori zvuka. Točkasti izvori u slobodnom prostoru stvaraju kuglaste valove i zrače zvučnu energiju jednako u svim smjerovima.

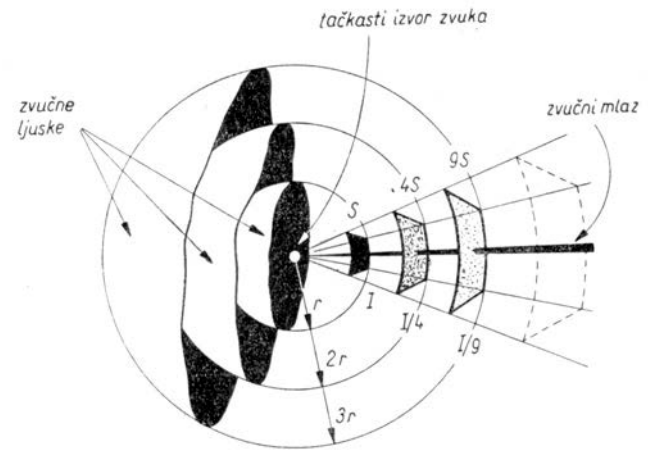
Ukupna zvučna energija koja svake sekunde prolazi kroz kuglu polumjera r bit će jednaka produktu oplošja kugle (*S*) i jakosti zvuka (*I*).

$$W = I \times S = \frac{p^2}{\rho^0 \times c} \times 4\pi r^2$$

Veličina *W* zove se zvučna snaga izvora. To je ukupna zvučna energija koju neki izvor izrači u jedinici vremena.

Površina kugle raste s kvadratom radijusa i zato intenzitet zvuka u kuglastom valu opada s kvadratom udaljenosti od izvora.

Slikovit prikaz promjene intenziteta zvuka u ovisnosti o udaljenosti od izvora.

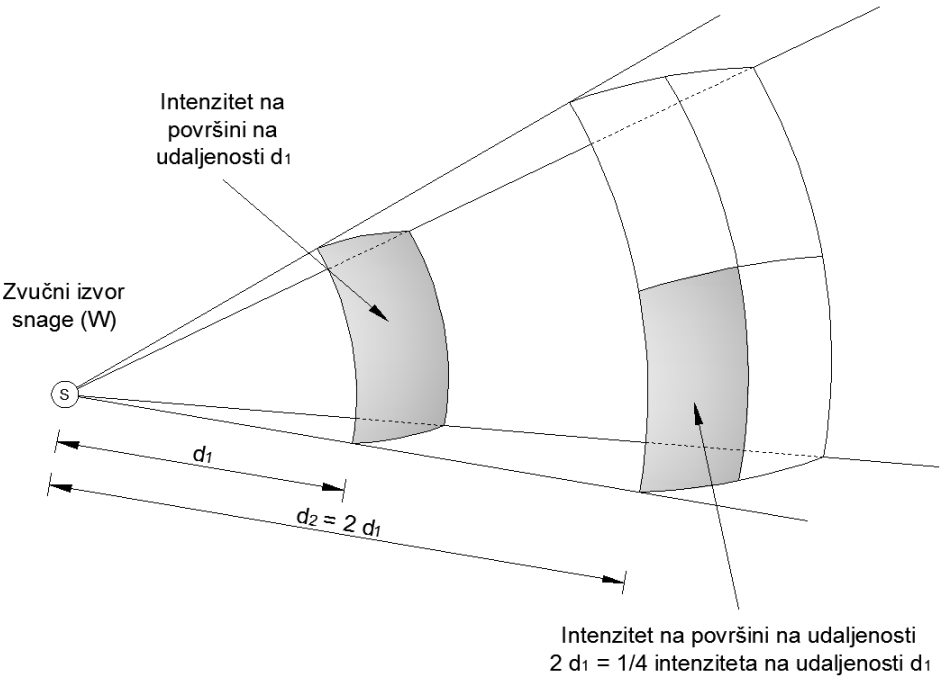


Sl. 10. Promjena intenziteta zvuka u ovisnosti o udaljenosti od izvora
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 21)

Razina zvučnog intenziteta (razina zvuka) u slobodnom prostoru, na udaljenosti *r* od točkastoga neusmjerenog izvora, vezana je za razinu zvučne snage izvora relacijom:

$$L_w = L_I + 10 \log S = L_I + 10 \log (4 \times \pi \times r^2)$$

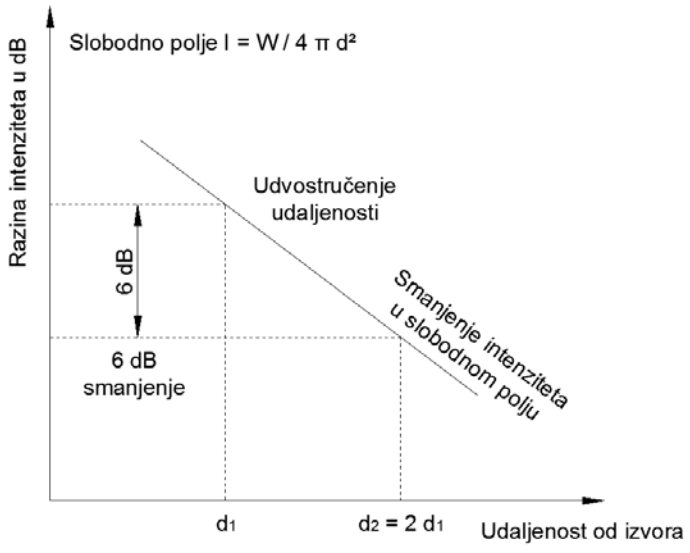
$$S = 4 \times \pi \times r^2 \text{ - površina kugle}$$



Sl. 11. Promjena intenziteta zvuka na površini u ovisnosti o udaljenosti od izvora
(Izvor: prema Charles M. Salter Associates Inc.,1998: 34)

Iz toga proizlazi da u slobodnome zvučnom polju (bez refleksije i apsorpcije zvuka), kad se udaljujemo od točkastog izvora zvuka, razina zvučnog tlaka (ili intenzitet) pada za 6 dB svaki put kad se udaljenost od izvora udvostruči.

npr. izvor L_p na 1 m = 59 dB,
L_p na 2 m = 53 dB,
L_p na 4 m = 47 dB,
L_p na 8 m = 41 dB itd.



Sl. 12. Razina intenziteta zvuka u ovisnosti o udaljenosti od izvora
(Izvor: prema Fasold W.; Veres E., 1998: 34)

Decibel

U tehničkoj akustici pokazalo se mnogo praktičnije izražavati zvučni tlak, intenzitet zvuka i zvučnu snagu - ne u apsolutnim, već u relativnim, logaritamskim vrijednostima. Iz tog razloga uvedeni su pojmovi razina, i to: razina zvučnog tlaka, razina intenziteta i razina zvučne snage.

Razinom neke veličine nazivamo logaritam odnosa vrijednosti te veličine i odabrane referentne vrijednosti. Kod toga moraju biti određeni baza logaritma, referentna vrijednost i vrsta razine.

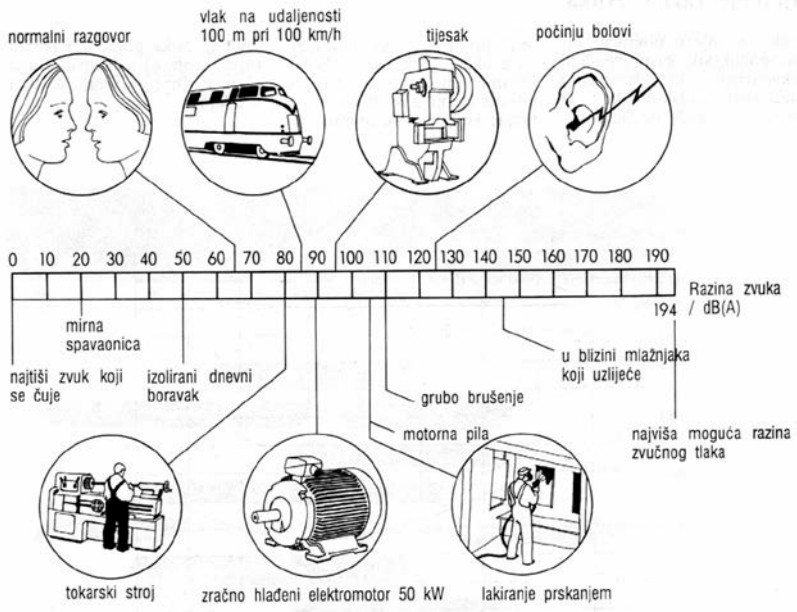
Razina (L) je logaritam omjera dviju vrijednosti iste veličine, što znači da je veličina L bezdimenzionalna brojčana veličina koja se u svojstvu jedinice razina energetskih veličina zove bel (B). U praktičnoj primjeni pokazalo se da je jedinica bel (B) prevelika pa se upotrebljava deset puta manja jedinica decibel (dB).

$$1 \text{ B} = 10 \text{ dB}$$

Razina zvučnog tlaka

$$L_p = 10 \log \frac{p_{ef}^2}{p_o^2} = 20 \log \frac{p_{ef}}{p_o} \text{ (dB)}$$

p_{ef} - efektivni zvučni tlak promatranog zvuka
p_o - referentni zvučni tlak (dogovorno je odabrana vrijednost 2 x 10^{-5} Pa što odgovara donjoj granici čujnosti prosječnoga ljudskog uha na frekvenciji 1000 Hz)



Sl. 13. Razine zvučnog tlaka različitih izvora
(Izvor: Ingemansson S., Elvhammar, H., 1995: 14)

Razina intenziteta zvuka

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_o} \text{ (dB)}$$

I - intenzitet promatranog zvuka
I_o - referentni intenzitet zvuka (10^{-12} W/m^2)

Razina zvučne snage

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_o} \text{ (dB)}$$

W - zvučna snaga promatranog zvuka
W_o - referentna zvučna snaga (10^{-12} W)

U akustici se radi o velikim odnosima zvučnih tlakova i jakosti zvuka. Na pragu čujnosti uho je osjetljivo već na zvučni tlak od $2x10^{-5}$ Pa. Bol u uhu nastaje kod zvučnog tlaka od 20 Pa. Prema tome, skala zvučnih tlakova koje zamjećuje ljudsko uho vrlo je velika. Njene granične vrijednosti odnose se kao $1:10^6$. Ako se računa s intenzitetom zvuka, ovaj odnos iznosi 10^{12}. Izražen u decibelima, odnos tih tlakova, odnosno intenziteta, iznosi 120 dB. Na pragu čujnosti razina zvuka je 0 dB, a na pragu bola 120 dB.

Odnos snaga	Decibeli	Odnos zvučnih tlakova	Decibeli
1	0	1	0
2	3,0	2	6,0
3	4,8	3	9,5
4	6,0	4	12,0
5	7,0	5	14,0
6	7,8	6	15,6
7	8,5	7	16,9
8	9,0	8	18,1
9	9,5	9	19,1
10	10	10	20
100	20	100	40
1.000	30	1.000	60
10.000	40	10.000	80
100.000	50	100.000	100
1,000.000	60	1.000.000	120

Tabl. II. Odnos između decibela i zvučne snage, odnosno između decibela i zvučnog tlaka
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 24)

Energetsko zbrajanje razina

Zbrajanje zvuka istih razina (L_1, L_2, ...)

$$L_{uk} = L_{1,2,...} + 10 \log n$$

$L_{1,2,...}$ - razina izvora (dB)
n - broj izvora istih razina

Zbrajanje zvuka različitih razina (L_1, L_2; $L_1 > L_2$)

$$L_{uk} = L_1 + \Delta L$$

$$\Delta L = 10 \log (1 + 10^{(L2 - L1) / 10})$$

ΔL - prirast koji se dodaje većoj razini

Sl. 14. Zbrajanje različitih razina zvuka
(Izvor: Fasold W.; Veres E., 1998: 21)

Približno zbrajanje

razlika razina L_1 - L_2 (L_1>L_2)	prirast većoj razini ΔL
0 - 1 dB	+3 dB
2 - 3 dB	+2 dB
4 - 9 dB	+1 dB
10 i više	0 dB

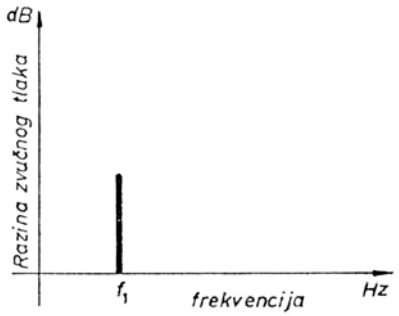
Tabl. III. Zbrajanje različitih razina zvuka

Zvučni spektar

Spektar zvuka naziva se grafički prikaz amplituda ili razina zvučnih tlakova komponenata složenog zvuka kao funkcije frekvencije.

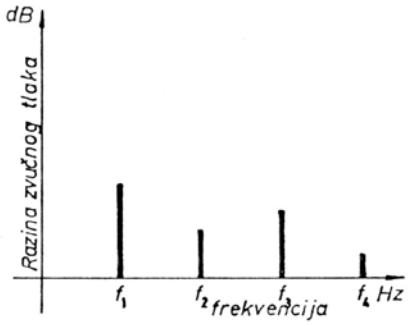
Na osnovi zvučnog spektra zvukovi se dijele na tri vrste, i to:

a) Čisti ton - jednostavno sinusno titranje koje se prikazuje u obliku jedne linije na određenoj frekvenciji. Ovakvi tonovi gotovo uopće ne nastaju u prirodi, ali se koriste u mjerne svrhe u elektroakustici.



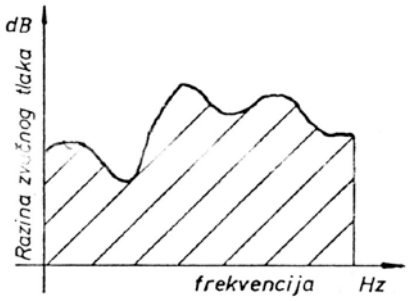
Sl. 15. Čisti ton
(Izvor: Šimetin V., 1983: 152)

b) Muzički ton - sastoji se od osnovnog tona i manjeg ili većeg broja harmoničnih tonova (nadvalova) koji su uvijek cjelobrojni višekratnici osnovnog tona.



Sl. 16. Muzički ton
(Izvor: Šimetin V., 1983: 152)

Šum - to je nepravilno titranje u kojem nema ni stalnih frekvencija ni stalnih amplituda. Spektar šuma nije linijski već kontinuiran, što znači da pojedini tonovi gusto ispunjavaju cijelo jedno frekventno područje.



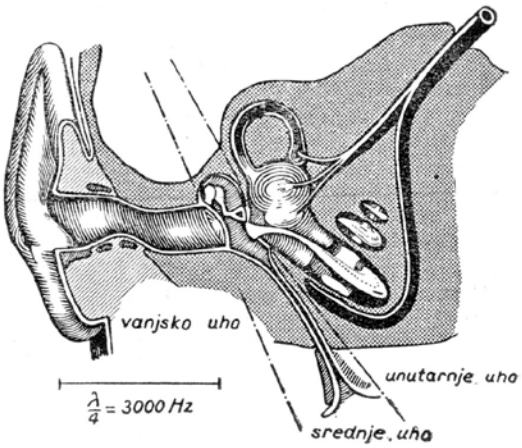
Sl. 17. Šum
(Izvor: Šimetin V., 1983: 152)

PSIHOFIZIOLOŠKE (SUBJEKTIVNE) KARAKTERISTIKE ZVUKA

Problemi prostorne akustike zapravo se svode na problem dobrog i ugodnog slušanja u nekoj prostoriji.

Uho

Osim što obavlja ulogu prijamnika zvuka, uho je i vrlo selektivan frekventni analizator, određivač smjera zvučnog izvora, indikator glasnoće, visine i boje tona.



Sl. 18. Shematizirana slika presjeka desnoga čovječjeg uha
(Izvor: Jelaković, T. 1962: 46)

Između karakteristika subjektivnog doživljaja zvuka (slušnog osjeta) i karakteristika objektivnog fizikalnog podražaja (zvuka) o kojem ovisi slušni osjet, postoji jednoznačna korelacija. Tako frekvenciji čistoga tona odgovara osjet visine, a zvučnom tlaku osjet glasnoće. Boja zvuka ovisna je o spektru složenog tona. Korelacija između ovih veličina nije, međutim, linearna. Ako se npr. nekom zvuku dva puta poveća jakost, osjet glasnoće neće se povećati dvostruko.

Visina tona

Visina tona je subjektivna (psihoakustička) karakteristika zvuka prema kojoj se tonovi međusobno razlikuju kao dublji i viši. Osjet visine tona direktno je vezan za njegovu frekvenciju. Što je frekvencija zvuka veća, to nam se zvuk čini viši.

Razlika u visini tona naziva se intervalom. Za dva tona frekvencije f_1 i f_2, - pri čemu $f_1<f_2$, - kaže se da se razlikuju u visini za interval f_2/f_1. Oni ujedno definiraju frekvencijski pojas širine $\Delta f = f_2 - f_1$.

U arhitektonskoj akustici najvažniju ulogu imaju intervali od jedne oktave i trećine oktave (terce), za koje vrijede odnosi:

- oktava $f_2 / f_1 = 2$
- terca $f_2 / f_1 = 1.26$

Frekvencijski pojas određen oktavom ili njenom trećinom s graničnim frekvencijama f_1 i f_2 predstavlja se središnjom frekvencijom:

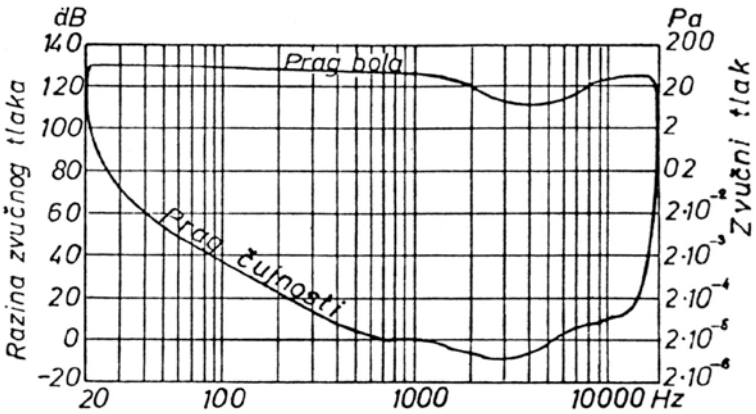
$$f = \sqrt{f_1 \times f_2}$$

U slučaju oktave gdje je $f_2 = 2xf_1$

$$f = f_1 \text{ x } \sqrt{2}$$

Čujno područje ljudskog uha

Prosječno ljudsko uho može čuti kao zvuk samo ona titranja koja imaju frekvenciju između 16 Hz i 20 kHz. Međutim, za svaku frekvenciju iz ovoga područja postoji jedan najniži zvučni tlak koji uho još čuje. Taj minimalni tlak, nazvan apsolutni prag čujnosti, ovisi o frekvenciji zvuka. Na frekvenciji 1000 Hz on iznosi 2 x 20^{-5} Pa.



Pragovi čujnosti i bola - određuju površinu koja predstavlja čujno područje ljudskog uha, a dobiveni su statističkom obradom rezultata ispitivanja velikog broja zdravih mladih osoba.

Sl. 19. Pragovi čujnosti i bola
(Izvor: Šimetin V., 1983: 160)

Najviši zvučni tlak kojem ljudsko uho smije biti izloženo kratko vrijeme a da ne nastanu oštećenja, odnosno da nema osjećaja neugodnosti, naziva se pragom bola.

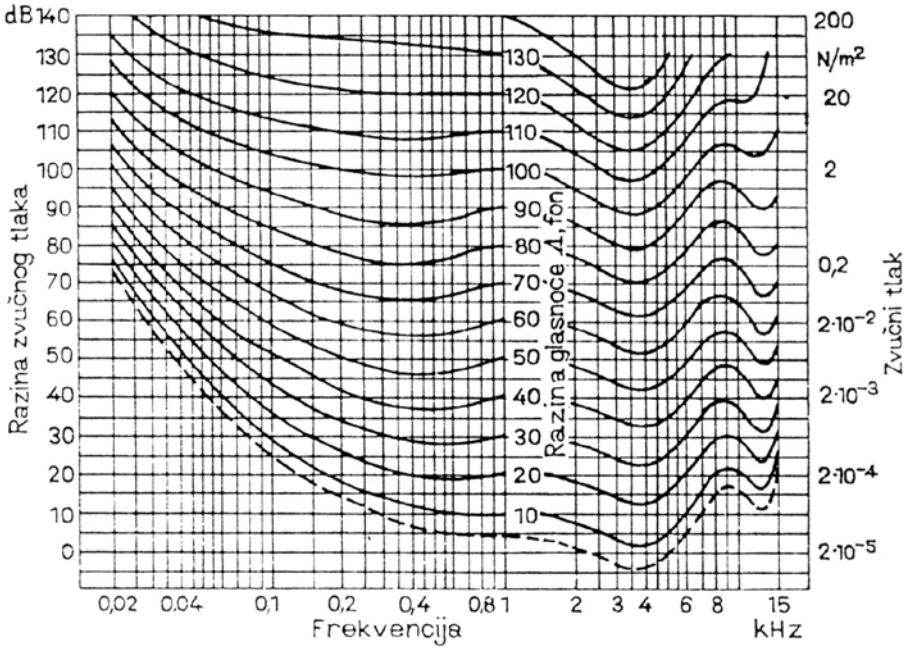
Glasnoća

Osjet glasnoće nekog zvuka vezan je za zvučni tlak. Slično pragu čujnosti i osjet glasnoće zvuka bitno ovisi o njegovoj frekvenciji. To znači da se dva tona jednakih zvučnih tlakova, ali različitih frekvencija, u pravilu na doživljavaju kao da su jednake glasnoće. Iz toga je razloga za razinu glasnoće umjesto decibela (dB) uvedena druga bezdimenzionalna jedinica fon. Dva tona koja imaju jednak broj fona ljudsko uho osjeća kao da su jednake glasnoće.

Razina glasnoće nekog tona određuje se na relativan način, uspoređujući osjet prouzročen tim tonom s osjetom koji izaziva jedan referentni ton. Ako ta oba tona uzrokuju jednaki osjet glasnoće, kaže se da imaju jednaku razinu glasnoće.

Međunarodnim dogovorom, kao referentni ton prihvaćen je zvuk frekvencije 1000 Hz.

Kad se u koordinatni sustav frekvencija / zvučni tlak (razina) unesu i međusobno spoje točke jednake razine glasnoće - dobivene na opisani način za čiste tonove različitih frekvencija i referentni ton različite jakosti - dobiju se izofonske krivulje ili krivulje jednake razine glasnoće. Broj izofonske krivulje znači zapravo razinu glasnoće u fonima i jednak je razini zvučnog tlaka u decibelima za čisti ton na frekvenciji 1000 Hz. Na frekvenciji 1000 Hz fonska skala i skala decibela podudaraju se (razina glasnoće u fonima jednaka je razini zvučnog tlaka u decibelima).



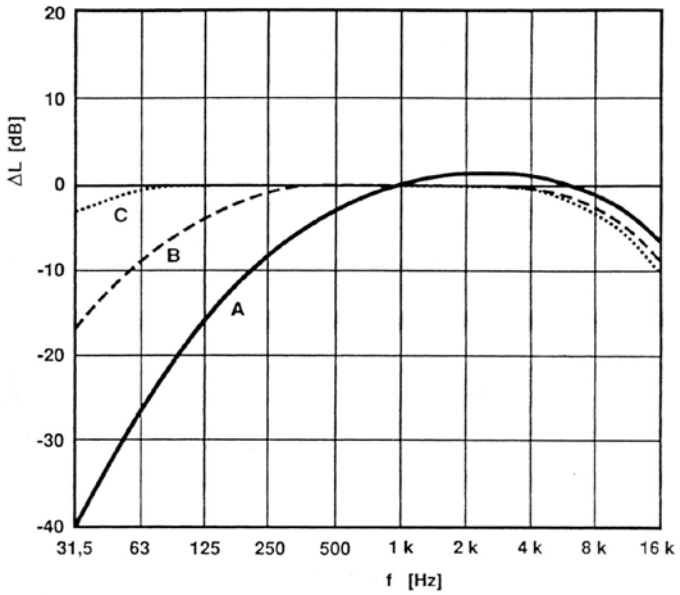
Sl. 20. Krivulje jednake razine glasnoće
(Izvor: Tehnička enciklopedija - svezak 4., 1973: 304)

Krivulje A, B i C

U slučaju čistih tonova relativno je jednostavno odrediti njihovu razinu glasnoće. Zvukomjerom (elektronskim instrumentom) izmjeri se razina promatranog tona u dB pa se pomoću izofonskih krivulja odredi razina glasnoće u fonima.

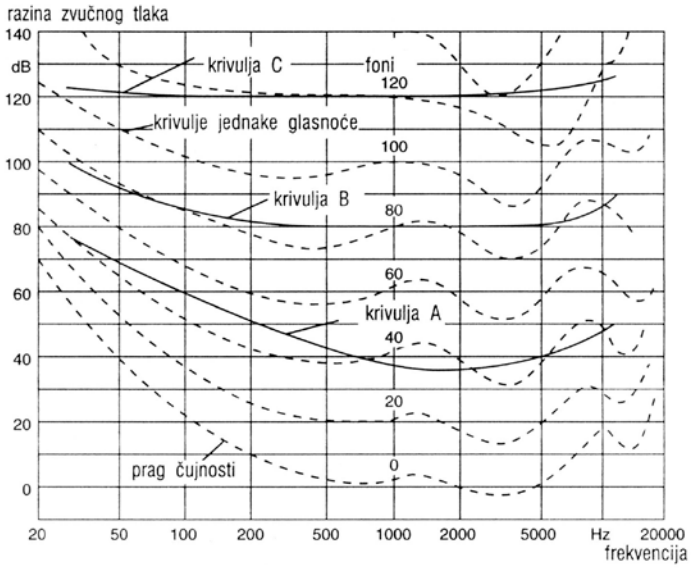
Problem nastaje kod mjerenja kompleksnog zvuka koji je sastavljen od više komponenata ili - što je najčešće - od kontinuiranog spektra. U pravilu trebalo bi za svaku frekvencijsku komponentu promatranog zvuka odrediti na opisani način razinu glasnoće u fonima i tako dobivene vrijednosti integrirati. Ovo bi bilo jednostavnije kad bi se pomoću mjernog instrumenta umjesto razine zvuka mogla neposredno mjeriti glasnoća. Da bi se to postiglo, trebalo bi konstruirati takav mjerni uređaj kojeg bi osjetljivost u funkciji frekvencija bila što sličnija onoj ljudskog uha. Takvi bi instrumenti bili izuzetno složeni i skupi pa današnji zvukomjeri imaju samo tri različite standardizirane frekvencijske karakteristike koje približno odgovaraju preslikanim izofonskim krivuljama za 40, 70 i 100 fona.

Ove tri krivulje nazvane su A, B i C krivulje, a dijelovi mjernog uređaja kojima se postižu prigušenja prema ovim krivuljama zovu se korekcijski filtri A, B i C. Izmjerena vrijednost ukupne razine glasnoće uz upotrebu korekcijskog filtra A, B ili C daje se u decibelima umjesto u fonima i označava se sa dB(A), dB(B) i dB(C), a razine se označavaju s L_A, L_B i L_C.



Sl. 21. Frekvencijske karakteristike korekcijskih filtara A, B i C
(Izvor: Fasold W.; Veres E., 1998: 50)

Namjena je filtara da se približe frekvencijske karakteristike osjetljivosti što ih ima uho pri različitim zvučnim tlakovima. Mjerenja uz upotrebu filtra A daju podatke koji se uglavnom slažu sa subjektivnom razinom glasnoće zvuka slušane uhom. Filtar B smanjuje razine u niskofrekventnom području nešto manje od filtra A. Filtar C propušta čujni dio spektra, gotovo bez ograničenja, po cijelomu frekventnom području, osim smanjenja u prvome niskofrekventnom području.

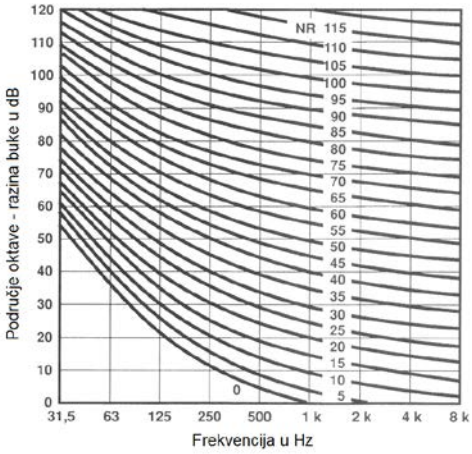


Sl. 22. Frekvencijske karakteristike normiranih filtara A, B i C
u usporedbi s krivuljama jednake glasnoće
(Izvor: Ingemansson S., Elvhammar, H., 1995: 13)

„Noise rating“ (NR) krivulje

Normirane krivulje oktavnih razina definiranih zvučnih ambijenata, počev od vrlo tihih pa sve do vrlo bučnih, nazivaju se NR-krivulje. Svaka krivulja označena je brojem koji odgovara razini zvuka oktave sa središnjom frekvencijom 1000 Hz. Kod svih krivulja razina opada s porastom frekvencije, čime se uzimaju u obzir karakteristike osjetljivosti ljudskog uha.

Ocjena glasnoće nekoga kompleksnog zvuka pomoću NR-krivulje provodi se na način da se u dijagram s familijom NR-krivulja ucrta oktavni spektar promatranog zvuka. Indeks NR promatranog zvuka jednak je broju NR-krivulje koja upravo tangira spektar ili je neposredno iznad njega. Obično se pretpostavlja da između razine nekoga kompleksnog zvuka u dB(A) i indeksa NR-zvuka postoji relacija L_A=NR+5, što dosta dobro odgovara stvarnim odnosima kod industrijske i prometne buke koje se najčešće i promatraju.



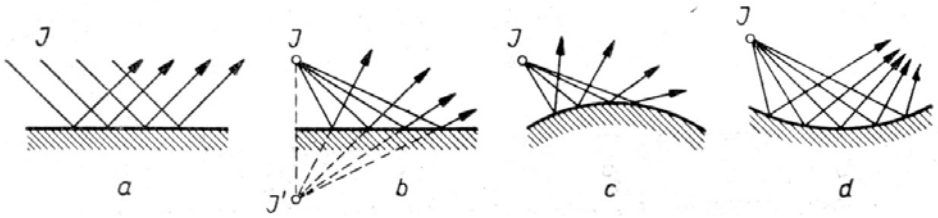
Sl. 23. NR-krivulje
(Izvor: Fasold W.; Veres E., 1998: 63)

POJAVE PRILIKOM ŠIRENJA ZVUKA

Put širenja zvuka može se prikazati zvučnim zrakama. To su zamišljeni pravci, okomiti na čelo valova, koji izlaze iz izvora zvuka. Na putu širenja zvuka najčešće se nalaze određene zapreke.

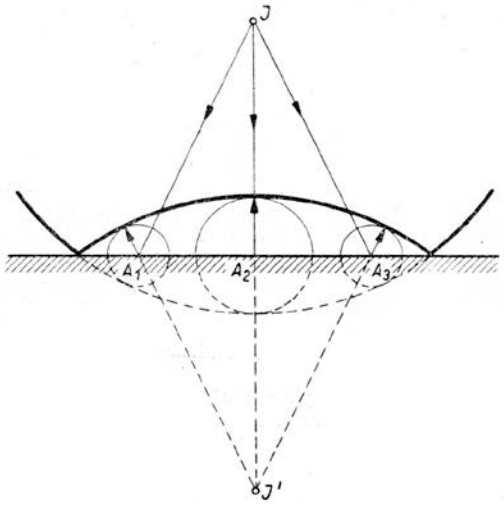
Refleksija zvučnih valova

Primjenom zvučnih zraka mogu se zakoni refleksije svjetla prenijeti u akustiku. Pritom treba biti ispunjen uvjet da je dužina zvučnog vala mnogo manja od dimenzija plohe od koje se val reflektira.



a) reflektiranje zvučnih zraka ravnog vala od ravne plohe;
reflektiranje zvučnih zraka koje dolaze iz točkastog izvora od:
b) ravne plohe, c) konveksne plohe i d) konkavne plohe

Sl. 24. Reflektiranje zvučnih zraka od različitih ploha
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 30)

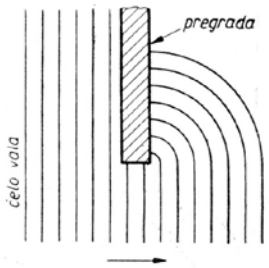


Reflektirani val konstruiran primjenom principa elementarnih kuglastih valova

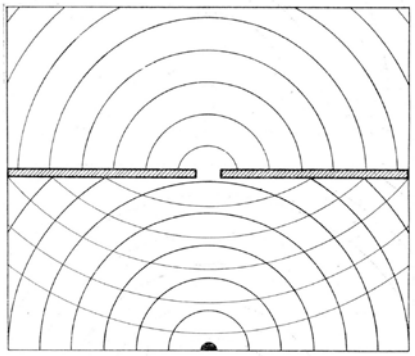
Sl. 25. Reflektiranje kuglastog vala od ravne plohe
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 30)

Difrakcija zvučnih valova

Zvučni valovi zaobilaze pregrade, oni mijenjaju smjer kad naiđu na zapreku. Što je veći odnos valne dužine prema dimenzijama pregrade, difrakcija (skretanje) je veća.

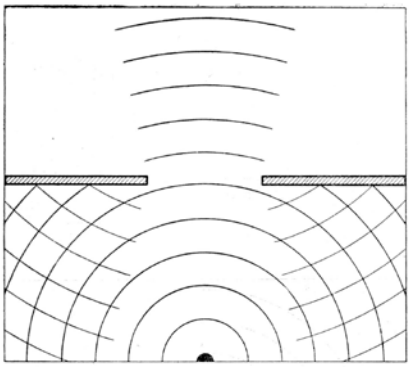


Sl. 26. Difrakcija ravnoga zvučnog vala oko ruba pregrade
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 33)



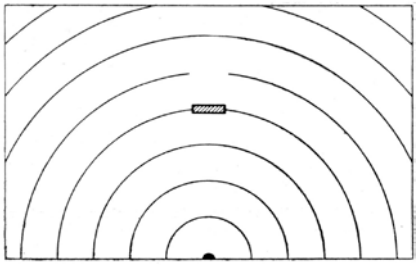
Otvor u tom slučaju postaje izvor kuglastog vala koji se širi na sve strane iza pregrade. Budući da kroz mali otvor može proći mala količina zvučne energije, intenzitet zvuka iza pregrade je malen. Veći dio upadne zvučne energije se reflektira.

Sl. 27. Difrakcija zvučnog vala pri prolazu kroz otvor koji ima dimenzije manje od valne duljine
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 33)



Ne dolazi do slabljenja valova i zvučni "mlaz" ima presjek istog oblika kakav ima otvor.

Sl. 28. Prolaz zvučnih valova kroz otvor kojem su dimenzije mnogo veće od valne dužine
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 34)



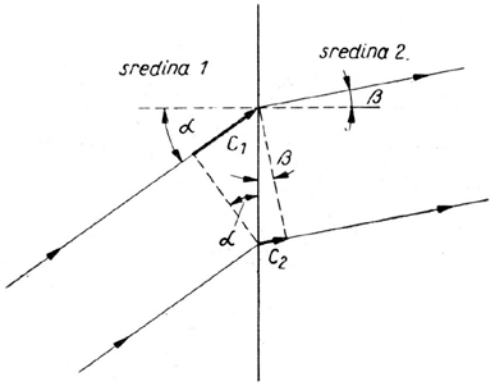
U odnosu na valnu dužinu praktički ne utječe na širenje zvučnih valova.

Sl. 29. Zapreka malih dimenzija
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 34)

Refrakcija zvučnih valova

Slično zrakama svjetla i zvučne zrake se lome pri prijelazu iz jedne u drugu sredinu. Veličina promjene smjera (refrakcija) ovisi o odnosu brzine širenja zvuka u određenoj sredini.

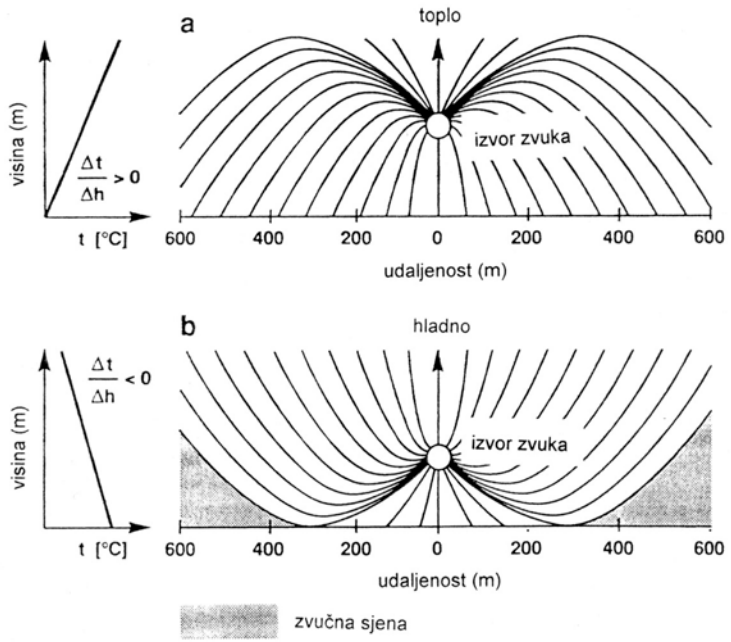
$$\sin \alpha / \sin \beta = c_1 / c_2$$



Kad zvučne zrake prelaze iz sredine s jednom brzinom širenja u sredinu s drugom brzinom širenja, dolazi do loma zvučnih zraka.

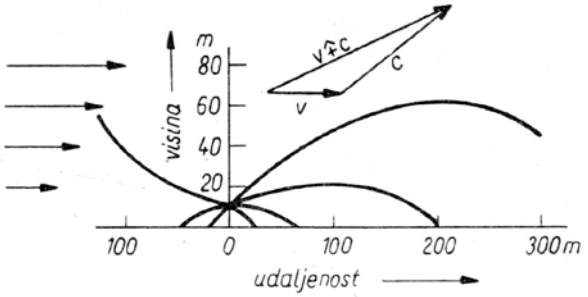
Sl. 30. Refrakcija zvučnih valova
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 35)

Brzina zvuka ovisi o temperaturi pa će do loma (savijanja) zvučnih zraka doći i kod prolaza kroz zrak različite temperature.



Sl. 31. Utjecaj promjene temperature na širenje zvuka
(Izvor: Fasold W.; Veres E., 1998: 40)

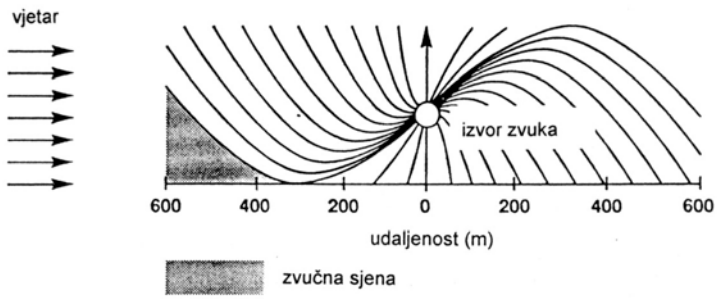
Vjetar također mijenja smjer širenja zvuka. Brzina vjetra i brzina zvuka vektorski se zbrajaju.



Pod utjecajem vjetra zvučne se zrake savijaju.

Sl. 32. Utjecaj vjetra na širenje zvuka
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 36)

Budući da je zbog trenja o tlo brzina vjetra u donjim slojevima manja, to je i brzina zvuka u odnosu na zemlju u tim slojevima manja. Zbog toga se zvučne zrake valova koji putuju protiv vjetra savijaju prema gore, a onih koji se šire niz vjetar savijaju se prema zemlji.



Sl. 33. Utjecaj vjetra na širenje zvuka
(Izvor: Fasold W.; Veres E., 1998: 40)

Apsorpcija zvuka

Apsorpcija zvuka je proces oslabljivanja zvuka prilikom prolaza kroz neku sredinu ili pri prijelazu preko neke površine. Zvučna se energija pritom najvećim dijelom pretvara u toplinu.

Apsorpcija zvuka u slobodnom polju (na otvorenom)

Do apsorpcije zvuka u zraku dolazi zbog fizikalne reakcije između molekula vode (H_2O) i kisika (O), odnosno veličina apsorpcije u zraku ovisi o vlažnosti zraka. Apsorpcija se smanjuje s povećanjem vlažnosti zraka, a povećava se s porastom frekvencije zvuka.

Relativna vlažnost	Gušenje u dB/m		
	3000 Hz	6000 Hz	10000 Hz
10%	0,08	0,15	0,20
20%	0,045	0,15	0,27
40%	0,02	0,08	0,17
50%	0,02	0,07	0,15

Tabl. IV. Apsorpcija zvuka u zraku ovisno o relativnoj vlažnosti i frekvenciji na temperaturi od 20°C
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 38)

Apsorpcija zvuka u magli i dimu ovisi o veličini čestica koje lebde u zraku. Ako su čestice vrlo malene, one se gibaju jednakom brzinom kao i čestice zraka pa ne dolazi do apsorpcije.

Frekvencija	Dodatno gušenje u dB/m
500 Hz	0,014
1000 Hz	0,02
4000 Hz	0,03
8000 Hz	0,04

Tabl. V. Dodatno gušenje u magli koja omogućava vidljivost do 50 m
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 38)

Gušenje do kojeg dolazi zbog raslinja (trava, grmlje, šuma ...) ovisi o visini izvora zvuka i slušaoca iznad zemlje.

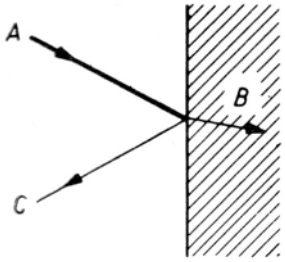
Raslinje	Dodatno gušenje u dB/m		
	100 Hz	1000 Hz	5000 Hz
Trava rijetka, visine 10 do 20 cm	0,005	0,03	—
Trava gusta, visine 40 do 50 cm	0,005	0,12	0,15
Žito gusto, visine 180 cm	0,03	0,36	0,4
Šuma	0,02	0,06	0,15

Tabl. VI. Dodatno gušenje u slučaju kad se izvor zvuka i prijam (uho) nalaze na visini od oko 1 do 2 m iznad zemlje
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 38)

Apsorpcija zvuka u zatvorenom prostoru

U zatvorenom prostoru apsorpcija zvuka ovisi o karakteristikama obodnih površina. Kad zvučni val udari u graničnu plohu koja omeđuje neku prostoriju, dio energije vala apsorbira materijal granične plohe, a preostali dio energije vraća se s reflektiranim valom u prostoriju. Sposobnost apsorpcije nekog materijala karakterizira se koeficijentom apsorpcije α koji je jednak odnosu apsorbirane snage i ukupne snage upadnog vala.

α = apsorbirana snaga / ukupna snaga



Od zvuka A koji udari u neki zid, dio B se apsorbira, a ostatak C se reflektira.

Sl. 34. Apsorpcija zvuka
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 166)

Vrijednost koeficijenta apsorpcije nekog materijala ovisi o frekvenciji zvuka i o kutu njegova upada na površinu promatranog materijala. Vrijednost koeficijenta apsorpcije može se kretati između 0 i 1. Materijali koji imaju vrijednost koeficijenta apsorpcije iznad 0.3 nazivaju se apsorpcijski materijali. Uobičajeno je da se vrijednosti koeficijenata apsorpcije materijala daju za frekvencije (125), 250, 500, 1000, 2000 i (4000) Hz.

Svrha je apsorpcijskih materijala i konstrukcija da:

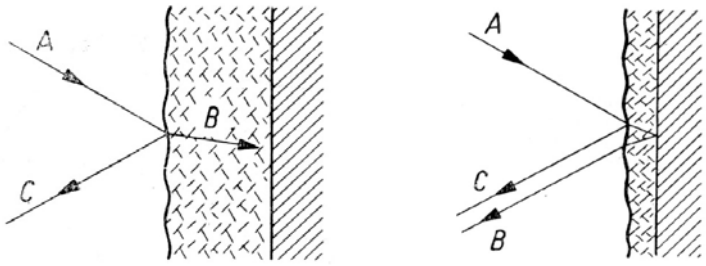
1. skrate vrijeme odjeka,
2. otklone pojavu jeke,
3. priguše buku.

U praktičnoj arhitektonskoj akustici primjenjuju se sljedeći apsorberi:

A) Porozni materijali

U ovu grupu spadaju materijali s mnogo otvorenih, međusobno povezanih šupljina i pora ispunjenih zrakom. Takvi su materijali npr. ploče mineralne vune (kamene i staklene), ploče od drvene mineralizirane strugotine (drvolit) i slično.

Kad zvučni val udari o površinu poroznog materijala, samo se manji dio vala reflektira, a veći dio prodire u materijal. Tijekom svoga širenja unutar poroznog materijala on gubi dio svoje energije zbog trenja titrajućih čestica zraka o stijenke pora. Ako je porozni materijal smješten uz površinu stijene od tvrdog materijala, zvučni val reflektira se od ove površine i nakon ponovnog prolaza kroz porozni materijal (u obrnutom smjeru) vraća se oslabljen u prostoriju.



U debelom poroznom apsorberu cijela se zvučna energija koja prodire u sloj pretvori u toplinu, to jest apsorbira.

Kroz tanak porozni sloj zvučni valovi prodiru do pregrade, od koje se reflektiraju.

Sl. 35. Apsorpcija zvuka poroznih materijala
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 168)

Koeficijent apsorpcije poroznih materijala ovisi o strukturi materijala, debljini sloja i frekvenciji.

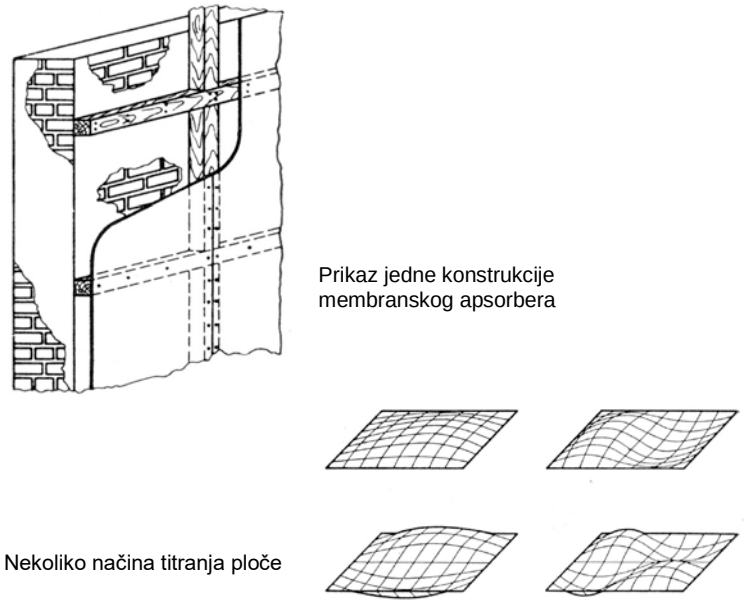
B) Membranski apsorberi

Membranski apsorberi izvode se od tankih, savitljivih obloga postavljenih ispred pregrada. To su najčešće membrane od drva, ljepenke, kože ili guste nepropusne tkanine postavljene na okvir ispred pregrade. Pod djelovanjem zvučnih valova membrana počne titrati, na što se troši dio zvučne energije.

Do najveće apsorpcije dolazi na frekvenciji rezonancije, koja se računa po formuli:

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{m \times d}}$$

m - površinska masa membrane (kg/m^2)
d - debljina zračnog sloja (m)

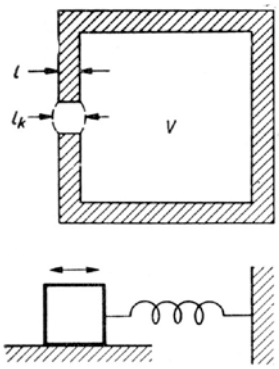


Sl. 36. Membranski apsorber
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 178)

Koeficijent apsorpcije membranskog apsorbera može se povećati ako se u zračni prostor iza membrane ugradi sloj poroznoga apsorpcijskog materijala.

C) Rezonatorski (Helmholtzovi) apsorberi

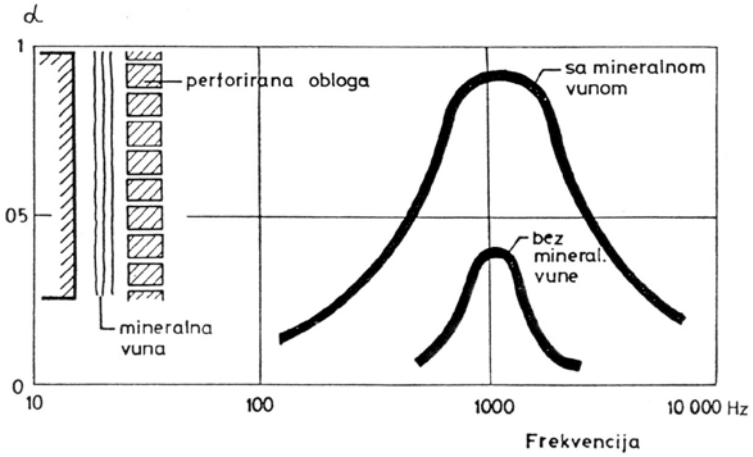
Kao rezonatorski apsorberi upotrebljavaju se kutije ili posude s otvorom, kojima zrak u otvoru, grlu, predstavlja masu koja pod djelovanjem zvučnog tlaka titra, a volumen zraka u samoj kutiji (posudi) tome se suprotstavlja i služi kao opruga.



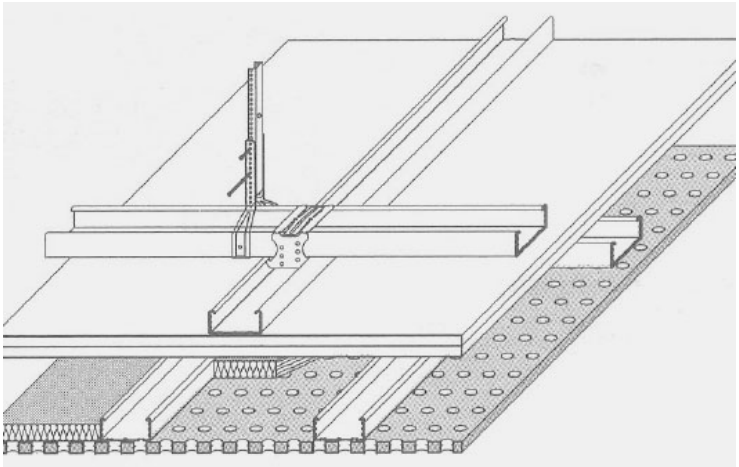
Sl. 37. Rezonatorski apsorber
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 182)

Pomicanjem zraka u otvoru rezonatora dio zvučne energije pretvara se u toplinu zbog trenja zraka o stijenke otvora. Najveća apsorpcija postiže se na frekvenciji rezonancije.

Danas u praksi najčešće korišteni rezonantni apsorberi načinjeni su od perforiranih ploča od metala, gipsa, drva ili sl., koje se postavljaju na određenoj udaljenosti od pregrada prostorije (zidova, stropova) tako da između tih ploča i površine pregrada ostane zatvoreni sloj zraka povezan sa zrakom prostorije samo preko otvora u pločama. Ovakav sustav ponaša se kao veliki broj rezonatora smještenih jedan pored drugog, a svaka rupa perforiranih ploča je otvor jednog rezonatora. Ako se između perforiranih ploča i površine pregrade umetne sloj poroznog materijala, poveća se apsorpcija (kompozitni apsorberi).



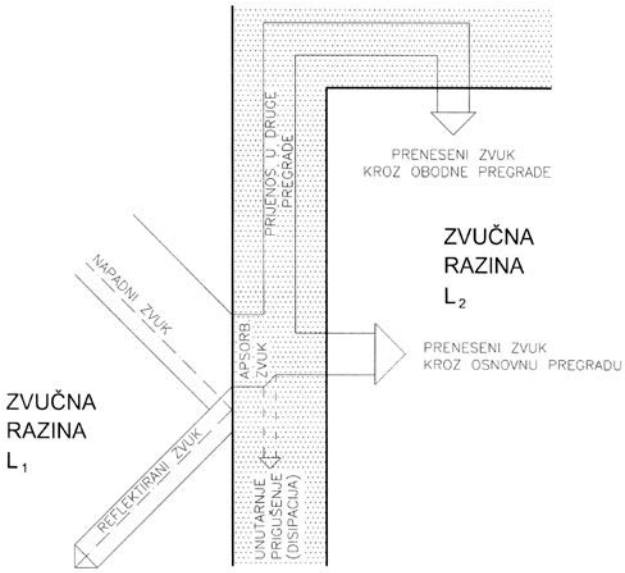
Sl. 38. Frekvencijske karakteristike koeficijenata apsorpcije perforiranih ploča
(Izvor: Šimetin V., 1983: 184)



Sl. 39. Primjer stropnoga panelnog rezonancijskog apsorbera
(Izvor: www.knauf.hr)

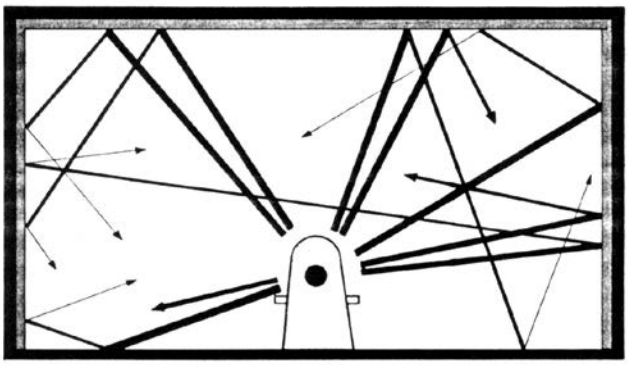
ZVUK U ZATVORENOM PROSTORU

U zatvorenom prostoru, pod utjecajem zvučnih valova, stvara se zatvoreno zvučno polje koje je rezultat refleksija i apsorpcija pregrada što formiraju prostor. Zvučni se valovi od pregradnih stijena dijelom reflektiraju, a dijelom apsorbiraju.



Sl. 40. Zvučni valovi i pregrade u prostoru

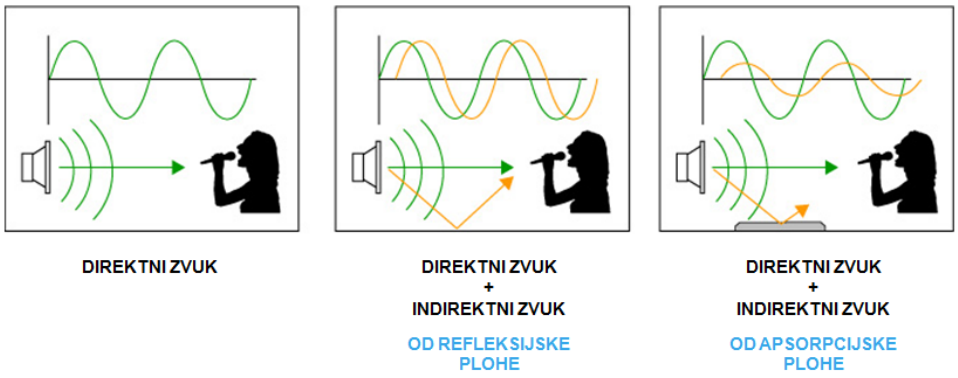
Zvučni valovi šire se od izvora u svim smjerovima. Od obodnih površina prostorije zvučni će se valovi reflektirati po zakonima geometrijske optike. U točku prijama dolazi direktni zvuk od izvora (najkraći put) i niz refleksija zvuka. Reflektirani zvučni valovi imat će u točki prijama manju jakost od direktnih valova jer su od izvora do točke prijama prešli duži put od direktnih valova i još su pritom izgubili dio svoje energije refleksijom (apsorpcijom). Reflektiranje zvučnih valova u prostoru nastavlja se i dalje, valovi se isprepleću, sve dok s vremenom, zbog slabljenja zvuka kod njegova širenja zrakom i gubitka kod refleksija, potpuno ne izgube jakost.



Sl. 41. Zvučni valovi u zatvorenom prostoru
(Izvor: Schulz P., 1993: 190)

Prilikom projektiranja građevina i njenih prostora, sa stajališta akustike javljaju se dva osnovna problema:

- problem kvalitete govora i muzike (prostorna akustika),
- problem zvučne zaštite.



Sl. 42. Čujni zvuk u zatvorenom prostoru – kombinacija direktnog i indirektnog zvuka
(Izvor: www.keywordteam.net)

Prostorna akustika

Zadatak je arhitektonske (prostorne) akustike da u prostorima stvori uvjete za dobro slušanje. Dobru akustiku osigurava zadovoljavanje sljedećih uvjeta:

1. U prostoriji ne smije biti buke, ni unutarnje ni one koja dolazi izvana.
2. Zvuk u prostoriji mora biti dovoljno glasan na svim mjestima.
3. U prostoriji ne smije doći do pojave jeke.
4. Glasnoća zvuka mora biti približno jednaka na svim sjedalima.
5. U prostoriji ne smije doći do neželjenih rezonancija.
6. Odjek u prostoriji mora biti dovoljno malen da bi se izbjegla preklapanja uzastopnih zvukova (slogova i tonova) u govoru i muzici, ali ujedno prostorija mora biti i dovoljno «živa» na svim frekvencijama kako bi slušanje govora ili glazbe bilo popraćeno ugodnim osjećajem. Pritom direktan zvuk treba biti u stanovitom odnosu prema reflektiranom zvuku.

Akustička svojstva prostorije određena su trima čimbenicima:

1. volumen,
2. oblik,
3. odjek (reverberacija).

Volumen

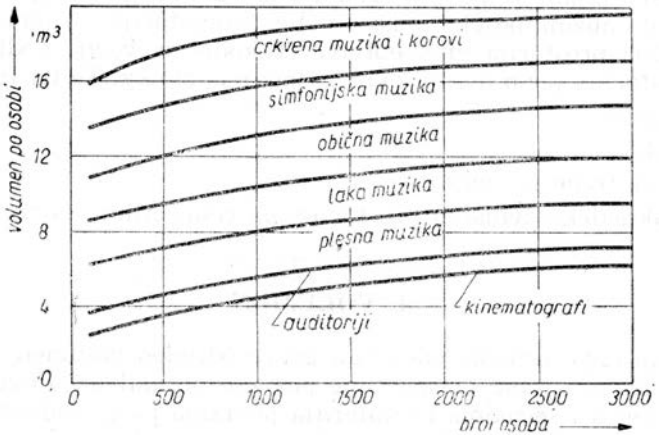
Svakom izvoru zvuka odgovara određeni volumen do kojeg se može ići a da pritom glasnoća ne postane premalena. Povećanjem volumena povećava se i unutarnja površina pa je apsorpcija zvuka veća, odnosno uz istu emitiranu zvučnu energiju glasnoća je manja.

Izvor zvuka	Maksimalni volumen
Prosječan govornik	3000 m^3
Uvježban govornik	6000 m^3
Instrumentalni ili vokalni solist	10000 m^3
Veliki simfonijski orkestar	20000 m^3
Veliki pjevački zbor	50000 m^3

Tabl. VII. Približne veličine volumena za neke izvore dobivene na temelju praktičnog iskustva
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 87)

Ako je volumen veći od maksimalnog, treba u takvom prostoru instalirati razglasni uređaj.

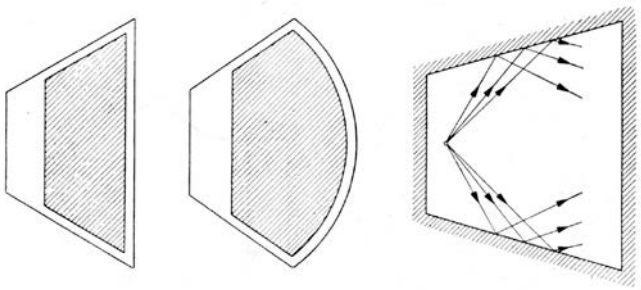
Volumen ovisi i o broju sjedala (slušača). Optimalan specifični volumen za koncertne dvorane jest 7 do 8 m^3 po sjedalu, za kinodvorane 4 do 5 m^3 po sjedalu i za predavaonice 4 do 5 m^3 po sjedalu.



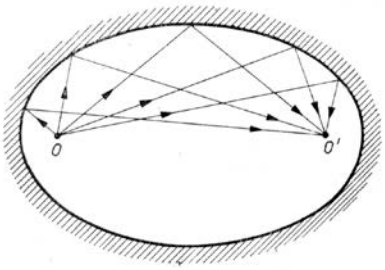
Sl. 43. Volumen po osobi (najniže vrijednosti) u ovisnosti o broju osoba za prostore različitih namjena
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 88)

Oblik

Akustička svojstva prostorije u velikoj mjeri ovise o njezinu obliku. Iz tog razloga potrebno je unutarnjim plohama prostorije već u fazi projektiranja dati ispravan oblik i položaj. Prilikom projektiranja treba posvetiti pozornost svakoj plohi prostorije (pod, strop, bočne vertikalne pregrade i sve ostale plohe u prostoru).

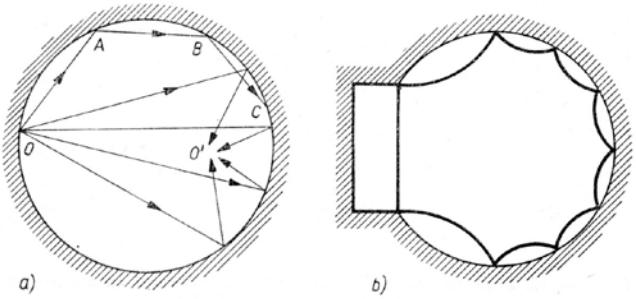


Sl. 44. Lepezasti oblik dvorane vrlo je povoljan za auditorije.
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 95)



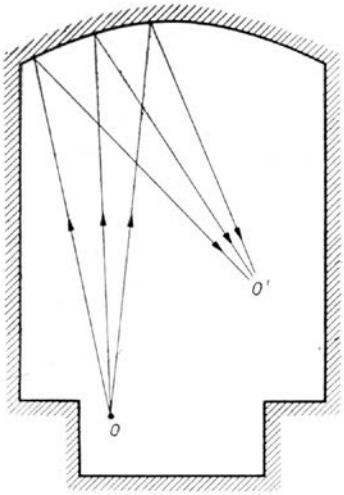
Eliptični tlocrt prostorije vrlo je nepovoljan, posebice u slučaju kad se govornik nalazi u jednom fokusu elipse.

Sl. 45. Eliptični tlocrt
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 96)

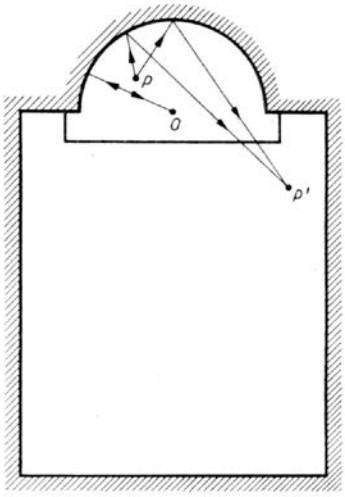


a) Kružni tlocrt uzrokuje nejednoliku raspodjelu zvuka u prostoriji.
b) U akustičkom smislu ispravna obrada stijena okrugle prostorije

Sl. 46. Kružni tlocrt
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 96)

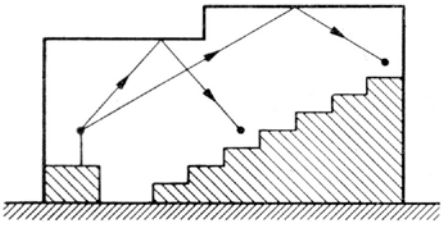


Konkavna stražnja stijena dvorane uzrokuje koncentraciju zvuka na jednome mjestu.

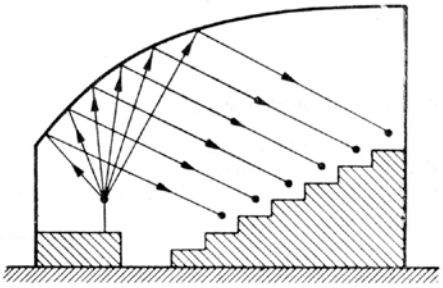


Kružna stražnja stijena pozornice uzrokuje nepovoljnu raspodjelu zvuka na pozornici i u gledalištu.

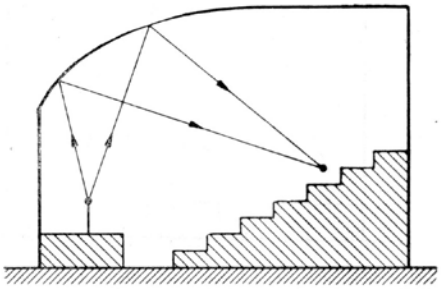
Sl. 47. Konkavna i kružna stražnja stijena
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 97)



Stubastim stropom mogu se zvučne zrake ispravno usmjeriti u dvoranu.

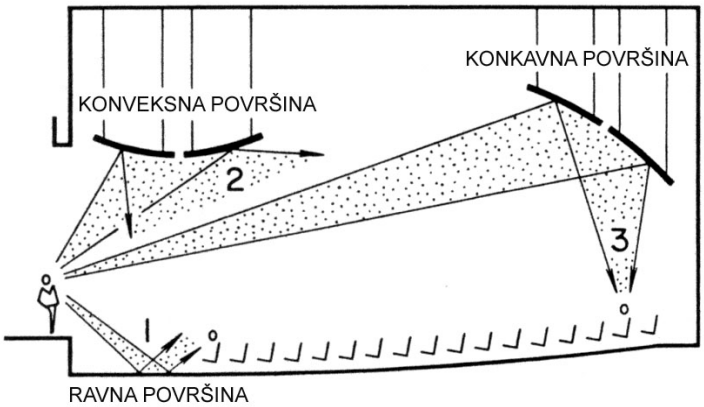


Ispravno zakrivljen konkavni strop može se dobro iskoristiti kao reflektor zvuka.



Konkavni strop s neispravnim zakrivljenjem može uzrokovati koncentriranje zvuka na jednome mjestu.

Sl. 48. Utjecaj oblika stropa na akustička svojstva prostorije
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 100)

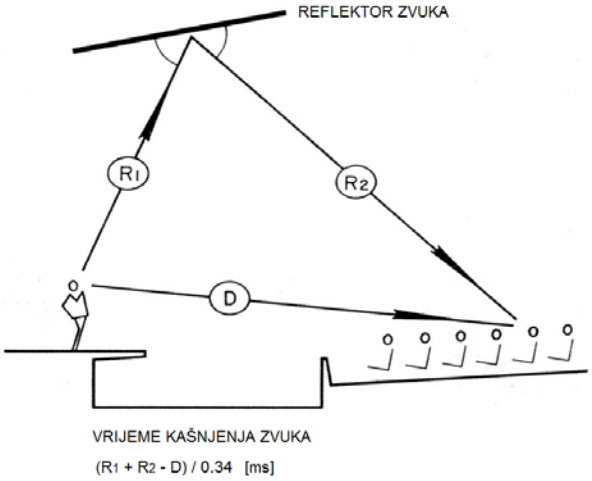


Sl. 49. Konveksne i konkavne površine za refleksiju zvuka u prostoru
(1-ujednačena refleksija, 2-disperzija zvuka, 3-koncentracija zvuka)
(Izvor: Leslie L. Doelle, 1972: 24)

Jeka i flater-jeka

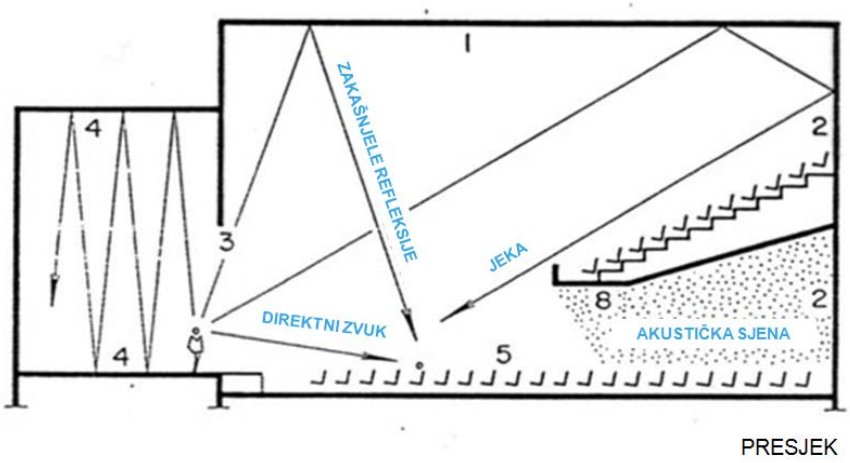
Zvučne impulse koji jedan nakon drugoga slijede u vremenu dužem od 0.05 do 0.1 sekunde uho čuje svaki posebno. Pojava da se zvučni impulsi po drugi put čuju nakon reflektiranja od neke plohe naziva se jekom.

Uz zakašnjenje reflektiranog zvuka prema direktnom zvuku od 0.05 sekundi (što odgovara razlici putova od 17 metara) jeka se čuje onda kad je reflektirani zvuk istog intenziteta kao i direktni. Vrijeme zakašnjenja od 0.1 sekunde (razlika u putu 34 metra) odnosi se na slučaj kad je intenzitet reflektiranog zvuka upola slabiji od direktnog zvuka.

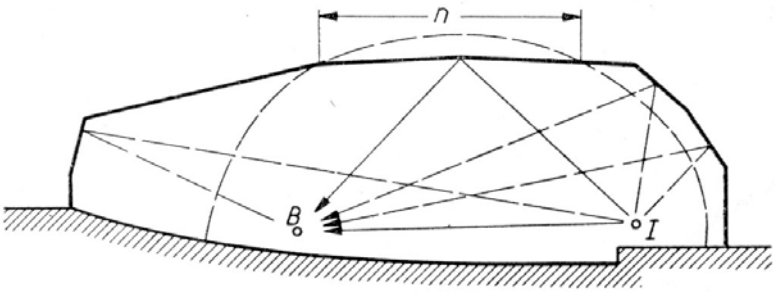


Sl. 50. Zakašnjenje reflektiranog u odnosu na direktni zvuk
(Izvor: Leslie L. Doelle, 1972: 51)

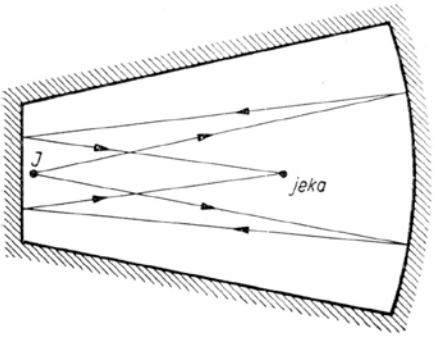
Jeka je prilikom slušanja neugodna i otežava razumijevanje. Jeka se javlja u prostorijama s visokim stropom i u suviše dugim prostorijama.



Sl. 51. Utjecaj oblika prostora na pojavu jeke
(Izvor: Leslie L. Doelle, 1972: 130)

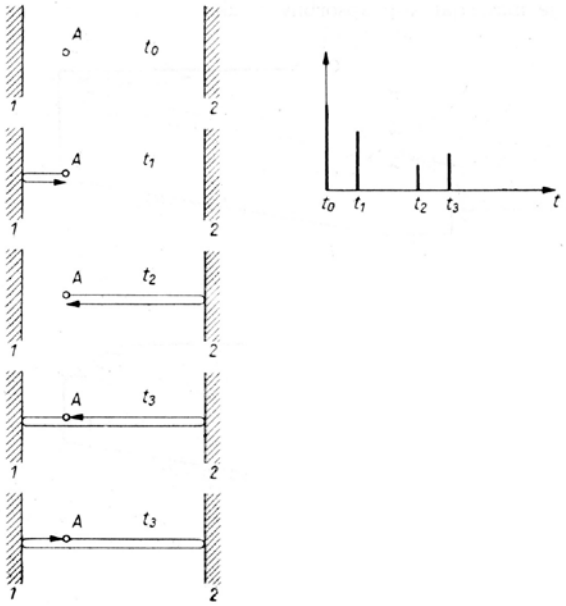


Presjek velike dvorane u kojoj zbog refleksije zvuka od nekih ploha može doći do pojave jeke.

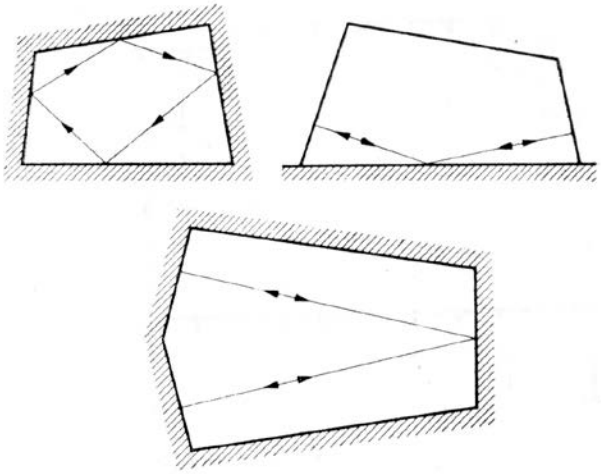


Do jeke može doći i zbog višestruke refleksije.

Sl. 52. Oblik prostora i jeka
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 106)



Sl. 53. Prikaz nastajanja flater-jeke i vremenski slijed zvučnih impulsa
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 108)



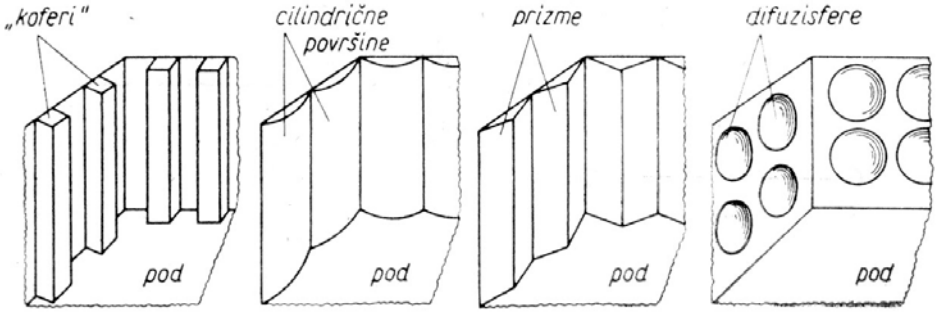
Sl. 54. Nastajanje flater-jeke reflektiranjem od neparalelnih ploha
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 108)

U manjim prostorijama glatkih i tvrdih stijena često ćemo naići na pojavu flater-jeke. Impuls proizveden u prostoru (točka A) odbija se od stijene 1 i nakon vremena t_1 vraća se do slušaoca. To se isto događa s impulsom koji se reflektira od stijene 2, samo nakon vremena t_2. Poslije toga oba reflektirana zvuka putuju do suprotnih stijena i stižu u točku prijama nakon istog vremena t_3. To se ponavlja sve dok se zvuk ne priguši. Flater-jeka može nastati i između ploha koje nisu paralelne.

Difuzori

Prilikom projektiranja koncertnih dvorana i muzičkih studija nastoji se postići raspršivanje zvuka u prostoru (difuzija) kako bi se dobila bolja jednolikost raspodjele zvuka po prostoriji.

Danas se za te svrhe najčešće upotrebljavaju prizmatične ili polucilindrične površine, a katkad i sferne.

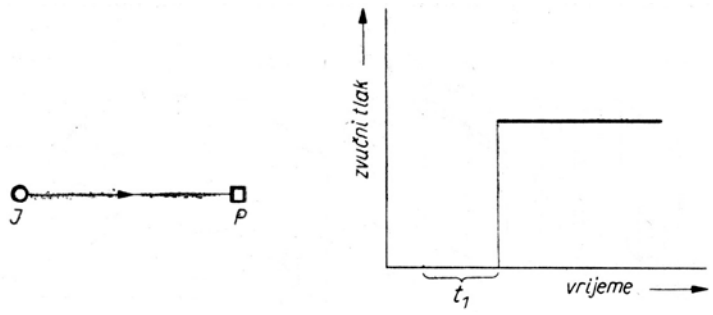


Sl. 55. Razne vrste raspršivača zvuka ili difuzora
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 109)

Efikasnost takvih površina ovisi o odnosu njihovih dimenzija prema valnoj dužini zvuka. Da bi djelovanje bilo više-manje jednoliko u širokome frekventnom području, trebali bi ti elementi biti različitih dimenzija.

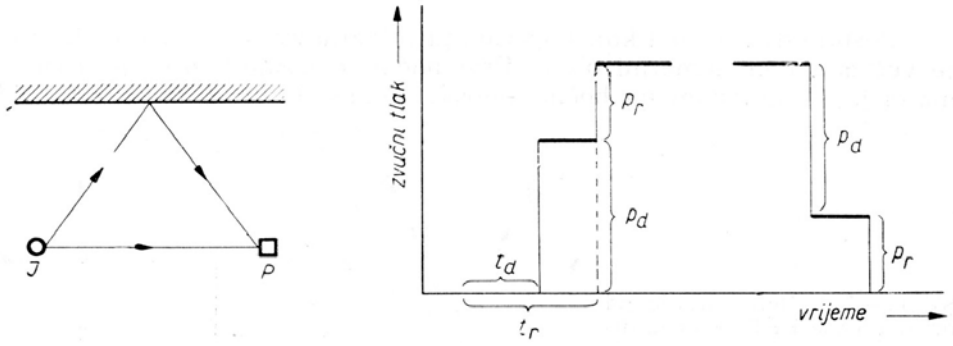
Dozvuk i odjek

Kad izvor zvuka u slobodnom prostoru (otvoreno polje) počne s emitiranjem, treba proći određeno vrijeme t_1 da direktni zvuk stigne do točke prijama. Nakon tog trenutka na mjestu prijama vlada konstantan zvučni tlak. Poslije prekida emitiranja ostaje zvučni tlak konstantan cijelo vrijeme za koje zvuk putuje od izvora do prijama, a nakon toga padne vrijednost na nulu.



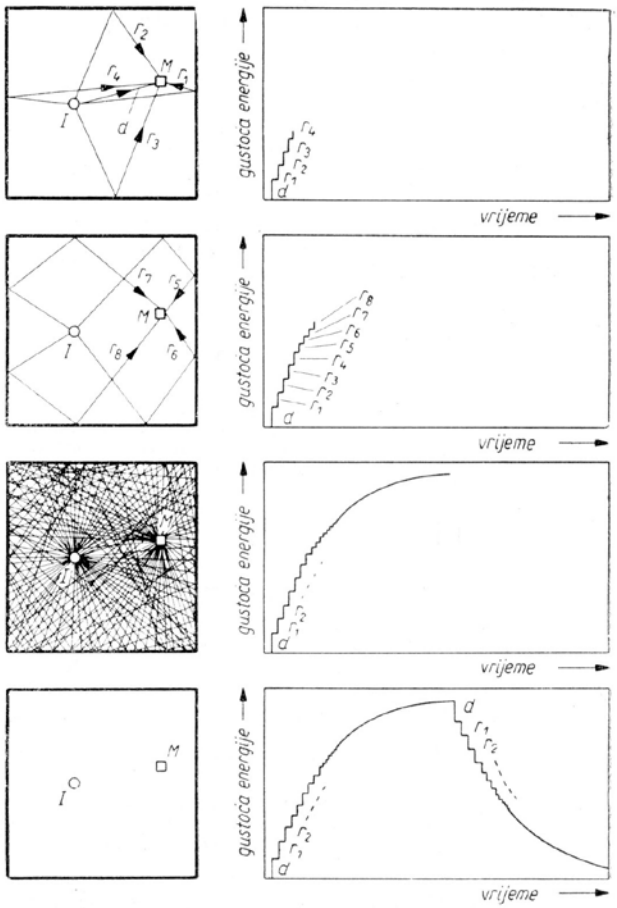
Sl. 56. Dijagram zvučnog tlaka direktnog zvuka
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 110)

U zatvorenom prostoru od izvora do prijama dolazi zvuk direktnim putem i reflektiranjem od pregrada. Budući da reflektirani zvuk treba prevaliti duži put, stiže kasnije, nakon direktnog zvuka. Oba zvuka zajedno daju povećani tlak. Prestankom emitiranja zvuka izvora najprije će prestati stizati direktni zvuk, a nakon toga i reflektirani.



Sl. 57. Dijagram zvučnog tlaka direktnog i reflektiranog zvuka na početku i na kraju emitiranja
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 110)

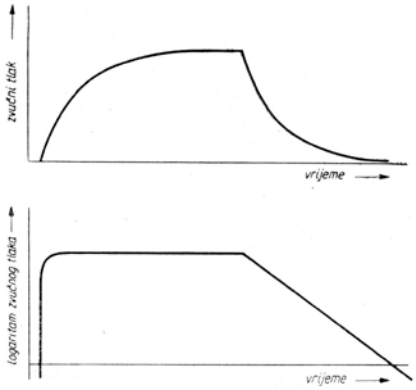
U zatvorenoj prostoriji dolazi do mnogostrukih refleksija od svih stijena. Stoga će se zvučni tlak povisivati u dijagramu skokovito. Budući da se prilikom svake refleksije jedan dio zvučne energije apsorbira, visina kasnijih skokova bit će u dijagramu sve manja jer pripadaju zvučnim zrakama koje nakon višestruke refleksije postupno sve više gube intenzitet. Zvučni se tlak povisuje eksponencijalno. Stacionarno stanje se uspostavlja kad nastane ravnoteža između emitirane i apsorbirane energije. Proces utišavanja zvuka nakon prestanka emitiranja zvučnog izvora odvija se na isti način.



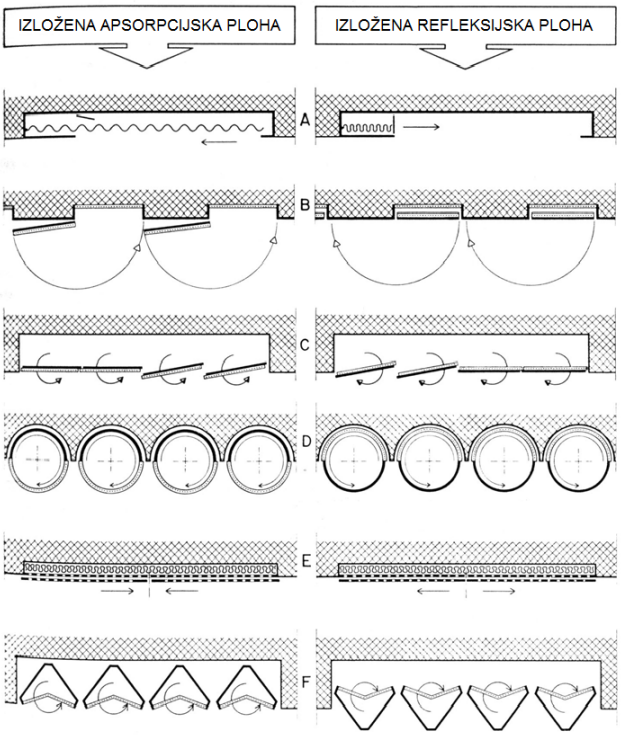
Sl. 58. Konstrukcija karakteristike dozvuka i odjeka na principu reflektiranja zvučnih zraka (prema Olsonu)
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 111)

Proces eksponencijalnog porasta zvučnog tlaka do stacionarnog stanja naziva se dozvukom. Suprotan proces koji se odvija nakon prestanka emitiranja izvora zvuka naziva se odjekom ili reverberacijom.

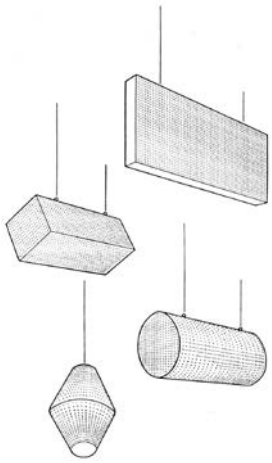
Zbog logaritmičke karakteristike koju ima uho proces dozvuka subjektivno traje znatno kraće nego proces odjeka.



Sl. 59. Karakteristika dozvuka i odjeka crtana uz linearnu skalu za zvučni tlak (gore) i uz logaritamsku skalu za zvučni tlak (dolje)
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 113)



Sl. 60. Varijabilni apsorberi
(Izvor: Leslie L. Doelle, 1972: 43)

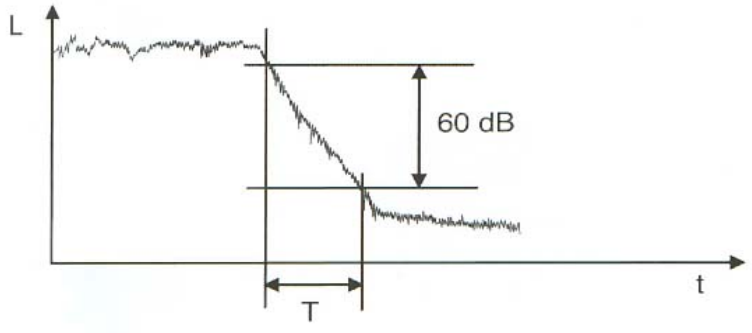


Sl. 61. Prostorni apsorberi
(Izvor: Leslie L. Doelle, 1972: 43)

Izračunavanje vremena odjeka

Koliko će vremena trajati slabljenje zvuka u nekoj prostoriji, ovisi o ekvivalentnoj apsorpcijskoj površini (*A*) i o volumenu prostorije. Što je veća apsorpcijska površina (*A*), to će zvučna energija biti prije apsorbirana. Što je veći volumen prostorije, zvučni će valovi između dviju uzastopnih refleksija prevaliti dulji put. Uz manje refleksija apsorbira se u jedinici vremena manje zvučne energije te proces odjeka traje duže.

Brzina slabljenja zvučne energije u prostoriji karakterizira se vremenom T koje je potrebno da bi se razina zvučnog tlaka u prostoriji smanjila za 60 dB nakon isključivanja izvora zvuka. Ovo se vrijeme T naziva vrijeme odjeka ili reverberacije i predstavlja osnovnu akustičku karakteristiku prostorije.



Sl. 62. Vrijeme odjeka
(Izvor: prema Willems, W. M., Dinter, S., Schild, K., 2006: 9.25)

Sabineova formula za vrijeme odjeka:

$$T = 0.161 \times \frac{V}{A} \text{ (sek)}$$

V – volumen prostorije (m^3)
A - ekvivalentna apsorpcijska površina (m^2)

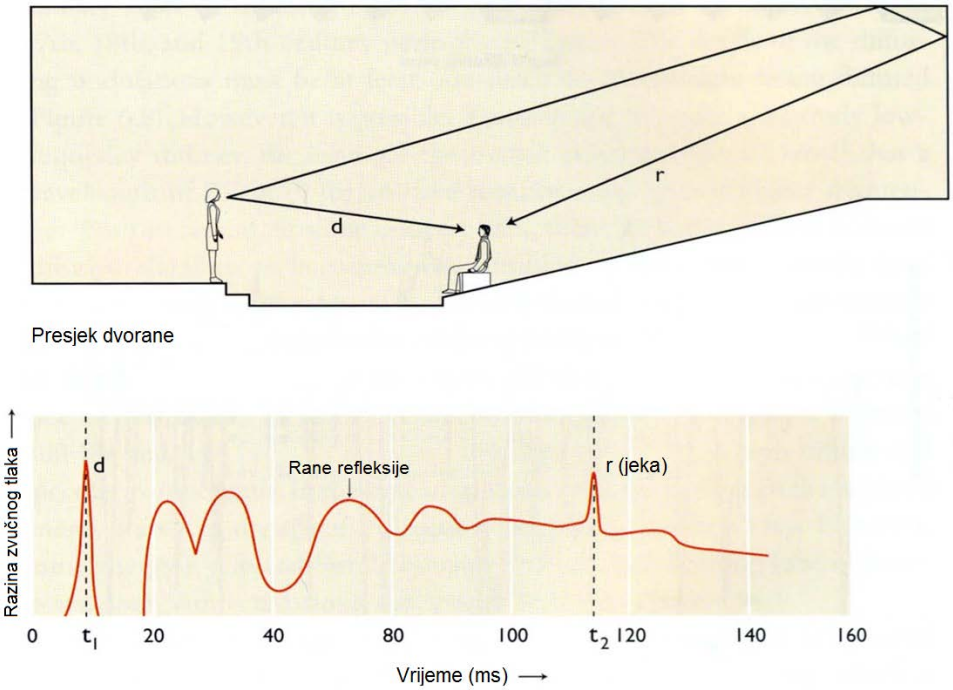
$$A = \Sigma\ \alpha_n \times S_n$$

α_n – koeficijent apsorpcije
S_n - površina (m^2)

Ova Sabineova formula dobivena je uz pretpostavku da se akustička energija u prostoru gubi samo zbog apsorpcije graničnih ploha (i eventualne opreme prostorije i korisnika u istoj). Za proračun vremena odjeka u velikim prostorima i na višim frekvencijama zvuka apsorpcija zvuka u zraku postaje značajna pa je potrebno i nju uzeti u obzir.

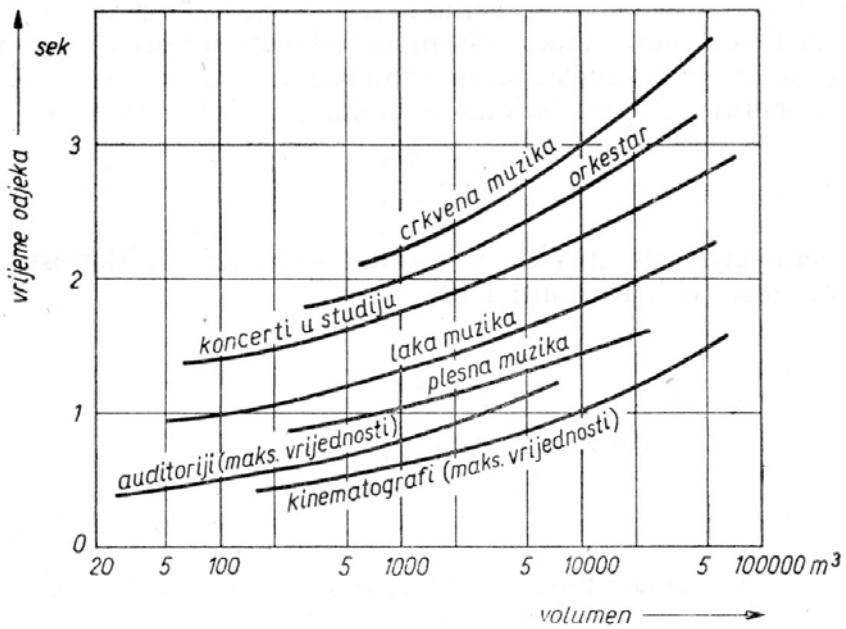
Akustička kvaliteta prostorija

Sve prostorije namijenjene slušanju govora, pjevanja ili glazbe moraju imati određenu akustičku kvalitetu. Akustička kvaliteta prostorije podrazumijeva njenu pogodnost za dobro i ugodno slušanje bez upotrebe elektroakustičkih uređaja.
Refleksije koje do slušatelja stignu u vrlo kratkom vremenu nakon direktnog zvuka, uho ne može razlikovati od direktnog zvuka. Svi se ti zvukovi stope u cjelinu, što rezultira povećanjem glasnoće. U uhu se stapaju refleksije s direktnim zvukom, koje se nakon njega pojavljuju u vremenu do 35 milisekunda. To je vrijeme u kojem direktni zvuk prevali put od cca 10 metara. Intenzitet zvuka u kasnijim refleksijama zbog apsorpcije sve je slabiji. Refleksije koje iskaču iznad susjednih čuju se kao jeka.



Sl. 63. Jeka - refleksije koje iskaču iznad susjednih
(Izvor: Charles M. Salter Associates Inc.,1998: 80)

Za svaku prostoriju postoji određeno najpovoljnije vrijeme odjeka. To vrijeme ovisi o volumenu prostorije i njenoj namjeni.



Sl. 64. Ovisnost optimalnog vremena odjeka o volumenu za različite vrste izvedbi
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 132)

Metode akustičkog projektiranja *(prema J. Moir : "High quality sound reproduction"*):

1. Prema arhitektonskom projektu izračunati vrijeme odjeka na barem šest frekvencija između 80 i 4000 Hz.

2. S obzirom na svrhu prostora, prilagoditi vrijeme odjeka na optimum. Ako je potrebno, dodavati apsorbere; treba ih staviti na zidove (osobito na zid nasuprot izvoru zvuka).

3. Izbjegavati konkavne površine.

4. Izbjegavati velike ravne plohe, osobito ako je predviđeno instaliranje razglasnog uređaja. Velike plohe razbiti u nepravilne likove.

5. Blaga neparalelnost zidova je poželjna.

6. Oblikom zidova smanjiti mogućnost koncentrirane refleksije zvučne energije na površini sjedala sa zakašnjenjem većim od 50 milisekunda.

7. Izbjegavati nagle promjene presjeka prostora - dvorane.

8. Troškovi građenja i akustička obrada prostora smanjuju se ako se volumen dvorane drži pod strogom kontrolom (volumen ovisno o namjeni).

9. Nadati se najboljem!

BUKA

Buka je neželjeni zvuk i kao takav može se opisati kao zagađenje. Razlika između buke i zvuka posve je subjektivna. Fizikalno oni se međusobno uopće ne razlikuju i zbog toga je nemoguće objektivno definirati buku. Buka je čujna akustička energija koja može štetno djelovati na fiziološko i psihološko stanje ljudi, a može potjecati iz različitih izvora. Izvori buke jesu: promet, industrija, građevinski i javni radovi, sport, rekreacija i zabava, servisni uređaji, kućanski uređaji, buka iz susjedstva.

Buka, ovisno o razini, izaziva različite tjelesne reakcije kod čovjeka. Izloženost buci visokih razina može dovesti do oštećenja sluha. Više razine buke mijenjaju fiziološke aktivnosti čovjeka, a niske razine imaju uglavnom psihološko djelovanje. Buka ometa govornu komunikaciju i utječe na općenito i radno ponašanje čovjeka.

Gruba procjena mogućeg djelovanja buke na čovjeka:

- **do 60 dB(A)** samo psihološko djelovanje (onemogućava koncentraciju, smanjuje pozornost, remeti odmor i san, povećava razdražljivost, nervira);

- **od 60 do 85 dB(A)** jako psihološko djelovanje i fiziološki efekti (povećava se broj otkucaja srca, raste krvni tlak, modificira se ritam disanja itd.);

- **iznad 85 dB(A)** pored jakih psiholoških i fizioloških efekata još i oštećenje sluha.

Za ocjenu razine buke upotrebljava se parametar ekvivalentne razine buke (L_{Aeq}). Ovaj se parametar najčešće koristi za opisivanje izloženosti buci i sve se više prihvaća u svijetu kao mjerilo ocjene buke, a u skladu je s preporukom Europske komisije. Ovaj parametar za ocjenu razine buke upotrebljava se i u Hrvatskoj.

Izvori buke

Buka u boravišnim prostorima može dolaziti od različitih izvora koji se nalaze u ili izvan zgrade. S obzirom na način na koji se buka prenosi do mjesta na kojem smeta razlikujemo:

- buku koja se stvara u prostoriji u kojoj smeta,
- buka koja se prenosi iz druge prostorije,
- buka koja se prenosi izvana.

Koje će se vrijednosti razine buke ocijeniti kao prihvatljive, ovisi o nekoliko čimbenika:

- o lokaciji na kojoj se buka pojavljuje,
- o namjeni prostora,
- o dobu dana kad se buka javlja itd.

Promatrajući zgradu i njene boravišne prostore, zaštita od buke treba sagledati i osigurati:

- zaštitu od vanjske buke,
- zaštitu od zračne i udarne buke unutar zgrade,
- zaštitu od buke ugrađene opreme u zgradi,
- zaštitu okoliša od buke za zgradu vezanih izvora buke,
- zaštitu od buke povećane odječnosti.

Zaštita od vanjske buke

Najčešća buka koja se pojavljuje u boravišnim stambenim prostorima jest vanjska buka, i to:

- buka industrije i zanatstva,
- buka prometa (cestovnog, tračničkog, zračnog),
- buka drugih izvora.

Pritom je dominantna buka prometa.

Buka prometa

Predviđanje buke od prometa moguće je prema sljedećoj formuli:

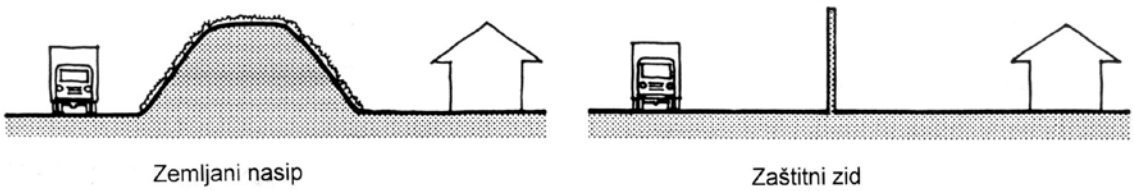
$$L_{A,eq} = 36.3 + 10 \log (n_o + 10\, n_k) + 10 \log 25 / d$$

n_o - broj osobnih vozila na sat
n_k - broj teških vozila (autobusi, kamioni …) na sat
d - udaljenost prometnice od pročelja

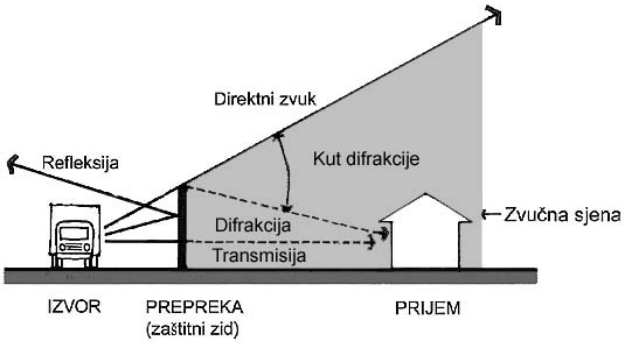
Barijere za zaštitu od buke

Barijere za zaštitu od buke najčešći su i najsigurniji način smanjenja rasprostiranja buke. Barijere su elementi koji se nalaze najčešće neposredno uz izvor buke i sprječavaju odnosno smanjuju širenje buke od izvora u okolinu. Odgovarajuće odabrane barijere mogu smanjiti razinu buke i do 15 dB.

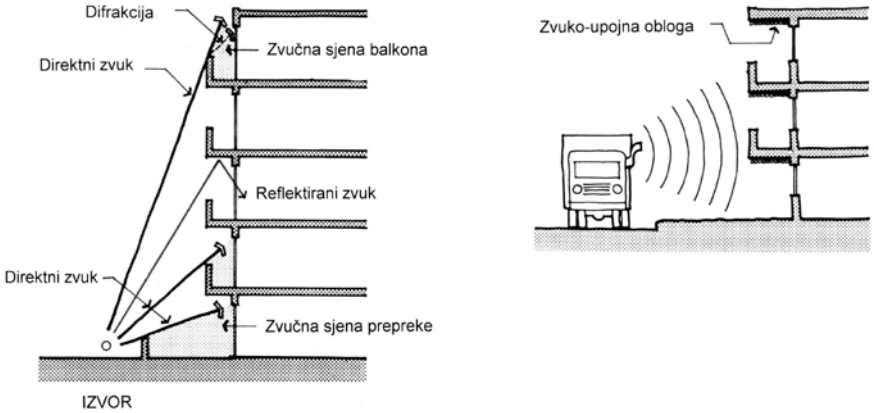
Barijere se razlikuju prema obliku, materijalu od kojeg su izvedene i prema akustičkim svojstvima (zvučna izolacija i apsorpcija zvuka). Kao barijere za zaštitu od buke prometa mogu se izvesti: zidovi za zaštitu od buke, nasipi, usjeci ili zasjeci, tuneli, zgrade (neosjetljive na buku, npr. garaže i sl.) i vegetacija.



Sl. 65. Elementi za zaštitu od buke prometa
(Izvor: Egan, M. David, 1988: 261)



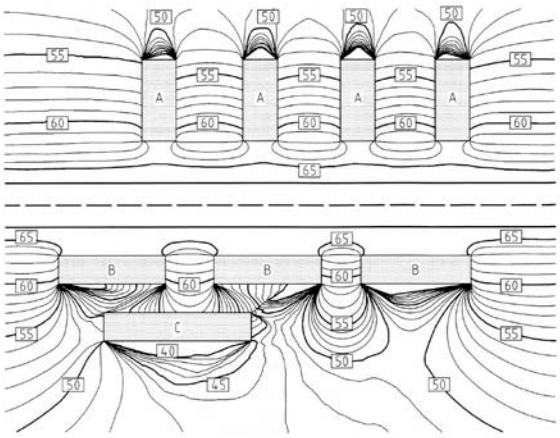
Sl. 66. Zid za zaštitu od buke prometnice
(Izvor: Egan, M. David, 1988: 255)



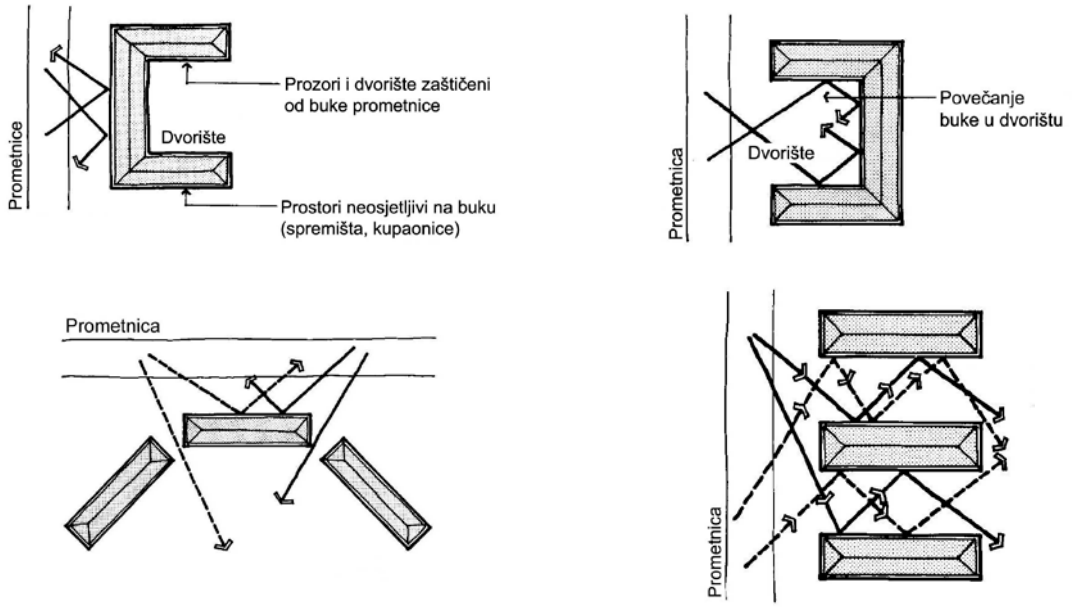
Sl. 67. Refleksija buke prometa od istaka (balkona) na pročelju zgrade
(Izvor: Egan, M. David, 1988: 260)

Smanjenje buke i njena utjecaja kroz urbanističko planiranje

Prilikom određivanja položaja zgrada u prostoru važno je voditi računa o orijentaciji zgrada prema izvorima buke.

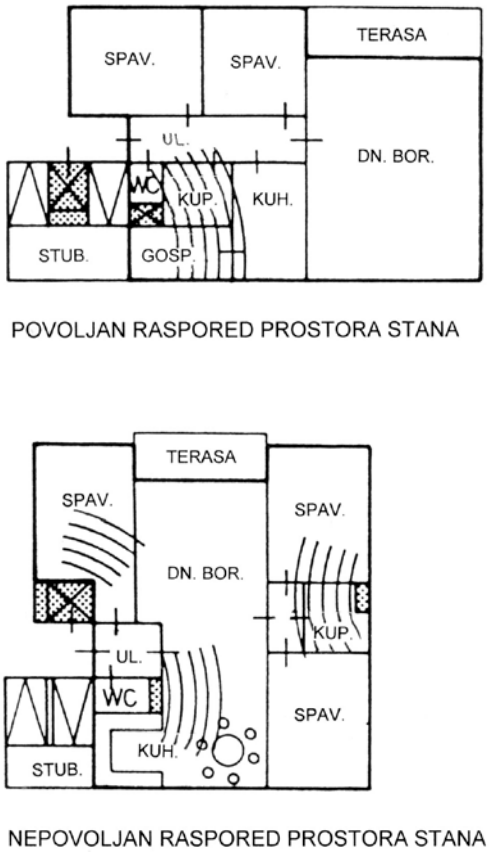


Sl. 68. Utjecaj položaja zgrada na širenje zvuka u prostoru
(Izvor: DIN – Taschenbuch 35, 2007: 143)

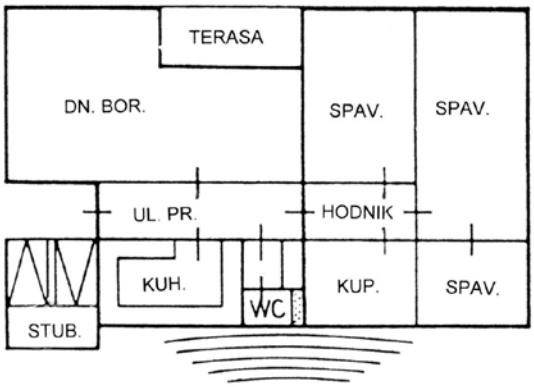


Sl. 69. Utjecaj oblika i položaja zgrada na širenje zvuka
(Izvor: Egan, M. David, 1988: 271)

Smanjenje buke i njena utjecaja kroz arhitektonsko projektiranje



Sl. 70. Utjecaj tlocrtnih rješenja stanova na buku iz susjednih prostora



POVOLJAN RASPORED PROSTORA OBZIROM NA ULIČNU BUKU

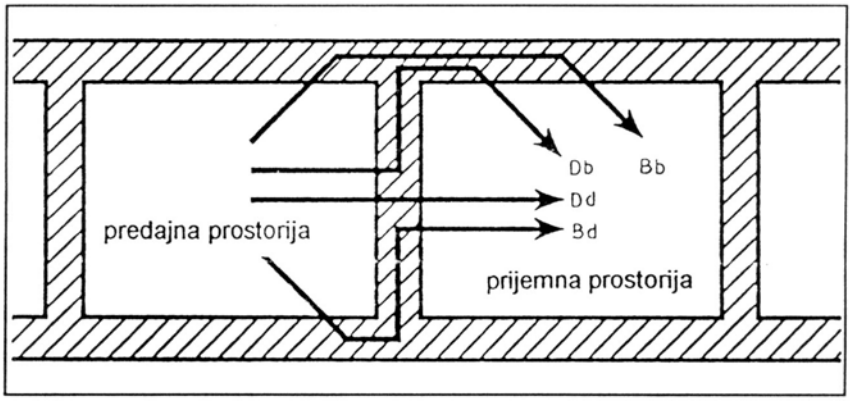
Sl. 71. Utjecaj tlocrtnog rješenja stana na buku izvana

Zaštita od zračne i udarne buke unutar zgrade

Za zaštitu od zračne i udarne buke treba zadovoljiti propisane minimalne vrijednosti zvučne izolacije zračnog zvuka R_w i maksimalne vrijednosti razine zvuka udara L_w. Ove vrijednosti ovise o namjeni zgrade i o funkciji pregrade (pregrade između prostorija određenih namjena).

Prenošenje zračnog zvuka iz prostorije u prostoriju

Zvučni valovi koje emitira izvor zvuka u predajnoj prostoriji prenose se različitim putovima u prijamnu prostoriju.



Putevi prijenosa zvuka između dviju prostorija
Dd – razdjelna konstrukcija se pobuđuje zvukom u predajnoj prostoriji i zrači zvuk u prijemnoj prostoriji
Db – razdjelna konstrukcija se pobuđuje zvukom u predajnoj prostoriji, vibracije se prenose na bočnu konstrukciju prijemne prostorije koja zrači zvuk u prijemnu prostoriju
Bd – bočna konstrukcija se pobuđuje zvukom u predajnoj prostoriji, vibracije se prenose na razdjelnu konstrukciju koja zrači zvuk u prijemnu prostoriju
Bb – bočna konstrukcija se pobuđuje zvukom u predajnoj prostoriji, vibracije se prenose na bočnu konstrukciju prijemne prostorije koja zrači zvuk u prijemnu prostoriju

Sl. 72. Putovi prijenosa zvuka između dviju prostorija
(Izvor: prema Fasold W.; Veres E., 1998: 221)

Razlika razina

Stupanj zvučne izolacije prijamne prostorije u odnosu na predajnu prostoriju karakterizira se veličinom *D* - razlika razina.

$$D = L_1 - L_2 \text{ (dB)}$$

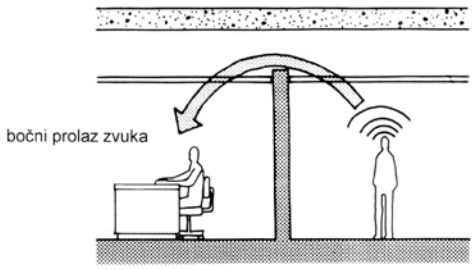
L_1 - razina srednjega zvučnog tlaka u predajnoj prostoriji (dB)
L_2 - razina srednjega zvučnog tlaka u prijamnoj prostoriji (dB)

Razlika razina određuje se mjerenjem na izvedenoj građevini, i to u frekvencijskim pojasima koji odgovaraju tercama (od 100 do 3150 Hz).

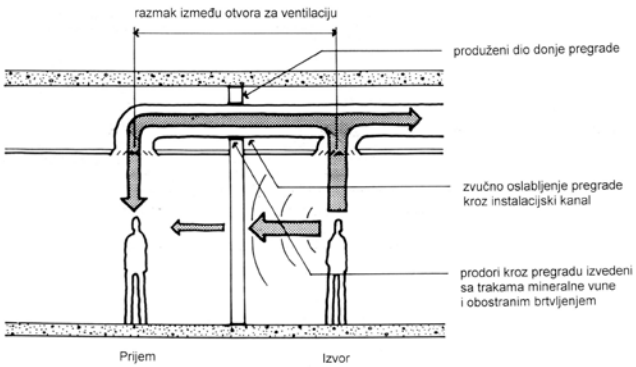
Razina zvuka u prostoriji ovisi o ekvivalentnoj apsorpcijskoj površini prostorije. Što je ekvivalentna apsorpcijska površina prijamne prostorije veća, to će, uz konstantnu vrijednost L_1 - razina L_2 biti niža. Iz toga razloga izmjerenu razliku razina treba korigirati tako da odgovara vrijednosti koja bi se dobila kad bi prijamna prostorija imala referentnu apsorpcijsku površinu A_o, za koju je odabrana vrijednost 10 m^2. Ovako korigirana razlika razina zove se normirana razlika razina i označava se s D_n.

$$D_n = D - 10 \log (A / A_o) = L_1 - L_2 - 10 \log (A / A_o) \quad \text{(dB)}$$

A - stvarna ekvivalentna apsorpcijska površina prijamne prostorije (m^2)
A_o - referentna apsorpcijska površina (m^2)



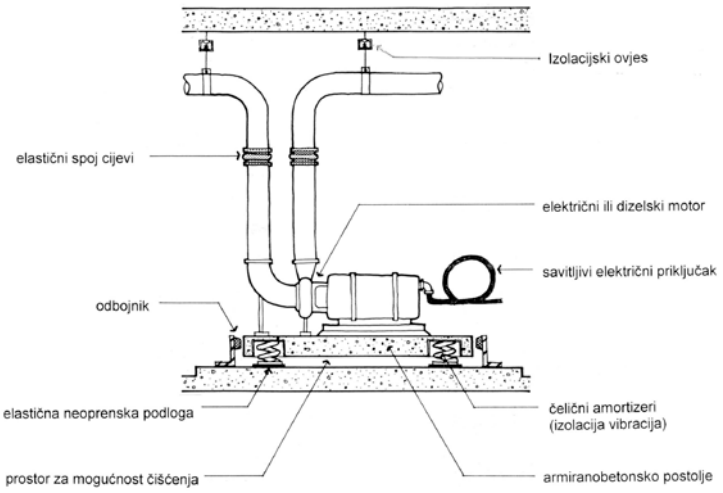
Sl. 73. Prijenos zvuka između dvaju prostora kroz prostor spuštenog stropa
(Izvor: Egan, M. David, 1988: 218)



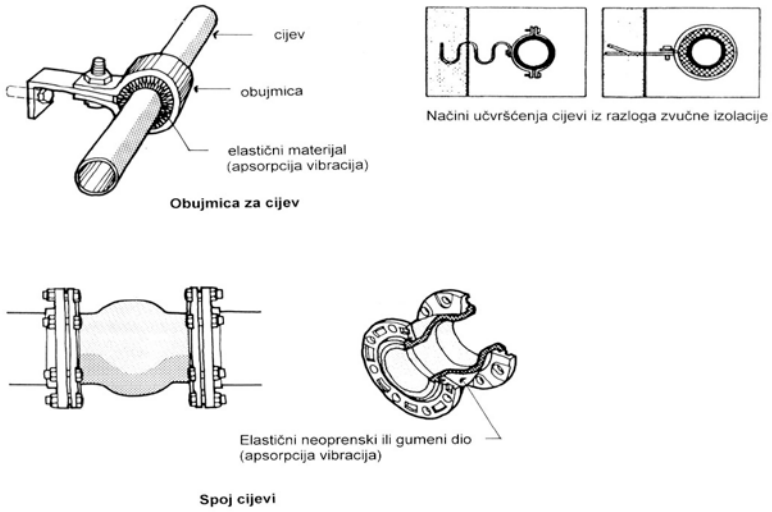
Sl. 74. Prijenos zvuka između dvaju prostora (utjecaj instalacijskih kanala)
(Izvor: Egan, M. David, 1988: 293)

Zaštita od buke ugrađene opreme u zgradi

Ugrađena oprema i uređaji u zgradi, elementi koji proizvode buku i vibracije, moraju biti projektirani i ugrađeni na način da ne ometaju bukom boravišne prostore zgrade iznad dopuštenih vrijednosti. Servisni uređaji i oprema u zgradi jesu: uređaji i oprema za dovod i odvod vode, uređaji za zagrijavanje, ventilaciju i klimatizaciju, dizala, vrata na motorni pogon... Buka ovih uređaja ovisi o karakteristikama samog uređaja, ali i o njihovoj pravilnoj izvedbi i ugradnji.



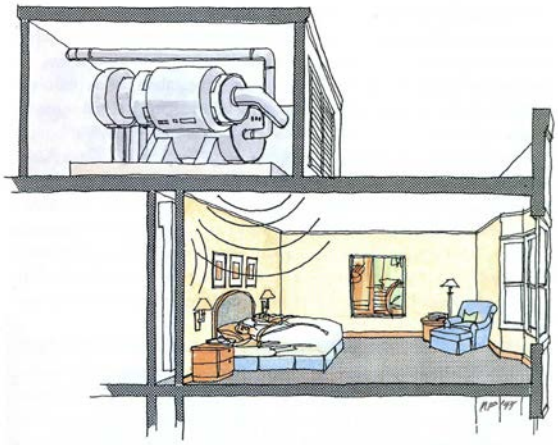
Sl. 75. Izolacija vibracija strojarskih uređaja (npr. crpka za vodu)
(Izvor: Egan, M. David, 1988: 218)



Sl. 76. Načini ugradnje cijevi za sprječavanje prijenosa zvuka i vibracija
(Izvor: Egan, M. David, 1988: 303, 304)

Zaštita okoliša od buke za zgradu vezanih izvora buke

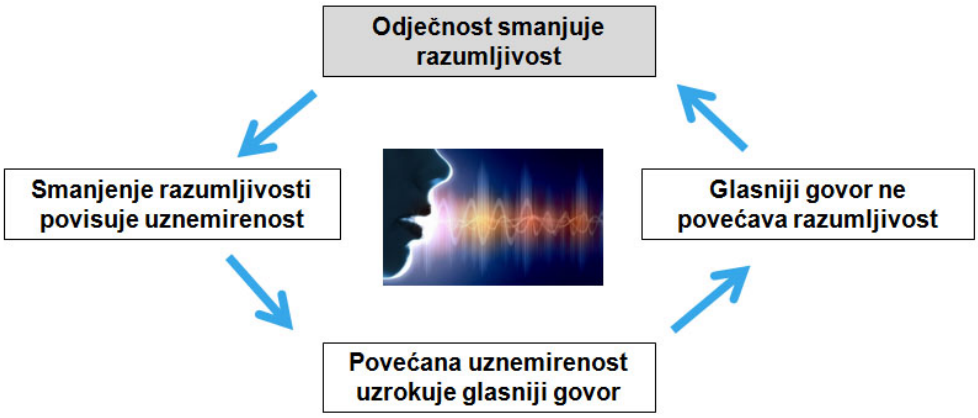
Strojevi i uređaji u/na zgradi ili u vezi sa zgradom, kao i predviđena djelatnost u poslovnim i proizvodnim zgradama, ne smiju ometati bukom ljude u boravišnim prostorijama u samoj zgradi, u boravišnim prostorima u okolnim zgradama, kao i samu okolinu.



Sl. 77. Utjecaj buke uređaja zgrade na prostore u zgradi i na okolinu
(Izvor: Charles M. Salter Associates Inc.,1998: 278)

Zaštita od buke povećane odječnosti

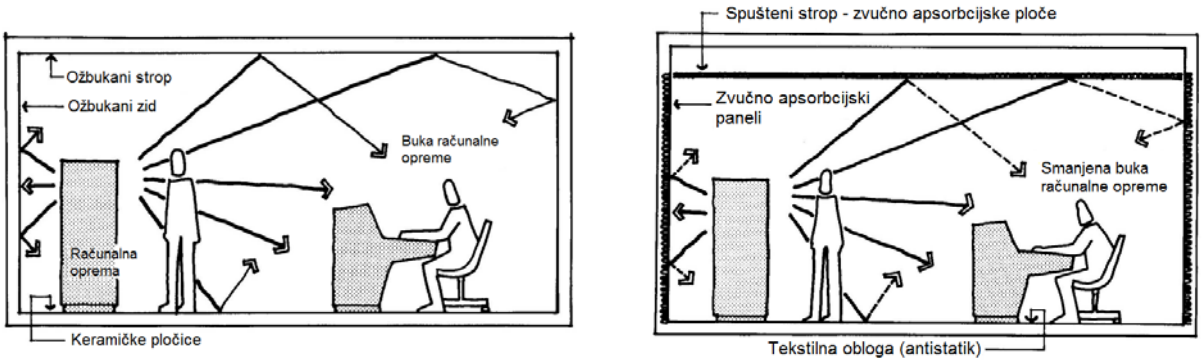
Zaštitu od buke koja nastaje zbog prekomjerne odječnosti, a da bi se osigurala dovoljna razumljivost govora, treba provoditi npr. u radnim prostorijama svih vrsta i veličina, uredskim prostorijama, prostorijama za odmor, predavaonicama i hodnicima obrazovnih institucija, kao i u prostorijama dječjih vrtića, gimnastičkim dvoranama, sportskim dvoranama, zatvorenim bazenima itd. Korištenje zvuko-apsorbirajućih obloga kako bi se postiglo odgovarajuće vrijeme odjeka prostorije ovisi o njenoj namjeni.



Sl. 78. Lombardov efekt - tendencija da govornik pojačava glasnoću govora u uvjetima bučnog okruženja

Smanjenje razine zvuka u prostoriji pomoću apsorpcije

Često je potrebno smanjiti razinu buke u nekoj prostoriji, a koja potječe od rada "bučnih" uređaja smještenih u toj prostoriji, te time umanjiti utjecaj buke na okolne prostore. Smanjenje razine buke postiže se upotrebom apsorpcijskih materijala i elemenata kojima se apsorbira dio energije reflektiranih valova. Time se smanjuje razina reflektiranog zvuka u prostoriji. Jasno je da se na ovaj način ne može utjecati na direktno zvučno polje jer je ono neovisno o apsorpciji graničnih ploha prostorije.



Sl. 79. Smanjenje razine reflektiranog zvuka u prostoriji upotrebom apsorpcijskih materijala
(Izvor: Egan, M. David, 1988: 38)

Ako je prije obrade apsorpcijskim materijalima ekvivalentna apsorpcijska površina prostorije imala vrijednost A_0, a nakon obrade A_1, tada će smanjenje razine reflektiranog zvuka u prostoriji biti

$$\Delta L = 10 \log \frac{A_1}{A_0} \text{ (dB)}$$

Kad se slabo apsorbirajuće plohe površine S obrade apsorpcijskim materijalom s koeficijentom α, može se uzeti da je

$$A_1 = A_0 + S \times \alpha$$

pa izraz dobiva oblik

$$\Delta L = 10 \log \frac{A_0 + S \times \alpha}{A_0} \text{ (dB)}$$

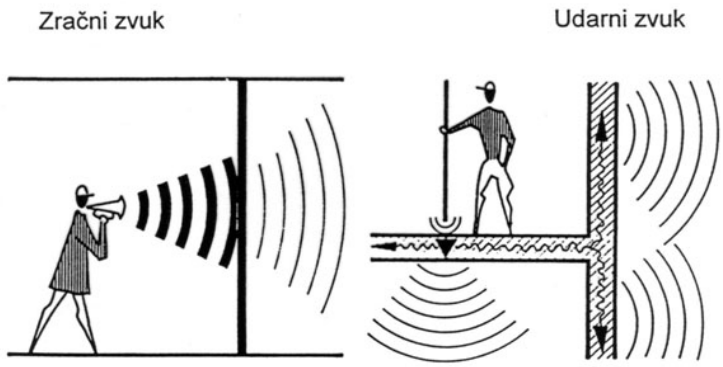
Na ovakav način najčešće se može smanjiti razina buke za najviše 10 dB.

IZOLACIJSKA MOĆ PREGRADE

U slučaju dviju susjednih prostorija razlikuju se dva puta prenošenja zvuka iz predajne u prijamnu prostoriju:

- direktni put (preko zajedničkog dijela pregrade),
- bočni put (uzduž bočnih zidova, međukatnih konstrukcija, instalacijskih kanala ...).

Pregrade zgrade ocjenjujemo s obzirom na zvučnu izolaciju od zračnog i od udarnog zvuka.



Sl. 80. Zračni i udarni zvuk
(Izvor: Schulz, P., 1993: 148)

Zračni zvuk

Energija zvučnog vala koji udari u pregradu između predajne i prijamne prostorije:

- djelomično se reflektira i vraća natrag u predajnu prostoriju,
- dijelom se predaje pregradi koja zbog toga počne vibrirati,
- dio energije vibriranja vraća se natrag u predajnu prostoriju,
- manji dio vibriranja širi se uzduž pregrade na susjedne pregrade,
- preostali dio energije zrači pregradna stijena u prijamnu prostoriju.

Koeficijent propustljivosti - transmisije (τ) je veličina definirana odnosom zvučne energije koja je prešla u prijamnu prostoriju (W_2) i napadne zvučne energije (W_1) koja je u predajnoj prostoriji udarila u pregradu.

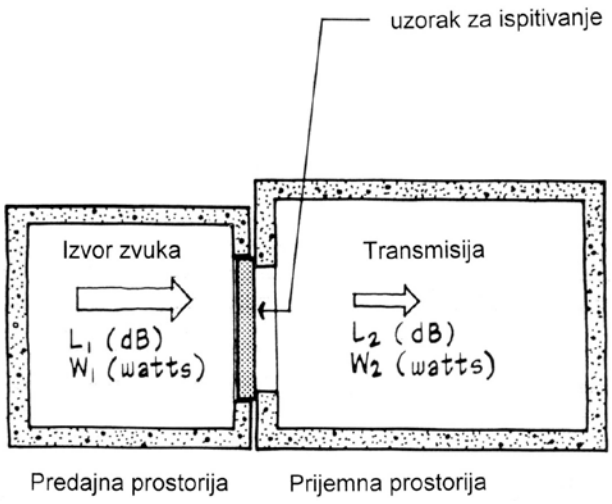
$$\tau = W_2 / W_1$$

Indeks zvučne izolacije - R (izolacijska moć pregrade) definirana je logaritmom recipročne vrijednosti zvučne propustljivosti.

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{W_1}{W_2} \qquad \text{(dB)}$$

Kako se prilikom mjerenja zvučnoga gušenja mjeri zvučni tlak ispred i iza pregrade, za izračunavanje je prikladnija formula:

$$R = 20 \log \frac{p_1}{p_2} \text{ (dB)}$$



Sl. 81. Laboratorijski način ispitivanja zvučne izolacije pregrade
(Izvor: Egan, M. David, 1988: 197)

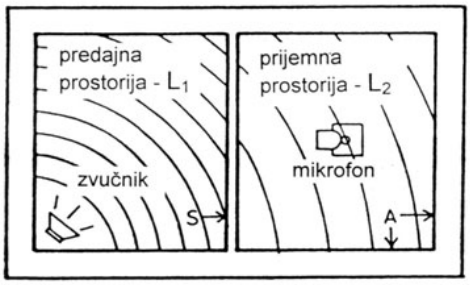
$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \text{ (dB)}$$

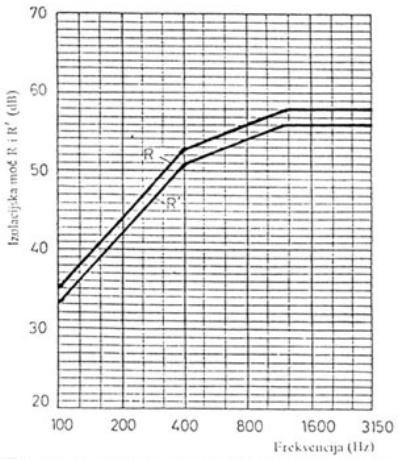
S – ploština površine pregrade (m^2)
A – ekvivalentna apsorpcijska površina prijamne prostorije (m^2)

Indeks zvučne izolacije pregrade određuje se mjerenjem u laboratoriju bez bočnih putova prijenosa buke (*R*) ili mjerenjem na građevini (*R*') u frekvencijskim pojasima od 1/3 oktave (terce) od 100 do 3150 Hz.

Da bi se ocijenila zvučnoizolacijska moć nekoga građevinskog elementa, rezultati mjerenja uspoređuju se s normiranim vrijednostima. Normirane vrijednosti prikazane grafički zovu se referentne krivulje. Uspoređivanje izmjerenih vrijednosti izolacijske moći s normiranim vrijednostima provodi se tako da se referentna krivulja pomiče u vertikalnom smjeru paralelno samoj sebi, u skokovima po 1 dB, sve dok zbroj nepovoljnih odstupanja ne bude što je moguće veći, ali ne više od 32 dB. Nepovoljno odstupanje kod određene frekvencije jest ono kad je rezultat mjerenja niži od referentne vrijednosti. Procijenjena (ponderirana) vrijednost u decibelima pomaknute referentne krivulje na 500 Hz određuje vrednovani indeks zvučne izolacije pregrade R_w, odnosno R'_w.

Ispitivanje izolacijske moći na zračni zvuk





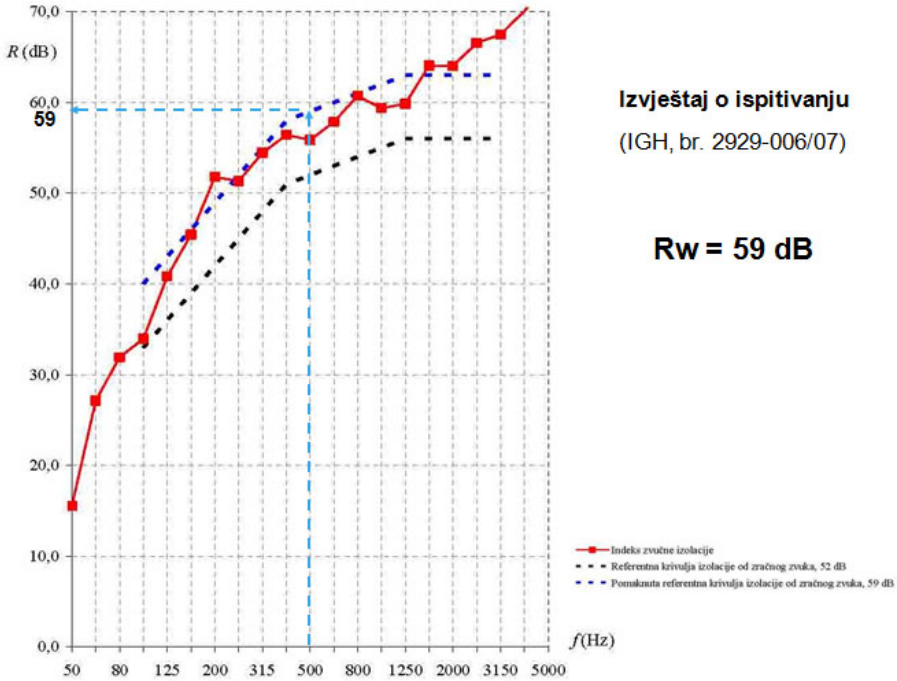
$$R = L_1 - L_2 + 10 \log (S / A) \quad (dB)$$

R - izolacijska moć pregrade (dB)
L_1 - srednja razina zvučnog tlaka u predajnoj prostoriji (dB)
L_2 - srednja razina zvučnog tlaka u prijemnoj prostoriji (dB)
S - površina pregrade (m^2)
A - ekvivalentna apsorpcijska površina prijemne prostorije (m^2)

Frekvencija (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500
R' (dB)	33	36	39	42	45	48	51	52
Frekvencija (Hz)	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
R' (dB)	53	54	55	56	56	56	56	56

Sl. 82. Ispitivanja zvučne izolacije pregrade – zračni zvuk

Frekvencija *f* (Hz)	terca *R* (dB)
50	15,5
63	27,1
80	31,9
100	34,0
125	40,8
160	45,4
200	51,8
250	51,3
315	54,5
400	56,4
500	55,9
630	57,8
800	60,7
1000	59,4
1250	59,9
1600	64,1
2000	64,0
2500	66,6
3150	67,5
4000	70,1
5000	73,3



Izvještaj o ispitivanju

(IGH, br. 2929-006/07)

Rw = 59 dB

Sl. 83. Rezultati ispitivanja zvučne izolacije pregrade
(Izvor: IGH, izvještaj o ispitivanju 2007)

Jednostruke pregrade

Akustički jednostruki građevinski elementi obično su izvedeni od jednog materijala (beton, opeka, drvo ...) ili od više materijala sličnih akustičkih karakteristika (npr. ožbukane pregrade od betona ili opeke).

Na zvučnoizolacijsku moć pregrade utječe više čimbenika:

- površinska masa,
- elastičnost,
- bočni građevinski elementi,
- propusnost građevinske pregrade na zrak.

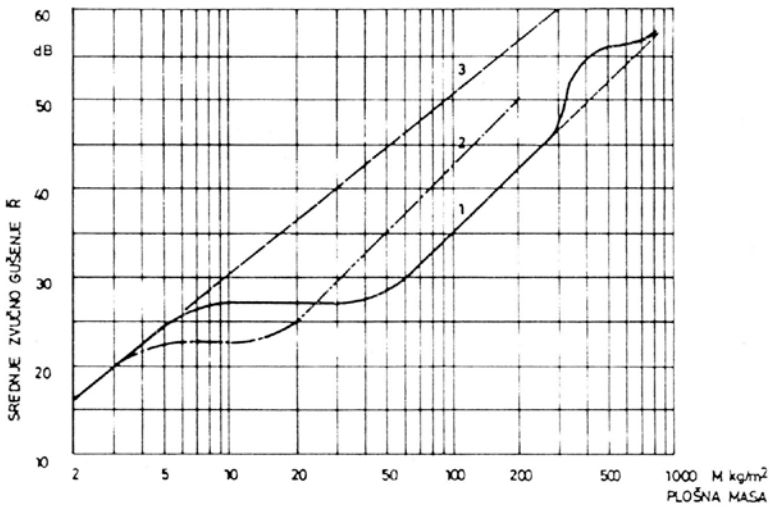
Utjecaj površinske mase

Zvučno gušenje ovisi o težini pregrade po jedinici površine. Što je pregrada teža, zvučno gušenje je veće. Za svako podvostručenje mase izolacijska moć naraste teorijski za 6 dB. Za određeni građevinski element i dani kut upada zvučnih valova izolacijska moć raste s porastom frekvencije zvuka, i to teorijski za 6 dB po oktavi.

Za praktične proračune može se koristiti formula:

$$R = 20 \log (m \times f) - 47{,}5 \qquad \text{(dB)}$$

m - masa pregrade (kg/m^2)
f - frekvencija (Hz)



SREDNJE ZVUČNO GUŠENJE R̄ U OVISNOSTI O PLOŠNOJ MASI M ZA:
1 : BETON, OPEKA, SADRA, STAKLO
2 : DRVO I DRVNE PRERAĐEVINE
3 : TEŽINSKI ZAKON (SAVITLJIVE STIJENKE)

Sl. 84. Ovisnost zvučne izolacije pregrade na zračni zvuk ovisno o masi
(Izvor: Šmidihen, E., 1983: 20)

	Površinska masa (kg/m²)	Procjenjena zvučno izolacijska moć [1] (dB)
1	85 [3]	34
2	90 [3]	35
3	95 [3]	36
4	105 [3]	37
5	115 [3]	38
6	125 [3]	39
7	135	40
8	150	41
9	160	42
10	175	43
11	190	44
12	210	45
13	230	46
14	250	47
15	270	48
16	295	49
17	320	50
18	350	51
19	380	52
20	410	53
21	450	54
22	490	55
23	530	56
24	580	57
25 [4]	630	58
26 [4]	680	59
27 [4]	740	60
28 [5]	810	61
29 [4]	880	62
30 [4]	960	63
31 [4]	1040	64

[1] Vrijedi uz uvjet da su bočne pregrade srednje površinske mase cca 300 kg/m²

Tabl. VIII. Procijenjena zvučno-izolacijska moć jednoslojnih krutih pregrada
(Izvor: DIN 4109 Beiblatt 1, 1989: 3)

Vrijednosti procijenjene zvučno-izolacijske moći jednoslojnih pregrada u Tabl. VIII. odgovaraju proračunu po formuli:

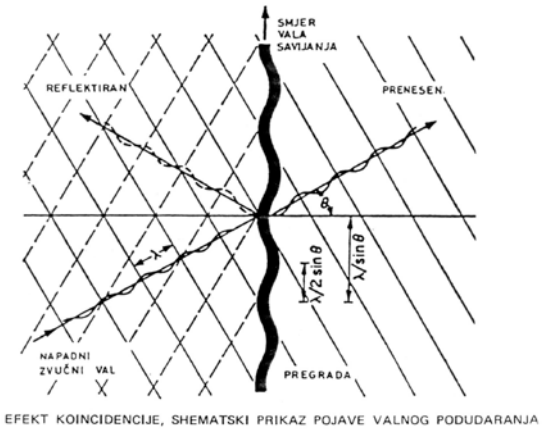
$$R' = 27 \log m - 17{,}5 \qquad \text{(dB)}$$

m - masa pregrade (kg/m²)

Utjecaj elastičnosti

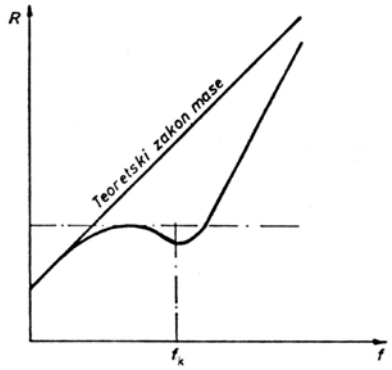
Pretpostavke i približne formule ne odgovaraju u potpunosti realnim vrijednostima za građevinske pregrade. Stvarni rezultati mjerenja razlikuju se od izračunatih teorijskih vrijednosti. Jedan je od razloga za ova odstupanja i utjecaj elastičnosti pregrade.

Na pregradu udaraju zvučni valovi različitih frekvencija pod različitim kutovima i uzrokuju prisilno kretanje pregrade. Ovo prisilno kretanje, iz razloga elastičnosti pregrade, uzrokovat će širenje slobodnih valova savijanja duž čitave pregrade. Slobodni valovi savijanja superponiraju se prisilnim valovima i mogu ih pojačati ili oslabiti. Može se dogoditi da dužina valova savijanja pregrade bude na određenoj frekvenciji upravo jednaka emitiranoj valnoj dužini u zraku. Na toj frekvenciji (frekvenciji koincidencije) zid će emitirati više zvučne energije nego na ostalim frekvencijama, odnosno smanjit će se zvučno gušenje.



Sl. 85. Efekt koincidencije
(Izvor: Šmidihen, E., 1983: 24)

Najniža frekvencija zvuka kod koje dolazi do pojave koincidencije zove se kritična frekvencija (f_k). Opći izgled krivulje koja prikazuje promjenu izolacijske moći neke pregrade (*R*) u funkciji frekvencije ima oblik prikazan krivuljom na slici.



Sl. 86. Krivulja prikaza promjene izolacijske moći neke pregrade (*R*) u funkciji frekvencije (*f*)
(Izvor: Šimetin V., 1983: 198)

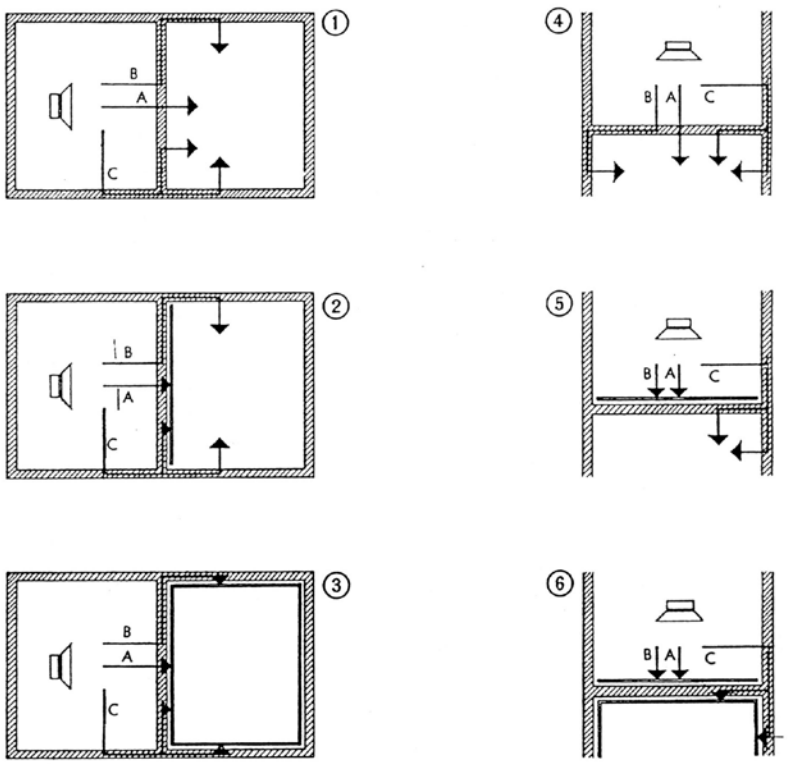
Kod projektiranja građevinskih pregrada treba nastojati da im kritična frekvencija bude dovoljno niska (<80 Hz) ili dovoljno visoka (>4000 Hz) kako u području frekvencija 100 - 3150 Hz ne bi došlo do velikog smanjenja izolacijske moći.

Utjecaj bočnih građevinskih pregrada

U zgradama su pregrade između prostorija u pravilu kruto povezane s bočnim građevinskim elementima koji se kontinuirano protežu kroz predajnu i prijamnu prostoriju. Iz toga razloga, osim direktnog puta širenja zvuka, prisutni su i bočni putovi širenja zvuka.

Zbog bočnoga prijenosa zvuka stvarna je razlika razina zvuka (*D*) između predajne i prijamne prostorije manja za određenu vrijednost (*a*):

- kad četiri bočna pregradna elementa imaju približno jednaku masu kao i promatrani element *a*=3 dB;
- ako bočne pregrade imaju dvostruko manju površinsku masu od pregradnog elementa *a*=5 dB;
- ako promatrana pregrada ima malu površinsku masu u odnosu na bočne pregrade *a*=0 dB.

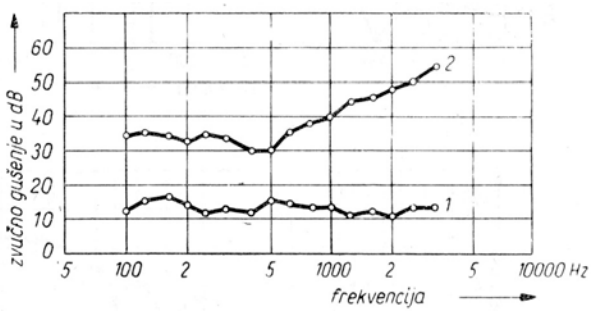


Sl. 87. Putovi prijenosa zvuka između dviju prostorija

Utjecaj propustljivosti pregrade na zrak

U slučaju da zrak lako prolazi kroz neku pregradu, njena izolacijska moć bit će znatno manja u odnosu na pregradu jednake mase i krutosti, ali koja je dovoljno nepropusna za zrak. Kod pregrada izvedenih od poroznih materijala, nakon kvalitetnog žbukanja poboljšava se vrijednost izolacijske moći.

Frekventna karakteristika zvučnog gušenja kod poroznoga betonskog zida debljine 10 cm: 1 – bez žbuke, 2 – sa žbukom

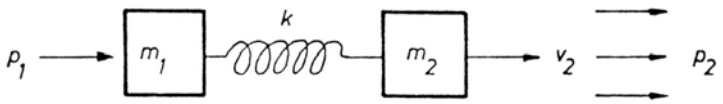


Sl. 88. Zvučno gušenja kod poroznoga betonskog zida
(Izvor: Jelaković, T., 1962: 211)

Dvostruke pregrade

Za postizanje velike izolacijske moći jednostrukom pregradom treba toj pregradi povećati površinsku masu. Često je to povećanje neekonomično i neracionalno. U tim slučajevima koriste se dvostruke ili višestruke pregrade koje, uz određene uvjete, relativno malom površinskom masom postižu veliko zvučno gušenje.

Dvostruke pregrade sastoje se od dva dijela međusobno odvojena slojem zraka ili nekim mekanim (apsorbirajućim) materijalom. Ponašanje dvostruke pregrade može se usporediti s ponašanjem mehaničkog sustava od dvije mase m_1 i m_2 međusobno povezane oprugom određene krutosti.



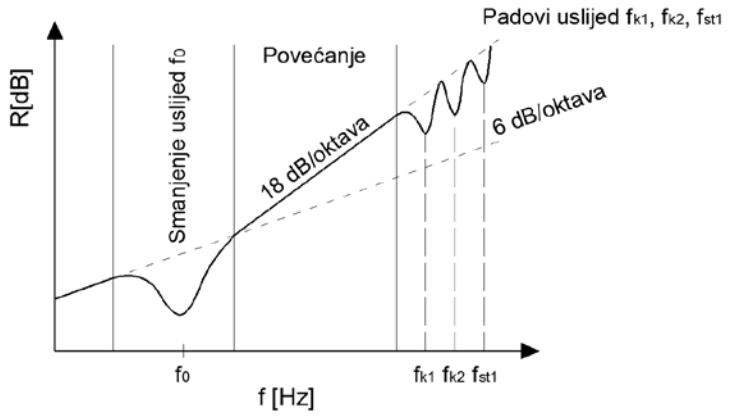
Sl. 89. Mehanički sustav „masa-opruga-masa“
(Izvor: Šimetin V., 1983: 200)

U području nižih frekvencija izolacijska moć dvostrukih pregrada približno je jednaka onoj izolacijskoj moći koju bi imala jednostruka pregrada iste površinske težine kao obje pregrade zajedno ($m_1 + m_2$). Ovo pravilo vrijedi do rezonantne frekvencije (f_o) pri kojoj nastaje znatan pad izolacijske moći pregrade. Na višim frekvencijama zvuka od frekvencije rezonancije izolacijska moć dvostruke pregrade veća je nego kod jednostruke pregrade iste mase. To poboljšanje izolacije to je veće što je viša frekvencija zvuka. Teoretski porast izolacijske moći u ovome području iznosi 12 dB po oktavi. Upravo zbog toga potrebno je postići da rezonantna frekvencija pregrade bude <80 Hz.

Kod dvostruke pregrade sa zračnim slojem dolazi i u zračnom sloju do pojave rezonancije na frekvencijama:

$$f_n = \frac{170}{d} \times n \qquad \text{(Hz)}$$

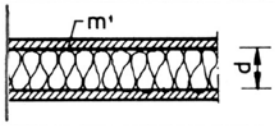
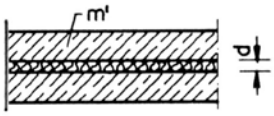
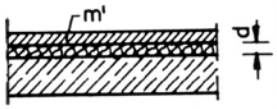
d - debljina zračnog sloja (m)
n - cijeli pozitivni broj



f_o – rezonantna frekvencija (Hz)
$f_{k1,2}$ – kritična frekvencija koincidencije (Hz)
f_{st} – frekvencija stojnih valova (Hz)

Sl. 90. Zvučna izolacija dvostruke pregrade
(Izvor: prema Willems, W. M., Dinter, S., Schild, K., 2006: 8.23)

Umetanjem u zračni sloj nekoga apsorpcijskog materijala (npr. mineralne vune) ovi negativni efekti mogu se gotovo u potpunosti spriječiti.

	dvije jednake savitljive stijenke	dvije masivne stijenke	lagana predstijenka na masivnoj pregradi
			
zračni sloj s prigušnim materijalom	$f_o \approx \frac{85}{\sqrt{m' \cdot d}}$ (Hz)	$f_o \approx \frac{340}{\sqrt{m' \cdot d}}$ (Hz)	$f_o \approx \frac{60}{\sqrt{m' \cdot d}}$ (Hz)
prigušni materijal čvrsto priljubljen uz stijenke	$f_o \approx 225\sqrt{\frac{s'}{m'}}$ (Hz)	$f_o \approx 900\sqrt{\frac{s'}{m'}}$ (Hz)	$f_o \approx 160\sqrt{\frac{s'}{m'}}$ (Hz)

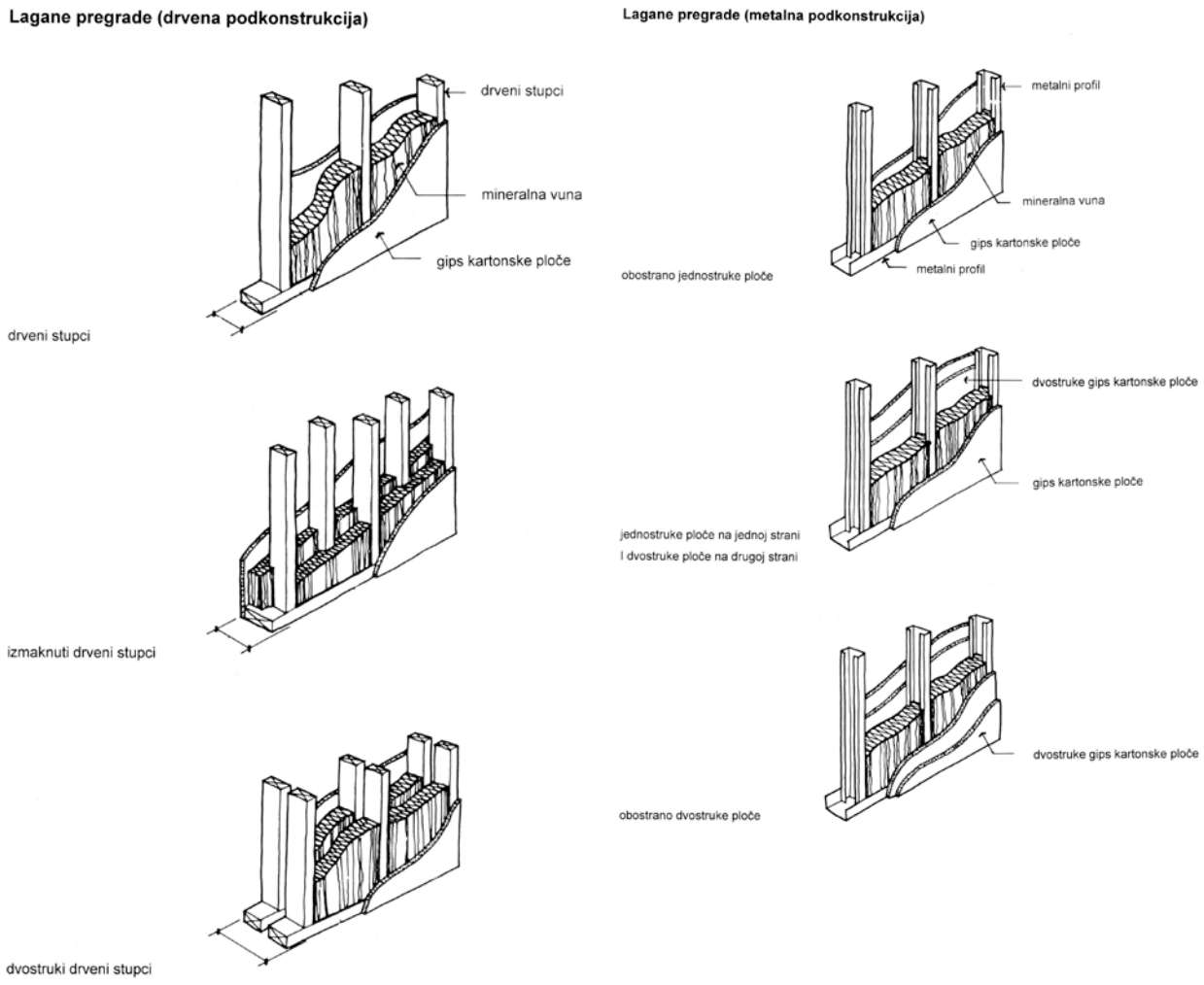
f_o – rezonantna frekvencija (Hz)
m' – površinska masa pregrade (kg/m^2)
d – razmak između stijenki (m)
s' – dinamička krutost izolacijskog materijala (MN/m^3)

Sl. 91. Rezonantna frekvencija različitih tipova dvostrukih pregrada
(Izvor: Göggel, M., 1987: 18)

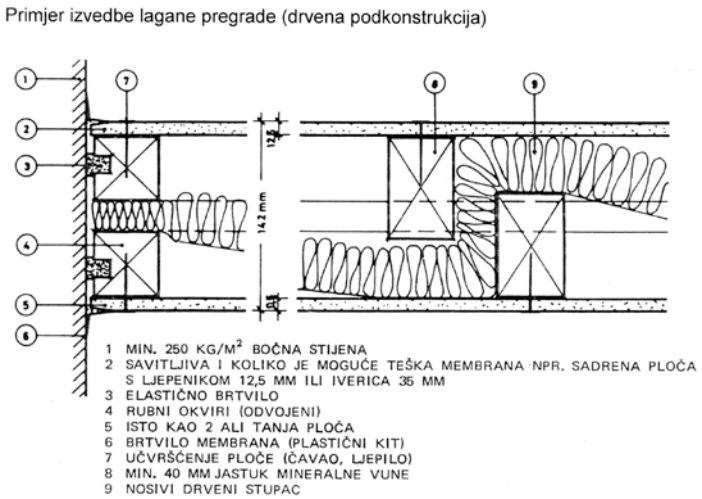
Pri difuznom zvučnom polju dolazi i do pojave koincidencije s posljedicom smanjenja izolacijske moći pregrade na kritičnoj frekvenciji. Ako svaki dio dvostruke pregrade ima različitu kritičnu frekvenciju, smanjenje izolacijske moći dvostruke pregrade neće biti tako izraženo kao u slučaju jednostrukog elementa. U slučaju da oba dijela dvostruke pregrade imaju istu kritičnu frekvenciju, smanjenje izolacijske moći na toj frekvenciji bit će izrazito naglašeno. Da bi se to izbjeglo, treba nastojati da je svaki dio dvostruke pregrade, po mogućnosti, različite mase i različite krutosti kako bi im se kritične frekvencije razlikovale.

Zvučno gušenje kontinuirano raste s povećanjem razmaka između dijelova dvostruke pregrade, i to sve do vrijednosti koja je jednaka zbroju zvučnih gušenja pojedinog dijela. Ovo vrijedi za slučaj ako između zidova nema mehaničke veze i ako je prostor između dovoljno prigušen.

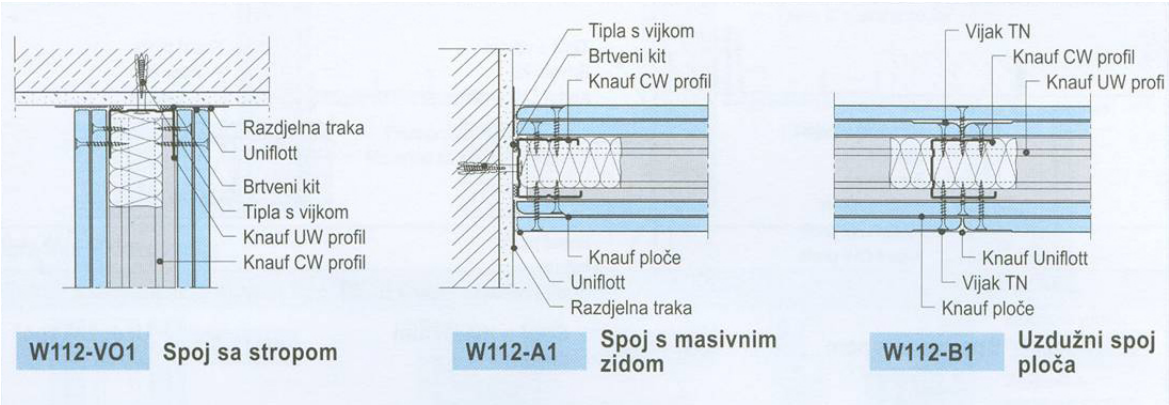
Između stijenki dvostruke pregrade ne bi smjelo biti zvučnih "mostova", odnosno neminovni "mostovi" trebali bi biti zvučno što manje provodni (upotreba elastičnih materijala: pluto, guma ...). Bočni je prijenos zvuka također od velike važnosti. Za vezu laganih pregrada na bočne pregrade treba koristiti elastične priključke.



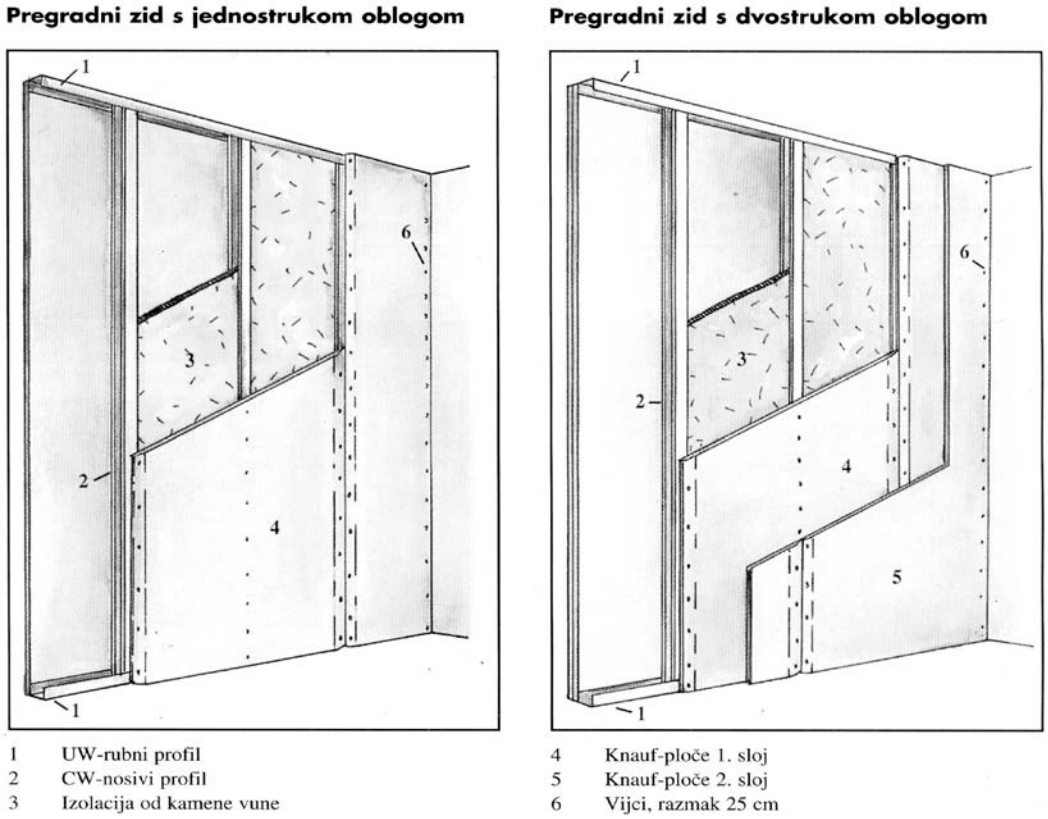
Sl. 92. Lagane dvostruke pregrade
(Izvor: Egan, M. David, 1988: 209)



Sl. 93. Primjer izvedbe lagane dvostruke pregrade s drvenom potkonstrukcijom
(Izvor: Šmidihen, E., 1983: 103)



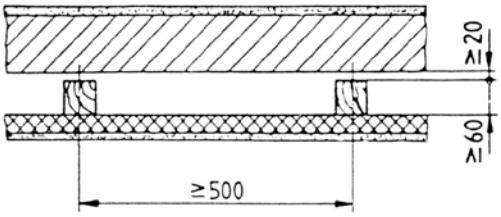
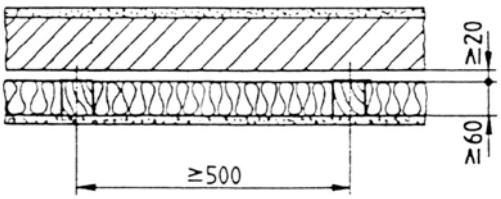
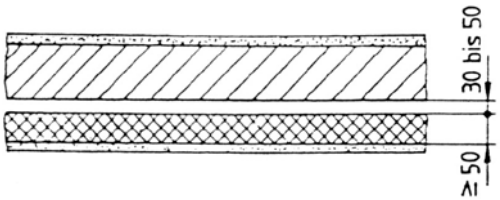
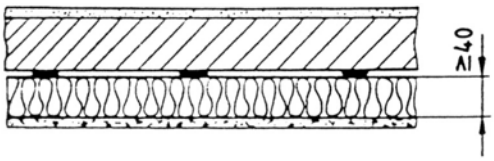
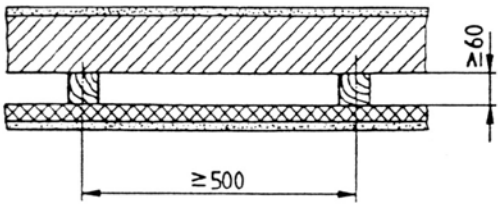
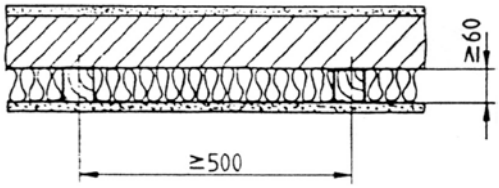
Sl. 94. Primjer izvedbe lagane dvostruke pregrade s metalnom potkonstrukcijom
(Izvor: www.knauf.hr)



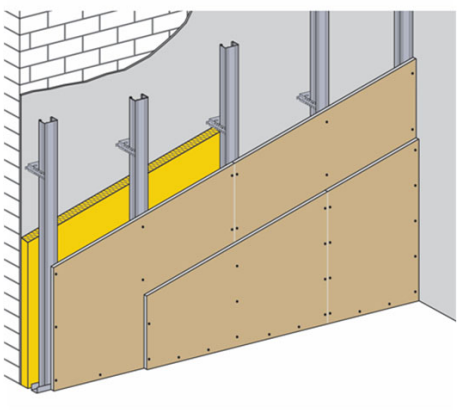
Sl. 95. Lagane dvostruke pregrade s jednostrukom i dvostrukom oblogom
(Izvor: www.knauf.hr)

Lagane predstijenke

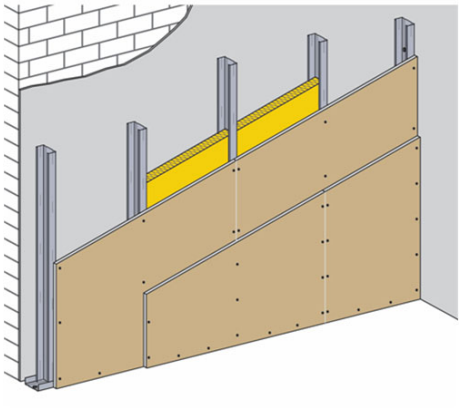
Kako bismo povećali izolacijsku moć jednostrukih pregrada, često koristimo lagane pregrade - lagane predstijenke. Između predstijenke i masivne jednostruke pregrade potrebno je staviti elastičan međusloj.

	Tip pregrade	Opis
Bez elastične veze između pregrada		Predstijenka od lakih ploča drvene vune debljine 25 mm, ožbukana. Drveni stupci na odmaku 20 mm od krute pregrade, slobodno stojeći.
		Predstijenka od gips-kartonskih ploča debljine 12,5 mm ili 15 mm, odnosno od iverice debljine 10 - 16 mm. Drveni stupci na odmaku 20 mm od krute pregrade, slobodno stojeći. Šupljina ispunjena apsorpcijskim materijalom.
		Predstijenka od lakih ploča drvene vune debljine ≥50 mm, ožbukana na udaljenosti 30-50 mm od krute pregrade. Kod ispunjavanja apsorpcijskim materijalom dovoljan je razmak od 20 mm.
		Predstijenka od gips-kartonskih ploča debljine 12,5 ili 15 mm s apsorpcijskim materijalom točkasto ili trakasto spojeni za krutu pregradu.
Pregrade spojene		Predstijenka od lakih ploča drvene vune debljine ≥25 mm, ožbukana. Drveni stupci pričvršćeni na krutu pregradu.
		Predstijenka od gips-kartonskih ploča debljine 12,5 mm ili 15 mm, odnosno od iverice debljine 10 - 16 mm. Drveni stupci učvršćeni ne krutu pregradu. Šupljina ispunjena apsorpcijskim materijalom.

Sl. 96. Lagane predstijenke ispred masivnih krutih pregrada
(Izvor: DIN 4109 Beiblatt 1, 1989: 8)

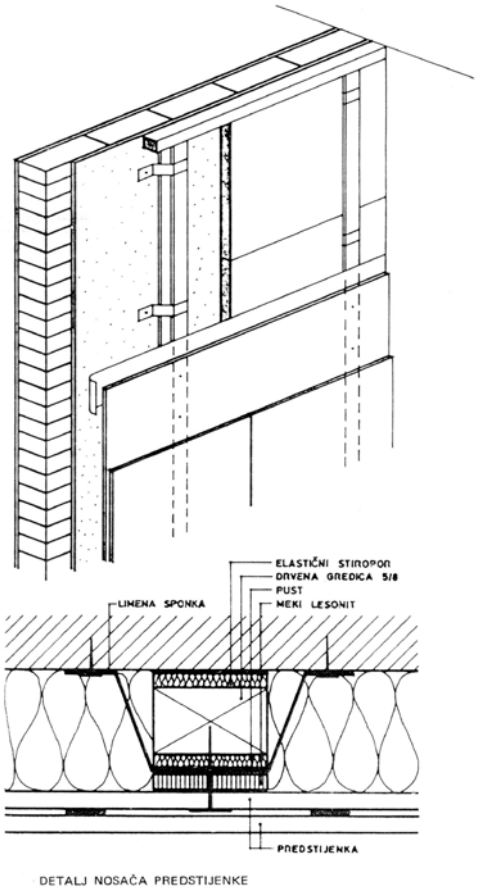


izvedba obloge s točkastim pridržavanjem



samostojeća izvedba obloge bez kontakta sa zidom

Sl. 97. Izvedba lagane predstijenke s metalnom potkomstrukcijom ispred masivnih zidova u svrhu povećanja zvučne izolacije
(Izvor: www.knauf.hr)



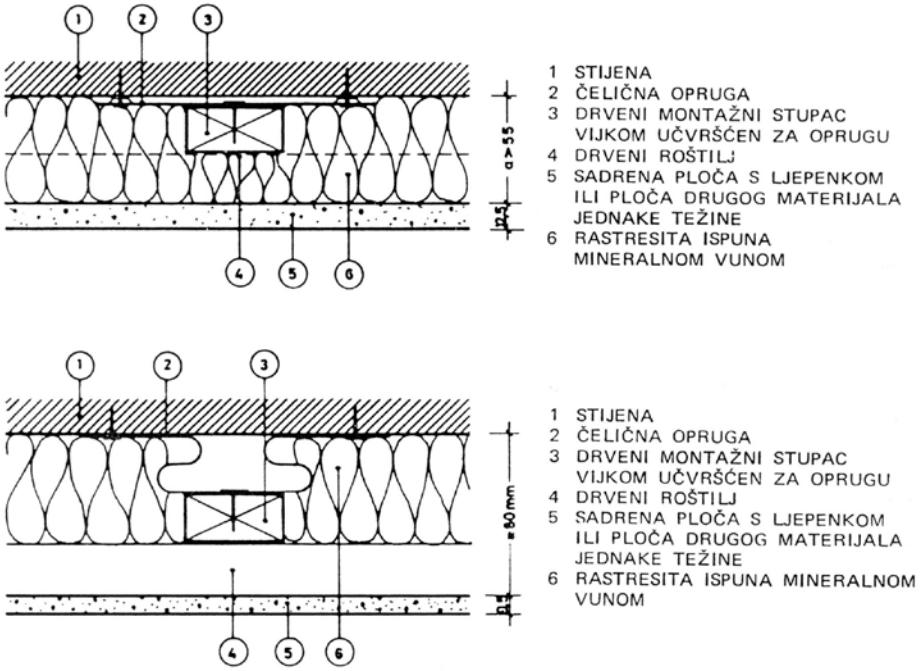
Sl. 98. Primjer izvedbe lagane predstijenke s drvenom potkonstrukcijom
(Izvor: Šmidihen, E., 1983: 123)

POVRŠINSKA MASA MASIVNE PREGRADE (kg/m2)	PROCJENJENA ZVUČNO IZOLACIJSKA MOĆ JEDNOSLOJNE KRUTE PREGRADE (dB)	PROCIJENJENA ZVUČNO IZOLACIJSKA MOĆ JEDNOSLOJNIH KRUTIH PREGRADA S LAGANOM PREDSTJENKOM (dB)	POVEĆANJE ZVUČNO IZOLACIJSKE MOĆI JEDNOSLOJNE KRUTE PREGRADE S LAGANOM PREDSTJENKOM (dB)
100	37	49	+12
150	41	49	+8
200	44	50	+6
250	47	52	+5
275	48	53	+5
300	49	54	+5
350	51	55	+4
400	52	56	+4
450	54	57	+3
500	55	58	+3

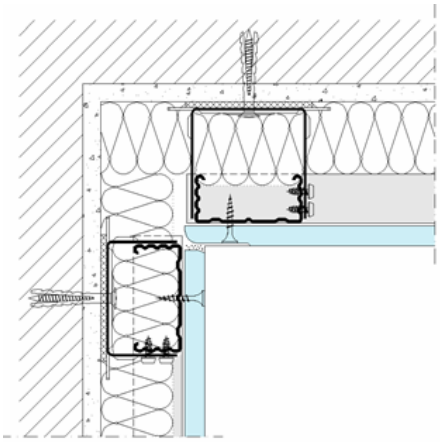
Važi uz uvjet da su bočne pregrade srednje površinske mase cca 300 kg/m^2

Tabl. IX. Procijenjena zvučnoizolacijska moć jednoslojnih krutih pregrada s laganom predstijenkom
(Izvor: prema DIN 4109 Beiblatt 1, 1989: 9)

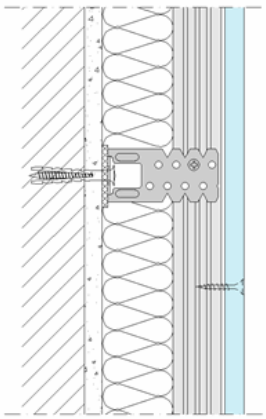
Izvedba lagane predstijenke



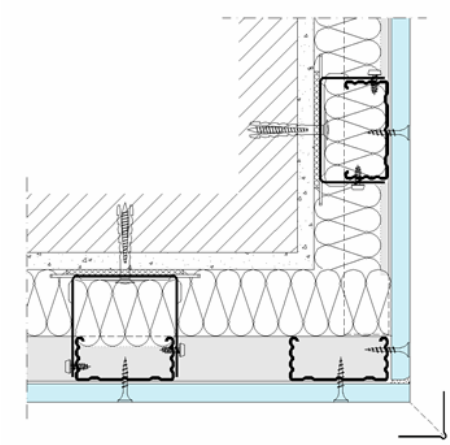
Sl. 99. Primjer izvedbe lagane predstijenke s drvenom potkonstrukcijom
(Izvor: Šmidihen, E., 1983: 111)



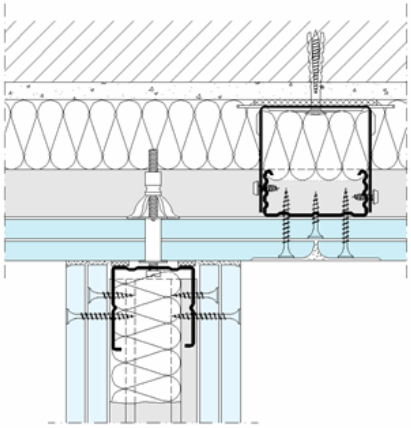
a) tlocrt unutarnjeg ugla



b) presjek

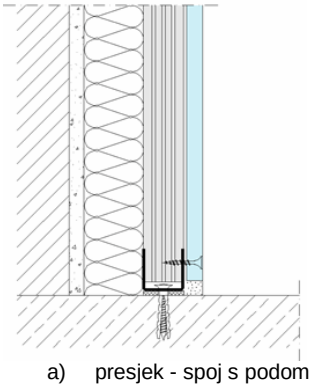


c) tlocrt vanjskog ugla

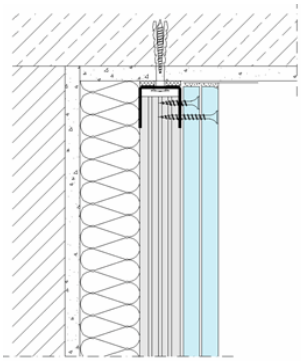


d) spoj s laganom dvostrukom pregradom

Sl. 100. Primjer izvedbe lagane predstijenke s metalnom potkonstrukcijom s točkastim pridržavanjem
(Izvor: www.knauf.hr)

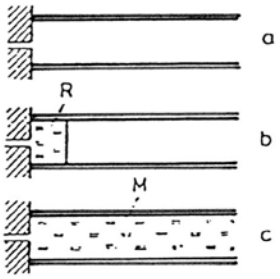


a) presjek - spoj s podom



b) presjek – spoj sa stropom

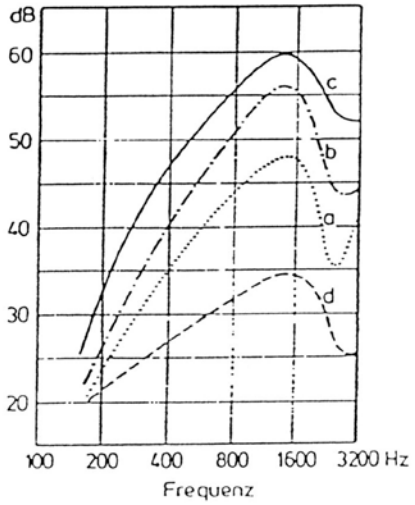
Sl. 101. Primjer izvedbe lagane predstijenke s metalnom potkonstrukcijom bez kontakta sa zidom
(Izvor: www.knauf.hr)



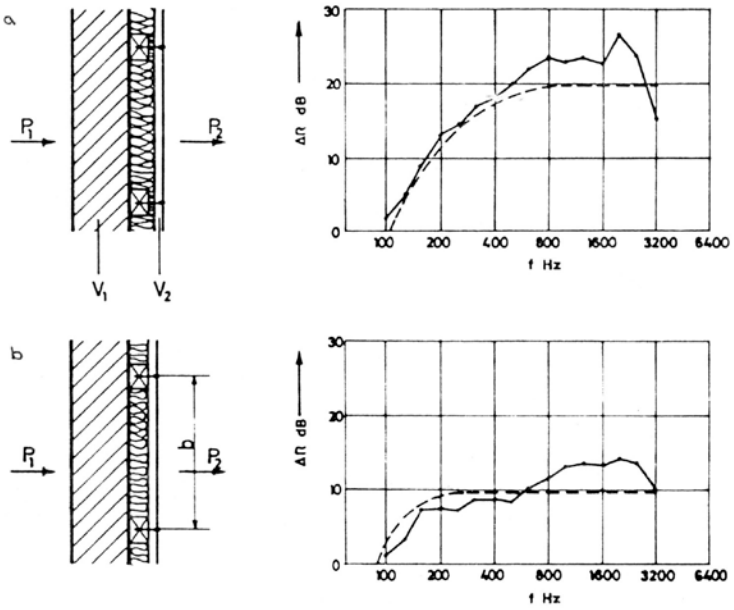
Utjecaj apsorpcijskog materijala ugrađenog u šupljinu međurazmaka dvostruke pregrade.

Stijenke: sadreno-kartonske ploče 2x12,5 mm
Međurazmak: šupljina 50 mm

a) šupljina bez ispune
b) šupljina s rubnim položajem apsorpcijskog materijala
c) šupljina ispunjena mineralnom vunom
d) jednostruka sadreno-kartonska stijenka



Sl. 102. Utjecaj apsorpcijskog materijala u međurazmaku dvostruke pregrade
(Izvor: Šmidihen, E., 1983: 47)



MOGUĆA VELIČINA POBOLJŠANJA ZVUČNOG GUŠENJA UGRADBOM PREDSTIJENKE

a) TOČKASTI MOSTOVI
b) LINIJSKI MOSTOVI

Sl. 103. Moguća poboljšanja zvučne izolacije pregrade s laganom predstijenkom
(Izvor: Šmidihen, E., 1983: 110)

Pregrade sastavljene od više dijelova različite izolacijske moći

Mnoge pregrade nemaju isti sastav u cijeloj svojoj površini, već se sastoje od više dijelova – elemenata, najčešće različite izolacijske moći. To je česti slučaj s vanjskim pregradama s prozorima ili unutarnjim pregradama s vratima. U tom slučaju potrebno je izračunati rezultirajuću izolacijsku moć pregrade složene od više dijelova. Proračunata zvučnoizolacijska moć složene pregrade uvijek je bliža vrijednosti zvučnoizolacijskoj moći dijela s manjom izolacijskom moći.

$$R'_{w,rez} = -10 \log \left(\frac{1}{S_{uk}} \times \sum_{i=1}^{n} S_i \times 10^{\frac{-R_{w,i}}{10}} \right) \text{ (dB)}$$

$R'_{w,R,res}$ - računska vrijednost rezultirajućega vrednovanog indeksa zvučne izolacije pregrade koja se sastoji od više dijelova različite izolacijske moći (dB),
$R_{w,R,i}$ - računska vrijednost vrednovanog indeksa zvučne izolacije i-tog dijela pregrade (dB),
S_{uk} - ukupna ploština površine pregrade (m^2),
S_i - ploština površine i-tog dijela pregrade (m^2).

U slučaju kad je pregrada sastavljena od samo dva dijela različite zvučnoizolacijske moći, što je čest slučaj kad imamo zid s prozorom, rezultirajući vrednovani indeks zvučne izolacije pregrade ($R'_{w,R,res}$) izračunava se prema pojednostavljenoj formuli:

$$R'_{w,rez} = R'_{w,1} - 10 \log \left(1 + \frac{S_2}{S_{uk}} \times \left(10^{\frac{R_{w,1} - R_{w,2}}{10}} - 1 \right) \right) \qquad \text{(dB)}$$

$R_{w,R,1}$ - računska vrijednost vrednovanog indeksa zvučne izolacije zida (dB),
$R_{w,R,2}$ - računska vrijednost vrednovanog indeksa zvučne izolacije prozora (dB),
S_{uk} - ukupna ploština površine pregrade (m^2),
S_2 - ploština površine prozora (m^2).

Primjer:

Zid s prozorom:		S_{uk} = 12 m^2	$R'_{w,rez}$ = ? dB
	- zid	S_1 = 10 m^2	$R'_{w,1}$ = 52 dB
	- prozor	S_2 = 2 m^2	$R'_{w,2}$ = 32 dB

Pojednostavljena formula:

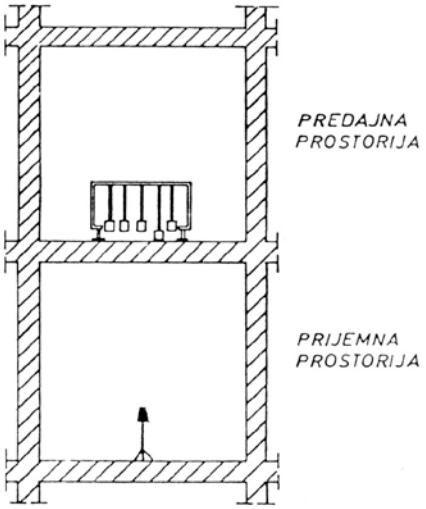
$$R'_{w,rez} = 52 - 10 \log \left(1 + \frac{2}{12} \times \left(10^{\frac{52-32}{10}} - 1 \right) \right) = 39{,}6 \text{ dB}$$

U pravilu prozori imaju manju zvučnoizolacijsku moć od pregrade u koju su ugrađeni, što rezultira činjenicom da zvučnoizolacijska moć vanjskih pregrada uglavnom ovisi o zvučnoizolacijskoj moći prozora ugrađenih u iste.

Udarni zvuk

Zvuk koji zrače pregrade pobuđene na vibriranje direktnim mehaničkim silama zove se udarni zvuk. Najčešći slučaj vibracija izazvanih mehaničkom pobudom susrećemo kod međukatnih konstrukcija, gdje vibracije nastaju hodanjem, trčanjem, guranjem pokućstva, padom predmeta na pod ili radom uređaja koji su u izravnom kontaktu s podom.

Ispitivanje ponašanja međukatnih konstrukcija na udar provodi se posebnim uređajem za proizvodnju mehaničkih udara. Uređaj se sastoji od 5 batića, svaki mase 0,5 kg, koji naizmjenično i pojedinačno udaraju u ispitivanu međukatnu konstrukciju, slobodno padajući s visine 4 cm brzinom 10 udaraca u sekundi.



Sl. 104. Primjer ispitivanja međukatne konstrukcije na udarni zvuk
(Izvor: Šimetin V., 1983: 215)

Razina srednjega zvučnog tlaka u određenom frekvencijskom pojasu zračnog zvuka u prijamnoj prostoriji, a koji nastaje radom standardnog izvora zvuka udara na površini poda predajne prostorije zove se razina zvuka udara (L_u). Da bi se spriječio utjecaj apsorpcije zvuka u prijamnoj prostoriji, izmjerena razina zvuka udara izračuna se na takozvanu normaliziranu razinu zvuka udara (L_n).

$$L_n = L_u - 10 \log (A_o / A) \quad \text{(dB)}$$

A - stvarna ekvivalentna apsorpcijska površina prijamne prostorije (m^2)
A_o - referentna apsorpcijska površina (10 m^2)

Normalizirane oktavne razine zvuka udara služe za ocjenu zvučne izolacije međukatnih konstrukcija od zvuka udara. Pritom veće vrijednosti normalizirane razine zvuka udara znače lošiju izolaciju od manjih vrijednosti.

Sama međukatna konstrukcija bez izvedenog poda i/ili stropa uglavnom ne zadovoljava normama propisane vrijednosti zvučne izolacije. Iz toga razloga potrebno je izvesti dodatne slojeve poda (mekana podna obloga, plivajući pod, spušteni strop …) kojima ćemo smanjiti normaliziranu razinu

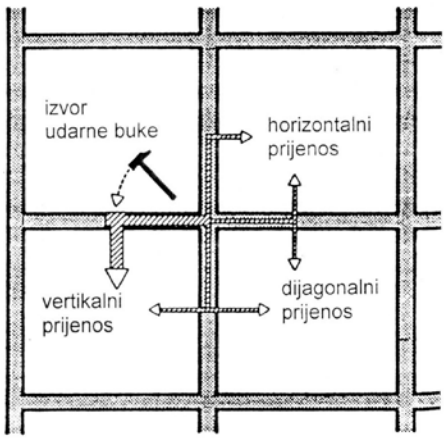
zvuka udara, što znači da se poboljša izolacija od zvuka udara. Poboljšanje izolacije od zvuka udara ΔL definirano je formulom:

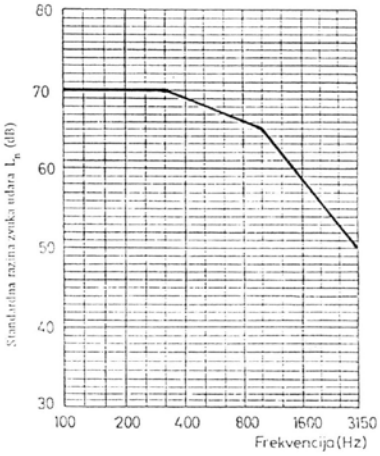
$$\Delta L = L_{no} - L_{n1} \quad \text{(dB)}$$

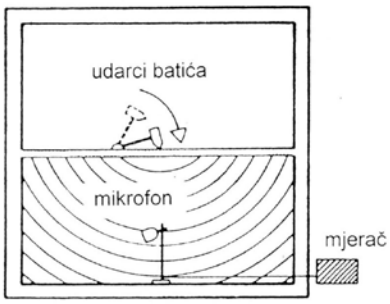
L_{no} – normalizirana razina zvuka udara u prijamnoj prostoriji izmjerena za «golu» međukatnu konstrukciju (bez poda i spuštenog stropa) (dB)
L_{n1} – normalizirana razina zvuka udara u prijamnoj prostoriji izmjerena za međukatnu konstrukciju s podom i/ili spuštenim stropom (dB)

Mjerenje veličine ΔL obavlja se u pojasima od trećine oktave (terci) u frekvencijskim pojasima od 1/3 oktave (terce) od 100 do 3150 Hz. Rezultat mjerenja prikazuje se grafički za sve mjerne frekvencije u obliku krivulje. Da bi se ocijenila izolacija od zvuka udara neke međukatne konstrukcije, rezultati mjerenja uspoređuju se s normiranim vrijednostima. Normirane vrijednosti prikazane grafički zovu se referentna krivulja. Uspoređivanje izmjerenih vrijednosti izolacijske moći s normiranim vrijednostima obavlja se tako da se referentna krivulja pomiče u vertikalnom smjeru paralelno samoj sebi, u skokovima po 1 dB, sve dok zbroj nepovoljnih odstupanja ne bude što je moguće veći, ali ne više od 32 dB. Nepovoljno odstupanje kod određene frekvencije jest ono kad je rezultat mjerenja viši od referentne vrijednosti. Procijenjena (ponderirana) vrijednost u decibelima pomaknute referentne krivulje na 500 Hz određuje vrednovani indeks zvučne izolacije pregrade $L_{n,w}$.

Ispitivanje izolacijske moći na udarni zvuk







Frekvencija (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500
L_n (dB)	70	70	70	70	70	70	69	68
Frekvencija (Hz)	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
L_n (dB)	67	66	65	62	59	56	53	50

$$L_n = L_u - 10 \log (A_o / A) \quad \text{(dB)}$$

L_n - normirana razina zvuka udara (dB)
L_u - razina zvuka udara - srednja razina zvučnog tlaka u predajnoj prostoriji (dB)
A_o - referentna apsorpcijska površina = 10 m^2
A - ekvivalentna apsorpcijska površina prijemne prostorije (m^2)

Sl. 105. Ispitivanja zvučne izolacije pregrade – udarni zvuk

Međukatna konstrukcija bez slojeva poda i spuštenog stropa

Udarci izazvani na površini konstrukcije (npr. armirano betonska ploča) izazvat će vibracije koje će se brzo širiti konstrukcijom. Kad ova energija stigne na donju površinu međukatne konstrukcije, jedan će se njen dio reflektirati i ponovno vratiti prema gornjoj površini konstrukcije, a preostali dio energije pretvorit će se u energiju zvučnih valova u zraku donje prostorije – nastaje zvuk udara.

Normalizirana razina zvuka udara u prijamnoj prostoriji ovisi o debljini međukatne konstrukcije i faktoru gubitka. Za svako podvostručenje debljine konstrukcije L_n teorijski se smanjuje za 9 dB.

Izolacija zvučne energije nastale udarcem

Ako želimo spriječiti ili ograničiti energiju udarca, trebamo:

- promijeniti okolnosti na početku širenja udarca,
- izvesti zapreke na putu kojim se val širi,
- stvoriti prekide u konstrukciji kojom se val širi.

Postizanje zadovoljavajuće vrijednosti izolacije udarnog zvuka može se postići:

- izvedbom mekoga završnog sloja poda,
- izvedbom plivajućeg poda,
- izvedbom spuštenog stropa (uz određene uvjete).

Meki završni sloj poda

Mekani završni sloj poda (razne vrste tepiha, sintetički podovi sa slojem spužvaste gume ili sl.) apsorbiraju dio energije udara. Na taj način samo manji dio energije prelazi u nosivu međukatnu konstrukciju, čime se smanjuje razina zvuka udara u prijamnoj prostoriji.

SMANJENJE RAZINE UDARNOG ZVUKA $\Delta L_{w,R}$ IZVEDBOM PODA	
Vrsta poda	**$\Delta L_{w,R}$**
Podne obloge bez donjeg mekoelastičnog sloja	0 – 5
Trake ili ploče s donjim mekoelastičnim slojem (pust, pluto, sintetske elastične pjene)	13 – 18
Tkane prevlake	17 – 22
Sagovi, tepisi	22 – 30
Plivajući podovi na mekoelastičnom sloju od prešane mineralne vune, ploča od kokosovih vlakana i sl.	25 – 35

Tabl. X. Vrijednosti smanjenja razine udarnog zvuka izvedbom poda

Plivajući pod

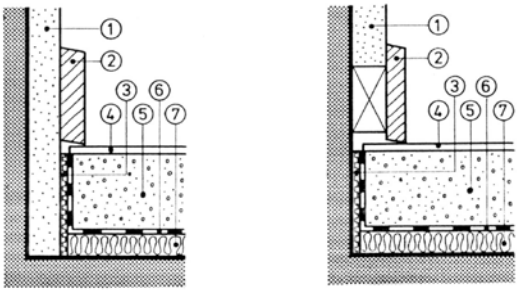
Plivajući pod sastoji se od krutoga podnog sloja (betonska podloga…) koji leži («pliva») na mekanomu elastičnom sloju. Pritom ne smije postojati ni najmanja kruta veza između plivajućeg sloja i nosive međukatne konstrukcije.

Na frekvencijama bliskim frekvenciji rezonancije (f_o) vrijednost veličine ΔL postaje negativna, što znači da će na tim frekvencijama razina zvuka udara biti veća nego u slučaju međukatne konstrukcije bez plivajućeg poda. Zbog toga treba izvesti takav plivajući pod kojem je frekvencija rezonancije što niža, odnosno barem niža od 100 Hz.

$$f_o = 160 \times \sqrt{\frac{s'}{m'}} \text{ (Hz)}$$

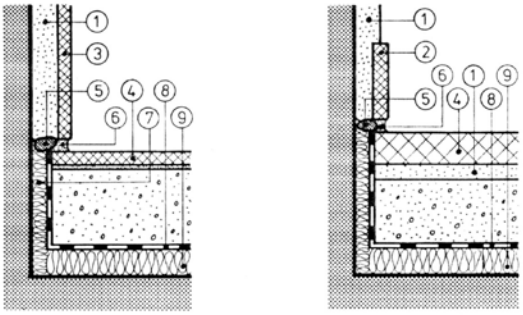
s' – dinamička krutost međusloja (MN/m^3)
m' – masa plivajućeg sloja (kg/m^2)

Plivajući pod - podna obloga tepih, PVC ili parket



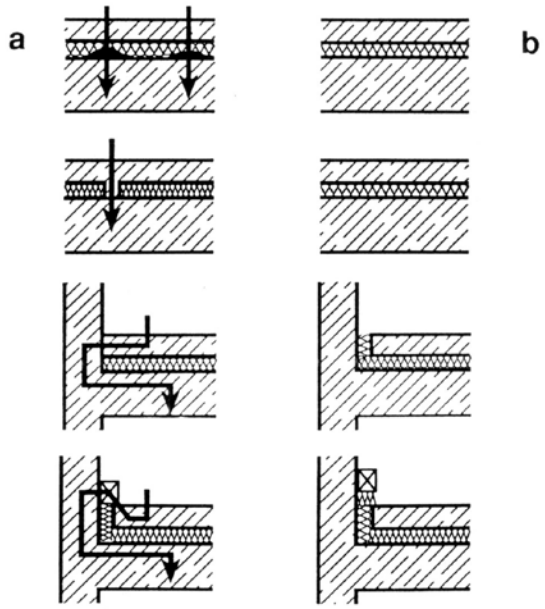
1 - žbuka
2 - rubna letva (drvena ili PVC)
3 - bitumenska valovita ljepenka
4 - podna obloga
5 - betonska podloga (estrih)
6 - bitumenska ljepenka ili PE folija
7 – meki elastični sloj

Plivajući pod - podna obloga keramičke pločice, kamen... na plivajućoj podlozi



1 - žbuka - cem. mort
2 - rubni element (sokl)
3 - zidne pločice
4 - podne pločice u mortu
5 - traka od pjenastog materijala
6 - elastična brtvena masa
7 - rubna traka
8 - bitumenska ljepenka ili PE folija
9 – meki elastični sloj

Sl. 106. Primjeri plivajućeg poda s različitim vrstama podnih obloga
(Izvor: Schulz, P., 1993: 127)

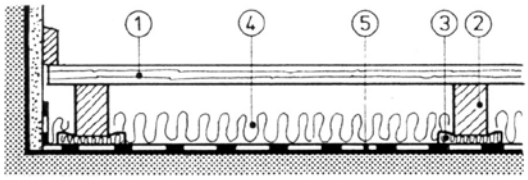


Plivajući pod:

a – zvučni most (krivo)
b – bez zvučnog mosta

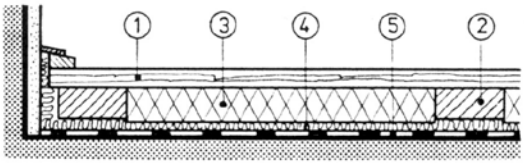
Sl. 107. Primjeri pogrešaka i pravila pri izvedbi plivajućeg poda
(Izvor: Fasold W.; Veres E., 1998: 310)

Drveni podovi



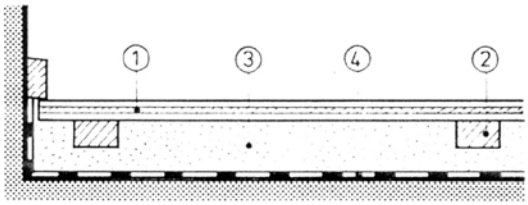
ΔL = 24 dB

1 - 2,3 cm drveni pod
2 - 4/6 cm drvene gredice
3 - 1 cm trake mineralne vune
4 - 4 cm mineralna vuna
5 - bitumenska ljepenka



ΔL = 27 dB

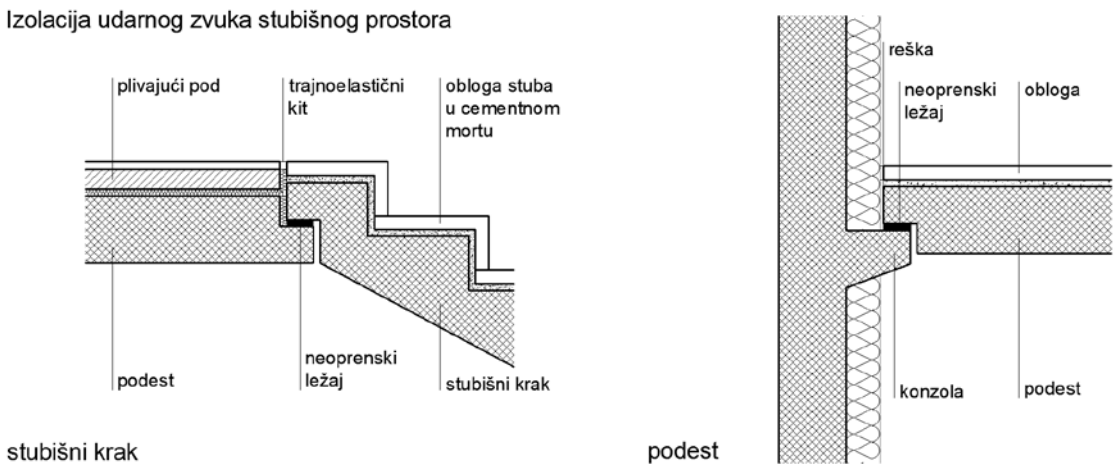
1 - 2,3 cm drveni pod
2 - 8/3,5 cm drvene gredice
3 - 4 cm ploče drvene vune
4 - 0,8 cm trake mineralne vune (s'=30 MN/m^3)
5 - bitumenska ljepenka



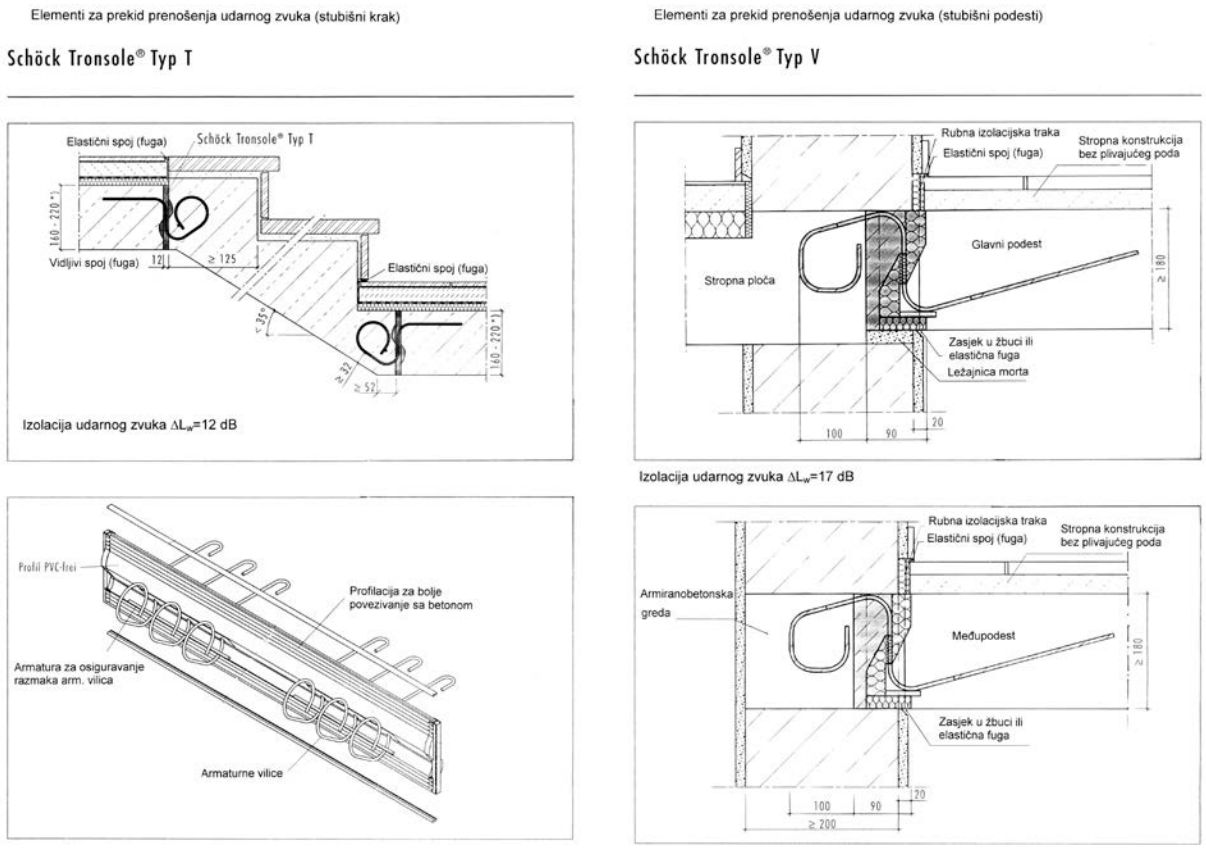
ΔL = 21 dB

1 - 2,3 cm drveni pod
2 - 3/5 cm drvene gredice
3 - nasip
4 - bitumenska ljepenka

Sl. 108. Primjeri plivajućeg poda s drvenom podnom oblogom
(Izvor: Schulz, P., 1993: 131)



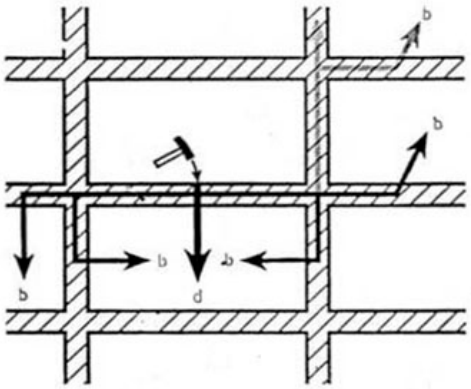
Sl. 109. Izolacija od udarnog zvuka stubišta
(Izvor: prema DIN 4109 Beiblatt 1, 1989: 23,24)



Sl. 110. Elementi za prekid zvučnog mosta - izolacija od udarnog zvuka stubišta
(Izvor: www.schock.hr)

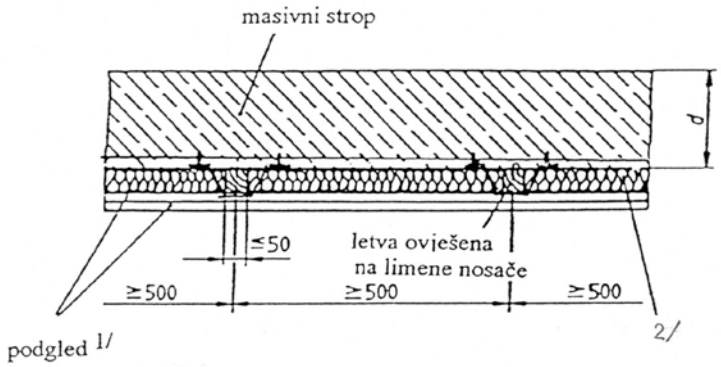
Spušteni strop

Prenošenje zvuka udara preko «gole» međukatne konstrukcije u donju prostoriju može se djelomično smanjiti izvedbom spuštenog stropa jer dio zvučne energije prolazi i bočnim vertikalnim pregradama u donju prostoriju.



Sl. 111. Poboljšanje izolacije od zvuka udara izvedbom spuštenog stropa ograničeno je zbog prenošenja vibracija bočnim putovima – pregradama.
(Izvor: Fasold W.; Veres E., 1998: 243)

Da bismo dobili što bolju izolaciju od zvuka udara, spušteni strop mora biti nepropustan za zrak i male krutosti kako bi njegova kritična frekvencija bila što veća. Zbog vibriranja nosive međukatne konstrukcije izazvane udarcima stvara se zračni zvuk u sloju zraka između konstrukcije i spuštenog stropa, tako da spušteni strop mora dobro izolirati zračni zvuk. Ugradnja apsorbirajućeg materijala (npr. mineralna vuna) u ovaj međuprostor poboljšava izolacijsku moć stropa. I ovješenje kojim je spušteni strop pričvršćen za međukatnu konstrukciju mora biti što elastičnije kako bi se što više spriječilo direktno prenošenje vibracija s konstrukcije na spušteni strop. Poboljšanje izolacije od zvuka udara izvedbom spuštenog stropa ograničeno je zbog prenošenja vibracija bočnim putovima – pregradama.



1/ Žbuka na rabic pletivu ili trstini, gips-kartonske ploče 2x12,5 mm ili 2x1,5 mm, ploče od drvene vune d ≥ 25 mm.
2/ Zvuko-apsorbirajući materijal (mineralna vuna) d=40 mm

Sl. 112. Masivna stropna ploča sa spuštenim stropom za poboljšanje zvučne izolacije
(Izvor: prema DIN 4109 Beiblatt 1, 1989: 14)

Plošna masa masivne ploče bez podne konstrukcije (kg/m^2)	L_w ($\Delta L_{w,R}$) (dB)	
	bez izvedenog podgleda	sa ovješenim podgledom
135	86 (-23)	75 (-12)
160	85 (-22)	74 (-11)
190	84 (-21)	74 (-11)
225	82 (-19)	73 (-10)
270	79 (-16)	73 (-10)
320	77 (-14)	72 (- 9)
380	74 (-11)	71 (- 8)
450	71 (- 8)	69 (- 6)
530	69 (- 6)	67 (- 4)

Za zahtjevani L_w = 63 dB

Tabl. XI. Ekvivalentna procijenjena normirana razina udarnog zvuka L_w (ekvivalentno smanjenje razine udarnog zvuka $\Delta L_{w,R}$) masivnih stropnih ploča bez/s ovješenim podgledom
(Izvor: prema DIN 4109 Beiblatt 1, 1989: 18)

	Površinska masa stropne ploče (kg/m^2)	R'_w [1] (dB)			
		Jednoslojna masivna ploča	Jednoslojna masivna ploča sa plivajućim podom	Jednoslojna masivna ploča sa spuštenim podgledom	Jednoslojna masivna ploča sa plivajućim podom i spuštenim podgledom
1	500	55	59	59	62
2	450	54	58	58	61
3	400	53	57	57	60
4	350	51	56	56	59
5	300	49	55	55	58
6	250	47	53	53	56
7	200	44	51	51	54
8	150	41	49	49	52

[1] Važi uz uvjet da su bočne pregrade srednje površinske mase cca 300 kg/m^2

Tabl. XII. Procijenjena zvučno izolacijska moć masivnih stropnih ploča
(Izvor: DIN 4109 Beiblatt 1 1989: 15)

Zvučna izolacija prozora

Zvučna izolacija gotovoga (tvornički proizvedenog) prozora i njegovih dodatnih elemenata sastoji se u načelu od pet komponenata:

1. zvučna izolacija ostakljenja,
2. zvučna izolacija doprozornika i okvira prozorskih krila,
3. zvučna izolacija spojeva i preklopa,
4. zvučna izolacija uređaja i elemenata za provjetravanje koji se nalaze na prozoru,
5. zvučna izolacija kutije za rolete.

Zvučna izolacija ostakljenja

Materijal (mm)	Indeks zvučne izolacije (dB) kod središnjih frekvencija oktava (Hz)						Jednobrojne vrijednosti i spektralne prilagodne vrijednosti		
	125	250	500	1000	2000	4000	R_w	C	C_{tr}
Jednoslojno staklo									
3	14	19	25	29	33	25	28	-1	-4
4	17	20	26	32	33	26	29	-2	-3
5	19	22	29	33	29	31	30	-1	-2
6	18	23	30	35	27	32	31	-2	-3
8	20	24	29	34	29	37	32	-2	-3
10	23	26	32	31	32	39	33	-2	-3
12	27	29	31	32	38	47	34	0	-2
Višeslojno staklo + sloj sintetskog materijala 0.5 mm do 1 mm									
6+	20	23	29	34	32	38	32	-1	-3
8+	20	25	32	35	34	42	33	-1	-3
10+	24	26	33	33	35	44	34	-1	-3
IZO staklo s jednoslojnim ili višeslojnim prozorskim staklima; međuprostor od 6 mm do 16 mm s punjenjem zrakom ili argonom									
4 (6-16) 4	21	17	25	35	37	31	29	-1	-4
6 (6-16) 4	21	20	26	38	37	39	32	-2	-4
6 (6-16) 6	20	18	28	38	34	38	31	-1	-4
8 (6-16) 4	22	21	28	38	40	47	33	-1	-4
8 (6-16) 6	20	21	33	40	36	48	35	-2	-6
10 (6-16) 4	24	21	32	37	42	43	35	-2	-5
10 (6-16) 6	24	24	32	37	37	44	35	-1	-3
6 (6-16) 6 višeslojno staklo	20	19	30	39	37	46	33	-2	-5
6 (6-16) 10 višeslojno staklo	24	25	33	39	40	49	37	-1	-5

Tabl. XIII. Zvučna izolacija jednostrukog i IZO stakla prema HRN EN 12758: 2002
(Izvor: Bauphysik Kalender, 2009: 215)

Zbog najvećeg udjela u ukupnoj površini prozora, prijenos zvuka preko stakla (ostakljenja) u velikoj mjeri određuje zvučnu izolaciju gotovoga prozora. Zvučna izolacija samog ostakljenja ovisi o vrsti stakla, debljini stakla, međusobnom razmaku staklenih ploča kod višeslojnog ostakljenja, rubnoj upetosti stakla u okvir prozora, veličini staklenih ploča, kao i o kutu upada zvučnih valova na površinu stakla.

Zvučna izolacija doprozornika i okvira prozorskog krila

Doprozornici i okviri prozora izrađuju se od profila različitih materijala, kao što su drvo, metal ili PVC. Udio profila u ukupnoj površini prozora ovisi o materijalu profila, kao i o geometriji prozora (dimenzije prozora, broj prozorskih krila, podjela prozora na dijelove).

S građevno-akustičkoga gledišta profili mogu biti puni profili i profili s komorama. Posljednjih je godina postignut značajan napredak u razvoju prozorskih profila visoke toplinskoizolacijske moći. S jedne se strane kod masivnih profila povećava debljina, odnosno izrađuju se spojni profili s visoko toplinski izoliranim međuslojem, a s druge strane razvijaju se profili s više komora, većom debljinom profila i širim izolacijskim zonama.

Puni profili za izradu doprozornika i prozorskih okvira u pravilu su izvedeni od drva. U svome punom presjeku mogu imati i materijal kvalitetnijih toplinskoizolacijskih svojstava. Zvučna izolacija doprozornika i okvira prozora izvedenih masivnim profilima ovisi o površinskoj masi. Gustoća materijala od kojih je profil izveden, kao i širina profila, djeluje povoljno na zvučnu izolaciju. Pritom bolju zvučnu izolaciju postižu širi profili, što proizlazi iz bolje izolacije okvira i doprozornika u odnosu na staklo, te u tom slučaju većeg udjela u ukupnoj površini prozora.

Utjecaj okvira prozora i okvira prozorskog krila na izolaciju gotovih (tvornički proizvedenih) prozora primjećuje se tek kod vrijednosti vrednovanog indeksa zvučne izolacije iznad R_w=40 dB. Opsežna istraživanja pokazala su da je maksimalna moguća zvučna izolacija prozora uobičajenih dimenzija okvira prozora i krila R_w=46-47 dB. Ta gornja granična vrijednost ne ovisi o upotrijebljenom materijalu za okvir (metal, drvo, PVC), nego o konstrukciji samog prozora.

Zvučna izolacija spojeva i preklopa

Kao što je već navedeno, prozori obično imaju znatno manju zvučnu izolaciju od vanjskih pregrada u koje su ugrađeni, a jedan je od razloga taj što otvor u nepropusnoj vanjskoj pregradi ne zatvaraju potpuno nepropusno. Prozor je preko priključne reške povezan s pregradom u koju je ugrađen, a i sam prozor ima preklope između fiksnog doprozornika i otvarajućih prozorskih krila. Pritom je potrebno ostvariti kvalitetno brtvljenje ovih spojeva i preklopa kako bi se osigurala zahtijevana zvučna izolacija.

Zvučna izolacija uređaja i elemenata za provjetravanje prostorija

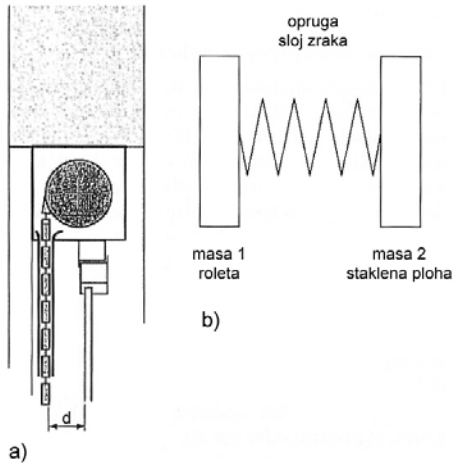
Prozračivanje prostorija zgrade važno je iz higijensko-zdravstvenih razloga, radi ugodnosti boravka u prostorijama, kao i radi sprječavanja pojave građevinskih šteta. Sve veći zahtjevi koji se postavljaju na omotač zgrade, u pogledu uštede toplinske energije i zvučne izolacije, uzrokuju da se on radi što nepropusniji. Taj razlog, povoljan sa stajališta toplinske i zvučne zaštite, ima nepovoljno djelovanje na kvalitetu zraka u prostorijama i povećava mogućnost pojave građevinskih šteta zbog nedovoljnoga prozračivanja.

Prozor će postići i ispuniti zadatak zvučne izolacije samo ako je zatvoren. Prozračivanje prostorija zgrade na uobičajeni način, kroz otvorene prozore, samo je uvjetno moguće jer je pri otvorenom prozoru razina buke u prostoriji uglavnom previsoka. Pritom će u mnogim slučajevima biti potrebno prostoriju provjetriti na drugi način. Ako se predviđa mehanička ventilacija prostora, ova se uloga prepušta strojarskim tehničkim uređajima. U ovu kategoriju ulaze uređaji koji su povezani kanalima za prozračivanje i osiguravaju prozračivanje prostorije neovisno o prozoru.

Utjecaj rolete na zvučnu izolaciju prozora

Za zaštitu od pogleda, sunca, topline i vremenskih/atmosferskih utjecaja, većina prozora opremljena je roletama. Rolete su drvene (danas rijetkost), PVC ili aluminijske profilirane letvice koje kližu po bočnim vodilicama, podižu se i namataju na valjak koji je smješten u kutiji iznad prozora. Dimenzije kutije ovise o visini prozora i debljini profiliranih letvica.

Kutiju za roletu i samu roletu treba, s obzirom na zvučnu izolaciju, promatrati uvijek u međusobnoj vezi s prozorom ili pročeljem. To vrijedi osobito u slučaju kad je roleta spuštena ispred prozora. Pritom roleta zajedno s prozorom (staklenom plohom) tvori zaseban sustav kod kojeg zvučna izolacija odstupa od zvučne izolacije prozora bez spuštene rolete.



Slika 113. a) Primjer kutije za roletu sa spuštenom roletom ispred prozora,
b) prikaz fizikalnog sustava „masa-opruga-masa“ („masa 1“ odgovara roleti, „opruga“ odgovara sloju zraka debljine *d*, „masa 2“ odgovara staklenoj plohi prozora)
(Izvor: Bauphysik Kalender, 2009: 238)

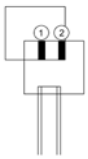
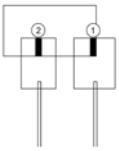
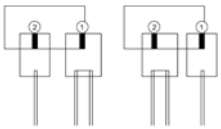
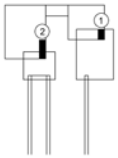
Sa spuštenom roletom ispred prozorskih staklenih ploha nastaje fizikalni sustav „masa-opruga-masa“, kojeg su svojstva karakterizirana rezonantnom frekvencijom (f_0). Veličina rezonantne frekvencije ovisi o razmaku između rolete i staklene plohe, kao i od površinskih masa obiju stijenki sustava (rolete i staklene plohe).

Sveukupnost utjecaja komponenata na zvučnu izolaciju prozora

Sagledavajući navedene komponente koje utječu na zvučnu izolaciju prozora ugrađenih u vanjske pregrade zgrada, u tablici su prikazane potrebne mjere i međusobne ovisnosti kako bi se osigurala zahtijevana vrijednost zvučne izolacije prozora.

Vrednovani indeks zvučne izolacije R'_w ugrađenih prozora	Potrebne mjere
R'_w = 25 dB	Ostakljenje: procijenjena mjera zvučne izolacije IZO stakla R'_w = 27 dB (u skladu s laboratorijskim testom) Brtvilo utora: obodni gumeni profil za brtvljenje u jednoj razini, u uglovima rezan ukoso i spojen pod kutom od 45° Kutija za rolete: revizijski poklopac i stijenka kutije prema prostoriji s nepropusnim priključnim spojevima (fugama) Uređaj za provjetravanje: procijenjena mjera zvučne izolacije, odnosi se na površinu prozora R'_w = 35 dB (u skladu s laboratorijskim testom)
R'_w = 30 dB	Ostakljenje: procijenjena mjera zvučne izolacije IZO stakla R'_w = 32 dB (u skladu s laboratorijskim testom) Brtvilo utora: obodni gumeni profil za brtvljenje u jednoj razini, u uglovima rezan ukoso i spojen pod kutom od 45° Kutija za rolete: revizijski poklopac i stijenka kutije prema prostoriji s nepropusnim priključnim spojevima (fugama) Uređaj za provjetravanje: procijenjena mjera zvučne izolacije, odnosi se na površinu prozora R'_w = 38 dB (u skladu s laboratorijskim testom)
R'_w = 35 dB	Ostakljenje: procijenjena mjera zvučne izolacije IZO stakla R'_w = 37 dB (u skladu s laboratorijskim testom) Brtvilo utora: s dva obodna gumena profila za brtvljenje, u uglovima rezanim ukoso i spojenim pod kutom od 45° Kutija za rolete: revizijski poklopac i stijenka kutije prema prostoriji s nepropusnim priključnim spojevima (fugama) Uređaj za provjetravanje: procijenjena mjera zvučne izolacije, odnosi se na površinu prozora R'_w = 43 dB (u skladu s laboratorijskim testom)
R'_w = 39 dB	Ostakljenje: procijenjena mjera zvučne izolacije IZO stakla R'_w = 42 dB (u skladu s laboratorijskim testom) Brtvilo utora: s dva obodna gumena profila za brtvljenje, u uglovima rezanim ukoso te spojenim pod kutom od 45° i zavarenim Kutija za rolete: revizijski poklopac i stijenka kutije prema prostoriji opremljeni teškom izolacijskom folijom i filcom od mineralne vune; spojevi zabrtvljeni Uređaj za provjetravanje: procijenjena mjera zvučne izolacije, odnosi se na površinu prozora R'_w = 48 dB (u skladu s laboratorijskim testom)
R'_w = 43 dB	Ostakljenje: procijenjena mjera zvučne izolacije IZO stakla R'_w = 46 dB (u skladu s laboratorijskim testom) Brtvilo utora: s dva obodna gumena profila za brtvljenje, u uglovima rezanim ukoso, spojenim pod kutom od 45° i zavarenim Kutija za rolete: revizijski poklopac i stijenka kutije prema prostoriji opremljeni teškom izolacijskom folijom i filcom od mineralne vune; spojevi zabrtvljeni Uređaj za provjetravanje: procijenjena mjera zvučne izolacije, odnosi se na površinu prozora R'_w = 50 dB (u skladu s laboratorijskim testom)
R'_w = 46 dB	Ostakljenje: procijenjena mjera zvučne izolacije IZO stakla R'_w = 49 dB (u skladu s laboratorijskim testom) Brtvilo utora: s dva obodna gumena profila za brtvljenje, u uglovima rezanim ukoso te spojenim pod kutom od 45° i zavarenim Kutija za rolete: revizijski poklopac i stijenka kutije prema prostoriji opremljeni teškom izolacijskom folijom i filcom od mineralne vune; spojevi zabrtvljeni Uređaj za provjetravanje: procijenjena mjera zvučne izolacije, odnosi se na površinu prozora R'_w = 52 dB (u skladu s laboratorijskim testom)

Tabl. XIV. Vrednovani indeks zvučne izolacije R'_w ugrađenih prozora
(Izvor: BM – Bau- und Möbelschreiner, Fachreihe für Schreiner, Bauphysik, 2004: 122)

Stupac	1	2	3	4	5	6
Red		Zahtjevi izvedbe različitih vrsta prozora				
				Spojni prozor [1]		
Red	$R_{w,R}$ dB	Konstrukcijska oznaka	Jednostruki prozor[1] s IZO staklom[2] 	S dva krila s jednostrukim ostakljenjem 	Dvostruki spojni prozor s jednim krilom s jednostrukim ostakljenjem i jednim krilom ostakljenim IZO staklom 	Dvostruki klasični prozor [1] [3] s dva jednostavna krila odnosno jednim jednostavnim i jednim ostakljenim IZO staklom 
1	25	Ostakljenje:				
		ukupna debljina stakla	≥ 6 mm	≥ 6 mm	Nema	-
		razmak stakala	≥ 8 mm	nema	Nema	-
		$R_{w,R}$ ostakljenja	≥ 27 dB	-	-	-
		brtvljenje preklopa	nije potrebno	nije potrebno	nije potrebno	nije potrebno
2	30	Ostakljenje:				
		ukupna debljina stakla	≥ 6 mm	≥ 6 mm	Nema	-
		razmak stakala	≥ 12 mm	≥ 30 mm	≥ 30 mm	-
		$R_{w,R}$ ostakljenja	≥ 30 dB	-	-	-
		brtvljenje preklopa	1 potrebno	1 potrebno	1 potrebno	nije potrebno
3	32	Ostakljenje:				
		ukupna debljina stakla	≥ 8 mm	≥ 8 mm	≥ 4 mm + 4/12/4	-
		razmak stakala	≥ 12 mm	≥ 30 mm	≥ 30 mm	-
		$R_{w,R}$ ostakljenja	≥ 32 dB	-	-	-
		brtvljenje preklopa	1 potrebno	1 potrebno	1 potrebno	1 potrebno
4	35	Ostakljenje:				
		ukupna debljina stakla	≥ 10 mm	≥ 8 mm	≥ 6 mm + 4/12/4	-
		razmak stakala	≥ 16 mm	≥ 40 mm	≥ 40 mm	-
		$R_{w,R}$ ostakljenja	≥ 35 dB	-	-	-
		brtvljenje preklopa	1 potrebno	1 potrebno	1 potrebno	1 potrebno

Tablica XV. – nastavak

Stupac	1	2	3	4	5	6
Red		Zahtjevi izvedbe različitih vrsta prozora				
5	37	Ostakljenje:				
		ukupna debljina stakla	-	≥ 10 mm	≥ 6 mm + 6/12/4	≥ 8 mm odnosno ≥ 4 mm + 4/12/4 mm
		razmak stakala	-	≥ 40 mm	≥ 40 mm	≥ 100 mm
		$R_{w,R}$ ostakljenja	≥ 37 dB	-	-	-
		brtvljenje preklopa	1 potrebno	1 potrebno	1 potrebno	1 potrebno
6	40	Ostakljenje:				
		ukupna debljina stakla	-	≥ 14 mm	≥ 8 mm + 6/12/4[4)]	≥ 8 mm odnosno ≥ 6 mm + 4/12/4 mm
		razmak stakala	-	≥ 50 mm	≥ 50 mm	≥ 100 mm
		$R_{w,R}$ ostakljenja	≥ 42 dB	-	-	-
		brtvljenje preklopa	1 + 2[4)] potrebno	1 + 2[4)] potrebno	1 + 2[4)] potrebno	1 + 2[4)] potrebno
7	42	Ostakljenje:				
		ukupna debljina stakla	-	≥ 16 mm	≥ 8 mm + 8/12/4	≥10 mm odnosno ≥ 8 mm + 4/12/4 mm
		razmak stakala	-	≥ 50 mm	≥ 50 mm	≥ 100 mm
		$R_{w,R}$ ostakljenja	≥ 45 dB	-	-	-
		brtvljenje preklopa	1 + 2[4)] potrebno	1 + 2[4)] potrebno	1 + 2[4)] potrebno	1 + 2[4)] potrebno
8	45	Ostakljenje:				
		ukupna debljina stakla	-	≥ 18 mm	≥ 8 mm + 8/12/4	≥12 mm odnosno ≥ 8 mm + 6/12/4 mm
		razmak stakala	-	≥ 60 mm	≥ 60 mm	≥ 100 mm
		$R_{w,R}$ ostakljenja	-	-	-	-
		brtvljenje preklopa	-	1 + 2[4)] potrebno	1 + 2[4)] potrebno	1 + 2[4)] potrebno

Tablica XV. – nastavak

Stupac	1	2	3	4	5	6
Red		Zahtjevi izvedbe različitih vrsta prozora				
9	≥48	Općevrijedeći podaci nisu mogući; dokazivanje samo ispitivanjem prema DIN 52210				

[1] Sva krila kod drvenih prozora moraju imati dvostruki preklop, a kod metalnih i plastičnih prozora moraju postojati dva učinkovita graničnika. Potrebne brtve moraju biti postavljene po čitavom obodu, bez prekida. Moraju biti mekane, trajno elastične, otporne na starenje i lako zamjenjive.

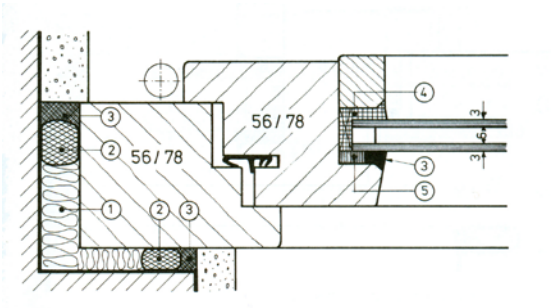
[2] Izolacijsko staklo mora biti trajno, označeno oznakom vidljivom i u ugrađenom stanju, a iz koje se može očitati procijenjena izolacijska moć $R_{w,R}$ i ime proizvođača. Uza svaku isporuku mora biti priložen tvornički atest po DIN 50049, kojem je osnova ispitivanje po DIN 52210 dio 5 koje nije starije od 5 godina.

[3] Zvučno apsorbirajuće udubljenje je svrhovito jer se time djelomično mogu izjednačiti propuštanja u preklopima koja nastaju zbog starenja brtve preklopa.

[4] Vrijednosti vrijede samo ako nisu poduzete dodatne mjere za odzračivanje međuprostora između stakala.

Tabl. XV. Primjeri izvedbe za otklopne, zaokretne i otklopno-zaokretne prozore i vrste ostakljenja za postizanje vrednovanog indeksa zvučne izolacije R_w od 25 do 45 dB (računske vrijednosti)
(Izvor: prema DIN 4109 Beiblatt 1 1989: 55, 56)

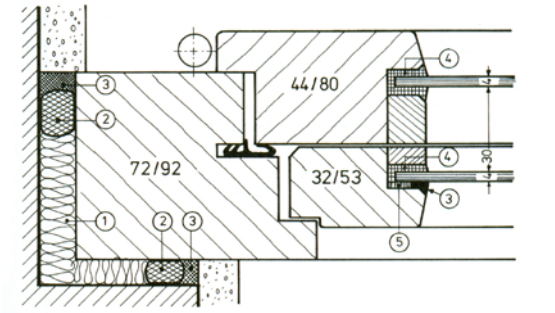
Zvučna izolacija različitih tipova drvenih prozora



Jednostruki prozor s IZO staklom

$R_{w,R}$ = cca 28 dB

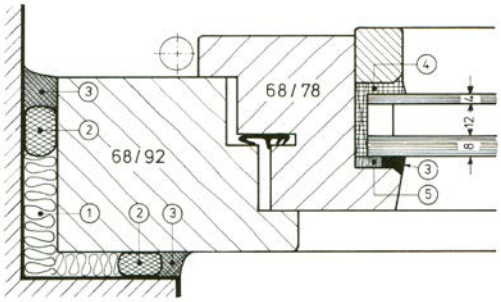
1 - mineralna vuna
2 - okrugao profil od pjenastog materijala
3 - elastično brtvilo
4 - brtvilo u utoru
5 - traka za brtvljenje



Dvostruki spojni prozor

$R_{w,R}$ = cca 34 dB

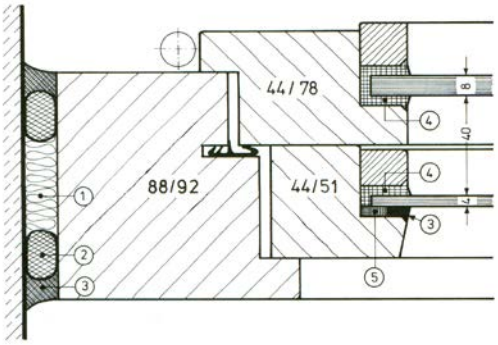
1 - mineralna vuna
2 - okrugao profil od pjenastog materijala
3 - elastično brtvilo
4 - brtvilo u utoru
5 - traka za brtvljenje



Jednostruki prozor s IZO staklom

$R_{w,R}$ = cca 34 dB

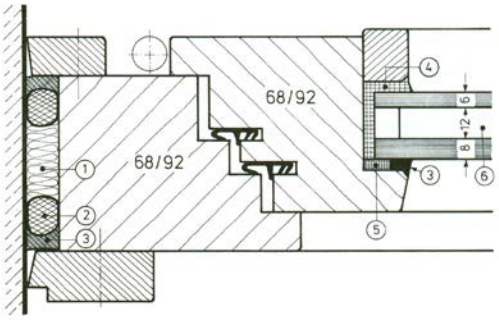
1 - mineralna vuna
2 - okrugao profil od pjenastog materijala
3 - elastično brtvilo
4 - brtvilo u utoru
5 - traka za brtvljenje



Dvostruki spojni prozor

$R_{w,R}$ = cca 39 dB

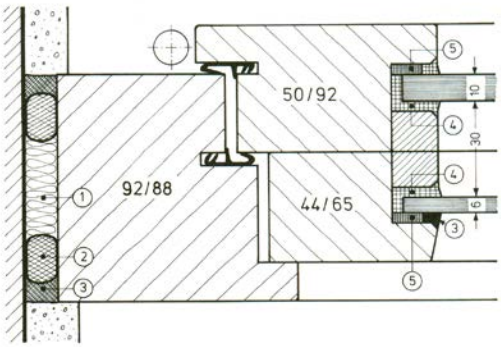
1 - mineralna vuna
2 - okrugao profil od pjenastog materijala
3 - elastično brtvilo
4 - brtvilo u utoru
5 - traka za brtvljenje



Jednostruki prozor s IZO staklom

$R_{w,R}$ = cca 36 dB

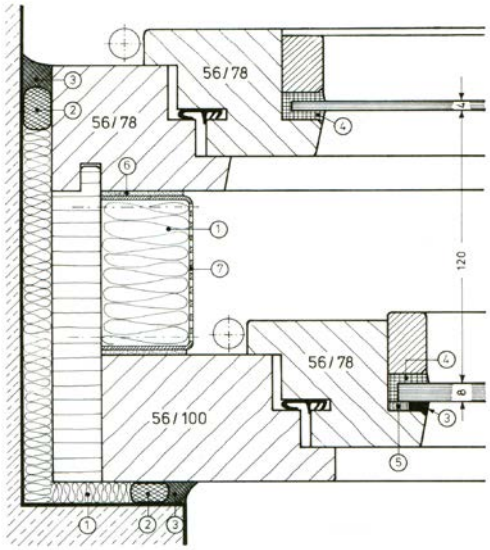
1 - mineralna vuna
2 - okrugao profil od pjenastog materijala
3 - elastično brtvilo
4 - brtvilo u utoru
5 - traka za brtvljenje
6 - punjenje plinom



Dvostruki spojni prozor

$R_{w,R}$ = cca 42 dB

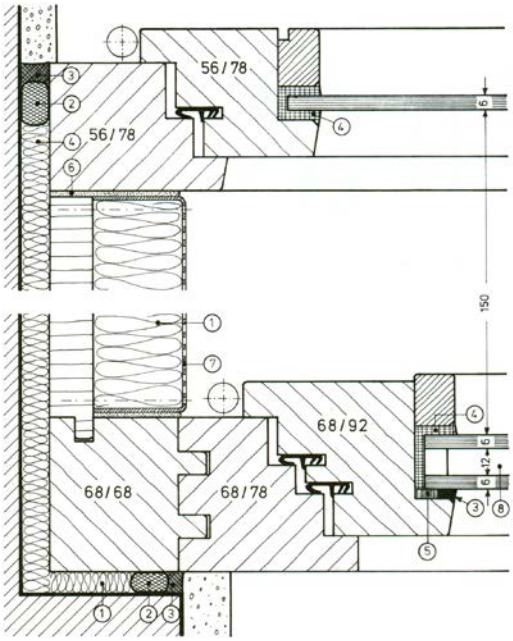
1 - mineralna vuna
2 - okrugao profil od pjenastog materijala
3 - elastično brtvilo
4 - brtvilo u utoru
5 - traka za brtvljenje



Dvostruki klasični prozor

$R_{w,R}$ = cca 46 dB

1 - mineralna vuna
2 - okrugao profil od pjenastog materijala
3 - elastično brtvilo
4 - brtvilo u utoru
5 - traka za brtvljenje
6 - porozna guma
7 - metalna ploča s perforacijama



Dvostruki klasični prozor

$R_{w,R}$ = cca 54 dB

1 - mineralna vuna
2 - okrugao profil od pjenastog materijala
3 - elastično brtvilo
4 - brtvilo u utoru
5 - traka za brtvljenje
6 - porozna guma
7 - metalna ploča s perforacijama
6 - punjenje plinom

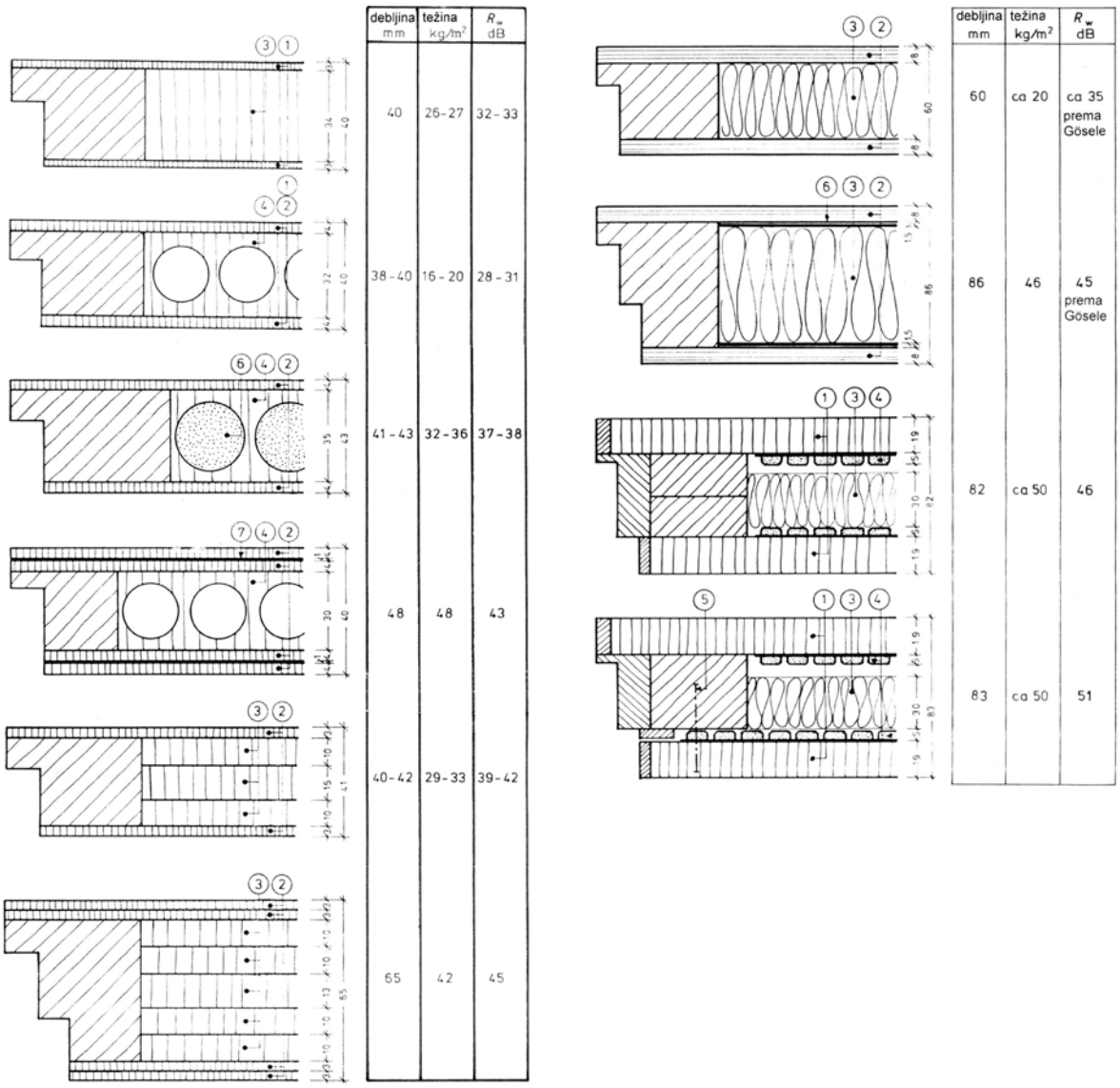
Slika 114. Zvučna izolacija ($R_{w,R}$) različitih tipova drvenih prozora s različitim ostakljenjem
(Izvor: Schulz P., 1993: 161-165)

Zvučna izolacija vrata

Kao i kod prozora, zvučna izolacija vrata sastoji se od više komponenata:

1. zvučna izolacija vratnog krila,
2. zvučna izolacija dovratnika,
3. zvučna izolacija spojeva i preklopa.

Zvučna izolacija vratnog krila



1 ukočena ploča
2 tvrdi lesonit
3 prešana iverica
4 ploča iverice sa šupljinama
6 ispuna pijeskom
7 lim

1 iverica
2 ukočena ploča
3 mineralna vuna
4 HAWA-PHON zvučnoizolacijska ploča
5 točkasto pričvršćenje drvenim trnovima ili vijcima na razmaku ≥400 mm
6 lim

Slika 115. Srednja vrijednost zvučne izolacije vratnih krila
(Izvor: Schulz P., 1993: 170-173, 175)

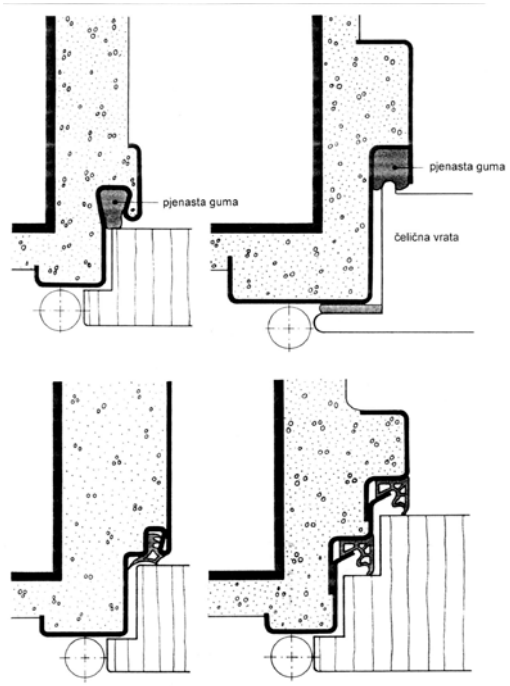
Zbog najvećeg udjela u ukupnoj površini vrata, prijenos zvuka preko vratnog krila u velikoj mjeri određuje zvučnu izolaciju vrata Ako u vratnom krilu postoji ostakljenje, zvučna izolacija samog ostakljenja, kao i kod prozora, ovisi o vrsti stakla, debljini stakla, međusobnom razmaku staklenih ploča kod višeslojnog ostakljenja, rubnoj upetosti stakla u okvir vrata, veličini staklenih ploča, ali i o kutu upada zvučnih valova na površinu stakla.

Zvučna izolacija dovratnika

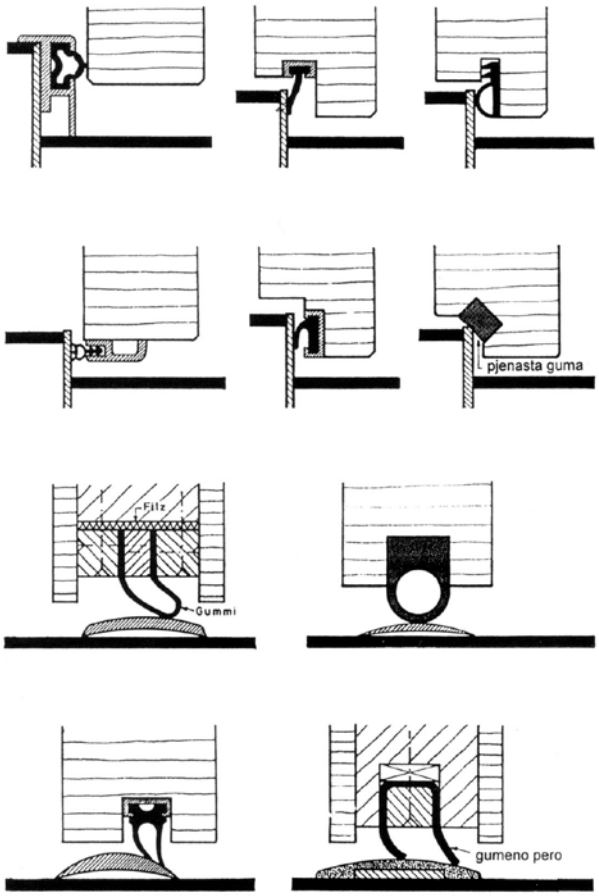
Kao i kod prozora, dovratnici se izrađuju od profila različitih materijala, kao što su drvo, metal ili PVC. Udio profila u ukupnoj površini vrata ovisi o materijalu profila, kao i o njihovoj geometriji (dimenzije vrata, broj vratnih krila).

Zvučna izolacija spojeva i preklopa

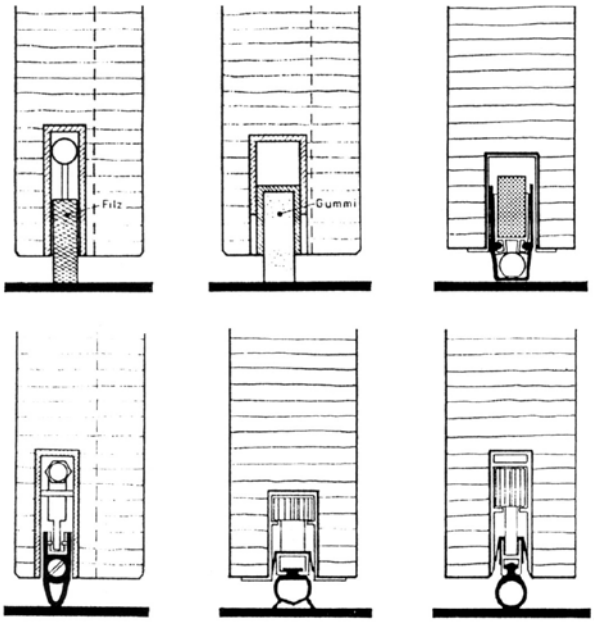
Vrata, kao i prozori, obično imaju znatno manju zvučnu izolaciju od pregrada u koje su ugrađeni, a jedan je od razloga taj što otvor u pregradi ne zatvaraju potpuno nepropusno. Vrata su preko priključnih reški povezana s pregradom u koju su ugrađena, sama vrata imaju preklope između dovratnika i vratnih krila, a najčešći problem predstavlja rješenje praga, odnosno propusnost reške između vratnog krila i poda. Kako bi se vrata mogla neometano otvarati, između vratnog krila i poda mora postojati razmak od minimalno 3 mm. Pritom treba osigurati da se ova reška pravilno zabrtvi kad su vrata u zatvorenom položaju. U protivnom, kroz ovu će se rešku prenijeti zvuk između dviju prostorija bez obzira na zvučnoizolacijsku kvalitetu vratnog krila. Upravo zbog toga potrebno je ostvariti kvalitetno brtvljenje svih spojeva i preklopa vrata kako bi se osigurala zahtijevana zvučna izolacija.



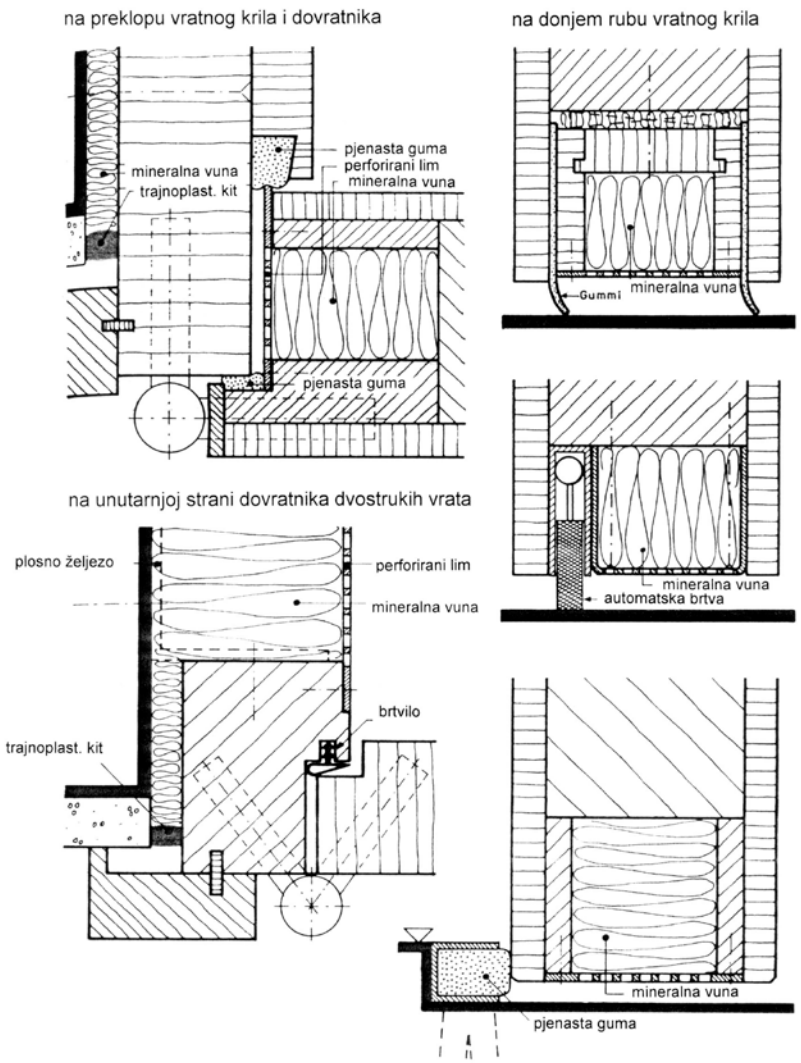
Slika 116. Brtvljenje vratnog krila i čeličnog dovratnika
(Izvor: Schulz P., 1993: 180)



Slika 117. Brtvljenje vratnog krila i poda s pragom
(Izvor: Schulz P., 1993: 182)



Slika 118. Brtvljenje vratnog krila i poda bez praga
(Izvor: Schulz P., 1993: 183)



Slika 119. Zvučno izolirajuća vrata - primjer izvedbe zvučno apsorpcijskih utora (komora) vrata za povećanje nepropusnosti zvuka kroz preklope
(Izvor: Schulz P., 1993: 181)

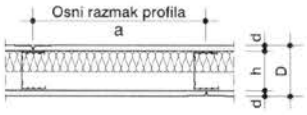
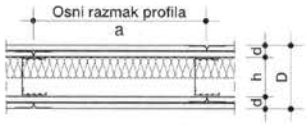
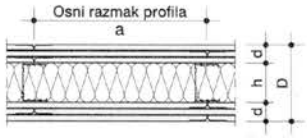
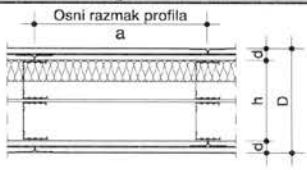
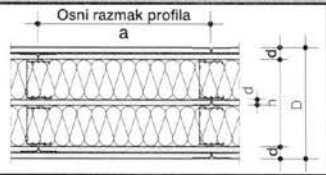
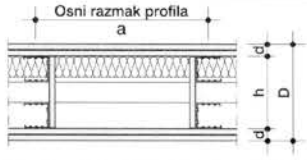
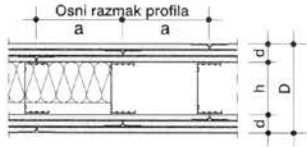
Prilozi

str. 91 do 102 - Izvor: www.knauf.hr

Tehnički podaci

Zaštita od požara, zvučna i toplinska izolacija

W11

Tehnički podaci: Prikaz sistema	Dimenzije u mm: D	h	Obloga d	Masa cca. kg/m²	Zaštita od požara 1): Razred vatrozaštite		Zvučna izolacija Rw 2) dB: mjerene vrijednosti	preporučane rač. vrijednosti	Izolacija iz miner. vune mm	Topl. izolacija U W/(m² K)
W111 Pregradni zid - jednostruka potkonstrukcija, obostrano jednostruka obloga										
	75 (80)	50	12,5 (15)	25 (29)	F30		45	41	50	0,61
	100 (105)	75					45	42	50	0,61
							48	45	75	0,44
	125 (130)	100					46 *)	43	50	0,61
							51	48	100	0,35
W112 Pregradni zid - jednostruka potkonstrukcija, obostrano dvostruka obloga										
	100	50	2 x 12,5	49	F90		51	48	50	0,57
	125	75					52	49	50	0,57
							54	51	75	0,42
	150	100					53 *)	50	50	0,57
							56	53	100	0,33
W113 Pregradni zid - jednostruka potkonstrukcija, obostrano trostruka obloga										
	125	50	3 x 12,5	66 3)	F90		56	53	50	0,54
	150	75			F180 prema normi HRN DIN 4102 s kamenom vunom debljine 60 mm, 100 kg/m³		58	55	75	0,40
	175	100					60	57	100	0,32
W115 Pregradni zid - dvostruka potkonstrukcija, obostrano dvostruka obloga										
	155	105	2 x 12,5	50	F90		62	60	50	0,57
	205	155					64	62	50	0,57
	255	205					65	63	50	0,57
							66	64	100	0,33
W115 Zid između stanova - dvostruka potkonstrukcija, obostrano dvostruka obloga										
	215	165	2 x 12,5 + 12,5	62	F90		74	69	2 x 75	0,23
W116 Instalacijski zid - dvostruka potkonstrukcija, obostrano dvostruka obloga										
	≥ 220	≥ 170 (CW 50)	2x12,5	49 3)	F90		cca. 54 **)		≥ 50	0,57
	≥ 270	≥ 220 (CW 75)								
	≥ 320	≥ 270 (CW 100)								
W118 Sigurnosni zid - jednostruka potkonstrukcija, obostrano trostruka obloga + čel. limovi										
	177	100	3x12,5 + 2 x 0,5 mm čelični limovi	82 3)	F90		cca. 54 **)		bez	cca. 1,65
							cca. 60 **)		50	cca. 0,54
							cca. 61 **)		75	cca. 0,40
							cca. 62 **)		100	cca. 0,32

rezultati normiranih mjerenja u institutu — *) srednja vrijednost iz više mjerenja

preporučana računska vrijednost — **) iskustvena procjena

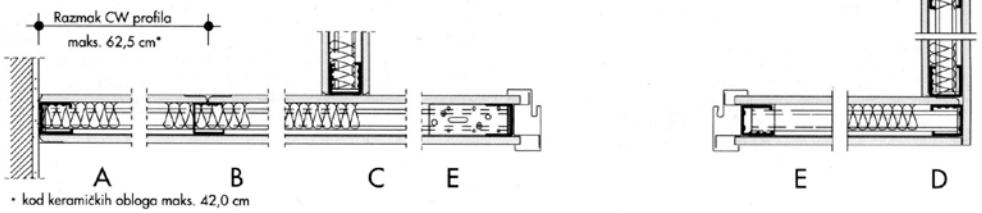
1) Uporabom protupožarnih ploča (GKF) i mineralne vune min. debljine 5 cm.
2) Rw = ocijenjena mjera zvučne izolacije; polazna vrijednost za izračun standardne ocijenjene razlike zvučne izolacije Dn,T,w (zaštita od buke između prostorija unutar zgrada) prema normi ÖNORM B 8115-4.
3) Podaci o ukupnoj masi bez izolacijskog sloja.

Pregradni zid

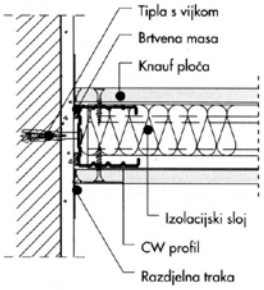
Jednostruka metalna konstrukcija, jednostruka obloga

W111

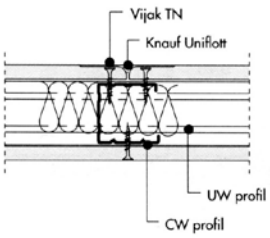
Tlocrt M 1:10



Vodoravni presjeci M 1:5

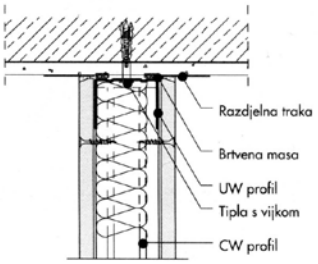


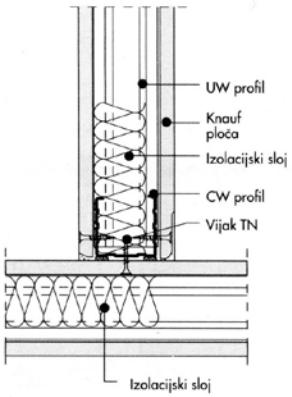
A Spoj sa zidom



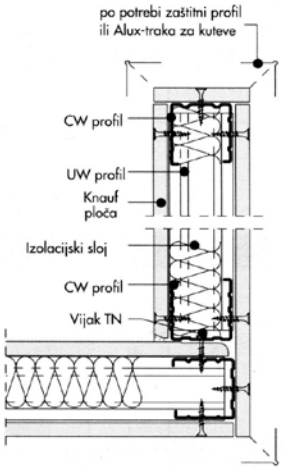
B Spoj dvaju ploča

Okomiti presjek M 1:5

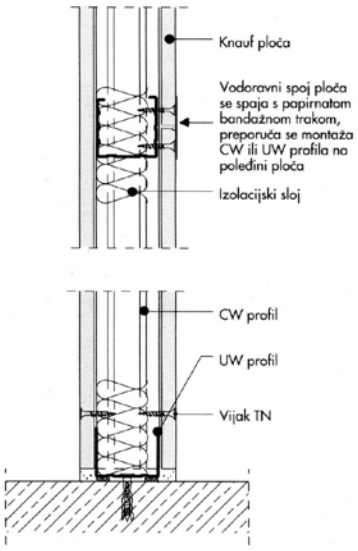




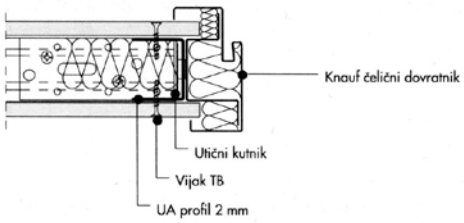
C T - spoj zidova



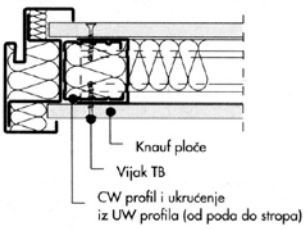
D Izvedba kuta zida



Izvedba UA
Težina vratnog krila
vidi str. 15



Izvedba CW/UW
Težina vratnog krila
do maks. 25 kg

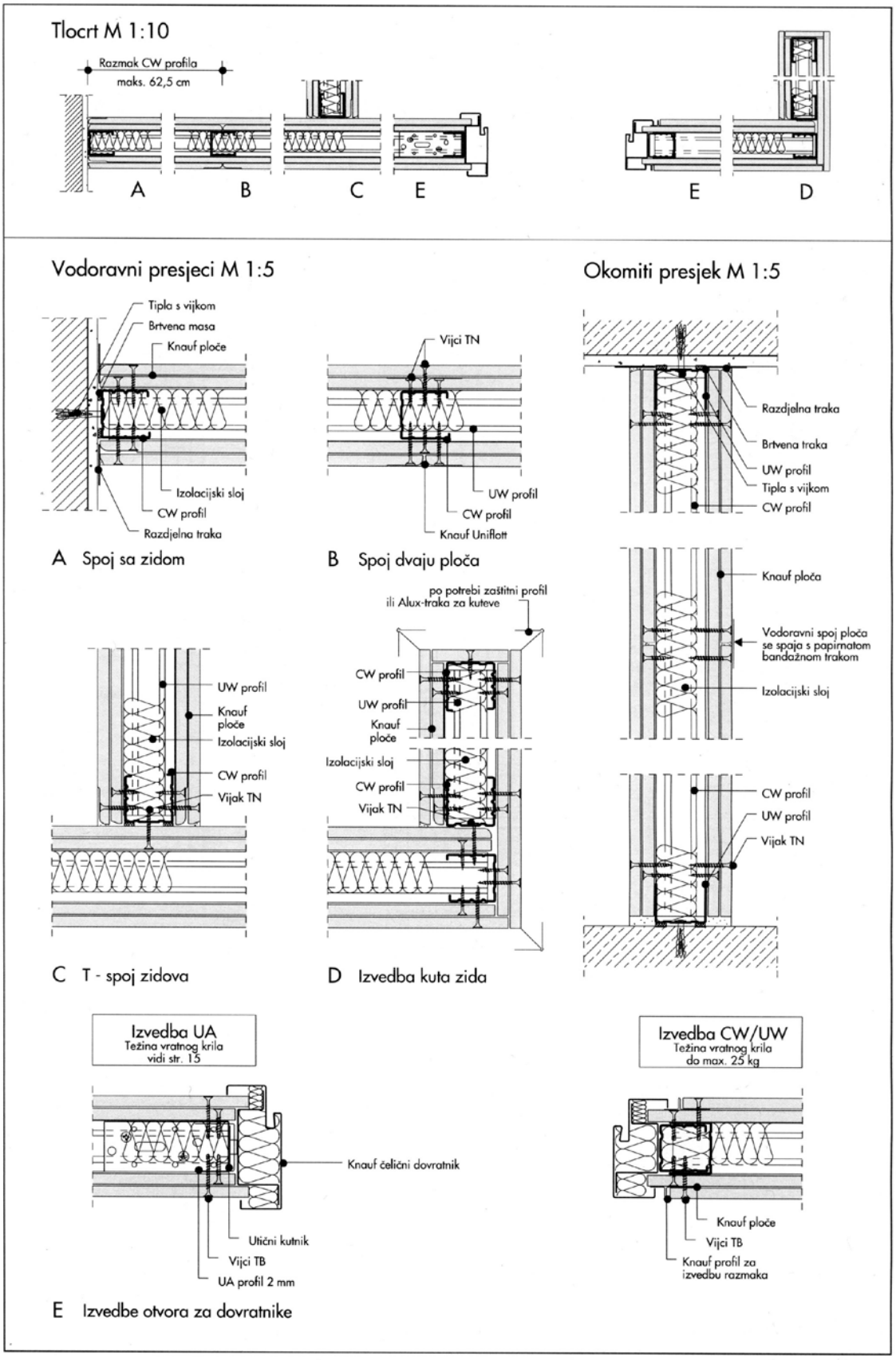


E Izvedbe otvora za dovratnike

Pregradni zid

Jednostruka metalna konstrukcija, dvostruka obloga

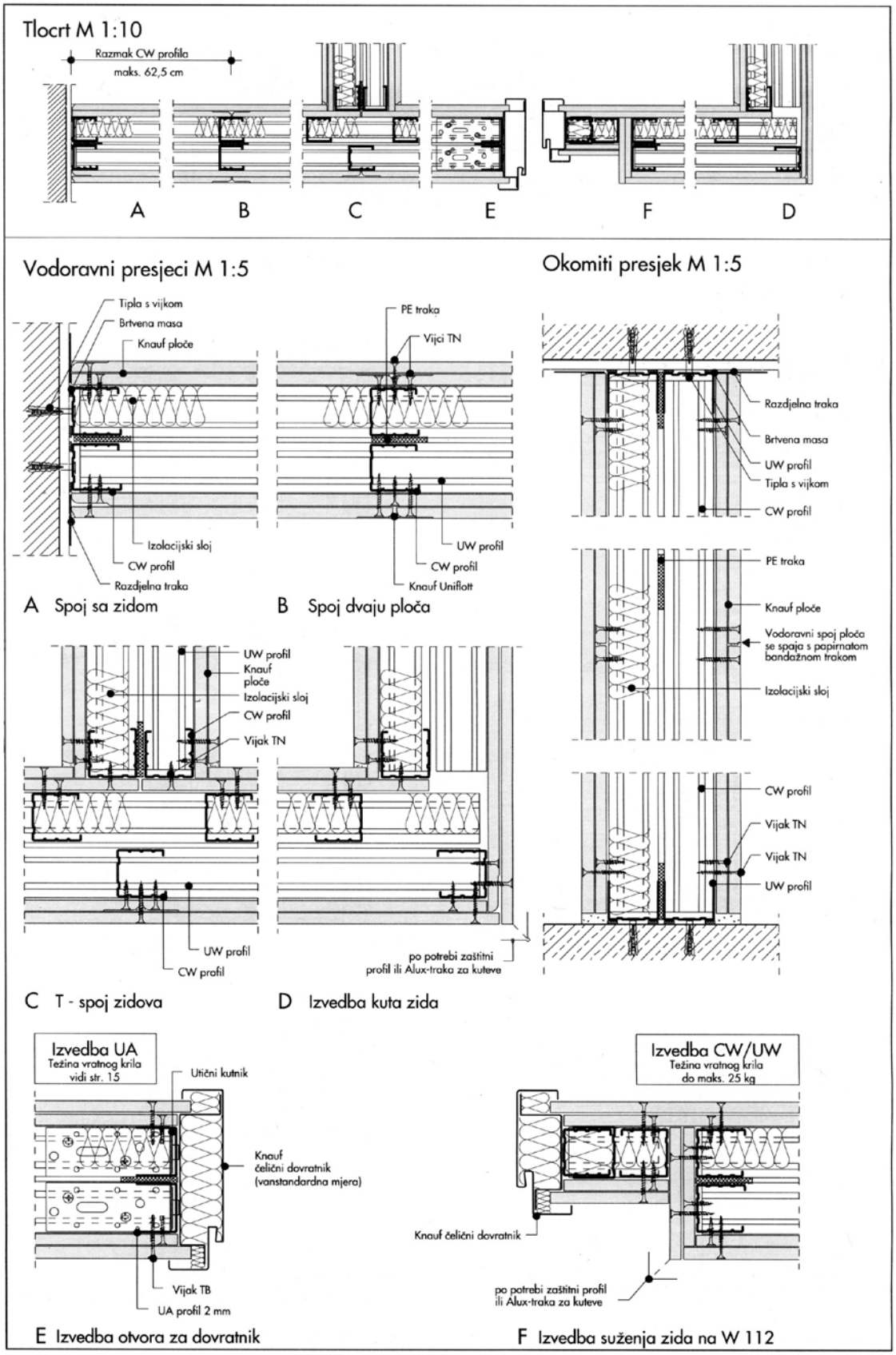
W112



Pregradni zid

Dvostruka metalna konstrukcija, dvostruka obloga

W115

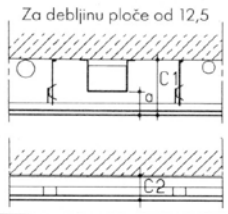


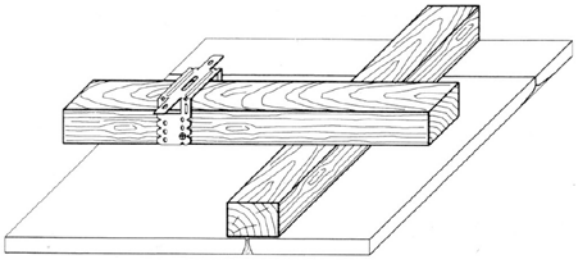
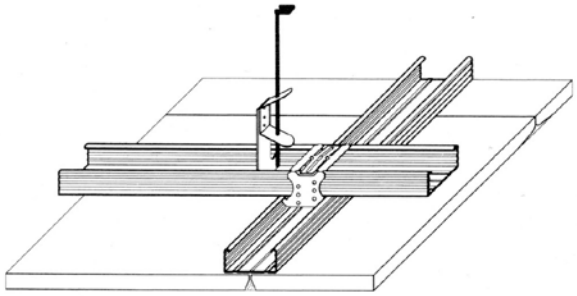
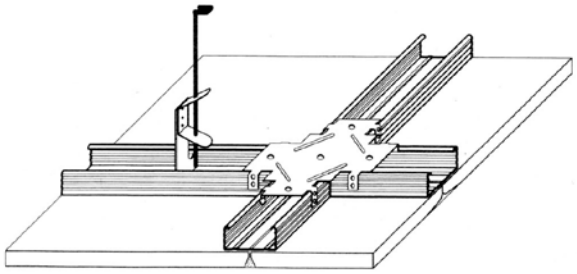
Tehnički podaci D 11

Knauf - spušteni stropovi GK

Napomene:
Svi podaci vrijede za zatvorene stropne površine bez dodatne izolacije i bez ugrađenih elemenata (npr. stropna rasvjeta).
Dodatne naslage izolacijskih materijala utječu na protupožarna svojstva i mogu stvoriti potrebu za debljom oblogom Knauf-ploča.
Za pojedine slučajeve preporuča se procjena ovlaštene institucije.

Tehnički podaci

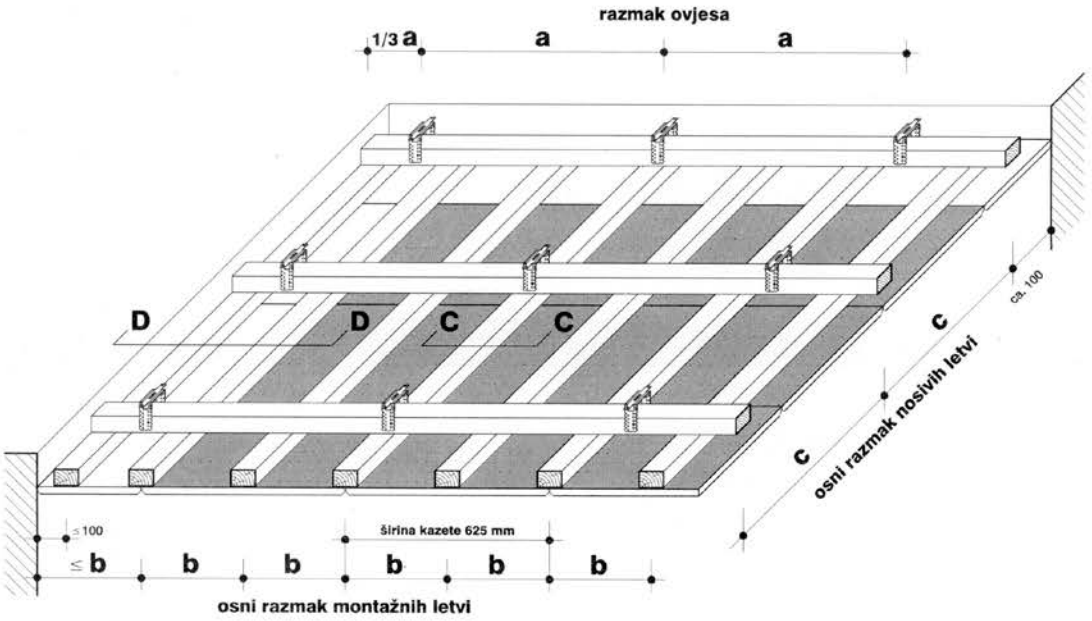


	Minimalna visina ugradnje			Protupožarna zaštita prema ÖNORM B 3800				
	C1	a	C2	Obloga prema ÖNORM B 3410 s Knauf-pločama F13/F15 (GKF)	Sam spušteni strop s donje strane	Ispod drvenih gredника s estrihom od 3 cm (za F60 5 cm) i negorivom ispunom debljine 5 cm (F60 7 cm)	Ispod čeličnih nosača sa slojem betona od min. 4 cm (za F90 min. 6 cm)	Ispod profiliranog čeličnog lima sa slojem betona od min. 4 cm (za F90 min. 6 cm)
 **D 111 Montaža na drvenoj potkonstrukciji**	**Element za brzi ovjes** Nosiva letva v/š 50 x 30 Montažna letva v/š 30 x 50 **200 mm**	Nosiva i montažna letva v/š 30 x 50 **73 mm**	**Direktno učvršćenje** Nosiva i montažna letva v/š 30 x 50 **73 mm**	12,5	–	F 30 C2 ≥ 53	F 30	F 30
			Direktni ovjes Jednostr. potkonstrukcija v/š 30 x 50 min. **43 mm** maks. **138 mm**	2 x 12,5	F 30	F 60 C2 ≥ 105	F 60	F 60
 **D 112 Montaža na metalnoj potkonstrukciji**	**Element za brzi ovjes** **160 mm**	**73 mm**	**Direktni ovjes** min. **73 mm** maks. **165 mm**	12,5	–	F 30 C2 ≥ 53	F 30	F 30
				2 x 12,5	F 30	F 60 C2 ≥ 105	F 60	F 60
	Nonius-ovjes **220 mm**			3 x 15,0	–	–	F 90	F 90
 **D 113 Montaža na metalnoj potkonstrukciji – na istoj razini –**	**Element za brzi ovjes** **130 mm**	**43 mm**	**Direktni ovjes** min. **43 mm** maks. **138 mm**	12,5	–	F 30 C2 ≥ 53	F 30	F 30
				2 x 12,5	F 30	F 60 C2 ≥ 105	F 60	F 60
	Nonius-ovjes **190 mm**			2 x 15,0	F 60	F 60	F 60	F 60
				3 x 15,0	–	–	F 90	F 90

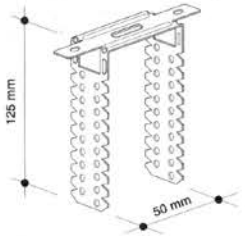
Kazetni strop

potkonstrukcija iz drvenih letvi

D 141



Direktno učvršćena potkonstrukcija



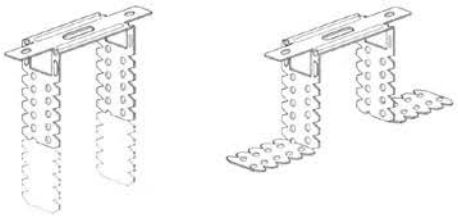
razred nosivosti prema DIN 18 168 Teil 2

0,4 kN

(40 kg)

Direktni ovjes za drvenu letvicu

prema potrebnoj visini ugradnje višak direktnog ovjesa treba



odrezati ili savinuti

Osni razmaci potkonstrukcije

Dimenzije i maks. rasponi za nosive i montažne letvice [1)]

	presjek letvica		maks. raspon (mm) težina p (kN/m²)	
	širina b mm	visina h mm	p ≤ 0,15	0,15 < p ≤ 0,30
nosive letvice			Razmak ovjesa (razmak tipli) - a -	
	50	30	850	750
montažne letvice			Osni razmak nosivih letvica - c -	
	48	24	700	600
	50	30	850	750
			Osni razmak montažnih letvica - b -	
			312,5	

Učvršćenje za betonski strop

kakvoća betona ≥ B 300

dozvoljeno opterećenje

0,5 kN

(50 kg)

čel. stropni čavao 6 x 35

upotreba u interijerima - ne koristi se u javnim prostorima sa stalnom vlagom

Razmaci prema ÖNORM B 3415 za Knauf vijke prema normi ÖNORM-DIN 18 182 Teil 2

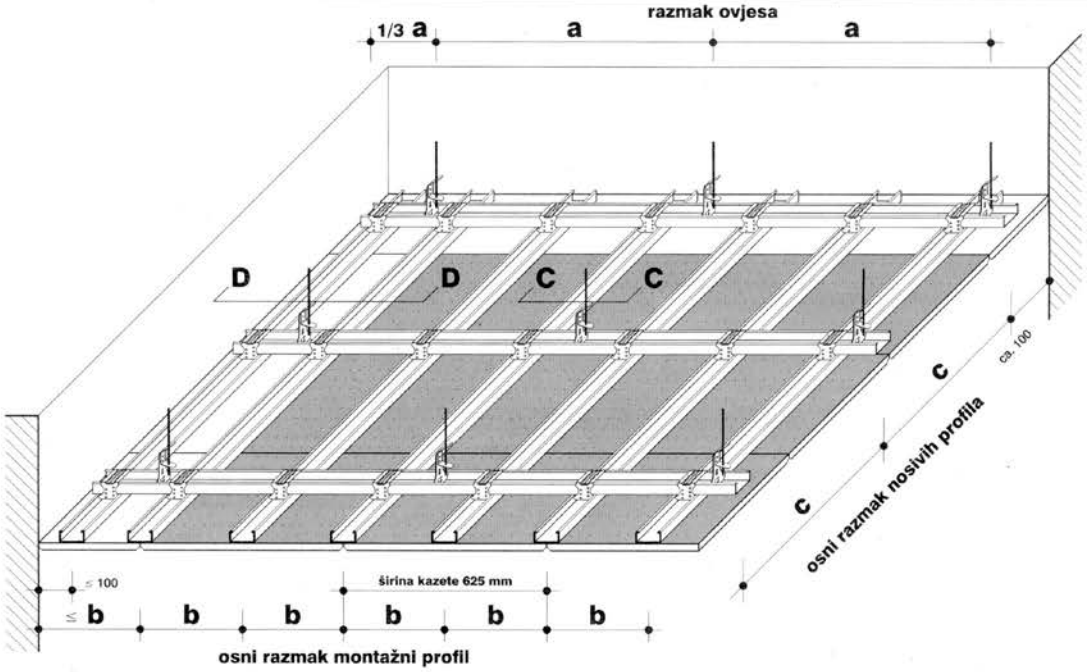
Kazete	Debljina mm	Učvršćenje s Knauf vijcima	Razmak vijaka kod učvršćivanja kazeta mm
Knauf kazete glatke	9,5	TN 35	170
	12,5		
Knauf kazete s perforacijom	9,5	SN 30	
	12,5		

[1)] kod upotrebe jednostruke potkonstrukcije (samo montažne letvice) treba razmak ovjesa (tipli) bit jednak osnom razmaku nosivih letvi

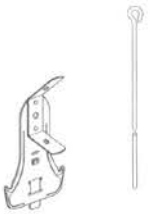
Kazetni strop

metalna potkonstrukcija direktno učvršćena / oviješena

D 142



Oviješena potkonstrukcija



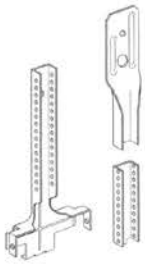
razred nosivosti prema DIN 18 168 Teil 2

0,25 kN

(25 kg)

Ankerfix sidreni ovjes s osiguračem 0,25 kN za CD profil 60 x 27

žica s ušicom



razred nosivosti prema DIN 18 168 Teil 2

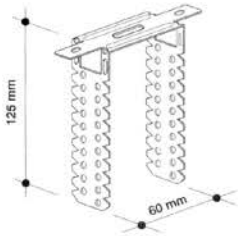
0,4 kN

(40 kg)

Nonius ovjes donji dio 0,4 kN za CD profil 60 x 27

Nonius ovjes - gornji dio
Nonius osigurači

Direktno učvršćena potkonstrukcija



razred nosivosti prema DIN 18 168 Teil 2

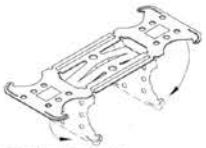
0,4 kN

(40 kg)

direktni ovjes za CD profil 60 x 27

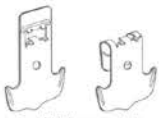
nakon montaže višak ovjesnog elementa treba odrezati ili presaviti

Spoj između profila



savinuti prije montaže

križna spojnica za CD 60 x 27



savinuti tijekom montaže

sidrena spojnica za CD 60 x 27

Učvršćenje za betonski strop

kakvoća betona ≥ B 300

dozvoljeno opterećenje

0,5 kN

(50 kg)

Čel. stropni čavao 6 x 35

upotreba u interijerima - ne koristi se u javnim prostorima sa stalnom vlagom

Osni razmaci potkonstrukcije

	maks. raspon (mm) težina p (kN/m²) ≤ 0,15
Razmak ovjesa (razmak tipli) - a -	900
Osni razmak nosivih profila*) CD 60 x 27 - c -	1000
Osni razmak montažni profil CD 60 x 27 - b -	312,5

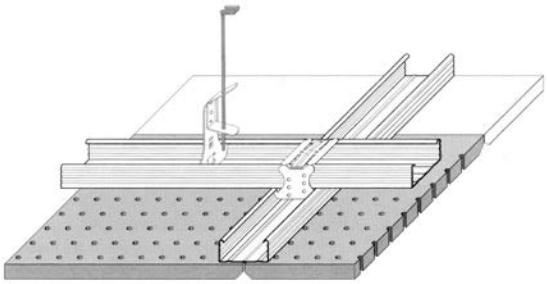
*) oviješeni profil

Razmaci prema ÖNORM B 3415 za Knauf vijke prema normi ÖNORM-DIN 18 182 Teil 2

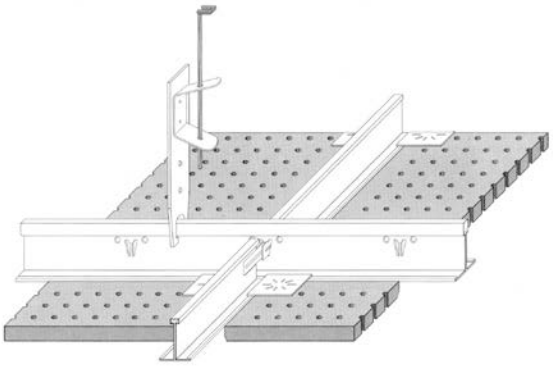
Kazete	Debljina mm	Učvršćenje s Knauf vijcima	Razmak vijaka kod učvršćenja kazeta mm
Knauf kazete glatke	9,5 12,5	TN 25	170
Knauf kazete s perforacijom	9,5 12,5	SN 3,5 x 30	

Knauf kazetni stropovi D 14

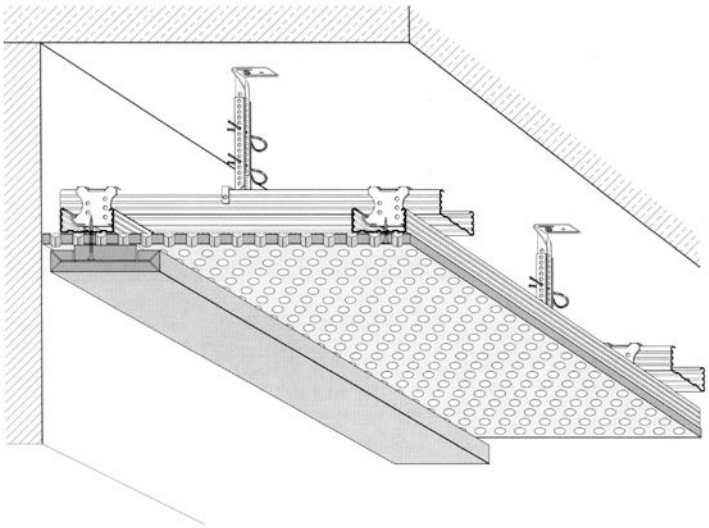
D 142 Knauf kazetni strop



D 145 Knauf kazetni strop "Markant"



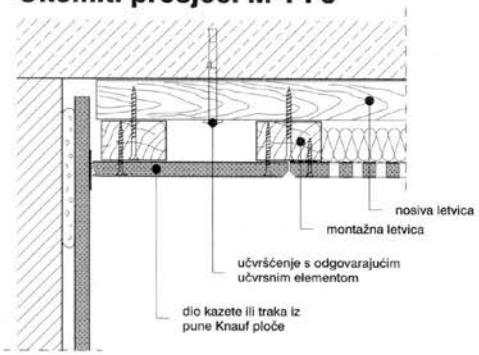
Knauf akustični stropovi D 12



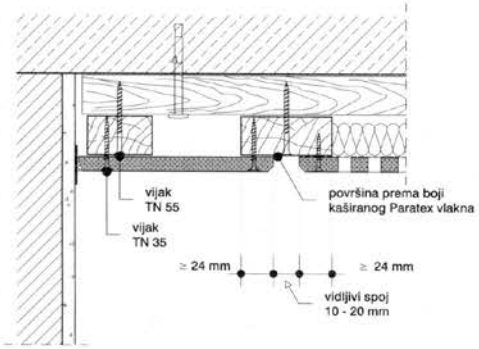
Kazetni spušteni stropovi D 141 / D 142

D 141 Drvena potkonstrukcija

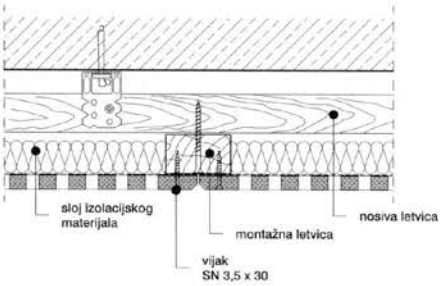
Okomiti presjeci M 1 : 5



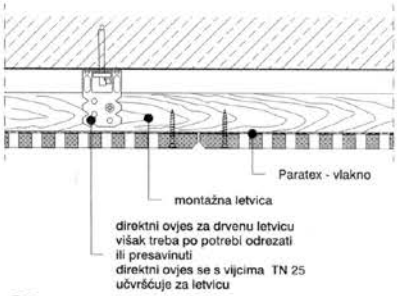
D1 Izvedba spoja sa zidom sa zatvorenim spojem ploča



D2 Izvedba spoja sa zidom s vidljivim spojem ploča



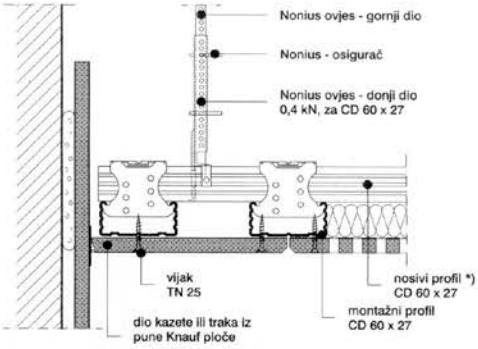
C1 Spoj kazeta



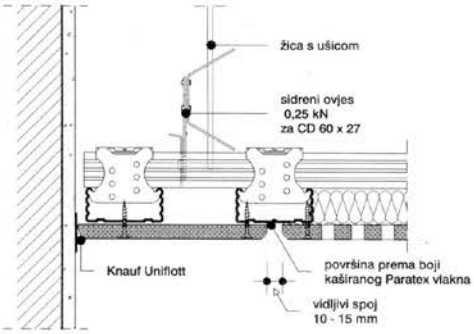
C2 Spoj kazeta bez nosivih letvica

D 142 Metalna potkonstrukcija

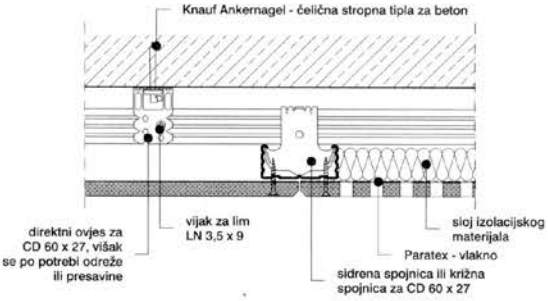
Okomiti presjeci M 1 : 5



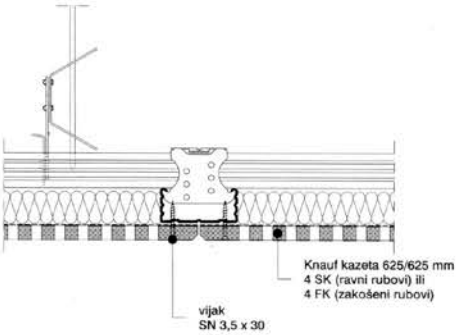
D1 Izvedba spoja sa zidom sa zatvorenim spojem ploča



D2 Izvedba spoja sa zidom s vidljivim spojem ploča



C1 Spoj kazeta



C2 Spoj kazeta

*) ovješeni profil

Perforirane ploče

Apsorpcija zvuka
Kontinuirana perforacija, tip - A

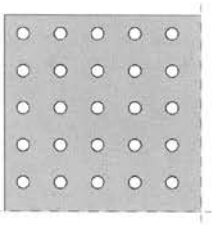
D 127

Ravna perforacija 6/18

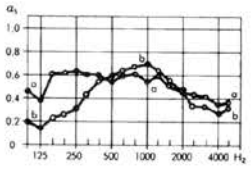
Postotak perforacije: 8,7%

Paratex-akustično vlakno
45 g/m²

a = odstojanje **400 mm**
b = odstojanje **60 mm**



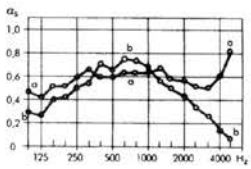
Stupnjevi apsorpcije zvuka bez mineralne vune



	125	250	500	1000	2000	4000 Hz	
α_s	0,39	0,63	0,57	0,58	0,50	0,38	a
	0,14	0,31	0,60	0,73	0,49	0,30	b

α **a = 0,59**
α **b = 0,57**

Stupnjevi apsorpcije zvuka s mineralnom vunom 20 mm, 0,4 kg/m²



	125	250	500	1000	2000	4000 Hz	
α_s	0,42	0,60	0,60	0,63	0,57	0,62	a
	0,28	0,52	0,66	0,68	0,43	0,16	b

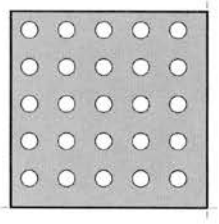
α **a = 0,62**
α **b = 0,63**

Ravna perforacija 8/18

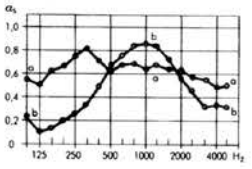
Postotak perforacije: 15,5%

Paratex-akustično vlakno
45 g/m²

a = odstojanje **400 mm**
b = odstojanje **60 mm**



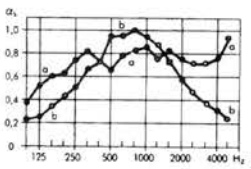
Stupnjevi apsorpcije zvuka bez mineralne vune



	125	250	500	1000	2000	4000 Hz	
α_s	0,50	0,76	0,61	0,63	0,63	0,84	a
	0,10	0,26	0,64	0,85	0,58	0,36	b

α **a = 0,69**
α **b = 0,63**

Stupnjevi apsorpcije zvuka s mineralnom vunom 20 mm, 0,4 kg/m²



	125	250	500	1000	2000	4000 Hz	
α_s	0,51	0,75	0,83	0,84	0,76	0,77	a
	0,26	0,50	0,94	0,93	0,59	0,32	b

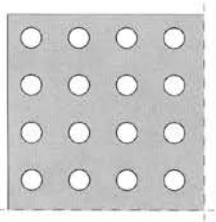
α **a = 0,77**
α **b = 0,79**

Ravna perforacija 10/23

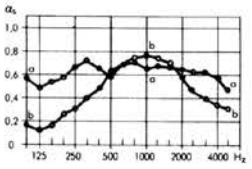
Postotak perforacije: 14,8%

Paratex-akustično vlakno
45 g/m²

a = odstojanje **400 mm**
b = odstojanje **60 mm**



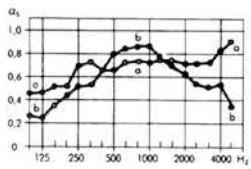
Stupnjevi apsorpcije zvuka bez mineralne vune



	125	250	500	1000	2000	4000 Hz	
α_s	0,49	0,67	0,58	0,66	0,65	0,59	a
	0,12	0,29	0,63	0,78	0,59	0,37	b

α **a = 0,68**
α **b = 0,61**

Stupnjevi apsorpcije zvuka s mineralnom vunom 20 mm, 0,4 kg/m²



	125	250	500	1000	2000	4000 Hz	
α_s	0,47	0,70	0,64	0,74	0,71	0,82	a
	0,25	0,52	0,86	0,87	0,62	0,54	b

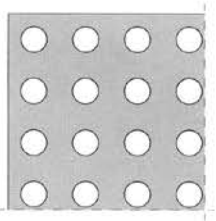
α **a = 0,71**
α **b = 0,72**

Ravna perforacija 12/25

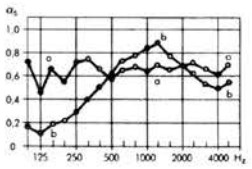
Postotak perforacije: 18,1%

Paratex-akustično vlakno
45 g/m²

a = odstojanje **400 mm**
b = odstojanje **60 mm**



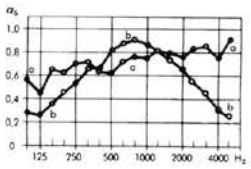
Stupnjevi apsorpcije zvuka bez mineralne vune



	125	250	500	1000	2000	4000 Hz	
α_s	0,46	0,72	0,58	0,66	0,69	0,61	a
	0,11	0,28	0,63	0,83	0,69	0,48	b

α **a = 0,68**
α **b = 0,65**

Stupnjevi apsorpcije zvuka s mineralnom vunom 20 mm, 0,4 kg/m²



	125	250	500	1000	2000	4000 Hz	
α_s	0,44	0,71	0,62	0,76	0,78	0,76	a
	0,24	0,53	0,82	0,86	0,67	0,30	b

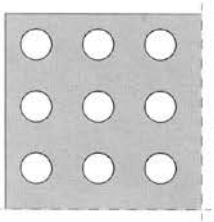
α **a = 0,73**
α **b = 0,76**

Ravna perforacija 15/30

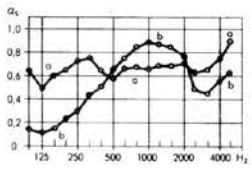
Postotak perforacije: 19,6%

Paratex-akustično vlakno
45 g/m²

a = odstojanje **400 mm**
b = odstojanje **60 mm**



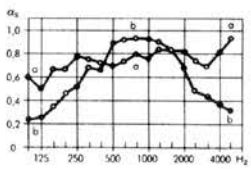
Stupnjevi apsorpcije zvuka bez mineralne vune



	125	250	500	1000	2000	4000 Hz	
α_s	0,49	0,73	0,59	0,66	0,72	0,78	a
	0,12	0,29	0,65	0,90	0,76	0,56	b

α **a = 0,69**
α **b = 0,68**

Stupnjevi apsorpcije zvuka s mineralnom vunom 20 mm, 0,4 kg/m²



	125	250	500	1000	2000	4000 Hz	
α_s	0,50	0,79	0,69	0,78	0,83	0,81	a
	0,24	0,52	0,89	0,93	0,66	0,39	b

α **a = 0,77**
α **b = 0,79**

$\alpha_{a,b}$ = aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti za 250 - 2000 Hz. Izmjereno prema DIN 52 212. Ocijenjeno prema VDI smjernicama 3755.

Perforirane ploče

Apsorpcija zvuka
Kontinuirana perforacija, tip - A

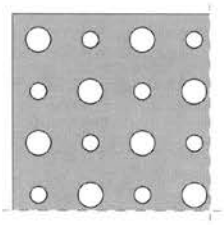
D 127

Raznolika perforacija 8/12/50

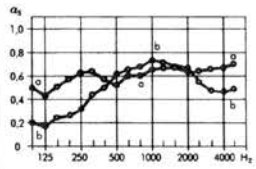
Postotak perforacije: 13,1%

Paratex-akustično vlakno
45 g/m²

a = odstojanje **400 mm**
b = odstojanje **60 mm**



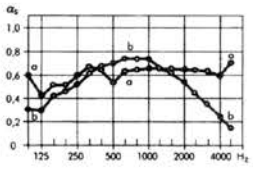
Stupnjevi apsorpcije zvuka bez mineralne vune



α_s	0,43	0,62	0,52	0,64	0,62	0,67	a
	0,17	0,31	0,61	0,73	0,63	0,46	b

α_a = **0,61**
α_b = **0,59**

Stupnjevi apsorpcije zvuka s mineralnom vunom 20 mm, 0,4 kg/m²



α_s	0,42	0,60	0,54	0,67	0,65	0,60	a
	0,28	0,55	0,71	0,75	0,55	0,23	b

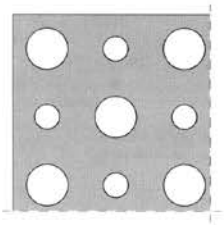
α_a = **0,64**
α_b = **0,66**

Raznolika perforacija 12/20/66

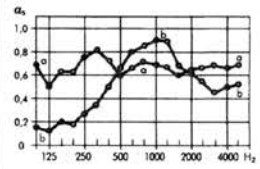
Postotak perforacije:19,6%

Paratex-akustično vlakno
45 g/m²

a = odstojanje **400 mm**
b = odstojanje **60 mm**



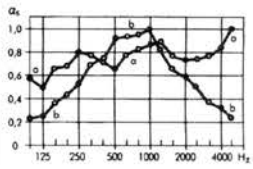
Stupnjevi apsorpcije zvuka bez mineralne vune



α_s	0,50	0,77	0,60	0,70	0,65	0,68	a
	0,12	0,27	0,64	0,90	0,62	0,50	b

α_a = **0,70**
α_b = **0,65**

Stupnjevi apsorpcije zvuka s mineralnom vunom 20 mm, 0,4 kg/m²



α_s	0,50	0,80	0,66	0,86	0,74	0,83	a
	0,23	0,54	0,91	1,00	0,59	0,33	b

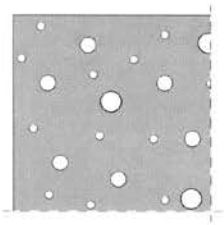
α_a = **0,78**
α_b = **0,79**

Nejednolika perforacija 8/15/20

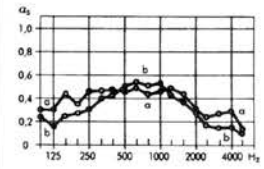
Postotak perforacije:5,2%

Paratex-akustično vlakno
45 g/m²

a = odstojanje **400 mm**
b = odstojanje **60 mm**



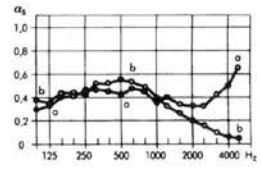
Stupnjevi apsorpcije zvuka bez mineralne vune



α_s	0,30	0,45	0,45	0,46	0,31	0,27	a
	0,16	0,31	0,48	0,53	0,28	0,17	b

α_a = **0,44**
α_b = **0,43**

Stupnjevi apsorpcije zvuka s mineralnom vunom 20 mm, 0,4 kg/m²



α_s	0,36	0,43	0,41	0,46	0,40	0,57	a
	0,33	0,48	0,51	0,50	0,26	0,10	b

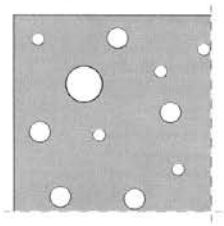
α_a = **0,44**
α_b = **0,47**

Nejednolika perforacija 12/20/35

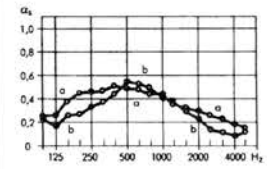
Postotak perforacije: 6,3%

Paratex-akustično vlakno
45 g/m²

a = odstojanje **400 mm**
b = odstojanje **60 mm**



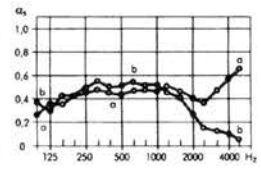
Stupnjevi apsorpcije zvuka bez mineralne vune



α_s	0,26	0,46	0,48	0,43	0,30	0,19	a
	0,17	0,32	0,56	0,40	0,21	0,11	b

α_a = **0,42**
α_b = **0,40**

Stupnjevi apsorpcije zvuka s mineralnom vunom 20 mm, 0,4 kg/m²



α_s	0,33	0,47	0,42	0,36	0,33	0,50	a
	0,37	0,45	0,56	0,40	0,20	0,06	b

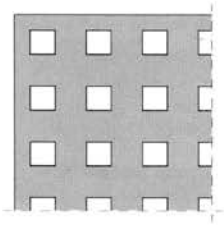
α_a = **0,41**
α_b = **0,43**

Kvadratna perforacija 12/27

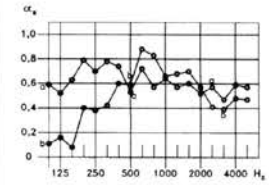
Postotak perforacije:19,7%

Paratex-akustično vlakno
45 g/m²

a = odstojanje **400 mm**
b = odstojanje **60 mm**



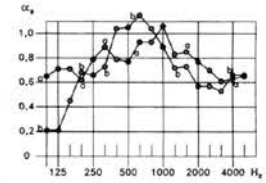
Stupnjevi apsorpcije zvuka bez mineralne vune



α_s	0,52	0,70	0,53	0,64	0,52	0,59	a
	0,16	0,38	0,59	0,66	0,57	0,48	b

α_a = **0,64**
α_b = **0,63**

Stupnjevi apsorpcije zvuka s mineralnom vunom 20 mm, 0,4 kg/m²



α_s	0,71	0,79	0,77	1,06	0,77	0,83	a
	0,21	0,66	1,05	0,89	0,57	0,66	b

α_a = **0,86**
α_b = **0,86**

$\alpha_{a,b}$ = aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti za 250 - 2000 Hz. Izmjereno prema DIN 52 212. Ocijenjeno prema VDI smjernicama 3755.

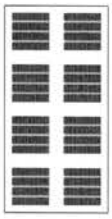
Užljebljene ploče

Apsorpcija zvuka tip - B4, B5, B6

D 128

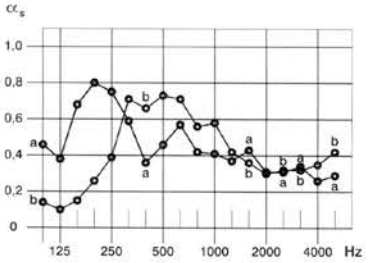
Užljebljena ploča tip - B4

Udio užljebljenja: 8,7 %
Paratex-akustično vlakno 45 g/m²



a = odstojanje **400 mm**
b = odstojanje **60 mm**

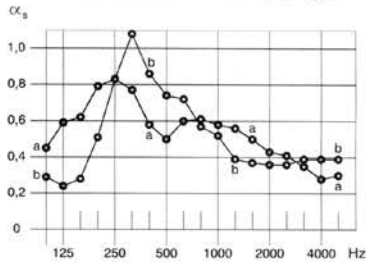
Stupnjevi apsorpcije zvuka bez mineralne vune



α_s	0,38	0,75	0,46	0,41	0,31	0,26	a
	0,10	0,39	0,73	0,58	0,30	0,35	b

α **a = 0,47**
α **b = 0,54**

Stupnjevi apsorpcije zvuka s mineralnom vunom 20 mm, 0,4 kg/m²

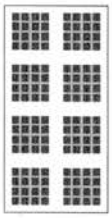


α_s	0,59	0,83	0,50	0,58	0,43	0,28	a
	0,24	0,83	0,74	0,52	0,36	0,39	b

α **a = 0,59**
α **b = 0,64**

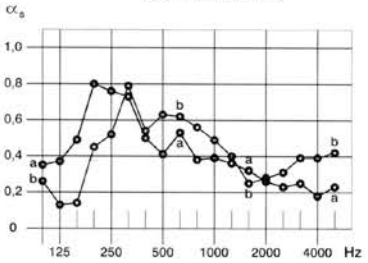
Užljebljena ploča tip - B5

Udio užljebljenja: 7,0 %
Paratex-akustično vlakno 45 g/m²



a = odstojanje **400 mm**
b = odstojanje **60 mm**

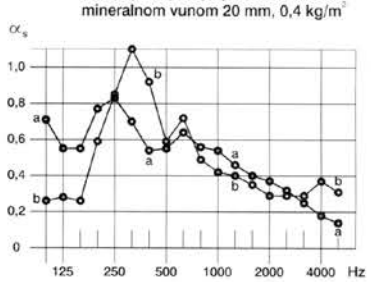
Stupnjevi apsorpcije zvuka bez mineralne vune



α_s	0,37	0,76	0,41	0,39	0,26	0,18	a
	0,13	0,52	0,63	0,49	0,28	0,39	b

α **a = 0,46**
α **b = 0,51**

Stupnjevi apsorpcije zvuka s mineralnom vunom 20 mm, 0,4 kg/m²



α_s	0,55	0,83	0,55	0,54	0,37	0,18	a
	0,28	0,85	0,59	0,42	0,29	0,37	b

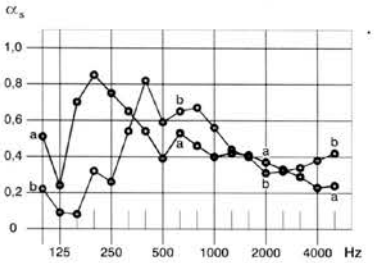
α **a = 0,55**
α **b = 0,61**

Užljebljena ploča tip - B6

Udio užljebljenja: 9,8 %
Paratex-akustično vlakno 45 g/m²

a = odstojanje **400 mm**
b = odstojanje **60 mm**

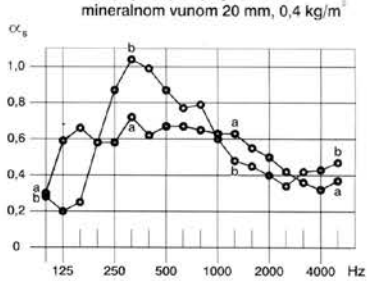
Stupnjevi apsorpcije zvuka bez mineralne vune



α_s	0,24	0,75	0,39	0,40	0,37	0,23	a
	0,09	0,26	0,59	0,56	0,31	0,38	b

α **a = 0,49**
α **b = 0,52**

Stupnjevi apsorpcije zvuka s mineralnom vunom 20 mm, 0,4 kg/m²



α_s	0,59	0,58	0,67	0,63	0,50	0,32	a
	0,20	0,87	0,87	0,60	0,40	0,43	b

α **a = 0,62**
α **b = 0,73**

$\alpha_{a,b}$ = aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti za 250 - 2000 Hz. Izmjereno prema DIN 52 212. Ocijenjeno prema VDI smjernicama 3755.

Koeficijenti apsorpcije (α_s)

R.br.	Materijal	Koeficijent apsorpcije zvuka α_s za središnje frekvencije (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	mramor, kamene pločice	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
2	beton (neožbukan), gips obloga	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
3	vidljivi beton - grub	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
4	vidljivi beton - gladak	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05
5	vapneno-cementna žbuka	0,03	0,03	0,02	0,04	0,05	0,05
6	zaglađena žbuka	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06
7	zid od opeke - neožbukan	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06
8	brušena daska - grubo	0,10	0,22	0,52	0,49	0,50	0,73
9	brušena daska - glatka	0,07	0,14	0,24	0,17	0,18	0,21
10	plinobetonski elementi - neožbukani	0,12	0,13	0,14	0,15	0,23	0,34
11	gipskartonske ploče – pune d=12,5 mm na stropu (odmak a=60 mm)	0,25	0,12	0,07	0,05	0,05	0,05
12	gipskartonske ploče – perforirane 6/18 na stropu (odmak a=50 mm) s akustik filcom	0,59	0,84	0,80	0,72	0,51	0,29
13	akustik žbuka	0,05	0,15	0,40	0,55	0,61	0,68
14	drveni parket – zalijepljen na podlogu	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,10
15	linoleum – zalijepljen na bet. podlogu	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
16	tepih do 6 mm	0,02	0,04	0,06	0,20	0,30	0,35
17	tepih do 7-10 mm	0,04	0,07	0,12	0,30	0,50	0,80
18	prozor – IZO staklo	0,28	0,20	0,10	0,06	0,03	0,02
19	prozor – staklena fasada	0,12	0,08	0,05	0,046	0,03	0,02
20	vrata – drvo lakirano	0,10	0,08	0,06	0,05	0,05	0,05
21	kino zid za projekcije	0,10	0,10	0,20	0,30	0,50	0,60
22	veliki otvor (najmanja dimenzija >1m)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
23	pojedinačna osoba (6m^2) - sjedeća	0,12	0,18	0,35	0,56	0,68	0,74
24	pojedinačna osoba (6m^2) - stojeća	0,12	0,19	0,42	0,66	0,86	0,94
25	jednostavna tapecirana stolica (tekstil)	0,15	0,25	0,30	0,35	0,40	0,40

(Izvor: Willems W. M., Dinter S., Schild K.. 2006: 9.24 – 9.46)

Literatura

Charles M. Salter Associates Inc. (1998.), *Acoustics - Architecture, Engineering, The Environment*, William Stout Publishers, San Francisco, ISBN0-9651144-6-5

Fischer H. M., Jenisch R., Klopfer H., Freymuth H., Richter E., Petzold K. (1997.), *Lehrbuch der Bauphysik: Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima*, B. G. Teubner, Stuttgart, ISBN 3-519-35014-9

Freymuth H., Jenisch R., Klopfer H., Petzold K., Stohrer, Fischer H. M., Richter E., (2002.), *Lehrbuch der Bauphysik: Schall – Wärme – Feuchte – Licht -Brand - Klima*, B. G. Teubner, Stuttgart, ISBN 3-519-45014-3

Egan M. David: (1988.), *Architectural Acoustics*, McGraw-Hill, Inc. United States of America, ISBN 0-07-019111-5

Fasold W.; Veres E.: (1998.), *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, Bauverlag GmbH, Wiesbaden – Berlin, ISBN 3-345-00549-2

Göggel M. (1987.), *Bauphysik für Baupraktiker*, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, ISBN 3-7625-2543-9

Gösele K., Schüle W. (1985.), *Schall, Wärme, Feuchte: Grundlagen, Erfahrungen und praktische Hinweise für den Hochbau*, Bauverlag GmbH, Wiesbaden – Berlin

Ingemansson S., Elvhammar, H., (1995.), *Zaštita od buke: načela i primjena*, Zavod za istraživanje i razvoj sigurnosti, Zagreb, ISBN 953-96031-7-X

Leslie L. Doelle (1972.), *Environmental Acoustics*, McGraw-Hill Book Company, United States of America, 07-017342-7

Jelaković T.. (1962.), *Arhitektonska akustika*, Tehnička knjiga, Zagreb

Schulz P. (1993.), *Schallschutz, Wärmeschutz, Feuchteschutz, Brandschutz im Innenausbau*, Deutsche Verlag - Anstalt GmbH, Stuttgart, ISBN 3-421-02995-4

Šimetin V. (1983.), *Građevinska fizika*, Fakultet građevinskih znanosti, Zagreb

Šmidihen E. (1983.), *Zvučna izolacija dvostrukih pregradnih zidova*, Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

Willems, W. M., Dinter, S., Schild, K.: (2006.), *Vieweg Handbuch Bauphysik, Teil 2*, Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage, Wiesbaden, ISBN 10 3-8348-0188-7

*** (1963.), *Tehnička enciklopedija - svezak 1., (Akustika)*, Leksikografski zavod "Miroslav Krleža", Zagreb

*** (1973.), *Tehnička enciklopedija - svezak 4., (Elektroakustika)*, Leksikografski zavod "Miroslav Krleža", Zagreb

*** (2004.), *BM – Bau- und Möbelschreiner, Fachreihe für Schreiner, Bauphysik*, Konradin Verlag Robert Kohlhammer GmbH, Stuttgart

*** (2009.), *Bauphysik Kalender 2009*, Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin, ISBN 978-3-433-02910-7

DIN – Taschenbuch 35 (2007.), *Schallschutz 1 – Anforderungen, Nachweise, Berechnungsverfahren,* Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, ISBN-978-3-410-16526-2

DIN 4109 (1989.)*, Schallschutz im Hochbau – Anforderungen und Nachweise,* Deutsches Institut für Normung

DIN 4109 Beiblatt 1 (1989.), *Schallschutz im Hochbau – Ausführungsbeispiel und Rechenverfahren*, Deutsches Institut für Normung

DIN 4109 Beiblatt 2 (1989.), *Schallschutz im Hochbau – Hinweise für Planung und Ausführung, Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz, Empfehlungen für den Schallschutz im eigang Wohn- oder Arbeitsbereich*, Deutsches Institut für Normung

DIN 4109 Beiblatt 1/A1 (2003.), *Schallschutz im Hochbau – Ausführungsbeispiel und Rechenverfahren; Änderung A1*, Deutsches Institut für Normung

VDI 2719 (1987.), *Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen*, VDI – Verlag GmbH, Düsseldorf

HRN U.J6.201 (1989.), *Akustika u zgradarstvu - Tehnički uvjeti za projektiranje i građenje zgrada*

*** (2009.), *Zakon o zaštiti od buke*, Narodne novine broj 30/2009., Zagreb
*** (2013.), *Zakon o gradnji*, Narodne novine broj 153/2013., Zagreb

*** (2004.), *Pravilnik o najvišim dopuštenim razinama buke u sredini u kojoj ljudi rade i borave*, Narodne novine broj 145/2004., Zagreb

*** www.pinterest.com
*** www.keywordteam.net

Primjeri iz izvještaja o ispitivanju zvučne izolacije pregrada, Građevinski institut, Zagreb

Tehnički detalji i upute proizvođača: - Knauf (www.knauf.hr)
- Schoeck (www.schoeck.hr)