

Akustička obrada prostorija - efekti

➤ Akustičkom obradom radnih, poslovnih ili stambenih prostorija, odnosno ugradnjom apsorpcionih materijala:

- ⊕ Povećava se apsorpciona površina prostorije (ukupna apsorpcija prostorije).

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i$$

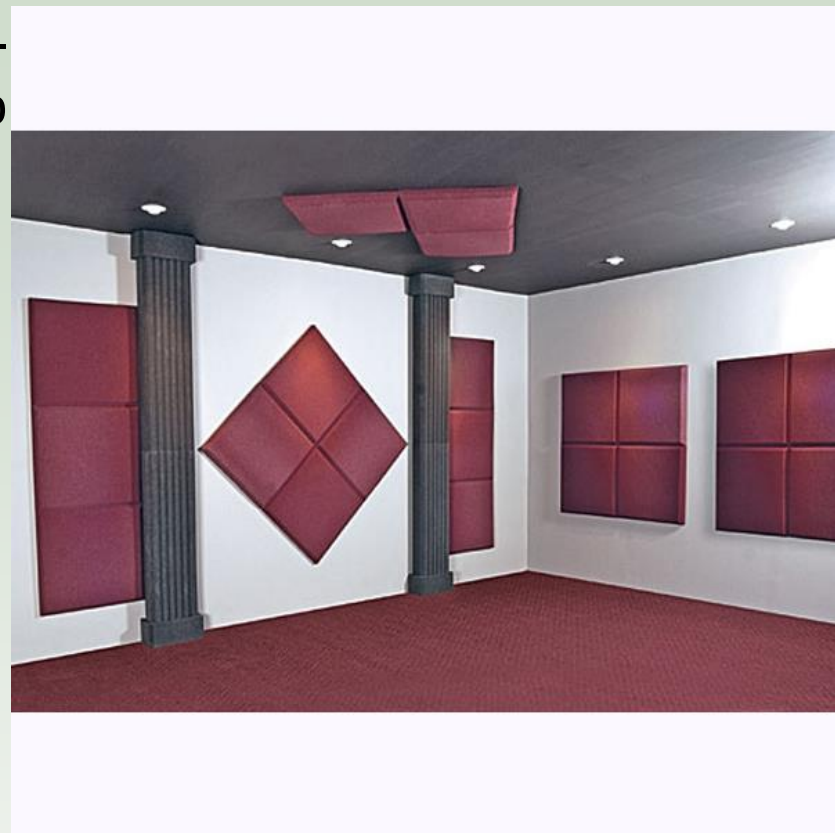
- ⊕ Smanjuje se efekat talasa reflektovanih od graničnih površina prostorije

$$I_r = \frac{4P_a}{A} (1 - \bar{\alpha})$$

- ⊕ Smanjuje se vreme reverberacije

$$T_R = 0.162 \frac{V}{A}$$

- ⊕ **Smanjuje se nivo buke u prostoriji kao krajni efekat akustičke obrade!**



Akustička obrada prostorija - efekti

PRE AKUSTIČKE OBRADE POSLE AKUSTIČKE OBRADE

⊕ Apsorpciona površina:

$$\mathbf{A} \leftarrow \boxed{A' > A} \rightarrow \mathbf{A'}$$

⊕ Vreme reverberacije:

$$T_R = 0.162 \frac{V}{A}$$

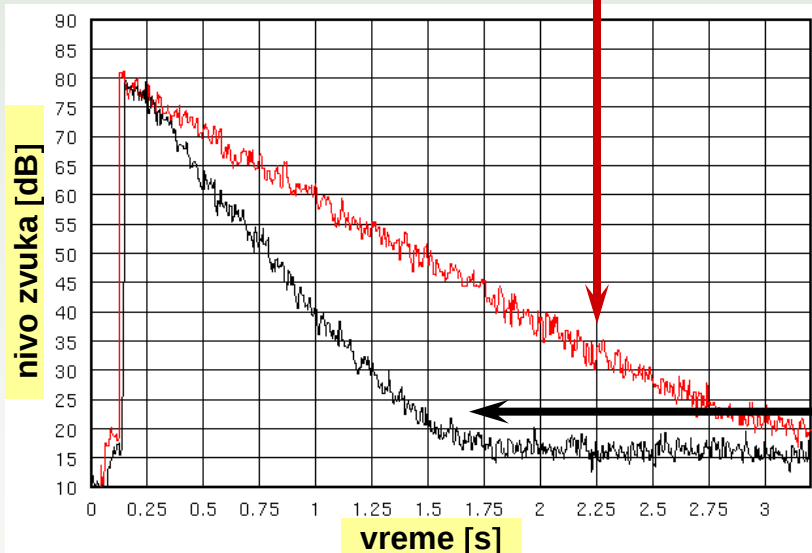
$$T'_R < T_R$$

$$T'_R = 0.162 \frac{V}{A'}$$

⊕ Zadržavanje talasa u prostoriji:

**PRAZNA
PROSTORIJA**

**PROSTORIJA SA
TEPIHOM**



Akustička obrada prostorija - efekti

PRE AKUSTIČKE OBRADE POSLE AKUSTIČKE OBRADE

⊕ Intenzitet zvuka:

1.

⊕ Smanjenje nivoa buke:

$$L' < L \Rightarrow \Delta L < 0$$

⊕ Intenzitet zvuka:

2.

⊕ Smanjenje nivoa buke:

$$I = \frac{4P_a}{A}$$

$$A' > A \Rightarrow \frac{A}{A'} < 1$$
$$\Delta L < 0$$

$$I' = \frac{4P_a}{A'}$$

$$\Delta L = L' - L = 10 \log \frac{I'}{I_0} - 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{I'}{I} = 10 \log \frac{A}{A'}$$

POVEĆANJEM APSORPCIONE POVRŠINE PROSTORIJE
NIVO BUKE U PROSTORIJI SE SMANJUJE !

$$I = \frac{25P_a T_R}{V}$$

$$T'_R < T_R \Rightarrow \frac{T'_R}{T_R} < 1$$
$$\Delta L < 0$$

$$I' = \frac{25P_a T'_R}{V}$$

$$\Delta L = L' - L = 10 \log \frac{I'}{I_0} - 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{I'}{I} = 10 \log \frac{T'_R}{T_R}$$

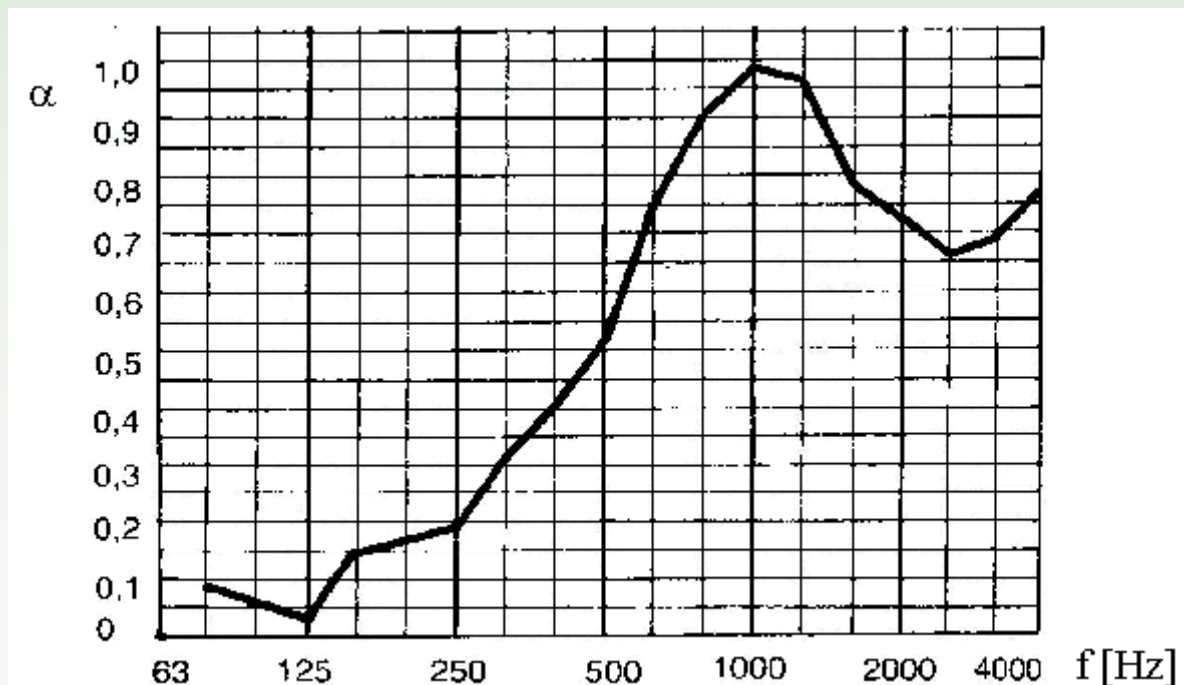
SMANJENJEM VREMENA REVERBERACIJE NIVO BUKE U
PROSTORIJI SE SMANJUJE !

Akustička obrada prostorija - materijali

- Za akustičku obradu prostorija se koriste materijali koji mogu da smanje refleksiju zvučnih talasa od graničnih zidova prostorije apsorbovanjem dela energije zvuka koja padne na zid prostorije.

Takvi materijali se nazivaju apsorpcioni materijali i oni se karakterišu koeficijentom apsorpcije zvuka kao frekvencijski zavisnom veličinom.

- Koeficijent apsorpcije zvuka definiše sposobnost nekog materijala da apsorbuje i transformiše deo energije zvuka u drugi oblik (najčešće toplotni).



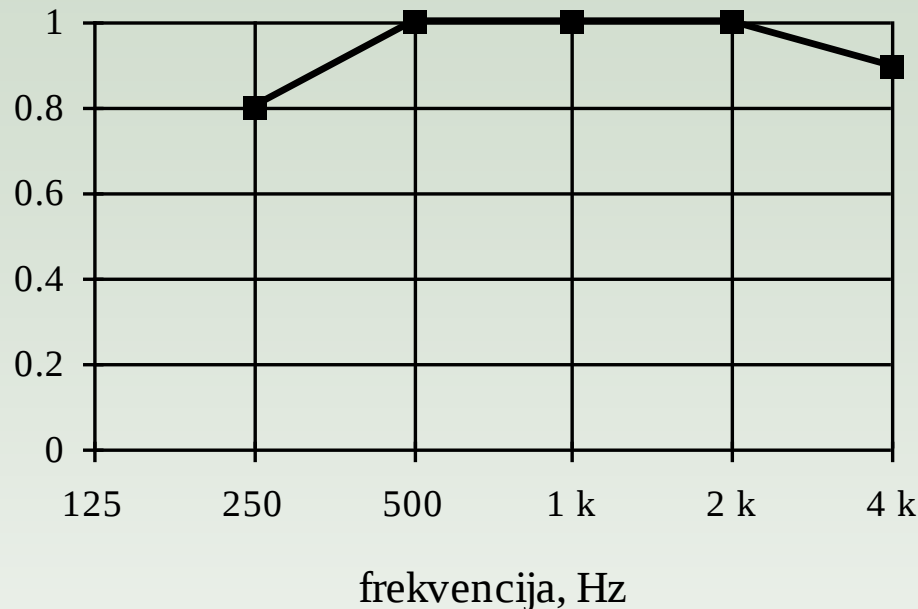
$$\alpha = \frac{P_{\alpha}}{P_u}$$

Akustička obrada prostorija - materijali

- Pored frekvencijske krive koeficijenta apsorpcije zvuka (vrednosti koeficijenta apsorpcije zvuka u funkciji frekvencije), koristi se i izražavanje koeficijenta apsorpcije zvuka jednim brojem.
- **Američki standard ASTM C423-90a** - Veličina koja se uglavnom koristi pri proračunima efekta akustičke obrade za prostorije namenjene za govor naziva se koeficijent smanjenja buke (Noise Reduction Coefficient - NRC).
- NRC se izračunava kao srednja vrednost koeficijenata apsorpcije u oktavnim opsezima centralnih frekvencija od 250 Hz do 2000 Hz, zaokružena na najbližih 0.05.
- **Standard SRPS EN ISO 11654** utvrđuje metodu za pretvaranje frekvencijski zavisne vrednosti koeficijenta apsorpcije zvuka u jednobrojnu veličinu, tzv. ponderisani koeficijent apsorpcije.
- Pre toga je potrebno terčne vrednosti koeficijenta apsorpcije zvuka pretvoriti u oktavne vrednosti $\alpha_{pi} = \frac{(\alpha_{i1} + \alpha_{i2} + \alpha_{i3})}{3}$ kao aritmetička srednja vrednost.
- Oktavne vrednosti se izračunavaju na drugu decimalu i zaokružuju u koracima od 0.05 i maksimizira na vrednost 1.00 za srednje vrednosti koje premašuju tu vrednost

Akustička obrada prostorija - materijali

- Ponderisana vrednost koeficijenta apsorpcije izračunava se na osnovu oktavnih vrednosti koeficijenta apsorpcije i referentne krive.



- Referentna kriva se pomera u koracima od 0.05 ka proračunatim oktavnim vrednostima koeficijenata apsorpcije dok suma nepovoljnih odstupanja ne postane manja ili jednaka 0.10.

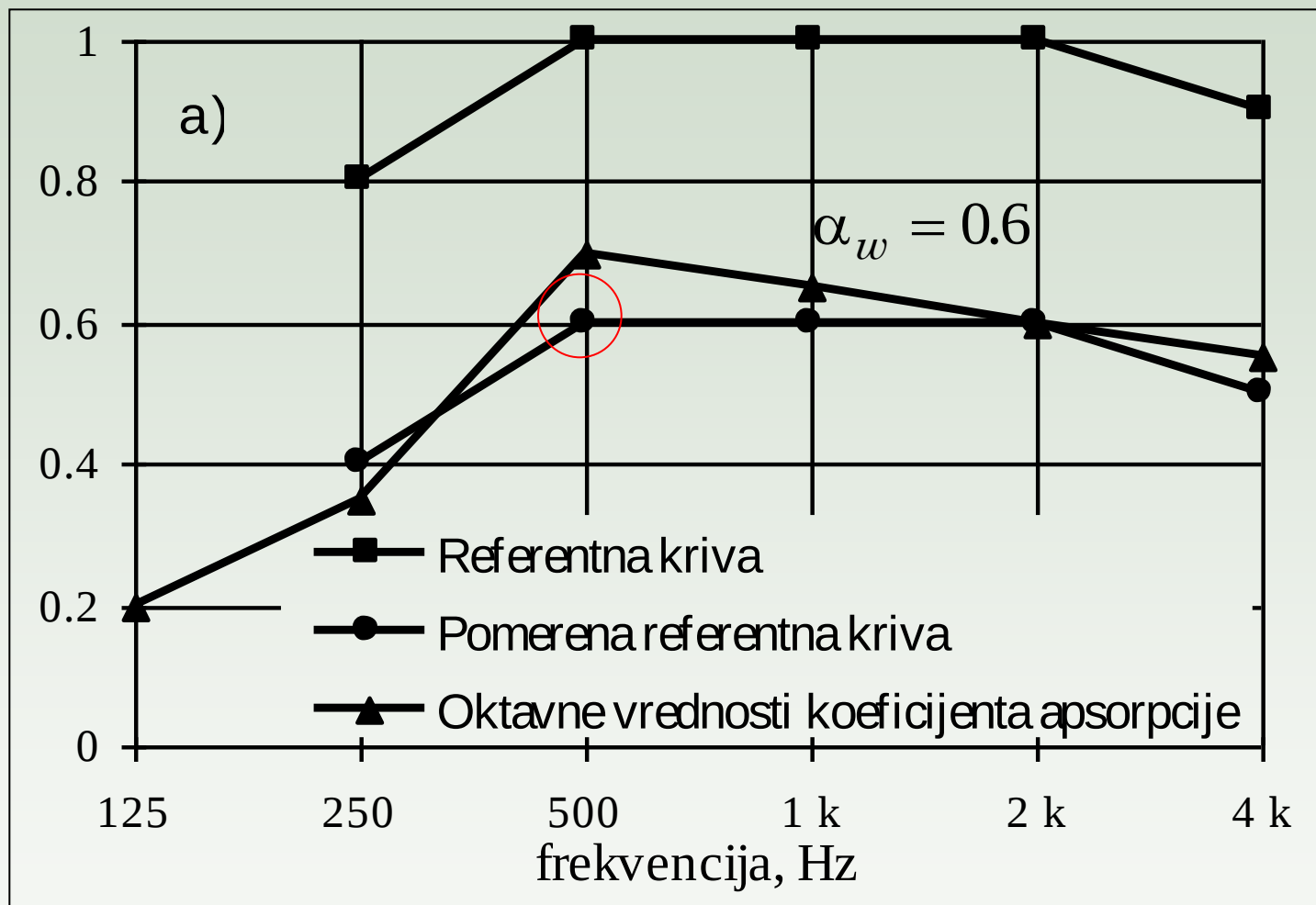
Tada je ponderisani koeficijent apsorpcije jednak vrednosti pomerene referentne krive na 500 Hz

Akustička obrada prostorija - materijali

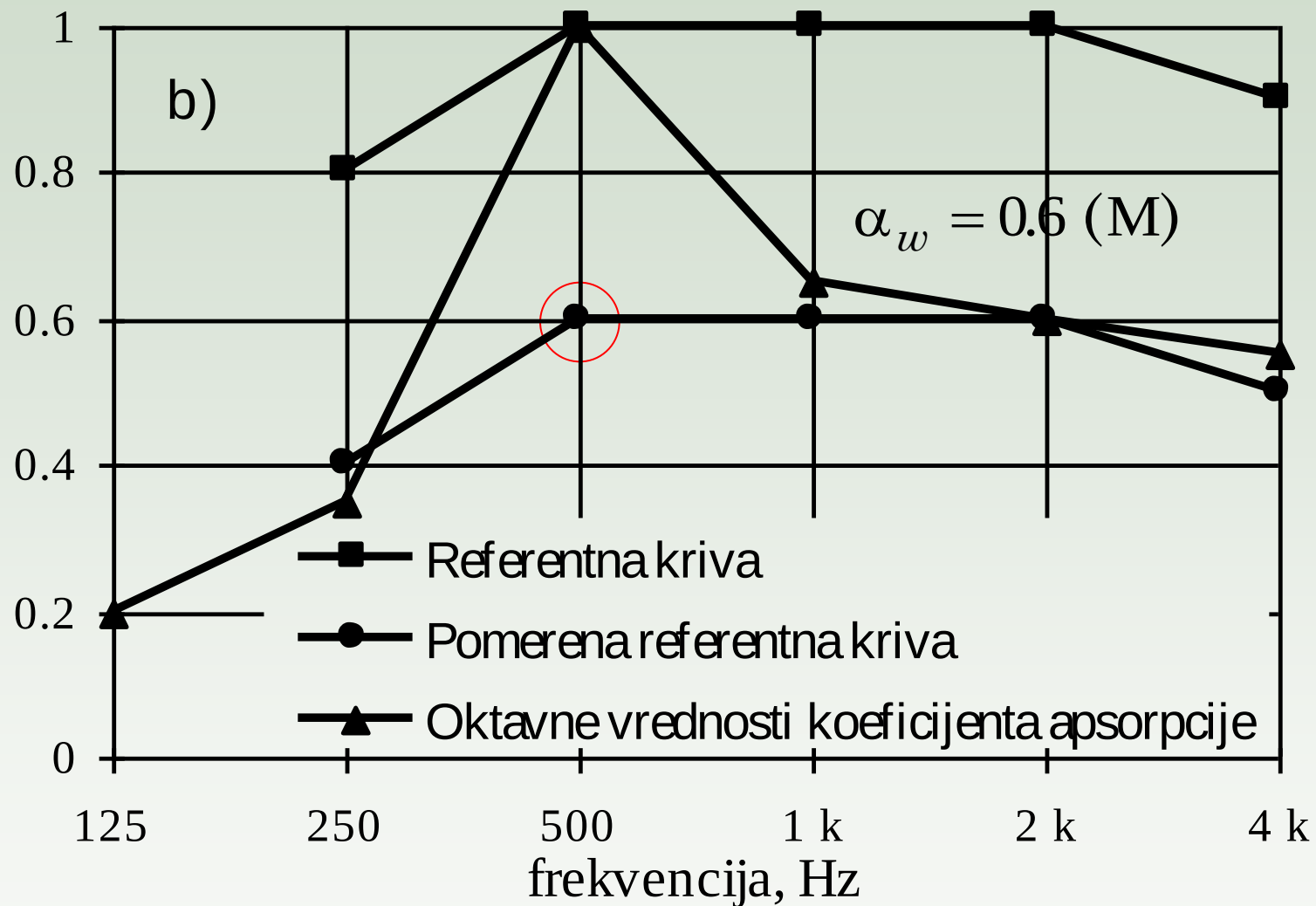
- Dodatno se koristi i indikator oblika krive.
- Indikator oblika krive ukazuje na činjenicu da oktavne vrednosti koeficijenta apsorpcije na jednoj ili više frekvencija premašuju vrednosti pomerene referentne krive za više od 0.25.
- Za taj deo frekvencijskog opsega treba koristiti kompletne vrednosti koeficijenta apsorpcije
- Ako se prekoračenje javlja na 250 Hz koristi se oznaka L koja se dodaje vrednosti ponderisanog koeficijenta apsorpcije.

Za prekoračenja koja se javljaju u opsegu od 500 do 1000 Hz koristi se oznaka M a za prekoračenja u opsegu od 2000 do 4000 Hz koristi se oznaka H.

Akustička obrada prostoriya - materijali



Akustička obrada prostoriya - materijali



Akustička obrada prostorija - materijali

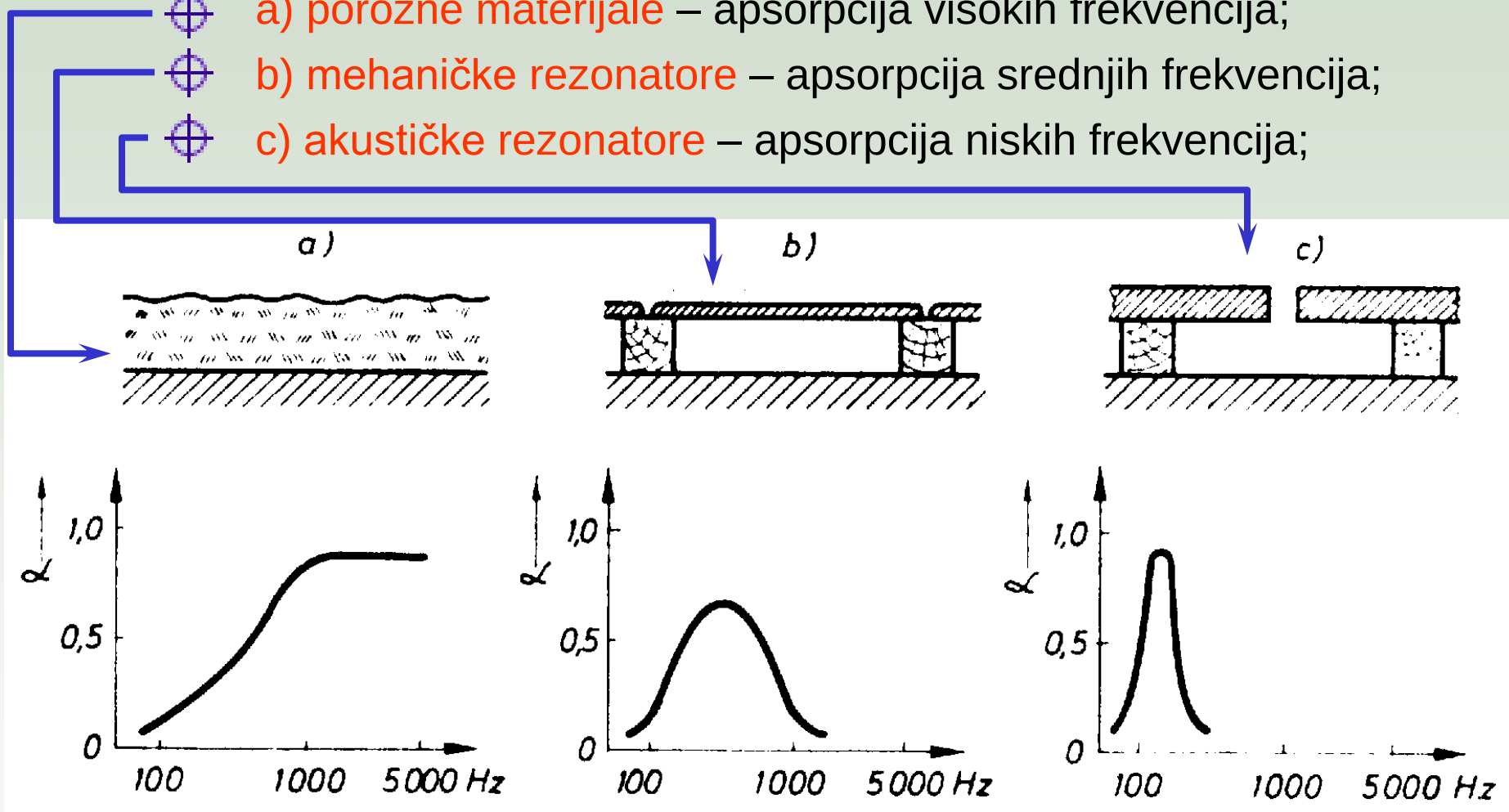
- Standard utvrđuje i klasifikaciju apsorpcionih materijala na osnovu vrednosti ponderisanog koeficijenta apsorpcije u 6 klasa (A, B, C, D, E i van klase).

Klasa zvučne apsorpcije	Vrednost ponderisanog koeficijenta apsorpcije
A	0.90; 0.95; 1.00
B	0.80; 0.85
C	0.60; 0.65; 0.70; 0.75
D	0.30; 0.35; 0.40; 0.45; 0.50; 0.55
E	0.25; 0.20; 0.15
Van klase	0.10; 0.05; 0.00

Akustička obrada prostoriya - materijali

➤ Akustički materijali koji se koriste za akustičku obradu prostoriya mogu se podeliti na:

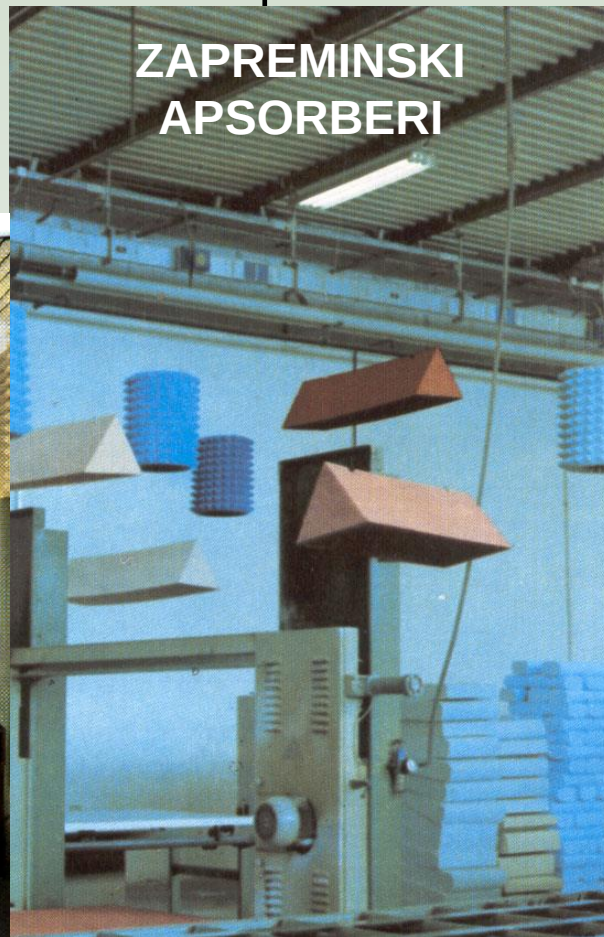
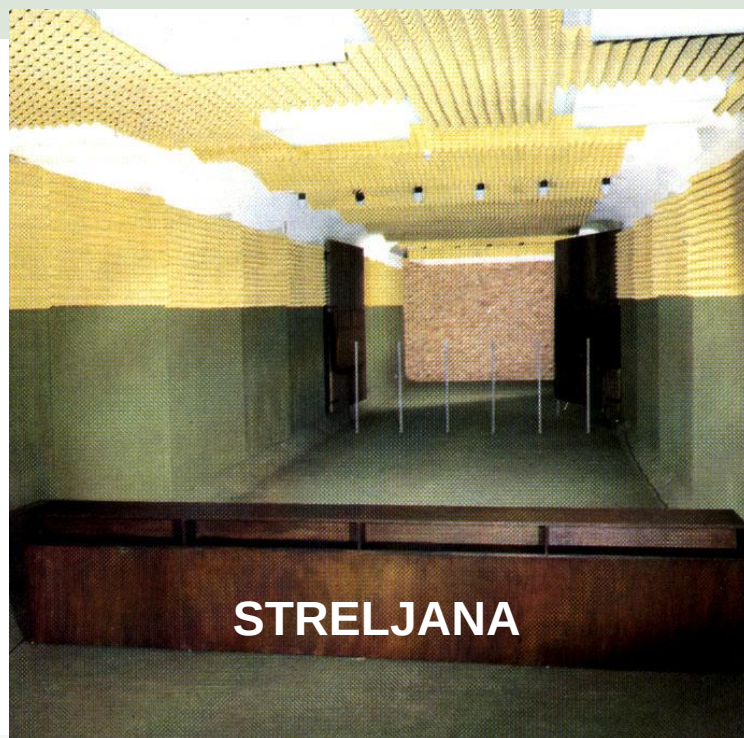
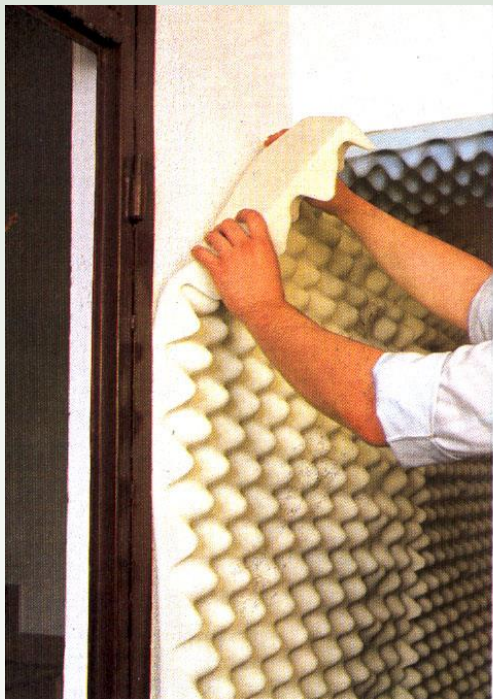
- ⊕ a) porozne materijale – apsorpcija visokih frekvencija;
- ⊕ b) mehaničke rezonatore – apsorpcija srednjih frekvencija;
- ⊕ c) akustičke rezonatore – apsorpcija niskih frekvencija;



Akustička obrada prostorija - materijali

➤ **Porozni materijali** su prožeti porama i sitnim kanalima (tekstilni materijali, staklena ili mineralna vuna, faser- ili heraklit ploče, ...). Apsorpcija se ostvaruje prodiranjem zvučne energije u pore, gde se zvučna energija usled trenja pretvara u toplotnu. Izrađuju se u obliku površinskih i zapremiskih apsorbera i mogu biti ravni ili reljefni.

POVRŠINSKI APSORBERI

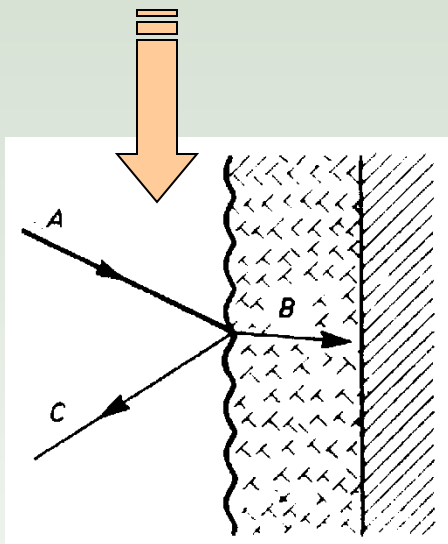


Akustička obrada prostoriya - materijali

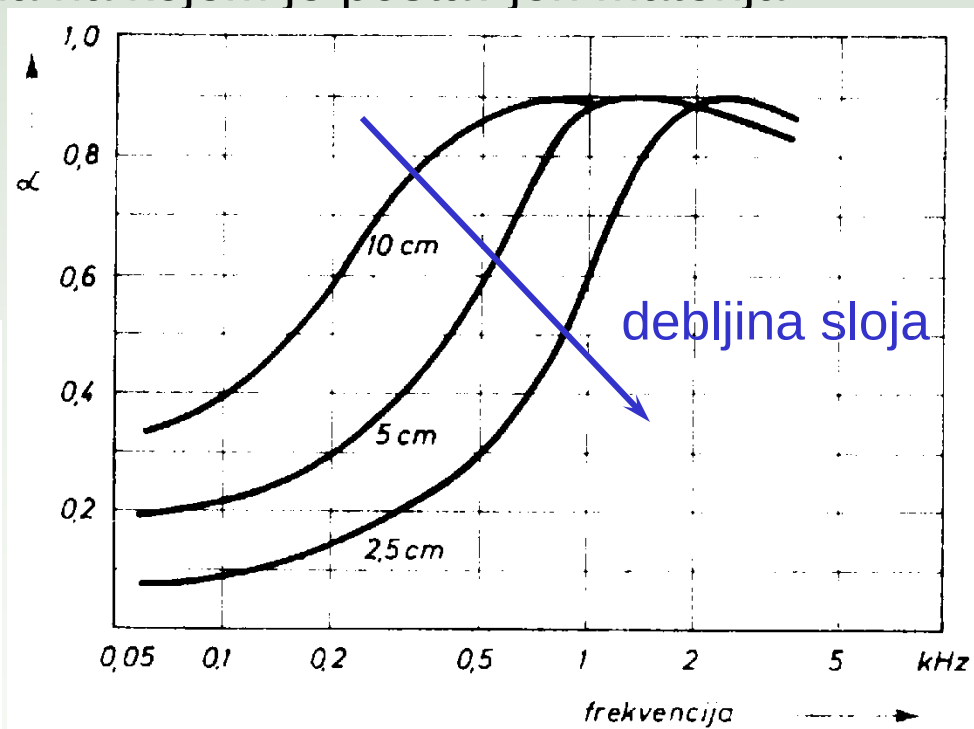
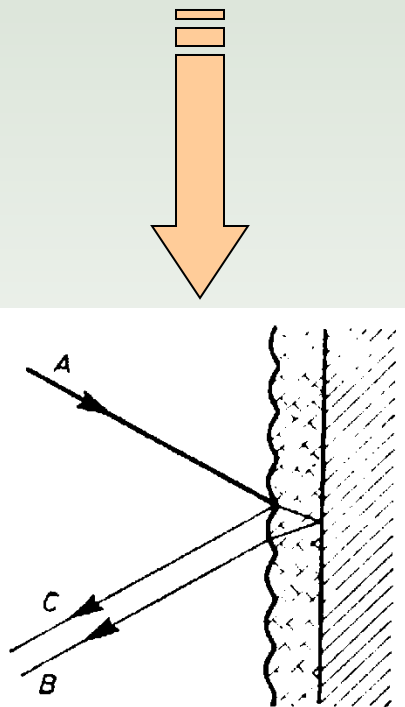
➤ Koeficijent apsorpcije poroznih materijala zavisi od:

⊕ debljine sloja ⊕ frekvencije ⊕ otpora strujanja ⊕ poroznosti

Materijal veće debljine apsorbuje veću količinu zvučne energije zbog dužeg puta zvučnih talasa kroz materijal.

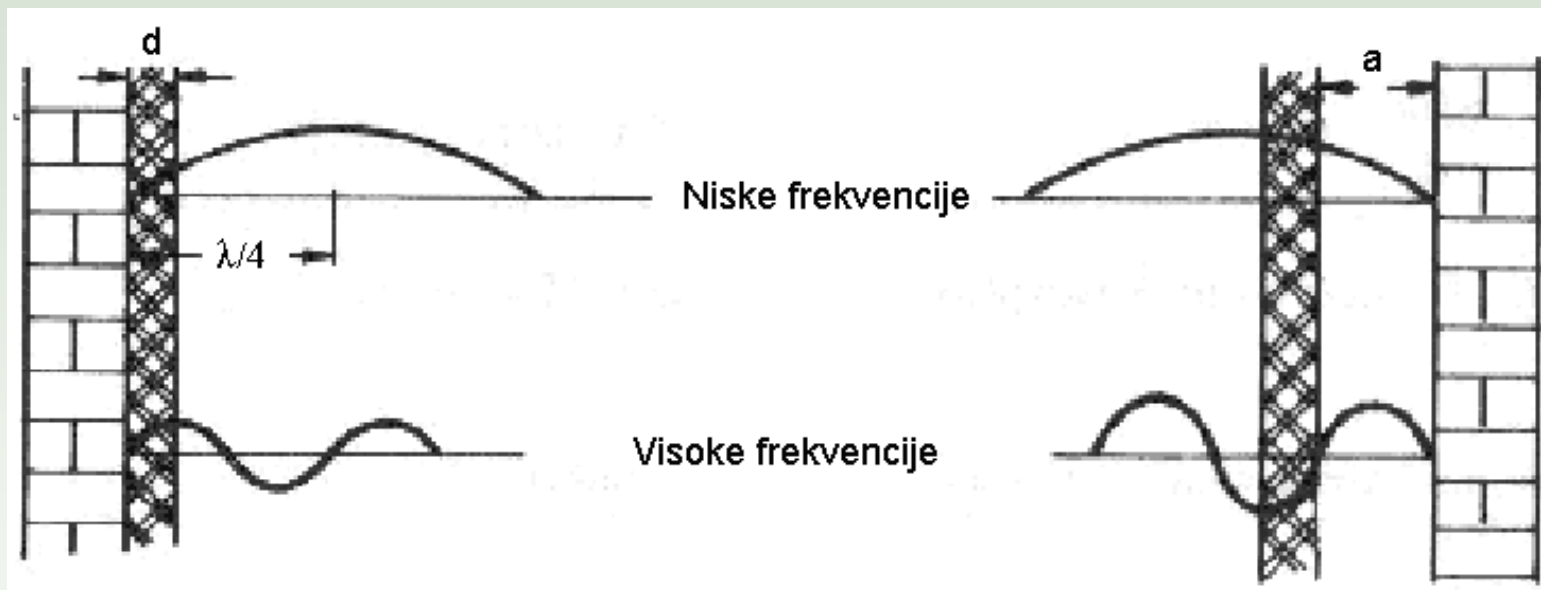


Kod tanjih materijala pojavljuje se i efekat refleksije talasa od zida na kojem je postavljen materijal.



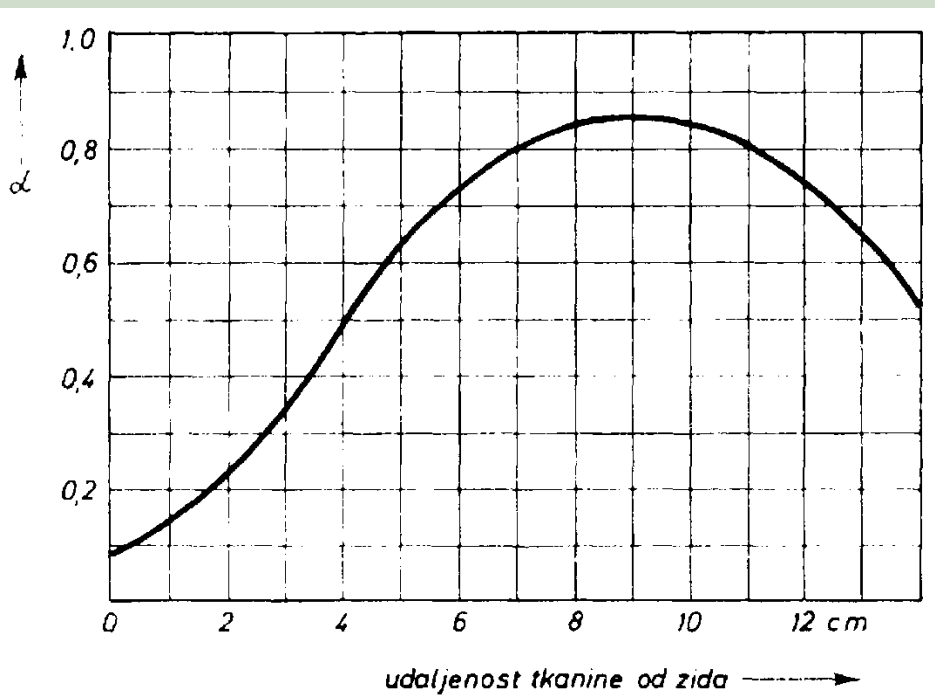
Akustička obrada prostoriya - materijali

- Koeficijent apsorpcije zvuka poroznih materijala je mali na niskim frekvencijama zbog odnosa talasnih dužina prema dimenzijama pora.
- U praksi se može koeficijent apsorpcije povećati tako što se porozni materijali odmiču od zida

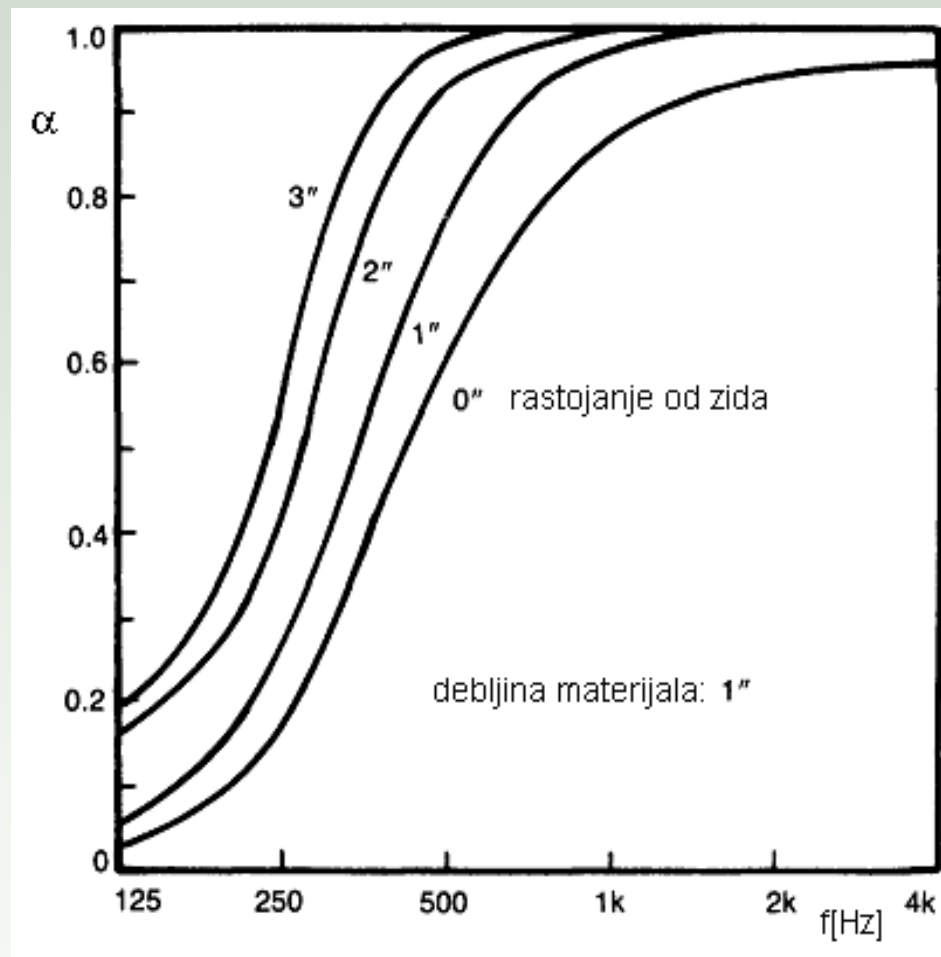


- Maksimalni efekat se postiže postavljanjem materijala na rastojanju $\frac{1}{4}$ talasne dužine od zida, a minimalni na rastojanju $\frac{1}{2}$ talasne dužin od zida.

Akustička obrada prostoriya - materijali



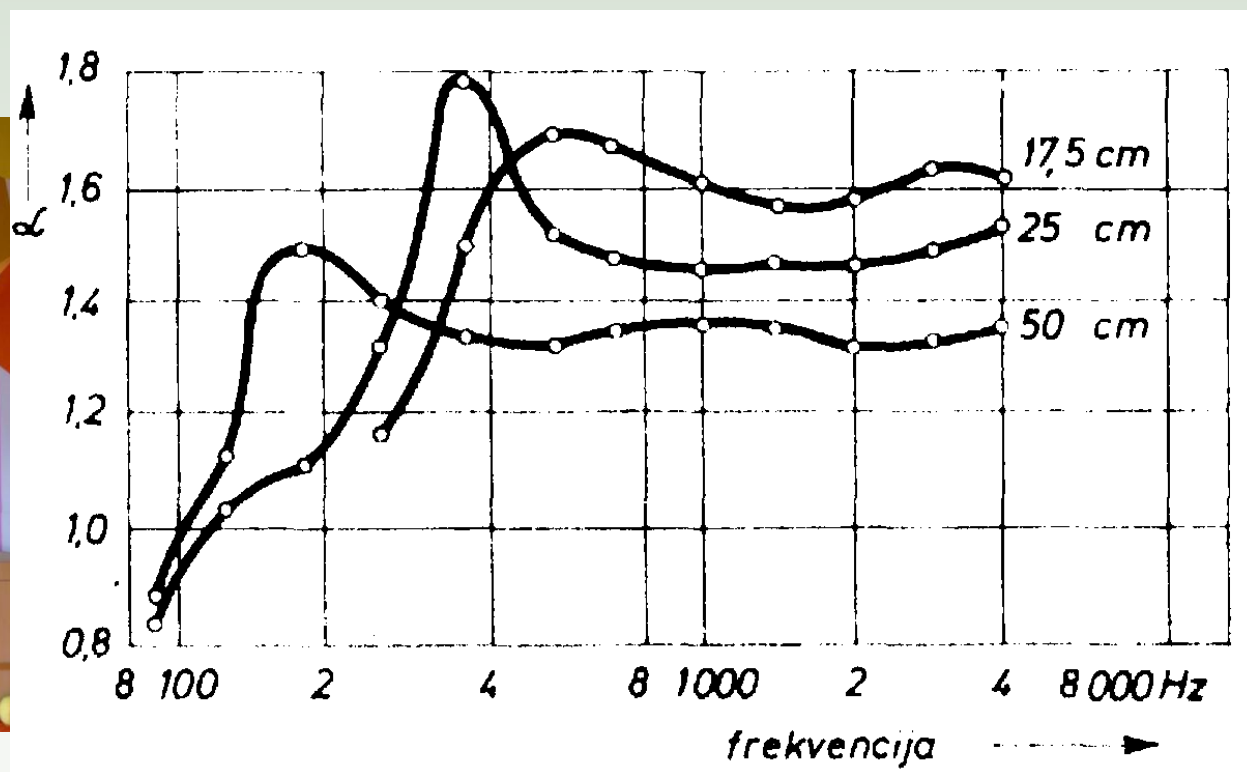
Zavisnost koeficijenta apsorpcije
zvuka od rastojanja do zida



Promena frekvencijske karakteristike
odmicanjem materijala od zida

Akustička obrada prostoriija - materijali

- Kod zapreminskih apsorbera koji su obešeni, koeficijent apsorpcije zvuka može imati vrednosti znatno veće od jedinice zbog dodatnog efekta difrakcije koji se javlja.
- Frekvencijska karakteristika je znatno zavisna od njihovih dimenzija



Akustička obrada prostorijske materijali

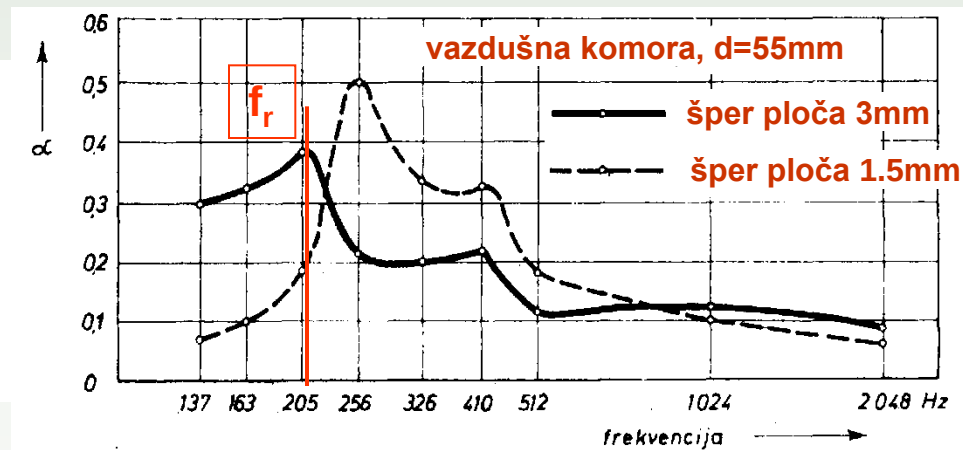
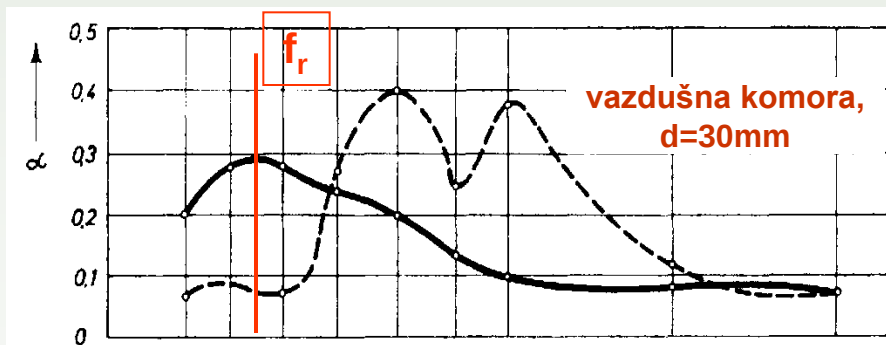
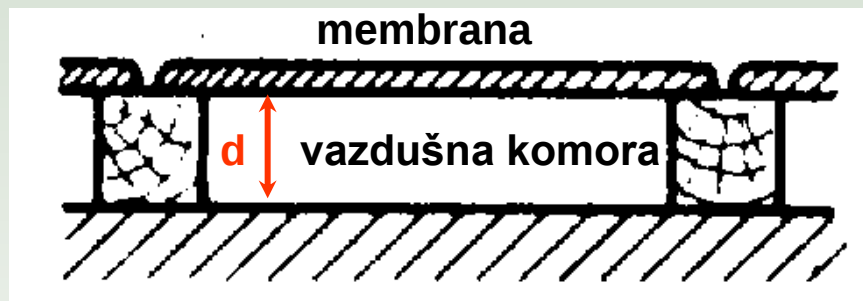
➤ **Mehanički rezonatori** su apsorpcioni sistemi koji se sastoje od membrane (tanka drvena, metalna, staklena, kožna, plastična) pričvršene na zid preko nosača i vazdušne komore ili komore ispunjene poroznim materijalom koja se nalazi iza ploče. Membrana vibrira pod uticajem zvučnih talasa pri čemu se troši zvučna energija.

➤ Najveći gubici energije nastaju pri rezonansi.

$$f_r = 600 \sqrt{\frac{1}{M \cdot d}}$$

M – površinska masa membrane [kg/m²]

d – debljina vazdušne komore [cm]

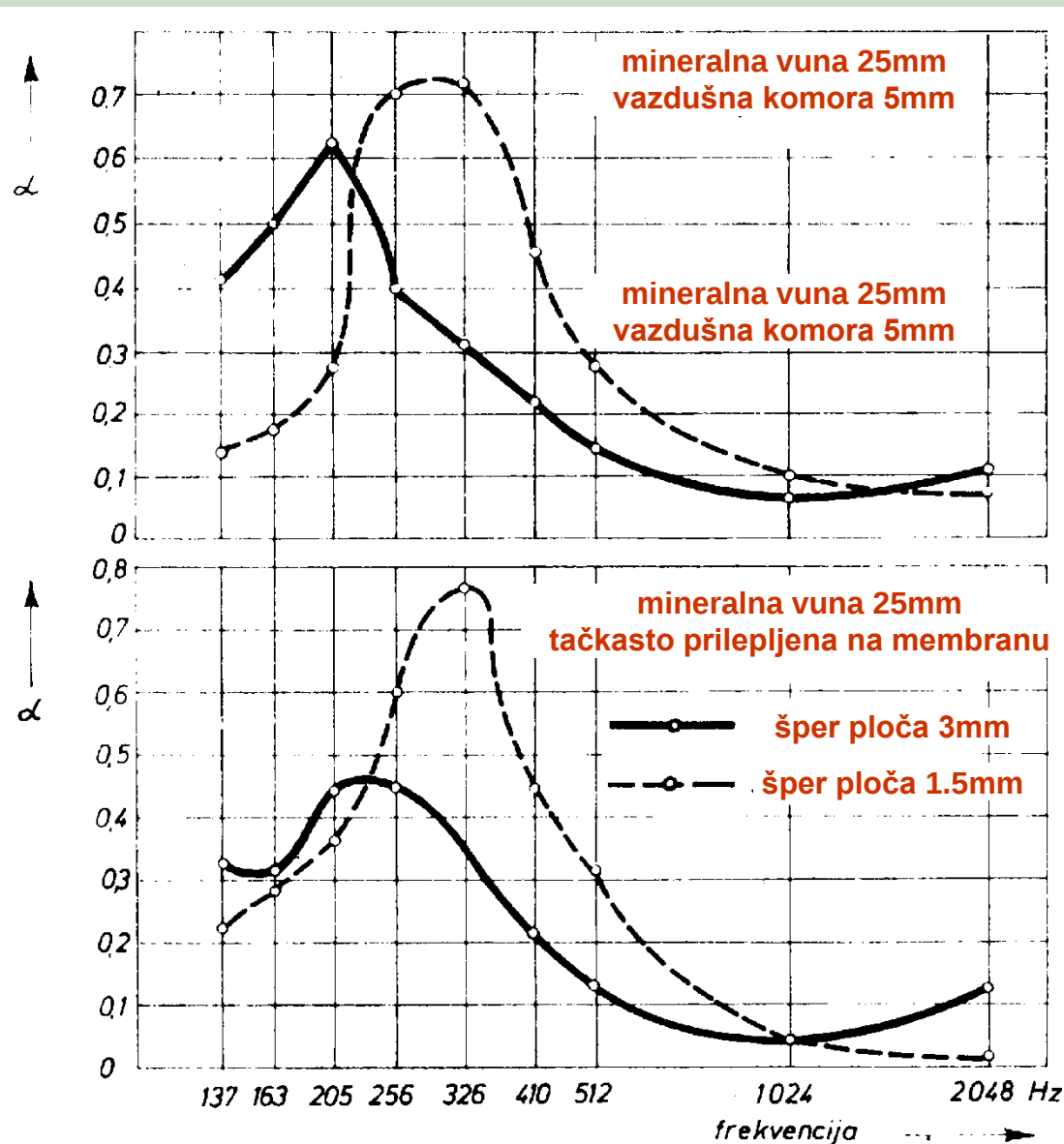


Akustička obrada prostoriija - materijali

➤ Koeficijent apsorpcije će se povećati ako se u prostor vazdušne komore smesti apsorpcijski materijal (obično nije potrebno po celoj zapremini).



Apsorpcioni materijal



Akustička obrada prostoriya - materijali

➤ Akustički rezonatori se izrađuju u obliku:

⊕ posuda različitih oblika, određene zapremine sa otvorom u obliku grla

Najveći gubici energije nastaju pri rezonansi.

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l_{eff} \cdot V}}$$

$$l_{eff} = l + 1.57R$$

S – poprečni presek otvora [m^2]

l – dužina grla [m]

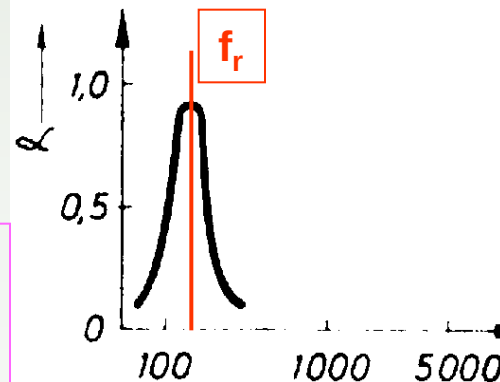
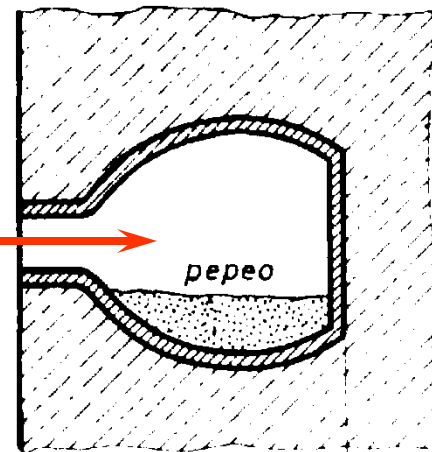
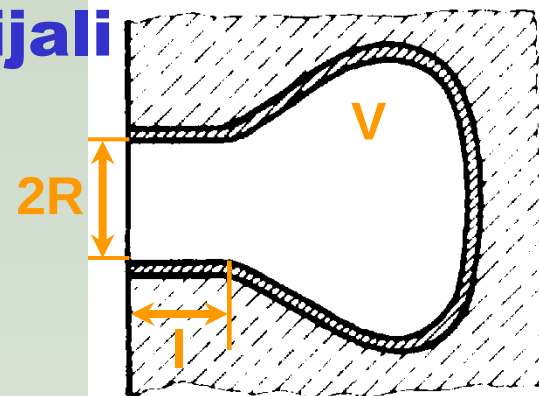
V – zapremina rezonatora [m^3]

R – poluprečnik otvora [m]

l_{eff} – efektivna dužina grla [m]

U rezonator se može dodati prigušni materijal koji proširuje frekvencijsko područje sa povećanom apsorpcijom.

ZANIMLJIVO: Izmjereno je da staklena boca Coca-Cole od 1 l ima apsorpciju od $5,9m^2$ (apsorpcija $5,9m^2$ otvorenog prozora, uz $\alpha=1$) na rezonantnoj frekvenciji od 185 Hz!!!



Akustička obrada prostoriya - materijali

➤ **Akustički rezonatori** se izrađuju u obliku:

- ⊕ perforirane ploče pričvršene na zid preko nosača i vazdušne komore ili komore ispunjene poroznim materijalom koja se nalazi iza ploče.

Najveći gubici energije nastaju pri rezonansi.

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{100hl_{eff}}}$$

$$l_{eff} = b + 0.8d$$

P – procenat perforacije [%]

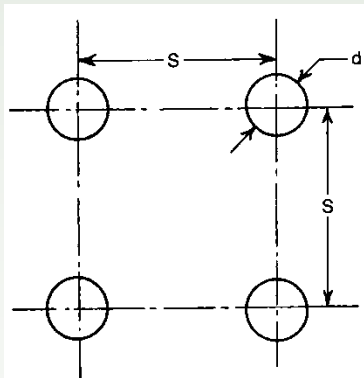
l – debljina ploče [m]

h – udaljenost ploče od zida [m]

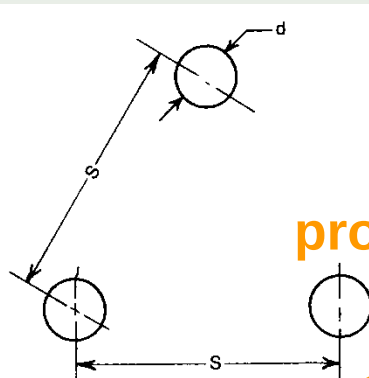
d – prečnik otvora [m]

l_{eff} – efektivna dužina grla [m]

Apsorpcioni materijal

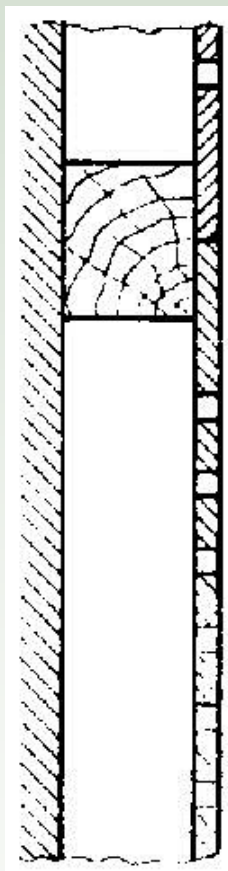


$$PERF \% = 78.5 \left(\frac{d}{s} \right)^2$$



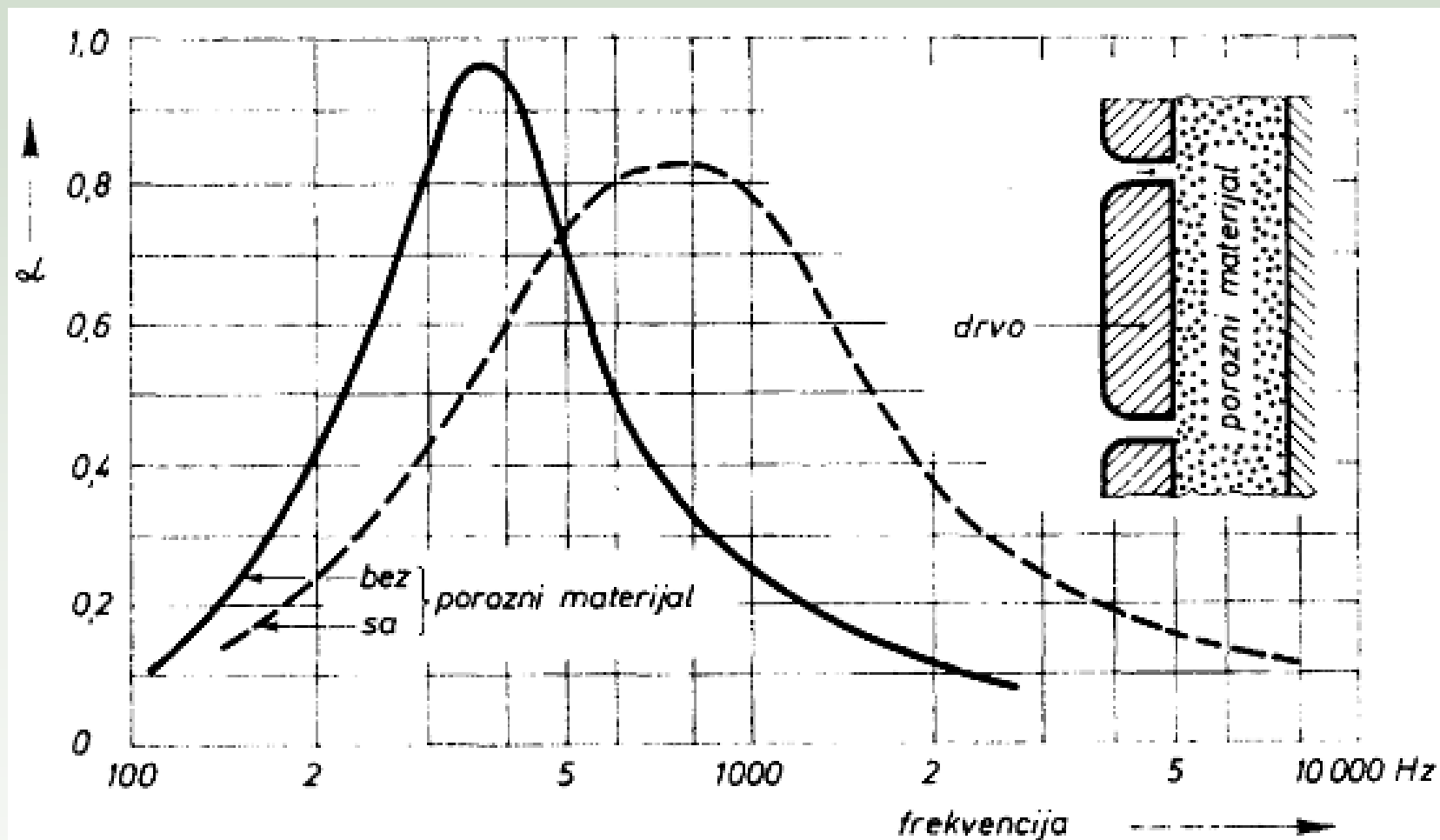
$$PERF \% = 90.6 \left(\frac{d}{s} \right)^2$$

Izračunavanje
procenata perforacije



Akustička obrada prostora - materijali

- Koeficijent apsorpcije zvuka akustičkog rezonatora bez i sa ispunom od poroznog materijala



Akustička obrada prostorija - materijali

► Softver za proračun koeficijenta apsorpcije

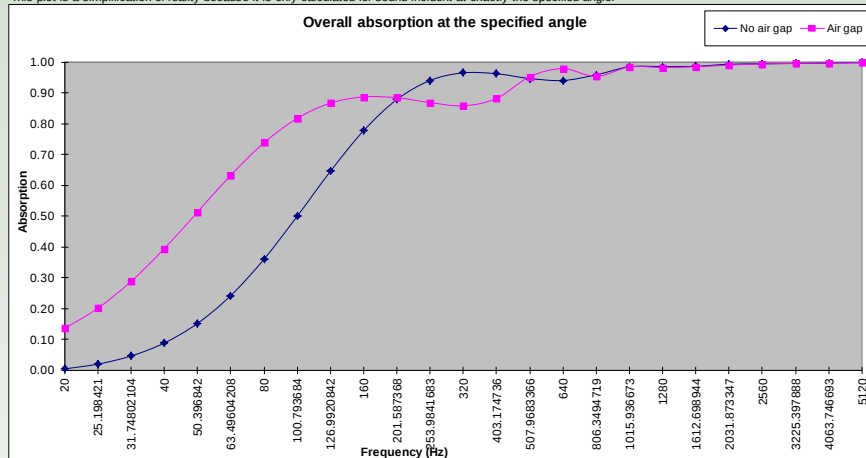
Rigid Backed Porous Absorber

© Chris Whealy 2010 V1.56

Properties of absorber		Display options	
Absorber thickness (t_a)	200.0 mm	Start graph at	20.0 Hz
Absorber flow resistivity	5,600 rays/m		
Properties of cavity			
Air gap (d)	200.0 mm	Whole Octaves	☐
		1/2 Octaves	☐
		1/3 Octaves	☐
		1/6 Octaves	☐
Properties of incident sound		Show subdivisions of	
Angle of incidence (ν)	0 °	Normal incidence	

To see the graph in the standard analysis frequencies, select "Whole Octaves" and set the starting frequency to 62.5Hz

This plot is a simplification of reality because it is only calculated for sound incident at exactly the specified angle.



Building Blanket (11kg/m ³)		5,600 Rays/m
Multitel (18kg/m ³)		15,300 Rays/m
Flexitel (24kg/m ³)		16,200 Rays/m
Supertel (32kg/m ³)		18,200 Rays/m
Ultratel (48kg/m ³)		31,500 Rays/m
Isover E100 S (50Kg/m ³)		44000 Rays/m
Isover E60 S (30Kg/m ³)		22000 Rays/m
rockwool #211, #213 - 40kg/m ³ = 14916 N s/m ⁴		
rockwool #220, #214 - 50kg/m ³ = 20248 N s/m ⁴		
rockwool #226 - 60kg/m ³ = 25992 N s/m ⁴		
rockwool #225, #231 - 70kg/m ³ = 32102 N s/m ⁴		
rockwool #590 - 80kg/m ³ = 38545 N s/m ⁴		
rockwool #233, #234 - 100kg/m ³ = 52324 N s/m ⁴		
Bradford Rockwool Building Blanket 13000 mks Rays/m (nominally 30kg/m ³ product)		
Bradford FIBERTEX™ 350 Rockwool 22000 (60kg/m ³)		
Bradford FIBERTEX™ 450 Rockwool 33000 (80kg/m ³)		
Bradford FIBERTEX™ 650 Rockwool 53000 (100kg/m ³)		
Bradford FIBERTEX™ HD Rockwool 70000 (120kg/m ³)		
Fibertex 350 Rockwool 2.2 x 10 ⁴ Rays/m		
Fibertex 450 Rockwool 3.3 x 10 ⁴ Rays/m		
Fibertex 650 Rockwool, has an acoustic resistivity of about 50000 mks Rays/m		
Fibertex Hd Rockwool 7.0 x 10 ⁴ mks Rays/m		
Fibertex Rockwool Building Blanket Plain 0.5 x 10 ⁴ mks Rays/m		
6000 mks Rays/m is roughly the resistivity of a fluffy fiberglass batt.		

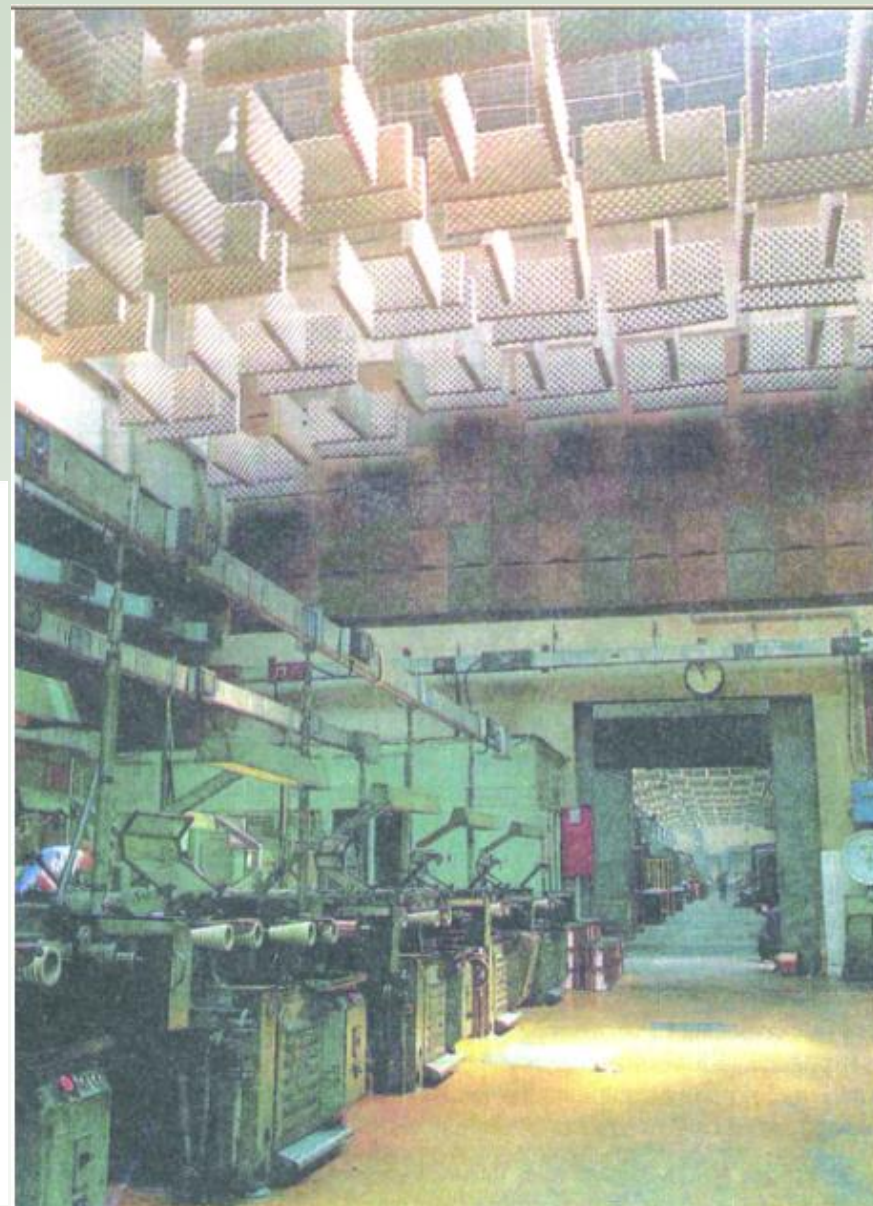
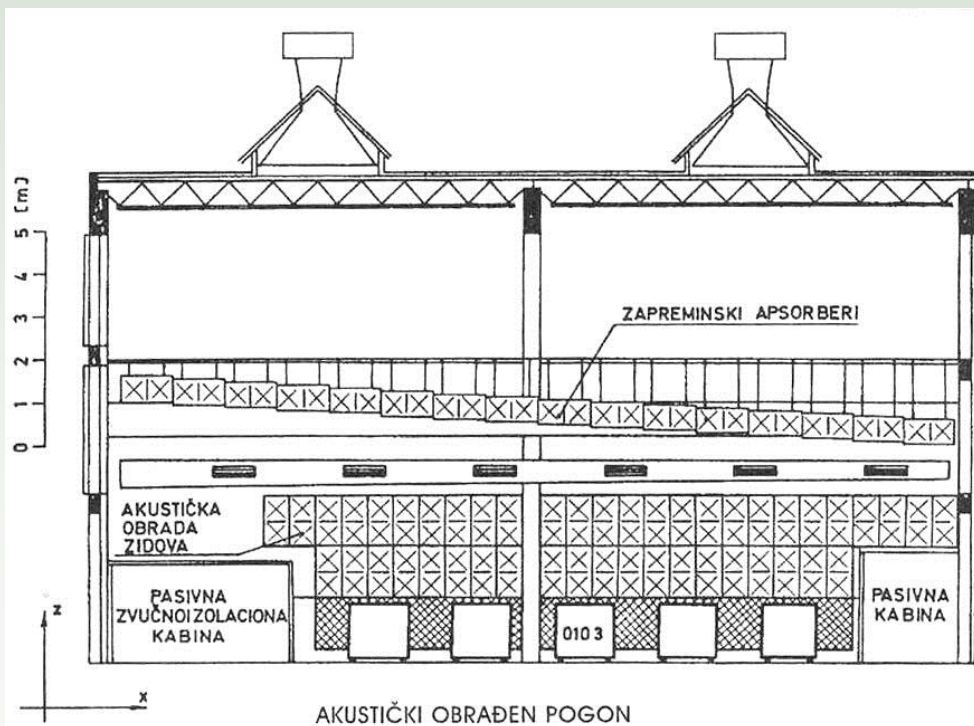
OC 703 has a resistance of 600 mks Rays/inch (about 23600 mks rays / m)
OC 705 has a flow resistance of 770 mks Rays/inch (about 30000 mks rays / m)

Rigid Backed Porous Absorber

Absorber thickness (t_a)	
Air gap (d)	
Octave subdivisions	
Interval number	
Angular values	
Angular frequency (ω)	
Wave number (k_{air})	
Properties of porous absorber	
Eq 5.11 Delany & Bazley's term (X)	
Eq 5.9 Characteristic absorber impedance (Z_{ca})	
Eq 5.10 Complex wavenumber (k)	
Eq 5.28 Y component of wavenumber (k_y)	
Eq 5.28 X component of wavenumber (k_x)	
Eq 5.28 Angle of propagation in porous layer (θ_{porous})	
Eq 5.28 Ratio of wavenumbers (k/k_{air})	
Impedance values	
Intermediate term $\cot(k \cdot t_a)$	
Eq 5.25 Impedance at absorber surface (Z_{sa})	
Real part of impedance (No air gap)	
Imaginary part of impedance (No air gap)	
Reflection/Absorption (No air gap)	
Intermediate term $(Z_{sa}/\rho C) \cos(\nu)$	
Eq 1.22 Reflection factor	
Eq 1.25 Absorption coefficient (α)	
Impedance values	
Eq 5.28 Y component of wavenumber ($k_{air,y}$)	
Eq 5.28 X component of wavenumber ($k_{air,x}$)	
Eq 5.28 Angle of propagation in air layer (θ_{air})	
Eq 5.28 Ratio of wavenumbers ($k_{air}/k_{air,x}$)	
Eq 1.29 Impedance at top of air layer (Z_{at})	
Intermediate term $j^*Z_{ca} \cot(k \cdot t_a)$	
Eq 1.28 At top of porous absorber (Z_{a+air})	
Real part of impedance (With air gap)	
Imaginary part of impedance (With air gap)	
Reflection/Absorption (abs + air gap)	
Intermediate term $(Z_{a+air}/\rho C) \cos(\nu)$	
Eq 1.22 Overall reflection factor	
Eq 1.25 Absorption coefficient (α)	

Akustička obrada prostorija

- **Industrijski pogon** –
mašine za fino izvlačenje žice.

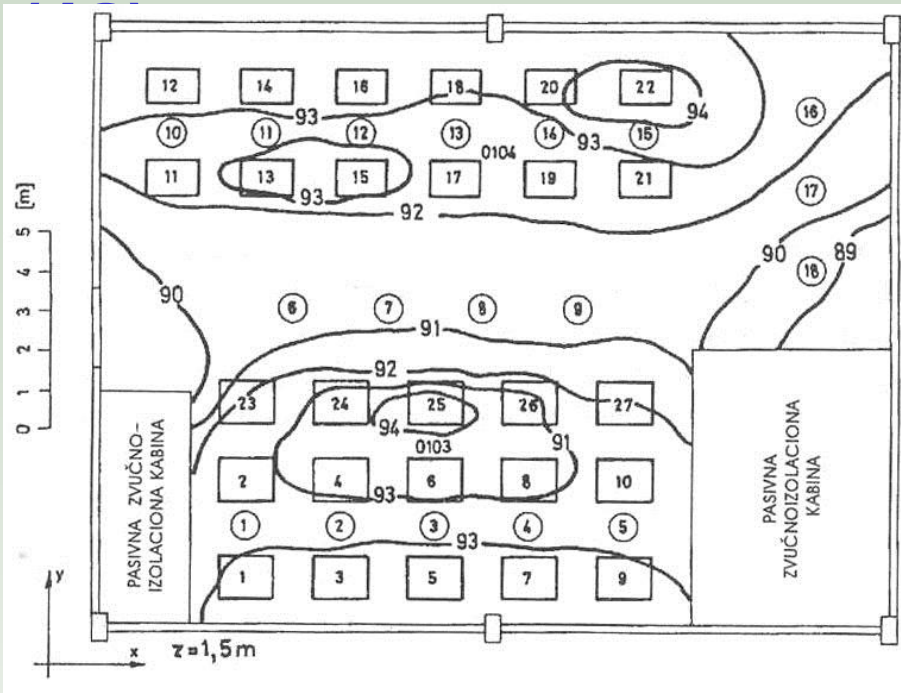


Akustička obrada prostorija

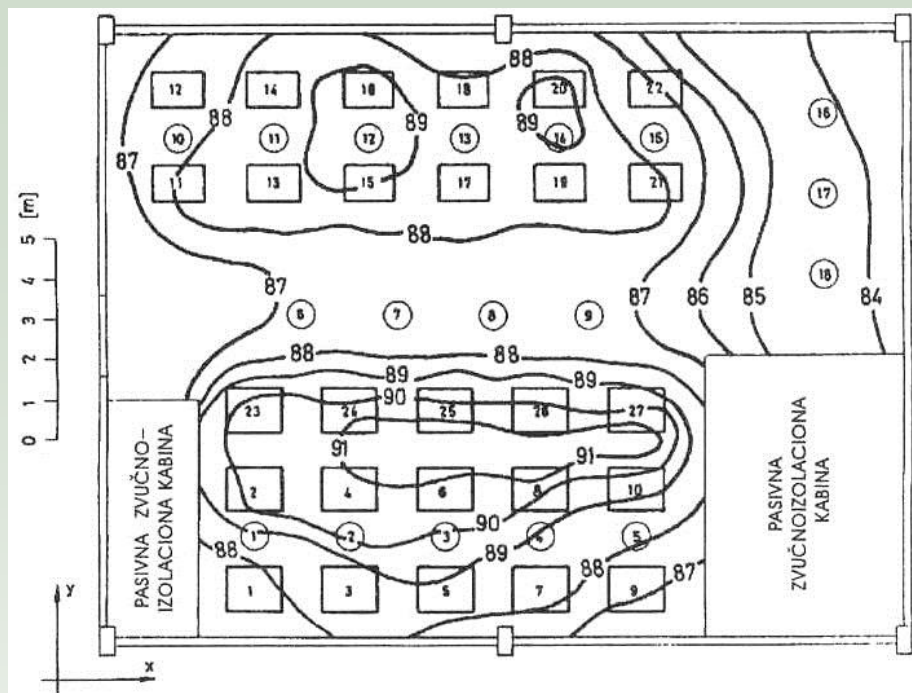
- **Industrijski pogon** – prostorija sa generatorima



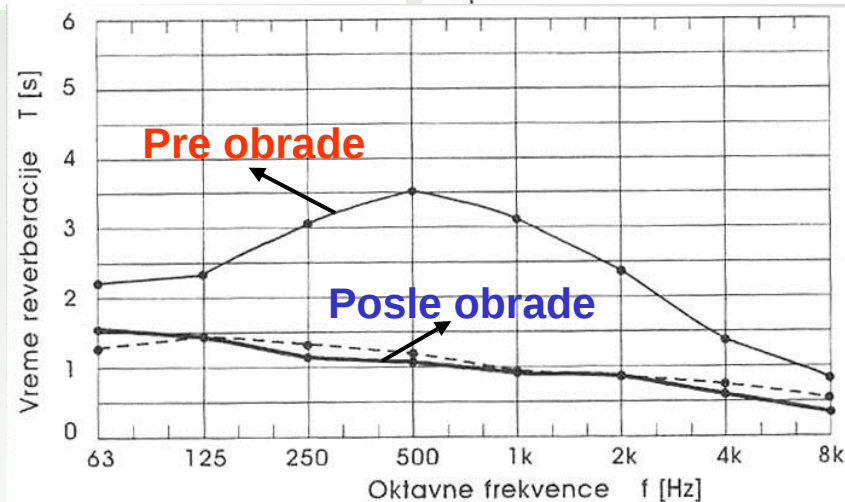
Akustička obrada prostorija



**Nivoi buke pre
akustičke obrade
prostorije**



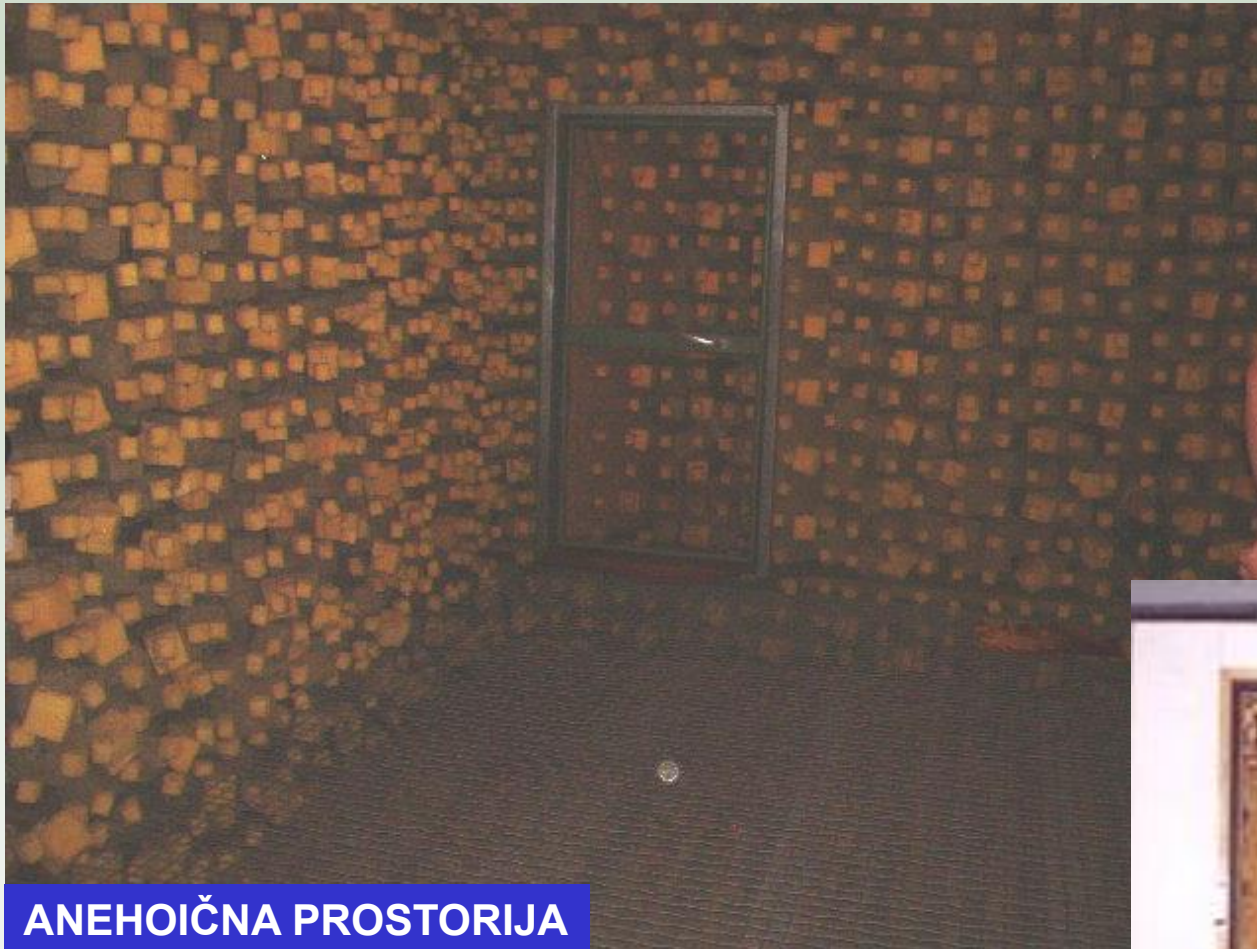
**Nivoi buke posle
akustičke obrade
prostorije**



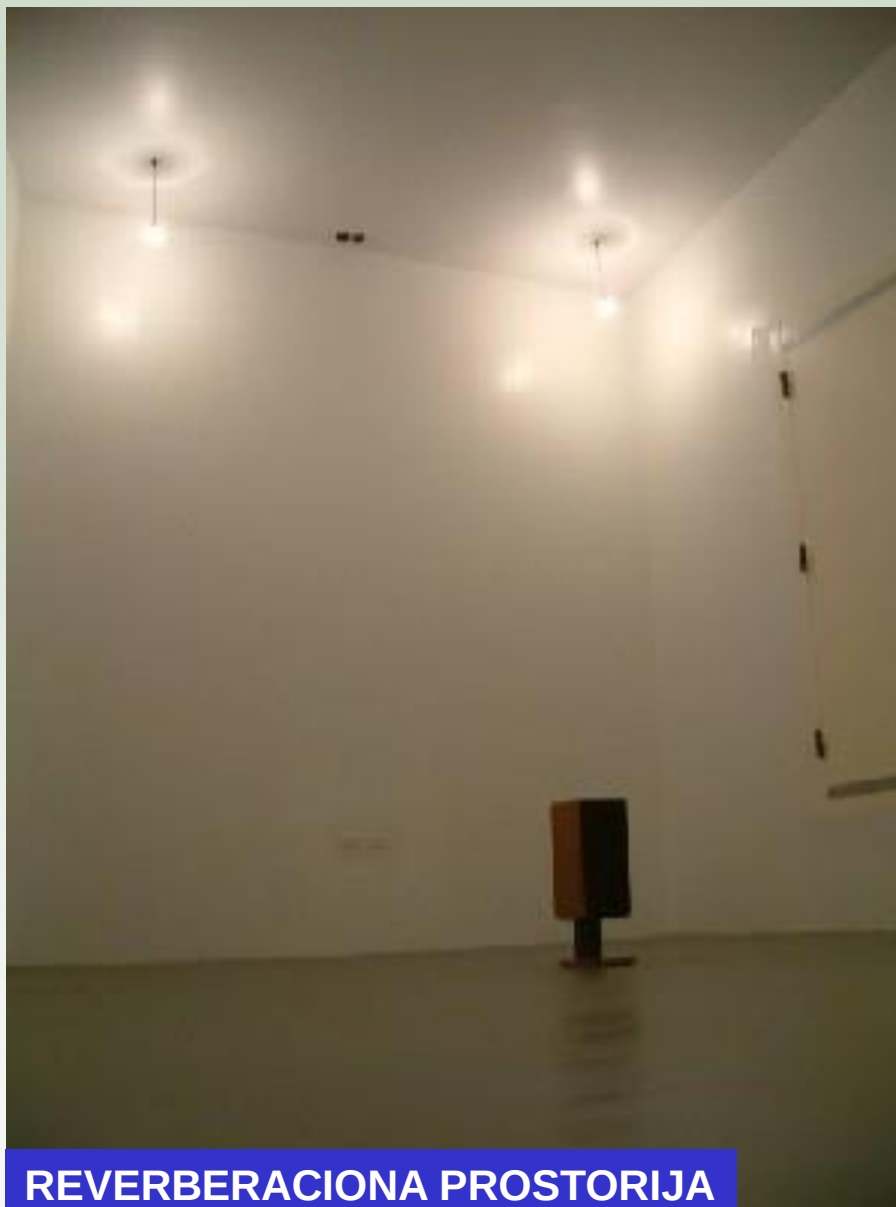
Prostorije specijalne namene (1)



Prostorije specijalne namene (2)



Prostorije specijalne namene (3)



REVERBERACIONA PROSTORIJA

Freq (Hz)	RT (s)
-----------	--------

125	29.9
-----	------

250	23.3
-----	------

500	17.5
-----	------

1k	15.6
----	------

2k	9.7
----	-----

4k	4.5
----	-----

8k	2.9
----	-----

