

# OBSAH

SOUPIS POUŽITÝCH ZNAČEK	4
ÚVOD	8
1. ZÁKLADNÍ POJMY V AKUSTICE	9
1.1 ZVUK	9
1.2 HLUK A JEHO ÚČINKY NA CLOVĚKA	9
1.3 HLADINA AKUSTICKÉHO VÝKONU	12
1.4 HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU	12
1.5 VZÁJEMNÁ SOUVISLOT DECIBELOVÝCH VELIČIN	13
1.6 OKTÁVOVÉ KMITOČTOVÉ PASMO	14
1.7 TŘETINOOKTÁVOVÉ KMITOČTOVÉ PASMO	14
1.8 HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU A	15
1.9 HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU V UZAVŘENÉM PROSTORU	15
2. ZVUKOVÁ POHLTIVOST	18
2.1 ZVUKOVÁ POHLTIVOST	18
2.2 ČINITEL ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI	18
2.3 ČINITELI ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI, ZVUKOVÉ PRŮZVUČNOSTI A TEPELNÉ PŘEMĚNY	23

3. METODY MĚŘENÍ ČINITELŮ ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI	24
3.1 V IMPEDANČNÍ TRUBICI	24
3.2 V $\alpha$ KABINĚ	27
3.3 PODLE NORMY ČSN ISO354 V DOZVUKOVÉ MÍSTNOSTI	29
4. MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU	31
4.1 DOBA DOZVUKU	31
4.2 DOBA DOZVUKU PODLE SABINEHO	32
4.3 DOBA DOZVUKU PODLE EYRINGA	33
4.4 DOBA DOZVUKU PODLE MILLINGTONA	33
4.5 FREKVENČNÍ ZAVISLOST DOBY DOZVUKU	34
4.6 PRINCIP MĚŘENÍ	34
4.6.1 METODA PŘERUŠENÉHO ŠUMU	36
4.6.2 METODA INTEGROVANÉ IMPULSOVÉ ODEZVY (SCHROEDEROVA METODA)	36
5. MĚŘENÍ A VÝPOČTY	39
5.1 OVĚŘENÍ HLADIN AKUSTICKÉHO ZDROJE	40
5.1.1 ČSN ISO 3746 PROVOZNÍ METODA VE VOLNÉM POLI NAD ODRAZIVOU PLOHOU	40
5.1.2 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	40
5.1.3 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ	40
5.1.4 VOLBA MĚŘICÍ PLOCHY	41

5.1.5	STANOVENÍ HLADINY AKUSTICKÉHO TLAKU A HLADINY AKUSTICKÉHO VÝKONU	42
5.2	STANOVENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI	46
5.3	STANOVENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI 2	51
5.5	STANOVENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI Z DOBY DOZVUKU	54
5.5	STANOVENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI VÝPOČTEM	57
6.	ZÁVĚR	60
6.1	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ Č.2 A Č.3	60
6.2	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ Č.2/3, Č.4 A VÝPOČTU	64
6.3	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ Č.2/3 A VÝSLEDKŮ Z PŘEDCHOZÍCH MĚŘENÍ	61
7.	POUŽITÉ ZDROJE	65
8.	POUŽITÁ LITERATURA	66
9.	SEZNAM PŘÍLOH	66

## SOUPIS POUŽITÝCH ZNÁČEK

$\alpha$	$[-]$	činitel zvukové pohltivosti
$I$	$[W/m^2]$	intenzita zvuku
$v$	$[m/s]$	akustická rychlost
$W$	$[W]$	akustický výkon
$W_0$	$[W]$	referenční výkon
$L_w$	$[dB]$	hladina akustického výkonu
$L_p$	$[dB]$	hladina akustického tlaku
$P$	$[Pa]$	akustický tlak
$P_0$	$[Pa]$	referenční akustický tlak
$f$	$[Hz]$	frekvence
$\Delta f$	$[Hz]$	frekvenční krok
$S$	$[m^2]$	součet všech ploch ohraničujících místnost
$S_m$	$[m^2]$	je plošný obsah měřicí plochy
$\alpha_m$	$[-]$	střední činitel zvukové pohltivosti
$Q$	$[-]$	činitel směrovosti zdroje
$R$	$[m]$	vzdálenost
$\lambda$	$[m]$	vlnová délka

I1	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$	intenzita zvuku vlny odražené
I2	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$	intenzita zvuku vlny pohlcené
I3	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$	intenzita zvuku vlny vyzářené za stěnu celkem
I4	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$	intenzita zvuku vlny prošlé za stěnu otvory a póry
I5	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$	intenzita zvuku vlny, kterou stěna vyzáří v důsledku svého ohybového kmitání do druhého poloprostoru
I6	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$	intenzita zvuku vlny, která je vedena ve formě chvění do ostatních částí přiléhajících konstrukcí
I7	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$	intenzita zvuku přeměněná ve stěně na teplo
$\beta$	$[-]$	činitel zvukové odrazivosti
$\tau$	$[-]$	činitel zvukové průzvučnosti
$\varepsilon$	$[-]$	činitel tepelné přeměny
$r$	$[-]$	činitel odrazu akustického tlaku
$r_r$	$[-]$	reálná složka činitele odrazu akustického tlaku
$r_i$	$[-]$	imaginární složka činitele odrazu akustického tlaku
$H_{12}$	$[-]$	přenosová funkce mezi místy 1 a 2
$H_I$	$[-]$	přenosová funkce pro samotnou dopadající vlnu
$H_R$	$[-]$	přenosová funkce pro samotnou odrážející se vlnu
$k_0$	$[m^{-1}]$	komplexní vlnové číslo

$x_1$	$[m]$	vzdálenost mezi vzorkem a vzdálenějším mikrofonem od něj
$i$	$[-]$	imaginární jednotka
$d$	$[mm]$	průměru
$T$	$[s]$	doba dozvuku
$A$	$[m^2]$	ekvivalentní pohltivost
$\alpha_s$	$[-]$	absolutní pohltivost
$\alpha_w$	$[-]$	stupeň zvukové pohltivosti
$\alpha_p$	$[-]$	praktický stupeň zvukové pohltivosti
$V$	$[m^3]$	objem místnosti
$m$	$[s^{-1}]$	dekrement útlumu
$T_s$	$[s]$	doba dozvuku podle Sabineho
$T_E$	$[s]$	doba dozvuku podle Eyringa
$T_M$	$[s]$	doba dozvuku podle Millingtona
$\alpha_e$	$[-]$	Eyringuv činitel zvukové pohltivosti
$\alpha_{NRC}$	$[-]$	zvuková pohltivost NRC (Noise Reduction Coefficient)
$d$	$[m]$	vzdálenost
$a$	$[m]$	vzdálenost
$b$	$[m]$	vzdálenost

$d$	$[m]$	vzdálenost
$\overline{L}_p'$	$[dB]$	průměrná hladina akustického tlaku na měřicí ploše
$\overline{L}_p''$	$[dB]$	průměrná hladina akustického tlaku pozadí na měřicí ploše
$K_1$	$[dB]$	korekce na hluk pozadí
$\Delta L$	$[dB]$	korekce
$K_2$	$[dB]$	korekce na zkušební prostředí
$A$	$[m^2]$	celková pohltivost zvuku místnosti
$L_p'$	$[dB]$	hladina akustického tlaku A naměřená v i-té poloze mikrofonu
$L_p''$	$[dB]$	hladina akustického tlaku A pozadí naměřená v i-té poloze mikrofonu
$\overline{L}_{pf}$	$[dB]$	hladina akustického tlaku na ploše
$N$	$[-]$	počet měřicích míst
$h$	$[m]$	výška

# ÚVOD

Cílem této práce je stanovení činitele zvukové pohltivosti stěn uzavřeného prostoru, který je důležitým parametrem v akustice pro snižování vlivu hluku na zdraví člověka, bezpečnost apod.

Hlukem můžeme označit každý nežádoucí zvuk, který je hodnocen z hlediska subjektivního vnímání. Jedna z možností eliminace nadměrného hluku spočívá ve schopnosti některých materiálů a konstrukcí pohlcovat akustickou energii a transformovat ji na tepelnou energii. Pohltivost zvuku je charakterizována činitelem zvukové pohltivosti, který nabývá hodnot od 0 (pro odrazivé materiály) do 1 (pro zcela pohltivé materiály).

V současné době je zřejmý velmi výrazný nárůst hlučnosti v našem životním prostředí, někdy se udávají hodnoty o zvětšení hlučnosti cca 1 [dB] za rok. Technický pokrok přináší s sebou nejen vývoj technologie, ale i nežádoucí účinky, jako je růst hlučnosti. Současně je důležitý pocit pohody a nerušenosti hlukem z cizích zdrojů. Pro řešení optimální akustiky je velmi významné použití správných materiálů. Aby bylo možné navrhnout správná akustická opatření v určitém prostoru, je nutné mít důkladné znalosti akustických vlastností materiálů, jako je činitel zvukové pohltivosti.



# 1. ZÁKLADNÍ POJMY V AKUSTICE

## 1.1 ZVUK

Zvukem je každé mechanické vlnění v látkovém prostředí, které je schopno vyvolat v lidském uchu sluchový vjem. Zvuk se šíří plyny (vzduchem), pevnými látkami i tekutinami ve formě zvukových vln. Šíření zvukových vln je v různých médiích rozdílné. Lidské ucho vnímá změny atmosférického tlaku bubínkem, který své chvění přenáší na nervové buňky ve vnitřním uchu [1].

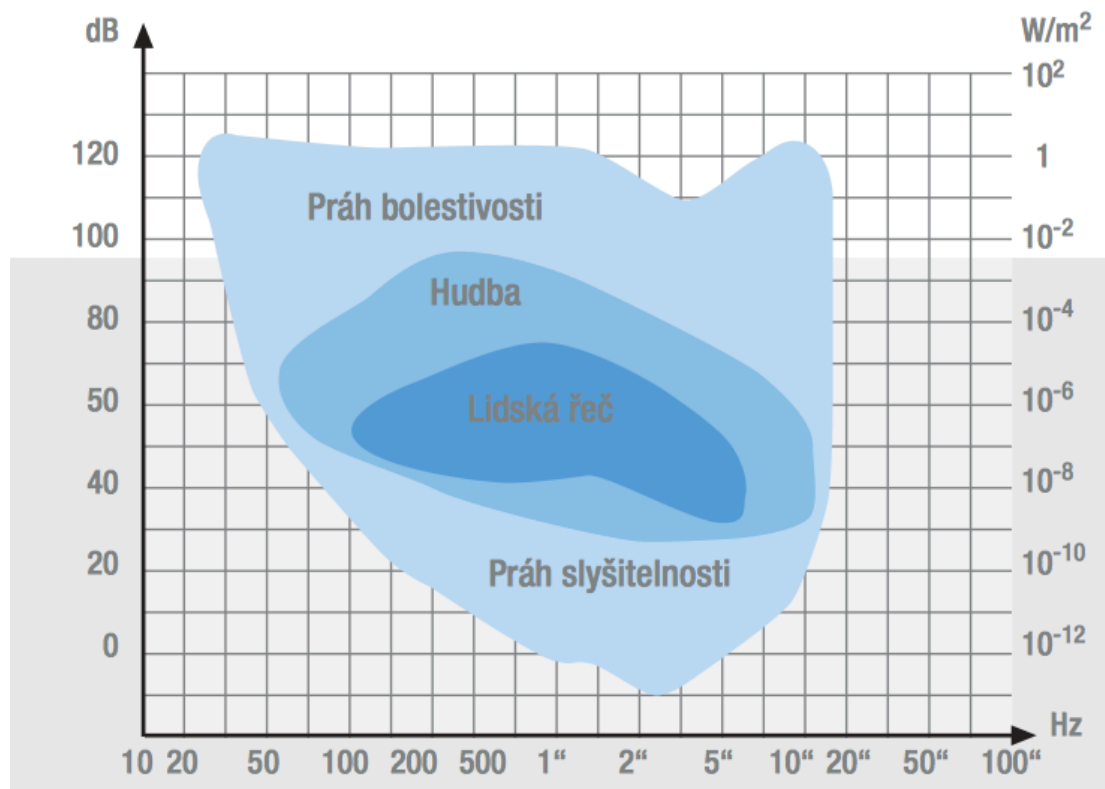
Podstatou slyšitelného zvuku je mechanické kmitání pružného prostředí ve frekvenčním rozsahu 20 až 20000 kmitů za sekundu, které se šíří konečnou rychlostí určitým prostředím. Akustická vlna se ve vzduchu pohybuje rychlostí cca  $340 \frac{m}{s}$ . Její rychlost ve vodě je podstatně vyšší, tj. cca  $1440 \frac{m}{s}$ . Frekvenční rozsah akustického vlnění, kterým se zabývá technická akustika, odpovídá kmitočtovému rozsahu lidského ucha. Jinak Akustika se zabývá mechanickými kmity v širším frekvenčním pásmu ultrazvuku [10].

## 1.2 HLUK A JEHO ÚČINKY NA ČLOVĚKA

Hluk je specifická forma zvuku, kterou můžeme fyzikálně popsat jako nepravidelné nebo náhodné kmitání. Z hlediska subjektivního vnímání se tedy jedná o nepříjemný, rušivý, nežádoucí či škodlivý zvuk. Z určitého úhlu pohledu může být hlukem i hudba. Vnímání hluku je ovlivněno mnoha faktory jako je informační obsah, doba trvání, věk, zdravotní stav nebo postoj posluchače [10].

Hluk se definuje v první řadě intenzitou. Ta se měří v decibelech [dB]. a působí na tělo i psychiku člověka. Příliš vysoká hladina hluku vede k:

- poruchám koncentrace, nervozitě, vysokému krevnímu tlaku, srdečním a cévním onemocněním
- agresivitě, travicím potížím, poruchám učení a spanku, vykvívám nalady
- zhoršení sluchu, snížení výkonu [2]



Obr. 1 Oblast slyšitelnosti zvuku v závislosti na frekvenci a síle

Základem určujícím účinek hluku je jeho intenzita. Pro hodnocení hlukové expozice se používá hladina tlaku korigovaná filtrem A, jehož útlumová charakteristika přibližně odpovídá citlivosti zdravého lidského sluchového orgánu. Člověk se necítí dobře v prostředí s nezvykle nízkou hladinou akustického tlaku A. Hodnoty okolo 20 dB považuje většina lidí již za hluboké ticho. Hladinu 30 dB hodnotí lidé jako příjemné ticho. Od 65 dB výše se začínají již nepříznivě projevovat účinky hluku zejména změnami vegetativních reakcí. Při trvalém pobytu v prostředí, kde hladiny akustického tlaku A přesahují 85 dB již vznikají trvalé poruchy sluchu. Současně se ve větší míře projevují účinky na vegetativní systém a celou nervovou soustavu. Při 130 dB se obvykle účinky hluku mění na bolesti ve sluchovém orgánu. K protržení bubínku dochází při hladinách cca 160 dB. Určitý přehled o kmitočtových i amplitudových oblastech, např. při lidské řeči či hudbě, podává diagram na obr. 1.1 [10].

Máme v zásadě dvě možnosti, jak hlukovou zátěž snížit:

1. zvuková pohltivost zamezuje přenosu zvuku od zdroje k příjemci nebo jej minimalizuje a tlumi tak hluk v místnosti

2. podél vzduchová neprůzvučnost redukuje přenos zvuku mezistropním prostorem z místnosti do místnosti [2]

<b>Případ</b>	<b>Účinek</b>
< 20 [dB] Volná příroda za bezvětrí	Prah slyšitelnosti, technicky obtížně měřitelný; ve městě prakticky nemožné pozorovat
20-30 [dB] Velmi klidný pokoj	Nejnižší měřitelná slyšitelnost; bez vlivu na schopnost koncentrace
30-40 [dB] Běžné hlukové pozadí	Možný vliv na kvalitu spanku
40-50 [dB] Normální zábava	Snižuje schopnost soustředění
50-60 [dB] Hlasitost domácí elektroniky v pokoji	Normální zábava vyžaduje hlasitější hovor
60-70 [dB] Zvuk klavírnice	Vegetativní problémy a výpadky výkonu
70-80 [dB] Osobní auto v městském provozu	Při častějším vyskytu způsobuje větší vegetativní problémy
80-90 [dB] Nakladní auto v městském provozu	Delší působení není užitečné
90-100 [dB] Sbíječka na stlačený vzduch	Nutná ochrana sluchu
100-110 [dB] Rockový koncert	Vleklá poškození sluchu
110-120 [dB] Tryskové letadlo při ověřovacím běhu	Hranice bolestivosti
120-130 [dB] Tryskové letadlo při startu	Fyzická poškození
130-140 [dB] Vystřel z děla v bezprostřední blízkosti	Akutní nezvratná poškození sluchu i při krátkodobém působení

Tab. 1 Příklady a účinky zdrojů hluku

### 1.3 HLADINA AKUSTICKÉHO VÝKONU

Hladina akustického výkonu  $L_w$  [dB]:

Podle Weber – Fechnerova zákona lze prokázat logaritmickou závislost mezi objektivními akustickými veličinami a subjektivním vjemem člověka. Vtechnické akustice byl zaveden pojem „hladin“ jednotlivých akustických veličin, jejichž veličinou je „decibel“ [dB]. Při použití decibelových stupnic je důležité stanovit referenční hodnotu. Např. mezi referenčními hodnotami 1 W a  $10^{-12}$  W je v decibelových stupnicích konstantní rozdíl 120 dB [10].

Hladina akustického výkonu  $L_w$  [dB] je definována vztahem:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0}, \quad (1)$$

kde je  $W$  – sledovaný akustický výkon [W],  $W_0$  – referenční výkon [W],  $W_0 = 10^{-12}$  W .

Každému zvýšení akustického výkonu o jeden řád odpovídá zvýšení hladiny akustického výkonu o 10 dB [10].

### 1.4 HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU

Hladina akustického tlaku  $L_p$  [dB]:

Nejslabší zvukový signál, který je ještě schopen zaznamenat nepoškozený lidský sluch, odpovídá dvaceti miliontinám základní jednotky tlaku 1 Pa, což je akustický tlak 20  $\mu$ Pa. Tato hodnota je  $5 \cdot 10^9$  krát menší než normální barometrický tlak. Změna tlaku o 20 [ $\mu$ Pa] je tak malá, že vyvolává vychýlení membrány lidského sluchového orgánu o hodnotu menší než je průměr jednoho jediného atomu. Lidské ucho je schopno snášet akustické tlaky více než  $10^6$  krát větší. Navíc lidský sluchový orgán rozlišuje tzv. barvu zvuku, což souvisí se schopností rozpoznávat zvuky různých kmitočtů [10].

Pro akustický tlak byla zavedena příslušná hladina, kterou je nutno vztahovat vždy k určitému kmitočtu, nebo pásmu kmitočtů. Jinak nemá pouhý údaj hladiny akustického tlaku význam, neboť nevypovídá nic o poloze signálu na kmitočtové ose. Hladina akustického tlaku

$L_p$  [dB] je definována vztahem:

$$L_p = 20 \log \frac{P}{P_0}, \quad (2)$$

kde je  $P$  – sledovaný akustický tlak [Pa],  $P_0$  – referenční akustický tlak [Pa],  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  [Pa] [10].

Tato logaritmická stupnice má jako výchozí bod prahovou hodnotu akustického tlaku  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa, čemuž odpovídá v decibelové stupnici 0 dB. Každému zesateronásobení akustického tlaku v [Pa] odpovídá zvýšení hladiny akustického tlaku o 20 [dB] [10].

Akustický výkon nebo akustický tlak jsou veličiny, které úzce souvisejí s teorií vlnění. Každému vlnění odpovídá určitá frekvence nebo frekvenční rozsah. Je proto nezbytné uvádět u hladin akustického výkonu nebo hladin akustického tlaku kmitočty, resp. rozsah kmitočtů, ke kterému daná hodnota přísluší. Jako příklad možno uvést tyto pojmy:

- celková hladina akustického tlaku podává informaci o celkovém akustickém tlaku, který je vlněním vyvoláván celkem v celém slyšitelném frekvenčním rozsahu
- hladina akustického tlaku v oktávovém pásmu podává informaci, jaký akustický tlak je soustředěn ve frekvenčním pásmu o šíři jedné oktávy o určitém středním kmitočtu [10]

## 1.5 VZÁJEMNÁ SOUVISLOST DECIBELOVÝCH VELIČIN

Hladinu akustického výkonu je nutné odlišovat od ostatních hladin, zejména od hladiny akustického tlaku. Hladina akustického výkonu určuje vždy akustický výkon vyzařovaný určitým zdrojem a je to tudíž vlastnost jenom zdroje zvuku. Hladina akustického tlaku naopak určuje akustický děj v kontrolním místě resp. v místě posluchače. Tato veličina se výrazně mění se vzdáleností a směrem od zdroje, v závislosti na cestě šíření akustické energie, okolním prostředím apod [10].

## 1.6 OKTÁVOVÉ KMITOČTOVÉ PASMO

Kmitočtové složení zvuku může být při měření získáno pomocí akustických filtrů, které propustí od mikrofónu do vyhodnocovacího bloku přístroje pouze signály požadované frekvence. Jsou používány dva hlavní typy kmitočtové analýzy:

- s procentuálně konstantní šíří pásma,
- s konstantní šíří pásma.

Při uplatnění první metody analýzy zvuku je šíře pásma propustnosti procentuálně konstantní vzhledem ke střednímu kmitočtu v pásmu [10].

Druhá metoda používá filtry s konstantní šíří pásma propustnosti, nezávislou na středním kmitočtu pásma. Stroje, které vyzařují čisté tóny, je vhodné měřit pomocí aparatur, které obsahují kmitočtové filtry konstantní šíře, neboť obvykle chceme pro další vývoj těchto strojů znát jejich diskrétní složky. Měření hluku, která mají sloužit k určení celkové hlučnosti, obvykle nevyžadují přesnou znalost spektra včetně úrovně diskrétních složek. V těchto případech používáme kmitočtové filtry, resp. kmitočtová pásma o procentuálně konstantní šířce. To splňují např. oktávová pásma [10].

## 1.7 TŘETINOOKTÁVOVÉ KMITOČTOVÉ PASMO

Rozdělíme-li oktávové pásmo na tři třetiny (v logaritmických stupnicích), získáme třetinooktávové pásmo. Musí pro ně platit následující závislost. Je-li frekvencemi  $f_1$  a  $f_4$  ohraničeno pásmo jedné oktávy a frekvencemi  $f_2$ ,  $f_3$  krajní frekvence vnitřní třetiny oktávy, můžeme psát:

$$\log \frac{f_2}{f_1} + \log \frac{f_3}{f_2} + \log \frac{f_4}{f_3} = \log \frac{f_4}{f_1} = \log 2, \quad (3)$$

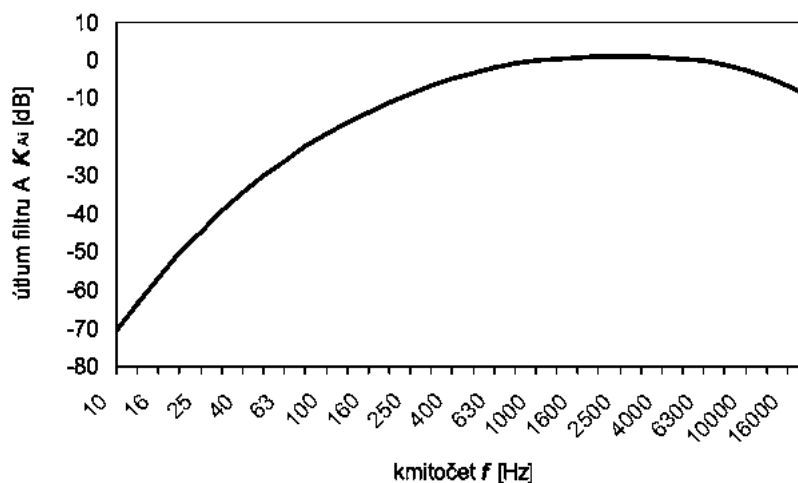
kde platí rovnost:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{f_3}{f_2} = \frac{f_4}{f_3}, \quad (4)$$

Poměr krajních kmitočtů v libovolné třetině oktávy je konstantní [10].

## 1.8 HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU A

Hladina akustického tlaku  $A$  je hladina akustického tlaku měřená při použití váhového filtru  $A$ , který koriguje naměřené hodnoty akustického tlaku podle charakteristiky lidského ucha [1].



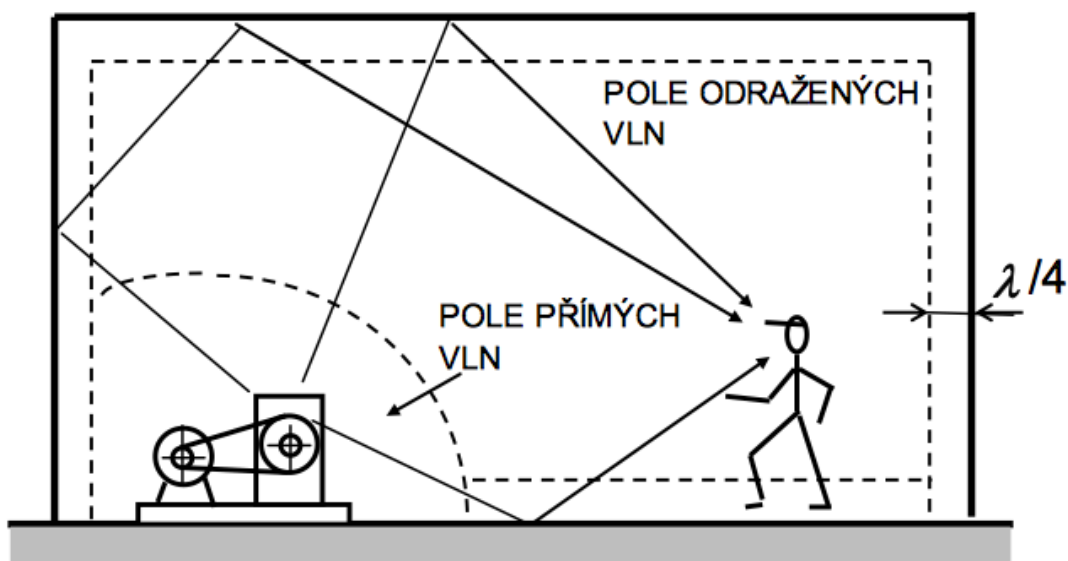
Obr. 2 Útlumová charakteristika filtru A

Váhový filtr  $A$  je aproximací křivek stejné hlasitosti pro oblast nízkých hladin akustického tlaku a je v mezinárodním měřítku nejčastěji používán [10].

## 1.9 HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU V UZAVŘENÉM PROSTORU

Uzavřený prostor možno rozdělit do dvou částí. V malé vzdálenosti od zdroje je tzv. pole přímých vln. Ve zbývajícím prostoru je pole odražených vln jak ukazuje schéma na obr. 3. Hladinu akustického tlaku lze stanovit ze vztahu:

$$L_p = L_w + 10 \log \left[ \frac{Q}{4\pi R^2} + \frac{4(1-\alpha_m)}{S\alpha_m} \right], \quad (5)$$



Obr. 3 Akustická pole uzavřeného prostoru

Podle vzájemné velikosti zlomků v závorce vztahu (5) možno usuzovat, zda daný bod leží v poli přímých nebo v poli odražených vln. Pro pole přímých vln bude platit:

$$\frac{Q}{4\pi R^2} > \frac{4(1-\alpha_m)}{S\alpha_m}, \quad (6)$$

kde  $S[m^2]$  je součet všech ploch ohraničujících místnost,  $\alpha_m[-]$  střední činitel zvukové pohltivosti,  $Q$  je činitel směrovosti zdroje  $[-]$ ,  $R$  je vzdálenost, určující rozhraní mezi polem přímých a polem odražených vln  $[m]$  [10].

Pro pole odražených vln platí opačná nerovnost:

$$\frac{Q}{4\pi R^2} < \frac{4(1-\alpha_m)}{S\alpha_m}, \quad (7)$$

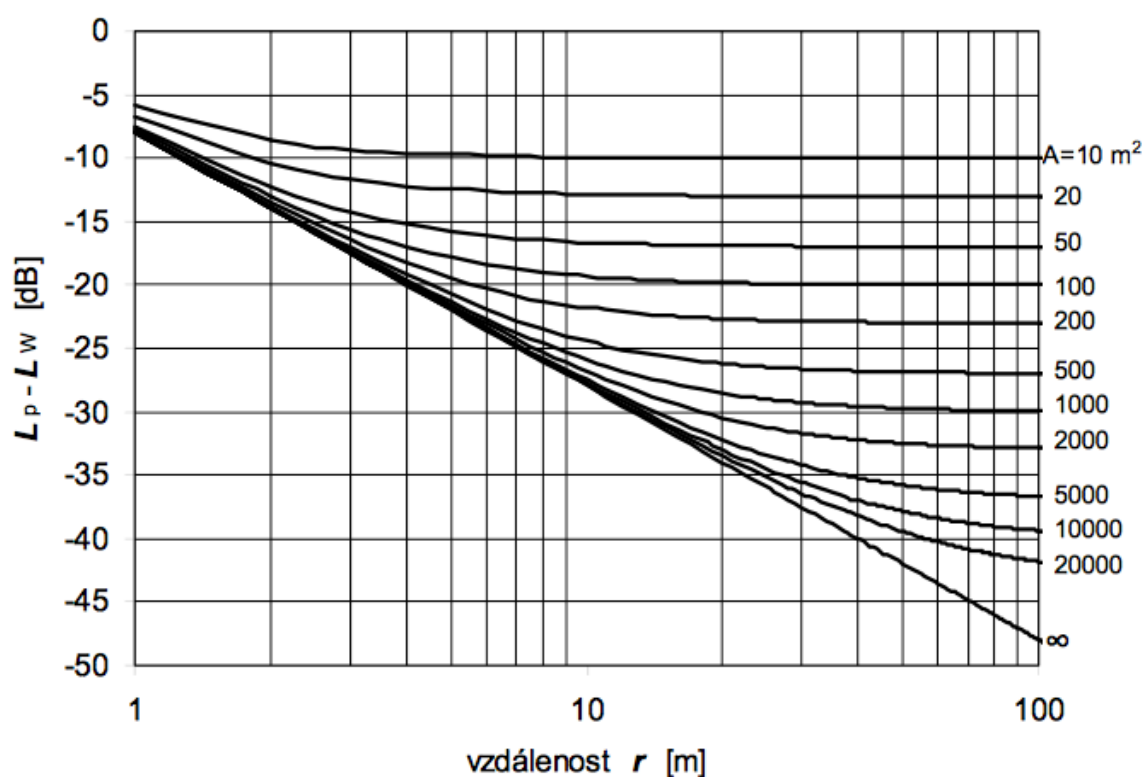
V případě rovnosti obou zlomků lze stanovit vzdálenost  $R$ , určující rozhraní mezi polem přímých a polem odražených vln ze vztahu:

$$R = \sqrt{\frac{S\alpha_m Q}{16\pi(1-\alpha_m)}}, \quad (8)$$



Pro snadnější výpočet hladiny akustického tlaku v uzavřených místnostech je zvykem používat nomogram na obr. 4. Uvedené vztahy platí pro výpočet hladiny akustického tlaku v kterémkoliv místě uzavřeného prostoru s výjimkou poměrně malých vzdáleností ( $\lambda/4$ ) od odražejících ploch. Zde lze měřením zjistit hladinu akustického tlaku vyšší až o 6 [dB] proti hladině akustického tlaku uvnitř místnosti. Schématicky je tento jev znázorněn na obr. 3 [12].

Jestliže jsou lidé v poli odražených vln, tak je možno snížit jejich hlukovou expozici zvýšením pohltivosti prostoru. V poli přímých vln nemá na hladinu akustického tlaku vliv pohltivost stěn [12].



Obr. 4 Útlum vzdáleností a absorpci v uzavřeném prostoru

Účinek zvětšení zvukové pohltivosti se projeví pouze v poli odražených vln. Aplikací pohltivých materiálů na stěnách místnosti se zvětší pole přímých vln. Tím se rozšíří prostor v němž nemá na hlukovou expozici vliv pohltivost stěn. Proto je používání pohltivých materiálů na stěnách výrobních hal velice problematická záležitost. Tam totiž jsou pracovníci vzhledem ke stroji, který obsluhují a který generuje nežádoucí hluk v poli přímých vln [13].

## 2. ZVUKOVÁ POHLTIVOST

### 2.1 ZVUKOVÁ POHLTIVOST

Zvuková pohltivost je odpovědná za „slyšitelnost“ v místnosti. Na ní závisí, zda zvuk v prostoru vnímáme jako „rozléhající se“ nebo jak hlasitě zdroj hluku působí. Rozumíme jí úbytek zvukové energie v daném prostoru, způsobený ztrátou energie zvukových vln na povrchu stavebních dílců [2].

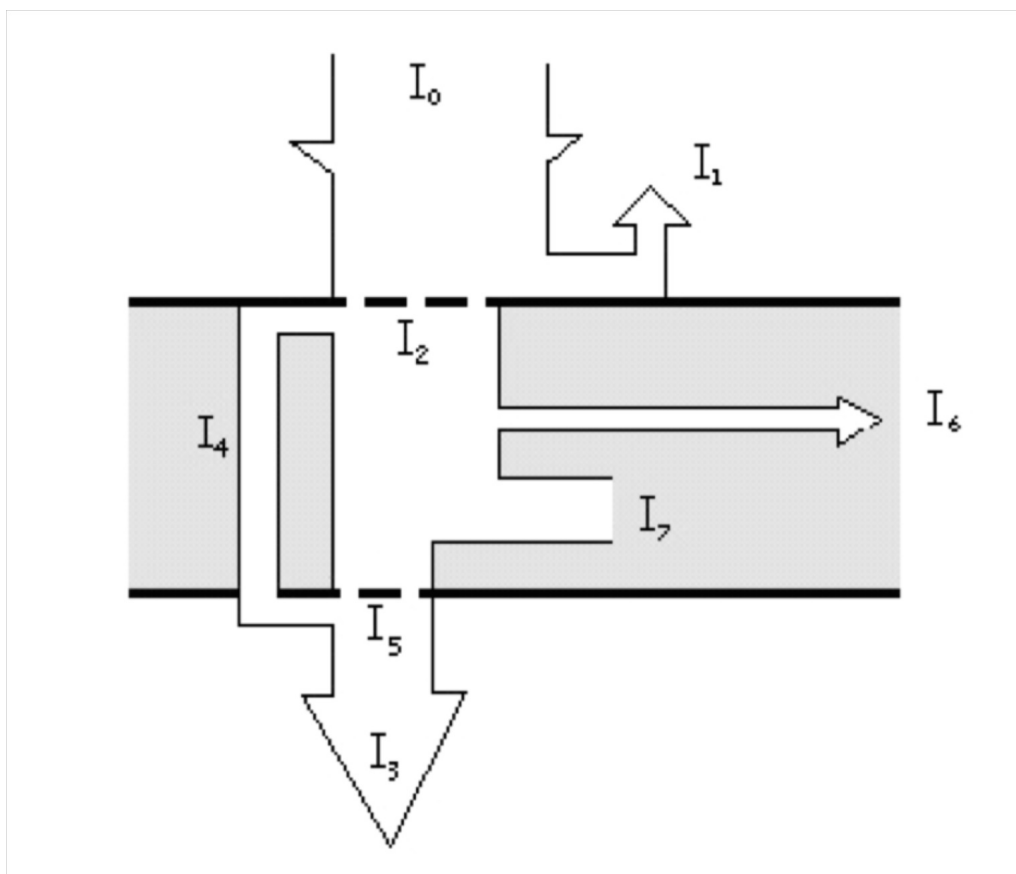
Energie zvukových vln je pohlcována nebo odrážena plochami omezujícími prostor, kromě toho i předměty a osobami v daném prostoru. Vhodně nastavená zvuková pohltivost má vliv na to, zda zvuk v prostoru vnímáme jako hlasitější nebo naopak tišší. Schopnost hmoty pohlcovat zvukové vlny závisí na jejích vlastnostech. Porézní nebo perforované materiály absorbují zvuk obvykle dobře. Jako „dobrou slyšitelnost“ v místnosti označujeme podmínky, které umožňují co nejlepší přenos zvuku od jeho zdroje k posluchači [2].

### 2.2 ČINITEL ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI

Nadměrný hluk má negativní vliv na zdraví člověka, bezpečnost apod. Jedna z možností eliminace nadměrného hluku spočívá ve schopnosti některých materiálů a konstrukcí pohlcovat akustickou energii a transformovat ji na tepelnou energii. Pohltivost zvuku je charakterizována činitelem zvukové pohltivosti, jehož velikost plyne z energetické bilance, která je znázorněna na obr. 2.1. Při dopadu zvukové vlny na nějakou překážku (např. povrch stěny) se část zvukové vlny odrazí a část pohltí. Kromě toho může ještě část zvukové vlny projít do prostoru za stěnou. Akustický výkon dopadající na  $1 \text{ m}^2$  povrchu stěny (tj. Intenzita zvuku vlny dopadající na překážku)  $I_0$  se rozdělí na následující dílčí složky [3]:

- $I_1$  – intenzita zvuku vlny odražené
- $I_2$  – intenzita zvuku vlny pohlcené
- $I_3$  – intenzita zvuku vlny vyzářené za stěnu celkem
- $I_4$  – intenzita zvuku vlny prošlé za stěnu otvory a póry

- $I_5$  – intenzita zvuku vlny, kterou stěna vyzáří v důsledku svého ohybového kmitání do druhého poloprostoru
- $I_6$  – intenzita zvuku vlny, která je vedena ve formě chvění do ostatních částí přiléhajících konstrukcí
- $I_7$  – intenzita zvuku přeměněná ve stěně na teplo [10]

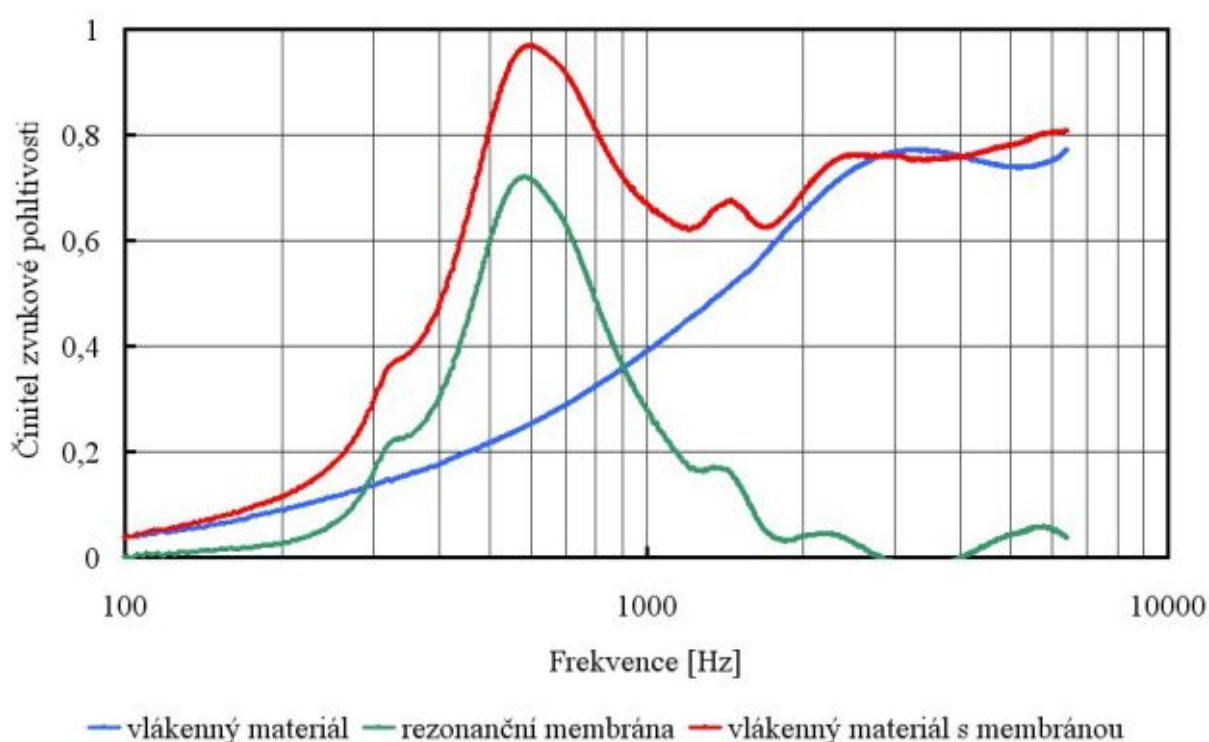


Obr. 5 Energetická bilance při dopadu zvukové vlny na stěnu

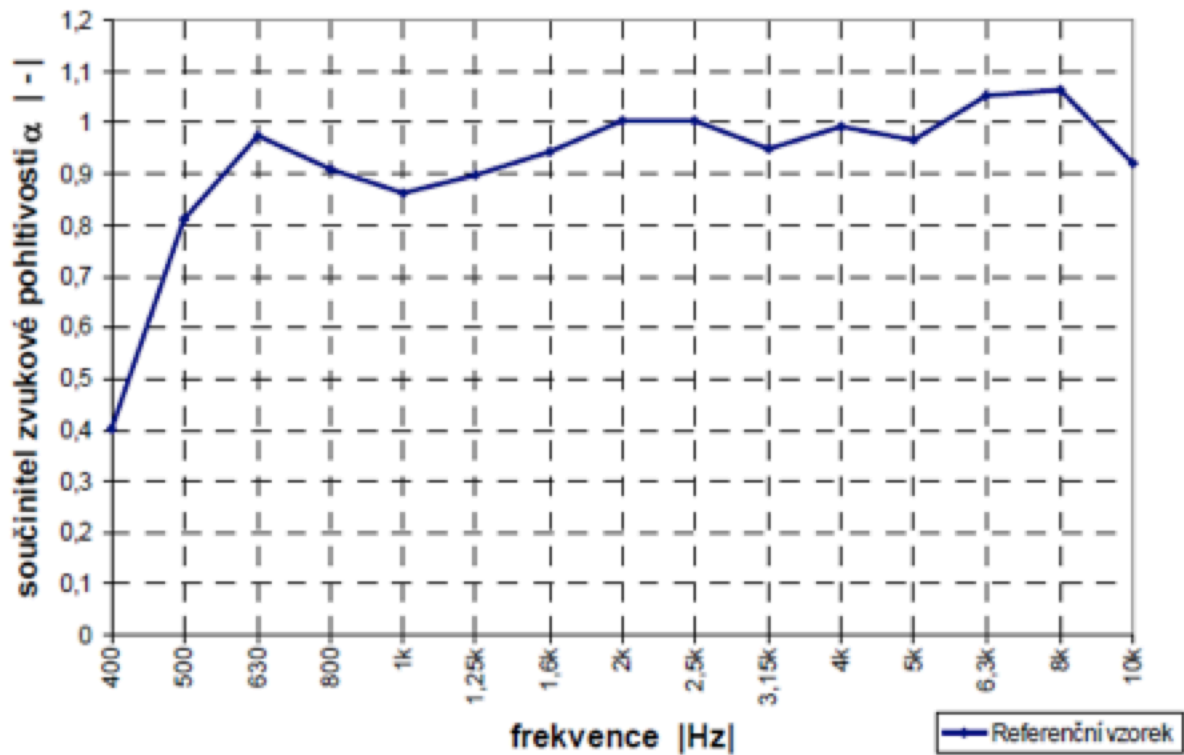
Schopnost nějakého tělesa pohlcovat zvuk se charakterizuje hodnotou činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$  [-], který je definován jako poměr energie  $I_2$ , pohlcené určitou plochou, k energii  $I_0$ , která na tuto plochu dopadá, což je vyjádřeno výrazem [10]:

$$\alpha = \frac{I_2}{I_0}, \quad (9)$$

Ze zákona zachování energie je zřejmé, že velikost činitele zvukové pohltivosti leží v intervalu  $\alpha \in \langle 0;1 \rangle$ . Materiál, u kterého dochází k úplnému pohlcení veškeré dopadající akustické energie, je charakterizován činitelem zvukové pohltivosti  $\alpha = 1$ . Jako nejvhodnější materiály pro pohlcování zvuku jsou všeobecně doporučovány zejména materiály s porézní nebo vláknitou strukturou. Naopak v případě dokonalého odrazu dopadajícího akustického vlnění od povrchu materiálu je tento materiál charakterizován činitelem zvukové pohltivosti  $\alpha = 0$ . Kromě druhu materiálu závisí velikost činitele zvukové pohltivosti zejména na frekvenci dopadajícího akustického vlnění, dále na tloušťce materiálu, pórovitosti, teplotě apod. [3]



Obr. 6 Činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$  je frekvenčně závislý (příklad z impedanční trubici)



Obr. 7 Činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$  je frekvenčně závislý (příklad z  $\alpha$  kabiny)

Schopnost pohlcovat zvuk charakterizuje každý předmět v prostoru se zřetelem na jeho akustické vlastnosti [2]. Hodnoty činitele zvukové pohltivosti pro některé materiály a jejich tloušťky v závislosti na frekvenci jsou uvedeny v tab. 2.

Materiál	kmitočety $f_m$ [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Hladký beton	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Dlaždice teracové	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04
Cihelná zeď neomítnutá	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Vápená omítka na drátěném pletivu	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05
Cihlová stěna s hlazenou omítkou	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Obkládačky, mramor, kachle	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Sádrová omítka na zdi	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Papírové tapety nalepené na zdi	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,09
Stěny obložené dřevem	0,10	0,11	0,10	0,08	0,08	0,11
Parkety na asfaltu	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,22
Podium s parketami	0,50	0,40	0,25	0,10	0,08	0,11
Guma 5 mm na betonu	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Linoleum přímo na betonu	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Korková podlaha tl. 20 mm	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
Měkká rohož 10 mm na betonu	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37
Dřevěná podlaha na polštářích	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Neomítnutý heraklit tl. 35 mm	0,08	0,09	0,15	0,23	0,29	0,30
Okenní sklo	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Koberec kokosový tl. 6 mm	0,15	0,07	0,10	0,19	0,28	0,79
Koberec plyšový tl. 10 mm	0,10	0,10	0,15	0,30	0,60	0,88
Plst' technická tl. 25 mm na zdi	0,12	0,18	0,32	0,60	0,88	0,88
Těžké záclony	0,06	0,10	0,38	0,63	0,70	0,73
Lehké záclony (50% řasení)	0,07	0,31	0,79	0,81	0,66	0,54
FEAL lamely perfor., mezera 150 mm	0,70	1,01	1,04	1,03	1,02	0,94
FEAL lamely plné, mezera 150 mm	0,80	0,60	0,38	0,25	0,21	0,32
FEAL kazety perforované o 2 mm,	0,31	0,65	0,84	0,79	0,72	0,70
FEAL kazety plné, mezera 150 mm	0,49	0,37	0,19	0,10	0,07	0,15
AKUMIN podhledy, stěny, mezera 70	0,31	0,27	0,37	0,55	0,62	0,68
AKUMIN podhledy, stěny, mezera 0	0,06	0,21	0,46	0,58	0,65	0,70
Posluchač sedící v místnosti						
1 osoba /m <sup>2</sup>	0,16	0,25	0,60	0,70	0,90	0,80
2 osoby/m <sup>2</sup>	0,23	0,40	0,85	0,88	0,92	0,92

Tab. 2 Hodnoty činitele zvukové pohltivosti některých materiálů

Činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$  lze zjistit výpočtem ze vztahu pro stanovení hladiny akustického tlaku v uzavřeném prostoru:

$$L_p = L_w + 10 \log \left[ \frac{Q}{4\pi R^2} + \frac{4(1-\alpha_m)}{S\alpha_m} \right], \quad (10)$$

výpočtem podle:

$$\alpha_m = \frac{\sum \alpha_i S_i}{\sum S_i}, \quad (11)$$

kde  $S[m^2]$  je součet všech ploch ohraničujících místnost,  $\alpha_m[-]$  střední činitel zvukové pohltivosti, který lze stanovit ze známých činitelů pohltivosti jednotlivých ploch  $\alpha_i[-]$ .

Činitel zvukové pohltivosti lze dále vypočítat z doby dozvuku, nebo přímým měřením. Obě metody budou popsány v následující kapitole.

## 2.3 ČINITELI ZVUKOVÉ ODRAZIVOSTI, ZVUKOVÉ PRŮVZDUŠNOSTI A TEPELNÉ PŘEMĚNY

Z energetické bilance lze dále definovat činitel zvukové odrazivosti  $\beta$ , činitel zvukové průvzdušnosti  $\tau$  a činitel tepelné přeměny  $\varepsilon$ , které jsou definovány rovnicemi [3]:

$$\beta = \frac{I1}{I0}, \quad (12)$$

$$\tau = \frac{I3}{I0}, \quad (13)$$

$$\varepsilon = \frac{I7}{I0}, \quad (14)$$

Výše uvedené činitele zvuku jsou bezrozměrné veličiny podobně jako činitel zvukové pohltivosti a jejich velikost se též může teoreticky pohybovat od 0 do 1. Ze zákona zachování energie musí platit [3z]:

$$\alpha + \beta = 1, \quad (15)$$

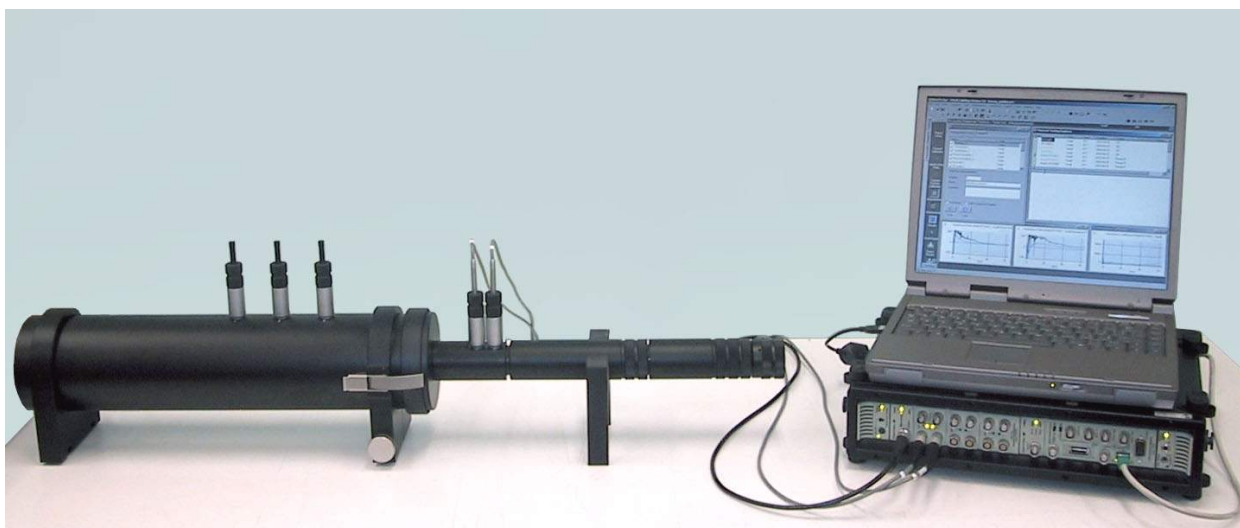
Součet činitele zvukové pohltivosti a činitele zvukové odrazivosti je roven 1 [3]. Z porovnání uvedených vztahů dále vyplývá, že [1]:

$$\alpha = \varepsilon + \tau. \quad (16)$$

### 3. METODY MĚŘENÍ ČINITELŮ ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI

#### 3.1 V IMPEDANČNÍ TRUBICI

- Měření na vzorku  $\varnothing 100$  mm
- Frekvenční rozsah 16 [Hz] – 6,4 [kHz]
- Kolmý dopad zvukových vln (minimální hodnota zvukové pohltivosti)
- Určeno především pro vývoj protihlukových materiálů a porovnávací měření [4]



Obr. 8 Impedanční trubice

Měření činitele zvukové pohltivosti se realizuje na Kundtově impedanční trubici metodou přenosové funkce (viz. obr. 8) podle normy ČSN ISO 10534-2. Na jednom konci trubice T je umístěn zkoumaný vzorek VZ, na druhém konci je umístěn reproduktor R, který je napájen generátorem signálu GS. Signál je následně zesílen v zesilovači Z. Na trubici jsou umístěny dva mikrofony M1 a M2 stejného druhu pro měření akustických tlaků. Naměřené veličiny jsou použity pro další zpracování v systému kmitočtové analýzy SKA. Činitel zvukové pohltivosti při kolmém dopadu akustického vlnění se potom určí z rovnice:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2, \quad (17)$$



kde  $r$  je činitel odrazu akustického tlaku,  $r_r$  je reálná složka činitele odrazu akustického tlaku,  $r_i$  je imaginární složka činitele odrazu akustického tlaku [3].

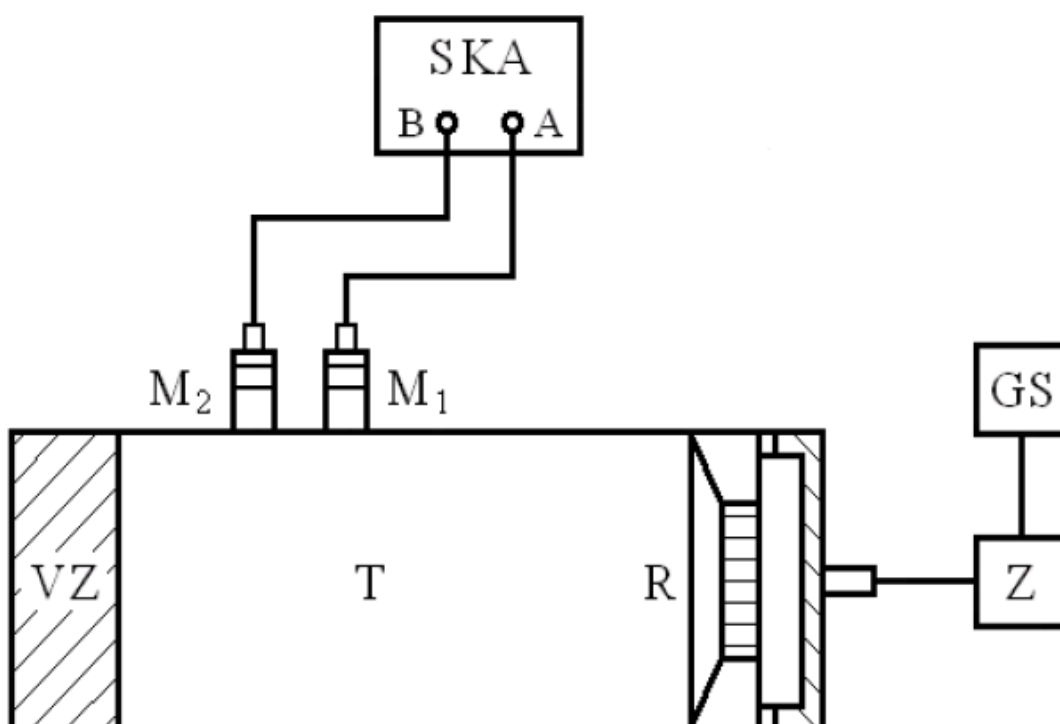
Činitel odrazu akustického tlaku je dán rovnicí:

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} \cdot e^{2k_0 \cdot x_i}, \quad (18)$$

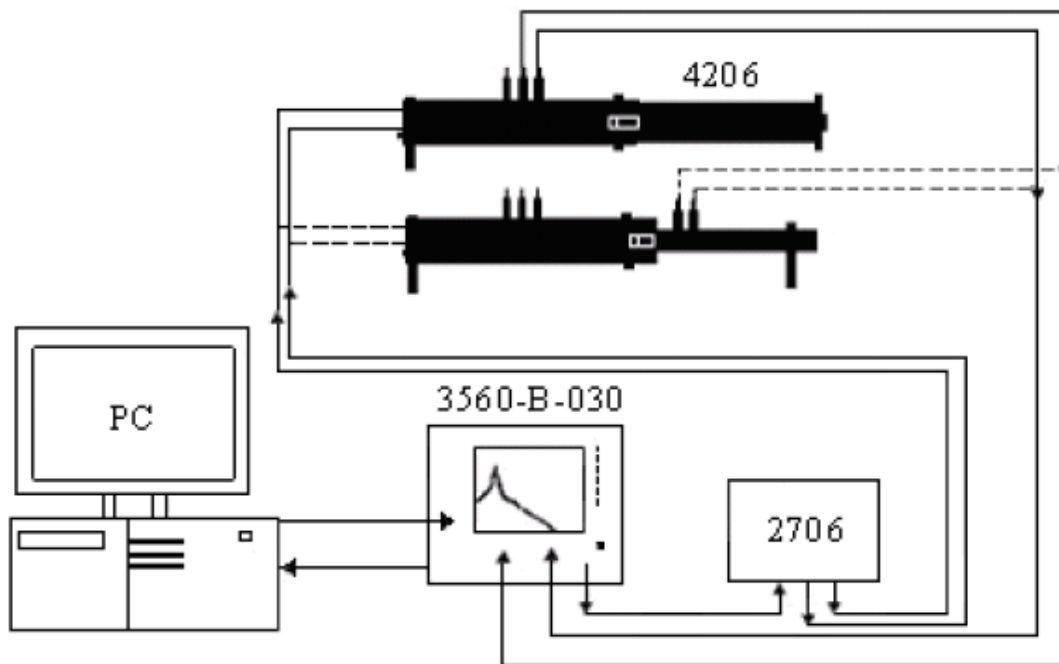
kde  $H_{12}$  je přenosová funkce mezi místy 1 a 2,  $H_I$  – přenosová funkce pro samotnou dopadající vlnu,  $H_R$  – přenosová funkce pro samotnou odrážející se vlnu,  $k_0$  – komplexní vlnové číslo,  $x_1$  – vzdálenost mezi vzorkem a vzdálenějším mikrofonom od něj,  $i$  – imaginární jednotka [3].

Schéma a fotografie této měřicí aparatury pro měření činitele zvukové pohltivosti jsou uvedeny na obr. 8, obr. 9 a obr. 10.

Tato aparatura sestává z Kundtovy impedanční trubice Brüel & Kjaer typu 4206, tříkanálového PULSE multianalyzátoru Brüel & Kjaer typu 3560-B-030, zesilovače Brüel & Kjaer typu 2706 pro zesílení vstupního signálu a počítače PC pro ukládání naměřených dat [3].



Obr. 9 Princip měření činitele zvukové pohltivosti v Kundtově impedanční trubici metodou přenosové funkce.



Obr. 10 Schéma zapojení měřicí aparatury pro měření činitele zvukové pohltivosti

Kundtova impedanční trubice se skládá ze dvou částí. A sice ze dvou trubic malého a velkého průměru. Velká trubice o průměru  $d = 100$  [mm] je vhodná pro měření činitele zvukové pohltivosti při malých frekvencích a používá se ve frekvenčním rozsahu  $f = \langle 0 \div 1600 \rangle$  Hz. Malá trubice o průměru  $d = 30$  mm je vhodná pro měření činitele zvukové pohltivosti při větších frekvencích a měří při frekvencích  $f = \langle 0 \div 6400 \rangle$  Hz. Je tedy zřejmé, že při frekvencích  $f = \langle 0 \div 1600 \rangle$  Hz se jedná o přechodovou oblast mezi oběma trubicemi. Z tohoto důvodu se velká trubice používá pro přímé měření akustických veličin při frekvencích  $f = \langle 0 \div 500 \rangle$  Hz. Malá trubice měří přímo akustické veličiny při frekvencích  $f \geq 1600$  Hz. Naměřená data akustických veličin v přechodové frekvenční oblasti, tzn. při  $f = \langle 500 \div 1600 \rangle$  Hz, se získají výpočtem z hodnot příslušných akustických veličin získaných měřením na malé a velké Kundtově trubici. Výsledkem měření jsou frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti při frekvencích  $f = \langle 0 \div 6400 \rangle$  Hz s frekvenčním krokem  $\Delta f = 2$  Hz [3]. Frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti pro impedanční trubice je na obr. 5.

### 3.2 $V_{\alpha}$ KABINĚ

- určena pro měření zvukové pohltivosti vzorků absorpčních materiálů, obkladů spojených s nosičem, součástí nebo výrobků
- určena pro měření zvukové pohltivosti při všesměrovém dopadu zvukových vln,
- výstupem z měření je koeficient zvukové pohltivosti  $\alpha$  (v případě, že je možné stanovit plochu, na které dochází k pohlcování)
- výstupem z měření je doba dozvuku  $T$  (v případě, že není možné stanovit plochu, na které dochází k pohlcování)
- je objektivní platformou pro měření zvukové pohltivosti
- vychází z požadavků ISO 354 (ČSN ISO 354 Akustika - Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti), respektuje metodiku, avšak odstraňuje nevýhodu potřeby vzorku o velkých rozměrech [4]

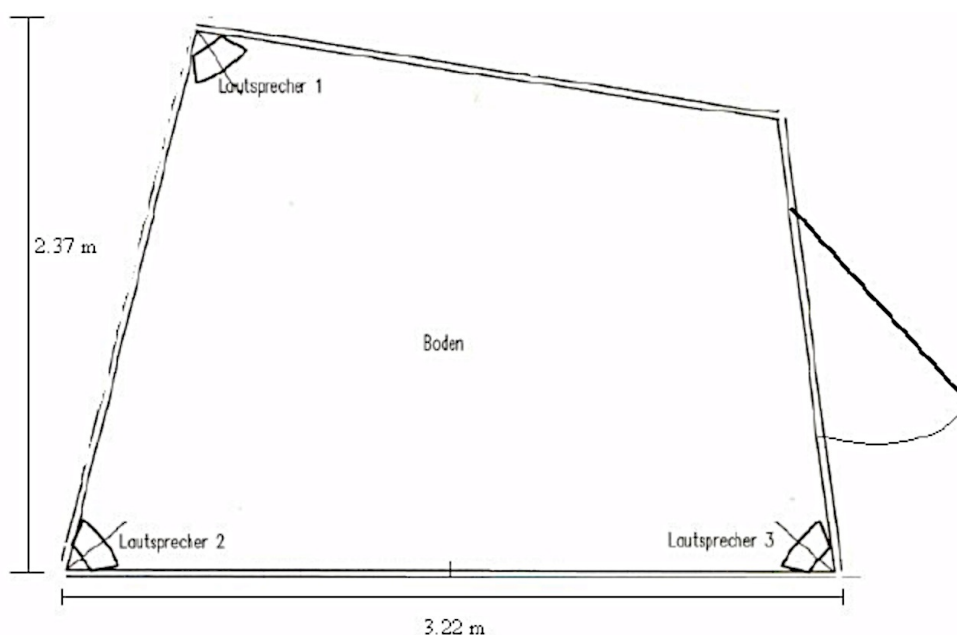


Obr. 11  $\alpha$ -kabina

Parametr	Hodnota	
Objem kabiny	6,44 m <sup>3</sup>	
Vnější rozměry $\alpha$ -kabiny	3,22 m $\times$ 2,37 m $\times$ 2,03 m	
Rozměr vstupních dveří $\alpha$ -kabiny	123 cm $\times$ 75 cm	
Rozměry standardního vzorku	1,0 m $\times$ 1,2 m	
Povrch měřených tvarových dílů	0,6 m <sup>2</sup> až 2,4 m <sup>2</sup>	
Rozsah měřených frekvencí	oktávová analýza	500 Hz až 8 kHz
	1/3-oktávová analýza	400 Hz až 10 kHz

Obr. 12 Parametry  $\alpha$  kabiny

- Alfa-kabina je v měřítku 1:3,2 k parametrům dozvukové komory švýcarské zkušební materiálu a testovací laboratoře (EMPA) v Dübendorfu
- Poměry v difúzním poli  $\alpha$  kabiny jsou prakticky stejné jako ve velká dozvukové komoře, ale pro třikrát kratší vlnové délky, resp. třikrát vyšší frekvence
- Rozdíl mezi měřeními v  $\alpha$  kabině a v dozvukové komoře dle ISO 354 spočívá v povrchových jevech vzorku
- Tloušťka vzorku v  $\alpha$  kabině je jediná geometrická veličina, která není redukována v poměru 1:3. Pohltivá plocha odpovídající okrajům vzorku se tedy jeví v poměru k jejímu povrchu třikrát větší. Vzhledem k normou požadovaným 12 [m<sup>2</sup>] plochy je velmi důležité olemování vzorku v  $\alpha$  kabině [4]

Obr. 13 Schema  $\alpha$  kabiny

Základní výpočetní vztah, který platí pro vzorky s definovanou plochou  $S$ :

$$\alpha_s = \frac{0,966}{S} \cdot \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right), \quad (19)$$

Ekvivalentní pohltivost  $A$  [ $m^2$ ] odpovídá ploše absolutní pohltivosti ( $\alpha_s = 1$ ), která má stejnou pohltivou schopnost, jako dotyčný tvarový díl. Je definovane následujícím vztahem:

$$A = 0.966 \cdot \left( \frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_2} \right), \quad (20)$$

Vzhledem k  $\alpha$  rozměru kabiny, rozměrům vstupních dvířek kabiny v  $\alpha$  kabině se standardně měří vzorky o rozměru 1,0 [m]×1,2 [m] (+2 [mm], - 1[mm]) a měření zvukové pohltivosti na vzorcích spojených s pokladovým nosným materiálem nebo měření konkrétních výrobků a/nebo součástí je nutne dopředu konzultovat. Výstupem z měření je standardní protokol a/nebo data exportovaná do MS Excel [4].

### 3.3 PODLE NORMY ČSN ISO354 V DOZVUKOVÉ MÍSTNOSTI

- Mezinárodní standard
- Objem místnosti minimálně 150 m<sup>3</sup>
- Frekvenční rozsah 100 [Hz] – 5 [kHz]
- Plocha vzorku 10 m<sup>2</sup> až 12 m<sup>2</sup>
- Všesměrový dopad zvukových vln na měřený vzorek [4]

V normovaných dozvukových komorách dle EN ISO 354 se měří doba dozvuku v terciových frekvenčních pásmech od 100 do 5000 Hz. Tím vznikne podklad pro porovnání vlastností prázdné komory a komory s nainstalovaným zkoušeným produktem. Výsledek se zobrazuje jako křivka nebo se vyjádří hodnotami v tabulce. Souhrn všech zvukových pohltivostí či odrazivostí jednotlivých předmětů v místnosti vytváří v našem uchu akustický obraz prostoru (dobu dozvuku), který v nás vyvolává pocit „rozléhavosti“ či „tlumenosti“ zvuku v daném prostoru [5].

Jednou z prvních souhrnných hodnot, které se začaly používat k vyjádření křivky zvukové pohltivosti jedním číselným údajem, byla hodnota NRC („součinitel zvukového útlumu“). Vypočítává se dle amerického standardu ASTM C 423 jako průměr hodnot zvukové pohltivosti pro frekvence 250, 500, 1000 a 2000 Hz s konečným zaokrouhlením na 0,05 [5].

Stupeň zvukové pohltivosti  $\alpha_w$  se stanovuje dle EN ISO 11654. Stupně zvukové pohltivosti naměřené dle EN ISO 354 pro každé oktávové frekvenční pásmo se převádějí do praktických stupňů zvukové pohltivosti  $\alpha_p$ .

$$\alpha_{p(f)} = \frac{\alpha_{f1} + \alpha_{f2} + \alpha_{f3}}{3}, \quad (21)$$

Normou daná referenční křivka se posouvá po výsledné křivce  $\alpha_p$  tak, aby se co nejvíce překrývaly. Přitom jsou odchylky směrem dolů normou velmi omezené. Hodnota referenční křivky pro frekvenci 500 Hz určuje stupeň pohltivosti  $\alpha_w$  daného produktu. Pokud je rozdíl mezi referenční křivkou a na ní ležící hodnocenou křivkou zvukové pohltivosti příliš velký, mohou být k upřesnění použity indikátory (L, M, H), které vyjadřují, že se křivka  $\alpha_p$  od referenční křivky výrazně odchyluje v nízkém (L), středním (M) nebo vysokém (H) frekvenčním pásmu a hodnocený produkt je tak významně pohltivější, než udává hodnota  $\alpha_w$  [5].

Třída zvukové pohltivosti (CSN EN ISO 11654)	Hodnoty	Třída pohltivosti (podle VDI 3755/2000)	NRC
A	0,90;0,95;1,00	velmi vysoko pohltivý	NRC>0,75
B	0,80;0,85	velmi vysoko pohltivý	NRC>0,75
C	0,60;0,65;0,70;0,75	vysoko pohltivý	0,5<NRC<0,75
D	0,30;0,35;0,40;0,45;0,50;0,55	pohltivý	0,5<NRC<0,75
E	0,15;0,20;0,25	málo pohltivý	0,25<NRC<0,5
Není klasifikovány	0,05;0,10	odrazivý	NRC<0,25

Tab. 3 Klasifikace zvukové pohltivosti podle CSN EN ISO 11654

## 4. MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU

### 4.1 DOBA DOZVUKU

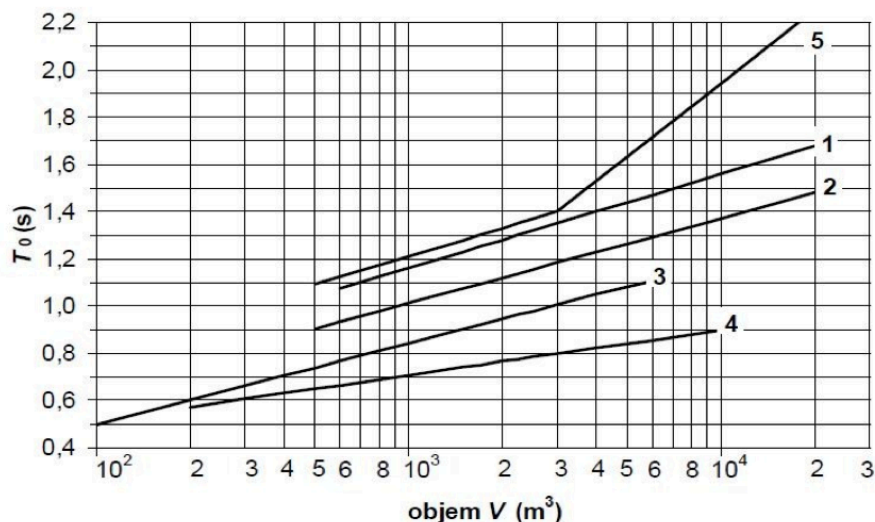
V ustáleném stavu je v uzavřeném prostoru vytvořena situace, kdy zdroj zvuku neustále doplňuje energii pohlcenou stěnami a jinými v prostoru se nacházejícími věcmi, lidmi nebo materiály. Protože se v uzavřených prostorech zvuk od zdroje do určitého místa šíří dvěma způsoby, a to za prvé přímo a za druhé odrazem od stěn, které obklopují tento prostor, tak jestliže zdroj zvuku vypneme, klesne energie přímého zvuku na nulu okamžitě, ale energie difúzního pole díky delším drahám a konečné rychlosti šíření odražených vln neklesne okamžitě na nulovou úroveň, ale bude se postupně zmenšovat, až bude úplně pohlcena. Tato složka zvukové energie, která se šíří prostorem po tom, co jsme vypnuli zdroj zvuku, bude tedy doznívat s časem a vznikne jev, který se nazývá dozvuk [11].

Pokud vypneme zdroj zvuku, bude hladina akustické energie v uzavřeném prostoru postupně klesat. Čas, za který tato hladina akustické energie poklesne o 60 dB se nazývá doba dozvuku. V časovém průběhu doby dozvuku je obsažen přímý zvuk, který přijde od zdroje, a dále pak prvotní a mnohonásobné odrazy přicházející z různých směrů [8].

Doba dozvuku je velmi důležitý parametr objektivního hodnocení kvality sálů. Je důležitá z hlediska srozumitelnosti řeči, kvalitního poslechu určitého druhu hudby (pro různé druhy hudby se hodí jiná doba dozvuku) a nebo třeba jen dobré pracovní pohody. Je také jedním z parametrů, které se dají poměrně přesně předpovědět výpočtem [8].

Optimální doba dozvuku uzavřeného prostoru a její závislost na frekvenci se stanovuje podle objemu a účelu místnosti. U náročnějších prostorů se předepisuje doba dozvuku v pásmu 63[Hz]–10k[Hz], v méně náročných případech pak pro pásmo 125 Hz – 4 kHz [8].

Se stoupajícím objemem prostoru optimální doba dozvuku  $T_{\text{opt}}$  stoupá a obecně lze říci, že je větší pro hudbu než pro mluvené slovo. Také lze říci, že doba dozvuku v prostorech s malou difuzitou musí být volena menší než v prostorech s příznivou hodnotou difuzity. Závislost optimální doby dozvuku na objemu prostoru znázorňuje obr. 14 [8].



Obr. 14 Závislost optimální doby dozvuku na objemu prostoru

Obr. 4.1 Závislost optimální doby dozvuku pro kmitočet 1 000 Hz na objemu uzavřeného prostoru v obsazeném stavu s výjimkou závislosti 5, která se týká neobsazeného stavu. 1 - opera, hudební divadlo, 2 - víceúčelový sál, zkušebna orchestru, 3 - činoherní divadlo, posluchárna, 4 - kino s jednokanálovým zvukovým zařízením, 5 - tělocvična, sportovní hala, plavecká hala [8].

## 4.2 DOBA DOZVUKU PODLE SABIHEHO

Doba dozvuku podle Sabineho  $T_s$

$$T_s = 0,164 \frac{V}{\alpha_m S}, \quad (\alpha_m < 0,2), \quad (22)$$

$$T_s = 0,164 \frac{V}{\sum_{(i)} \alpha_i S_i + 4mV}, \quad (\alpha_m < 0,2), \quad (23)$$

$$\alpha_m = \frac{\sum_{(i)} \alpha_i S_i}{\sum_{(i)} S_i}, \quad (24)$$

kde index  $i$  zahrnuje všechny materiály na povrchu místnosti včetně vnitřního zařízení (nábytek, koberce apod.) a osob. Hodnoty  $\alpha$ , resp.  $S\alpha$  pro tyto objekty jsou tabelovány v akustických tabulkách [6]. Velikost absorpce je vyjádřena součinem  $4mV$ , přičemž  $m$  je dekrement útlumu, který závisí především na relativní vlhkosti vzduchu,  $V$  je objem místnosti. Absorpce se



uplatňuje při výpočtech zejména na vyšších frekvencích, tj. Nad 2000 Hz a pro objem místnosti větší než 2000 m<sup>3</sup> [11].

Vztahy (22) a (23) pro dobu dozvuku podle Sabina má zjevně omezenou platnost. Bude-li pohltivost stěn nulová  $\alpha = 0$  a všechna energie se odrazí, měla by doba dozvuku být nekonečná. Tento rozpor se zkušeností vyžaduje zahrnutí útlumu zvuku při jeho šíření. Větší komplikace nastává pro dokonale pohltivé stěny  $\alpha = 1$ , kdy doba dozvuku podle vztahu (22) a (23) je zjevně nenulová, i když by se měla rovnat nule. Pro prostory se středním činitelem pohltivosti  $\alpha < 0,2$  a ne příliš velkými rozdíly mezi jednotlivými stěnami je i Sabinův vzorec dostatečně přesný, při běžných měřeních se pak nejčastěji používá vzorec Eyringův [7].

### 4.3 DOBA DOZVUKU PODLE EYRINGA

Doba dozvuku podle Eyringa  $T_E$

$$T_E = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_m) + 4mV}, \quad (\alpha_m < 0,8), \quad (25)$$

$$\alpha_m = \frac{\sum_{(i)} \alpha_i S_i}{\sum_{(i)} S_i}, \quad (26)$$

kde substituce  $\alpha_e = -\ln(1 - \alpha)$  ja někdy označována jako Eyringův činitel zvukové pohltivosti a doba dozvuku vyjadřena tímto vztahem se nazývá doba dozvuku podle Eyringa. Vidíme, že pro  $\alpha = 1$  vychází  $T_E = 0$  a Eyringův vzorec vychovuje i pro velké pohltivosti [7].

### 4.4 DOBA DOZVUKU PODLE MILLINGTONA

Doba dozvuku podle Millingtona  $T_M$

$$T_M = 0,164 \frac{V}{-\sum_{(i)} S_i \ln(1 - \alpha_i) + 4mV}, \quad (\alpha_m > 0,8), \quad (27)$$

Millington respektoval tu skutečnost, že obvykle není splněn předpoklad, že absorpce je rovnoměrně rozložena po celém povrchu místnosti [10].

V praxi je pro výpočet doby dozvuku nejčastěji používán Eyringův vztah (25).

## 4.5 FREKVENČNÍ ZÁVISLOST DOBY DOZVUKU

Nutno připomenout, že činitel akustické pohltivosti  $\alpha$  (materiálová frekvenčně závislý, takže tím se i doba dozvuku stává frekvenčně závislou. Je proto třeba určovat, pro jakou frekvenci provádíme výpočet doby dozvuku. Většinou jsou hodnoty  $\alpha$  tabelovány pro frekvenci 500 [Hz], takže i doba dozvuku z nich vypočítaná se vztahuje k této frekvenci. Někdy se také můžeme setkat s dobou dozvuku vypočítanou pomocí činitele akustické pohltivosti  $\alpha_{NRC}$  (Noise Reduction Coefficient) získaného jako aritmetický průměr konstanta) je z činitelů akustických pohltivosti  $\alpha$  pro frekvence 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz a 2000 Hz [6].

$$\alpha_{NRC} = \frac{\alpha_{250Hz} + \alpha_{500Hz} + \alpha_{1000Hz} + \alpha_{2000Hz}}{4}, \quad (28)$$

Doba dozvuku vypočítaná pomocí  $\alpha_{NRC}$  má ovšem spíše orientační hodnotu.

Pokud dobu dozvuku měříme, máme možnost určovat doby dozvuku v jedno-oktávních frekvenčních pásech nebo ve třetino-oktávních pásech, čímž dostáváme dost podrobnou informaci o době dozvuku v místnosti v závislosti na frekvencích. Měření ovšem můžeme provádět i širokopásmově (pro všechny frekvence souhrnně), čímž dostáváme dobu dozvuku, která je ovlivněna všemi frekvencemi. Vypočtené a naměřené hodnoty bychom tedy měli srovnávat vždy s ohledem na jejich frekvenční příslušnost [6].

## 4.6 PRINCIP MĚŘENÍ

Praktická měření doby dozvuku se mohou provádět různými způsoby, vždy však je k tomu zapotřebí zdroj zvuku (např. reproduktor), kterým se vytvoří testující signál (akustické pole), dále je třeba přijímač (např. mikrofon se zesilovačem), který zachycuje dozívání a konečně také vyhodnocovací jednotka (např. PC se zvukovou kartou a řídicím a výpočetním programem) Jako testujícího signálu se může použít buď kontinuálního nebo pulsního zvukového signálu. Kontinuální signál má většinou podobu bílého (event. růžového) šumu

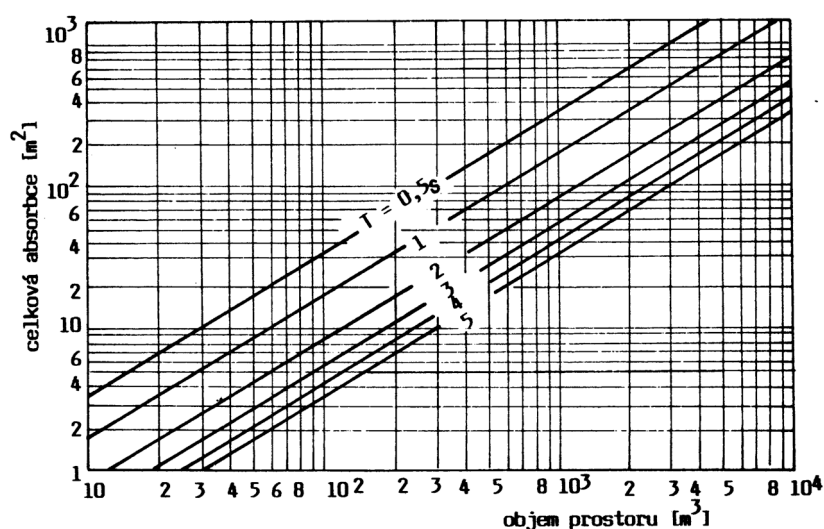
(plochá frekvenční charakteristika) a použít se do místnosti buď širokopásmově (nefiltrovaně) nebo v jedno-oktákových nebo třetino-oktákových frekvenčních pásmech. Pulsní signál se může generovat různě např. silným tlesknutím do dlaní nebo jiskrovým výbojem nebo startovací poplašnou pistolí apod [6].

Zdroj zvuku by měl být co nejvíce všesměrový a musí vybudit hladinu akustického tlaku, postačující pro získání dozvukových poklesů o požadovaném dynamickém rozsahu bez narušení hlukem pozadí. Volí se takový počet měřicích poloh, aby se dosáhlo příslušného pokrytí místnosti. Mikrofony musí být od sebe vzdáleny alespoň na polovinu vlnové délky tj. na minimální vzdálenost 2 m pro obvyklý kmitočtový rozsah. Vzdálenost kterékoli polohy mikrofonu k nejbližšímu odrazivému povrchu, včetně podlahy musí být alespoň čtvrtina vlnové délky, tj. normálně cca 1 m. Žádný z mikrofonů nesmí být příliš blízko zdroje zvuku, aby se zabránilo silnému vlivu přímého zvuku [6].

Doba dozvuku se určuje výpočtem nebo měřením v prostorech, které mají sloužit přednáškám, koncertům, divadlu apod. Ze známé doby dozvuku je možno zpětně vypočítat celkovou pohltivost prostoru [10].

$$A = \alpha_m S, \quad (29)$$

Následně lze pak určit očekávanou dobu dozvuku odečtem z nomogramu.



Obr. 15 Závislost doby dozvuku na objemu a celkové pohltivosti prostoru

Střední činitel pohltivosti $\alpha$	Druh prostoru
0,05	Téměř prázdná místnost s tvrdými stěnami z betonu
0,1	Částečně prázdná místnost s tvrdými stěnami
0,15	Pravoúhlá místnost zařízená nábytkem - dílna, průmyslová hala
0,2	Nepravidelná místnost zařízená nábytkem - dílna, průmyslová hala
0,25	Místnost s čalouněným nábytkem, dílna atd. s dílčími zvuk pohltivými obklady na stropu nebo stěnách
0,35	Místnost s větším množstvím zvuk pohltivých obkladů stropu a stěn
0,5	Místnost s velkým množstvím zvuk pohltivých materiálů na stěnách a stropu

Obr. 16 Přibližné hodnoty středního součinitele zvukové pohltivosti

#### 4.6.1 METODA PŘERUŠENÉHO ŠUMU

Jako zdroj zvuku musí být použit reproduktor a signál, který do něj přivedeme, musí být náhodný nebo pseudonáhodný šum. Pokud použijeme pseudonáhodný šum, musí být tento vypínán po různě dlouhé době. Nesmí se stát, že bude přehrávána stále stejná sekvence, která bude vypínána v témže okamžiku. Budeme-li chtít měřit například  $T_{30}$ , musí být zdroj schopen vybudit hladinu nejméně 45 dB nad hladinou hluku pozadí. Dobu dozvuku určíme jako rozdíl časů při poklesu hladiny akustického tlaku o 5 dB a 35 dB od ustálené hladiny [8].

Pokud chceme měřit v oktákových pásmech, musí být šířka pásma signálu větší nebo rovna jedné oktávě a podobně pro měření v třetioktákových pásmech musí být větší nebo rovna 1/3 oktávy, přičemž spektrum musí být v daném pásmu dostatečně ploché. Nebo může být použit širokopásmový šum, jehož spektrum je tvarováno tak, aby poskytovalo růžové spektrum ustáleného odraženého zvuku v uzavřeném prostoru od 88 Hz do 5657 Hz. Tento pak pokrývá třetioktáková pásma se středními kmitočty od 100 Hz do 5 kHz nebo oktáková pásma od 125 Hz do 4 kHz. Inženýrská a přesná metoda vyžadují buzení trvající nejméně tak dlouho, aby zvukové pole před vypnutím zdroje dosáhlo ustáleného stavu. Šum musí být tedy vyzařován po dobu nejméně  $T/2$ , kde  $T$  je odhad očekávané doby dozvuku v sekundách. Ve velkých objemech musí být doba buzení alespoň několik sekund. U orientační metody lze použít krátké buzení,

nebo impulzní signál jako náhradu přerušného šumového signálu, přesnost je však potom menší než výše uvedených 10 % [8].

#### **4.6.2 METODA INTEGROVANÉ IMPULSOVÉ ODEZVY (SCHROEDEROVÁ METODA)**

Impulzovou odezvu z místa zdroje zvuku do místa příjmu zvuku v uzavřeném prostoru lze získat několika způsoby. Např. pomocí signálu s rozprostřeným spektrem MLS - Maximum Length Sequence (sledy maximální délky), spojitě přeladovaného tónu nebo šumových pulzů či výstřelů z pistole. Norma nevyklučuje žádnou metodu, která poskytne správnou impulzovou odezvu [8].

Pokud použijeme jako zdroj impulzu pistoli nebo jiný zdroj zvuku, který sám nedoznívá, lze získat impulzovou odezvu přímo. Tato metoda by se však měla používat pouze pro orientační měření [8].

Pokud použijeme speciální signál, jakým je např. MLS, dostaneme impulzovou odezvu až po dekonvoluci signálu zaznamenaného mikrofonem. Výhodou použití tohoto signálu je zlepšený odstup signálu od šumu (tzv. SNR – Signal to Noise Ratio), což v praxi znamená snížení dynamických požadavků na zdroj. Stále však platí, že tyto speciální signály musí splňovat požadavky kladené na spektrum a zdroj musí mít všesměrovou charakteristiku a musí dokázat dostatečně vybudit prostor pro zvolené měření doby dozvuku  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  nebo  $T_{30}$ . Při analýze signálu se často používá kmitočtové filtrování, které postačuje, aby budicí signál pokrýval pásma, která se měří. Při použití časového průměrování nesmí proces průměrování měnit měřenou impulzovou odezvu [8].

**Integrace impulzové odezvy:** Pro každé oktávové pásmo se křivka poklesu vytvoří zpětnou integrací kvadrátu filtrované impulzové odezvy [8].

**Vyhodnocení křivky poklesu:** Ustálená hladina je dána celkovou hladinou integrované impulzové odezvy. Ve vyhodnocovaném rozmezí se křivka proloží přímkou, která se vypočítá metodou nejmenších čtverců nebo jiným postupem, který dává podobné výsledky. Dobu dozvuku  $T_{30}$  následně zjistíme z poklesu o 5 dB až 35 dB [8].

Oba uvedené postupy vychází z ČSN EN ISO 3382-2. Pro obe metody v každé poloze mikrofonu se měří několikrát pro každé kmitočtové pásmo doba pro pokles hladiny akustického tlaku pro pokles o 30 dB po vypnutí zdroje buzení a to od poklesu o 5 dB až 25 dB pod počáteční hodnotou. Proveďte se přepočítání na pokles o 60 dB a z jednotlivých měření se stanoví průměrná hodnota v jednotlivých kmitočtových pásmech a vypočte se nejistota výsledků. Měření je obvykle v základním frekvenčním rozsahu od 100 Hz do 3150 Hz nebo v rozšířeném [8].

## 5. MĚŘENÍ A VÝPOČTY

Výše popsané metody v kapitole číslo 3 jsou především určeny pro měření vzorků určitých (omezených) rozměrů. Cílem měření bylo zjistit činitele zvukové pohltivosti stěn v reálném prostoru, a pro toto měření byly zvoleny následující metody na základě teorie kapitol č. 3 a 4:

- měření č.1: ověření hladin akustického zdroje
- měření č.2: stanovení činitele zvukové pohltivosti
- měření č.3: stanovení činitele zvukové pohltivosti 2
- měření č.4: stanovení činitele zvukové pohltivosti z doby dozvuku
- stanovení činitele zvukové pohltivosti výpočtem

Měření bylo provedeno v akustické laboratoři Ústavu techniky prostředí ČVUT o rozměru 5,5x5,5x3,5 m. Místnost má betonovou podlahu, strop a stěny obložené akustickým širokopásmovým materiálem POLYSON (podrobnější popis vlastnosti materiálu v podkapitole 5.5).



Obr. 17 Akustická laboratoř Ústavu techniky prostředí ČVUT

## 5.1 OVĚŘENÍ HLADIN AKUSTICKÉHO ZDROJE

Cílem je stanovení hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku pro následné výpočty činitele zvukové pohltivosti.

### 5.1.1 ČSN ISO 3746 PROVOZNÍ METODA VE VOLNÉM POLI NAD ODRAZIVOU PLOHOU

Tato měření bylo provedeno podle mezinárodní normy ČSN ISO 3746, která stanovuje metodu pro měření hladiny akustického tlaku na měřicí ploše obklopující zdroj hluku, v podmínkách převažujícího volného pole v blízkosti jedné nebo více odrazivých rovin. Cílem je výpočet hladiny akustického výkonu vyzařovaného zdrojem. Metoda je vhodná pro měření všech typů hluku. Přesnost této normy je vyjádřena směrodatnou odchylkou reprodukovatelnosti hladiny akustického výkonu A rovnou nebo menší než 3 dB [9].

### 5.1.2 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

K měření bylo použito:

- zvukoměr BRUEL&KJAER 2260
- třetinooktávová analýza
- referenční zdroj RS30, definován spektrum viz. příloha č.5
- ½“ mikrofón BRUEL&KJAER 4189

### 5.1.3 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ

Zkoušený zdroj byl namontovat na odrazivou rovinu (podlahu) tak, jak to odpovídá jeho běžnému použití a tak, aby způsob montáže neměl významný vliv na vyzařovaný akustický výkon (obr. 18). Zkoušený zdroj nevyžadoval k provozu podpěry.

Žadný zkušební provozní předpis pro dany typ stroje, ve kterém jsou popsány podmínky provozování během měření neexistuje.



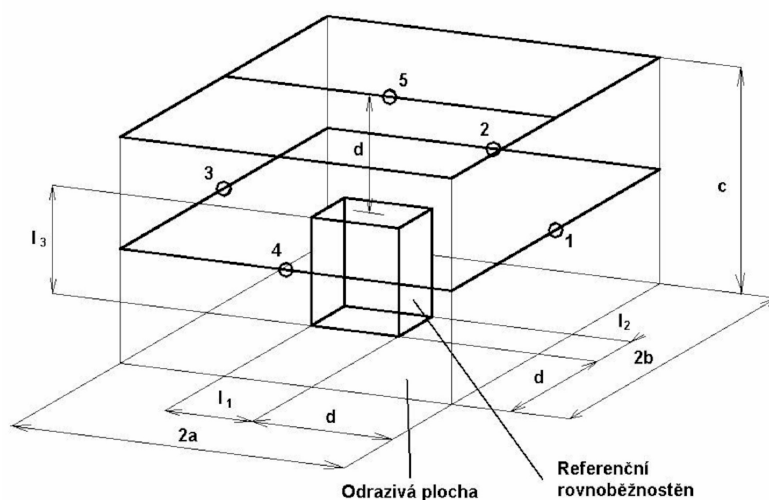


Obr. 18 Uložení stroje

### 5.1.4 VOLBA MĚŘICÍ PLOCHY

Měřicí plocha tvaru pravoúhlého rovnoběžnostěnu. Hypotetická měřicí plocha  $S$  obklopující referenční rovnoběžnostěn v měřicí vzdálenosti  $d$ . Měřicí vzdálenost  $d$  je kolmá vzdálenost mezi referenčním rovnoběžnostěnem a měřicí plochou. Norma předepisuje volit vzdálenost  $d$  podle doporučení: 0,15, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8 m. Zvolená hodnota je  $d = 1$  m.

Polohy mikrofonů na hypotetické měřicí ploše  $S$  obklopující daný zdroj jsou zobrazeny na obrázku 19. Normou je předepsáno 5 základních poloh mikrofonu rozmístěných po měřicí ploše v případě měření malého stroje umístěného na jedné odrazivé ploše [9].



Obr. 19 Rozmístění mikrofonů

Vypočet hypotetický měřicí plochy:

$$S = 4 \cdot (ab + bc + ac) = 4 \cdot (1,15 \cdot 1,15 + 1,15 \cdot 1,3 + 1,15 \cdot 1,3) = 17,25 [m^2],$$

$$a = 0,5 \cdot l_1 + 0,5 \cdot d = 0,5 \cdot 0,3 + 1 = 1,15 [m],$$

$$b = 0,5 \cdot l_2 + 0,5 \cdot d = 0,5 \cdot 0,3 + 1 = 1,15 [m],$$

$$c = l_3 + d = 0,3 + 1 = 1,3 [m].$$

### 5.1.5 STANOVENÍ HLADINY AKUSTICKÉHO TLAKU A HLADINY AKUSTICKÉHO VÝKONU

**Výpočet korekce na hluk pozadí** např. měřicí přístroje, od vlivu elektrických nebo magnetických polí nebo jiných zdrojů hluku do měření nezahrnovaných se musí měřit ve stejných veličinách a měřicích místech jako hluk zkoušeného stroje. Počet měřicích míst hluku pozadí se může snížit, jestliže je hluk pozadí rozložen rovnoměrně v prostoru [9].

Korekce na hluk pozadí se neprovádí v případě, že  $\Delta L \geq 10$  dB. Je-li rozdíl mezi hladinou akustického tlaku zdroje a hladinou hluku pozadí menší než 3 dB přesnost výsledků se snižuje. Pro hodnoty  $\Delta L$  mezi 3 a 10 dB se korekce vypočtou podle vztahu:

$$K_1 = -10 \log(1 - 10^{-0,1 \Delta L}), \quad (30)$$

$$\Delta L = \overline{L_p} - \overline{L_p}^{\prime\prime}, \quad (31)$$

kde  $\overline{L_p}$  je průměrná hladina akustického tlaku na měřicí ploše [dB],  $\overline{L_p}^{\prime\prime}$  průměrná hladina akustického tlaku pozadí na měřicí ploše [dB] (viz. příloha č.1) [9].

$f [Hz]$	<b>31,5</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>63</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>125</b>
$K_1 [dB]$	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
$f [Hz]$	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>
$K_1 [dB]$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$f [Hz]$	<b>800</b>	<b>1 000</b>	<b>1 250</b>	<b>1 600</b>	<b>2 000</b>	<b>2 500</b>	<b>3 150</b>
$K_1 [dB]$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$f [Hz]$	<b>4 000</b>	<b>5 000</b>	<b>6 300</b>	<b>8 000</b>	<b>10 000</b>	<b>12 500</b>	<b>16 000</b>
$K_1 [dB]$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tab. 4 Vypočtený hodnoty korekce na hluk pozadí

**Korekce na zkušební prostředí** pro hodnocení vlivu odražených zvukových vln a stanovení korekce pro odražený zvuk ve zkušebním prostoru se musí stanovit hodnota korekce  $K_2$  pro hladiny akustického tlaku. Výsledky měření podle této normy jsou platné je-li splněna podmínka  $K_2 \leq 7$  dB. Hodnotu korekce  $K_2$  určíme ze vztahu:

$$K_2 = 10 \log \left[ 1 + 4 \left( \frac{S_m}{A} \right) \right], \quad (32)$$

kde  $A$  je celková pohltivost zvuku místnosti [ $m^2$ ],  $S_m$  je plošný obsah měřicí plochy [ $m^2$ ] [9].

Určení celkové pohltivosti zvuku místnosti provedeno podle vztahu:

$$A = \alpha_m \cdot S, \quad (33)$$

kde  $\alpha$  je střední činitel pohltivosti [-],  $S$  celková plocha ohraničující zkušební prostor (stěny, strop, podlaha) [ $m^2$ ] [9].

Vypočtená hodnota korekce na hluk pozadí:

$$K_2 = 10 \log \left[ 1 + 4 \left( \frac{S}{A} \right) \right] = 10 \log \left[ 1 + 4 \left( \frac{17,25}{0,5 \cdot (5,5 \cdot 5,5 \cdot 2 + 5,5 \cdot 3,5 \cdot 2 + 5,5 \cdot 3,5 \cdot 2)} \right) \right] = 3,0182 \text{ dB}$$

**Průměrnou hladinu akustického tlaku** na měřicí ploše vypočítám z naměřených hladin akustického tlaku (viz. příloha č.1) v  $i$ -té poloze mikrofonu ze vztahu:

$$\overline{L}_p = 10 \log \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1 L'_{pi}} \right], \quad (34)$$

Stejným způsobem určíme hladinu akustického tlaku pozadí:

$$\overline{L}_p'' = 10 \log \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1 L''_{pi}} \right], \quad (35)$$

kde  $\overline{L}_p$  je průměrná hladina akustického tlaku  $A$  na měřicí ploše, zkoušeného zdroje [dB],

$\overline{L}_p'$  průměrná hladina akustického tlaku  $A$  pozadí na měřicí ploše [dB],  $L'_{pi}$  hladina akustického tlaku  $A$  naměřená v  $i$ -té poloze mikrofonu [dB],  $L''_{pi}$  hladina akustického tlaku  $A$  pozadí naměřená v  $i$ -té poloze mikrofonu [dB],  $N$  počet měřicích míst [-] (viz. příloha č.1).

$f$ [Hz]	<b>31,5</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>63</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>125</b>
$\overline{L}_p$ [dB]	20,5	21,8	26,1	24,3	19,6	13,1	13,3
$\overline{L}_p''$ [dB]	53,5	57,8	61,2	59,9	62,5	66,8	62,5
$f$ [Hz]	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>
$\overline{L}_p$ [dB]	9,5	6,9	5,2	9,9	5,3	5,2	2,3
$\overline{L}_p''$ [dB]	62,1	63,8	62,7	63,5	64,4	63,9	65,5
$f$ [Hz]	<b>800</b>	<b>1 000</b>	<b>1 250</b>	<b>1 600</b>	<b>2 000</b>	<b>2 500</b>	<b>3 150</b>
$\overline{L}_p$ [dB]	1,7	2,1	2,4	3,6	4,2	4,9	5,7
$\overline{L}_p''$ [dB]	69,9	73,5	74,3	71,9	69,1	67,9	69,3

$f [Hz]$	<b>4 000</b>	<b>5 000</b>	<b>6 300</b>	<b>8 000</b>	<b>10 000</b>	<b>12 500</b>	<b>16 000</b>
$\overline{L}_p [dB]$	6,5	7,1	7,5	7,6	7,6	7,8	7,9
$\overline{L}_p'' [dB]$	70,3	71,2	73,8	73,7	71,7	70,9	69,9

Tab. 5 Vypočtený hodnoty hladiny akustického tlaku na měřicí ploše a hladiny akustického tlaku pozadí

**Hladinu akustického tlaku** na ploše vypočítám z průměrné hladiny akustického tlaku na měřicí ploše korigováním na hluk pozadí a odražený zvuk podle vztahu:

$$\overline{L}_{pf} = \overline{L}_p - K_1 - K_2, \quad (36)$$

**Hladinu akustického výkonu A** vypočteme ze vztahu:

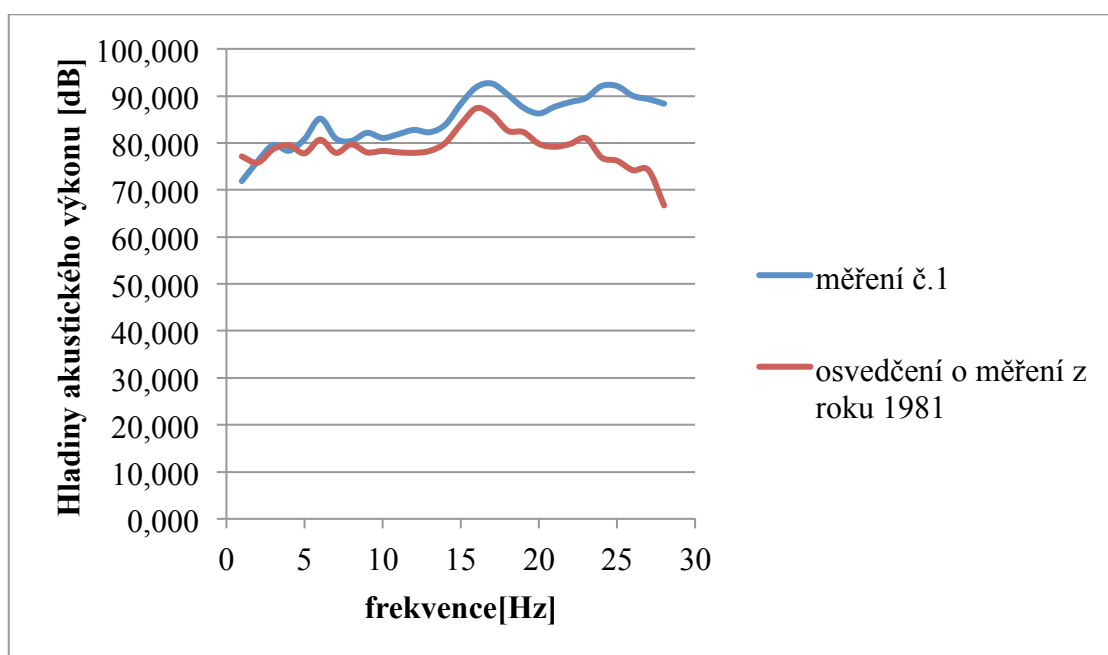
$$L_w = \overline{L}_{pf} + 10 \log \left( \frac{S_m}{S_0} \right), \quad (37)$$

kde  $\overline{L}_{pf}$  je hladina akustického tlaku na ploše [dB],  $S_m$  plošný obsah měřicí plochy [ $m^2$ ],  $S_0 = 1 m^2$  [9].

$f [Hz]$	<b>31,5</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>63</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>125</b>
$\overline{L}_{pf} [dB]$	50,4	54,7	58,1	56,9	59,4	63,8	59,5
$L_w [dB]$	71,8	76,1	79,5	78,3	80,8	85,1	80,9
$f [Hz]$	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>
$\overline{L}_{pf} [dB]$	59,1	60,7	59,6	60,4	61,3	60,9	62,4
$L_w [dB]$	80,4	82,1	81,1	81,8	82,7	82,2	83,8
$f [Hz]$	<b>800</b>	<b>1 000</b>	<b>1 250</b>	<b>1 600</b>	<b>2 000</b>	<b>2 500</b>	<b>3 150</b>
$\overline{L}_{pf} [dB]$	66,9	70,5	71,2	68,8	66,1	64,8	66,3

$L_w [dB]$	88,3	91,9	92,6	90,2	87,5	86,2	87,7
$f [Hz]$	<b>4 000</b>	<b>5 000</b>	<b>6 300</b>	<b>8 000</b>	<b>10 000</b>	<b>12 500</b>	<b>16 000</b>
$\overline{L}_{pf} [dB]$	67,3	68,1	70,7	70,7	68,6	67,9	66,9
$L_w [dB]$	88,6	89,5	92,1	92,0	90,1	89,3	88,3

Tab. 6 Vypočtený hodnoty hladiny akustického tlaku na ploše a hladiny akustického výkonu A



Obr. 20 Hladiny akustického výkonu v třetinooktávových pásmech

Po porovnání výsledků měření z experimentu 1 s výsledky osvědčení o měření hluku zařízení z roku 1981 (viz. příloha č.5) je zřejmé, že v současné době vzhledem ke stárnutí zdroje hluk referenčního zdroje je vyšší, než v roce 1981.

## 5.2 STANOVĚNÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI

Druhé měření bylo provedeno stejným postupem jako měření předchozí, se změnou měřicí plochy a se zvětšením počtu poloh mikrofonu jak je znázorněno na obr. 21. Měření bylo

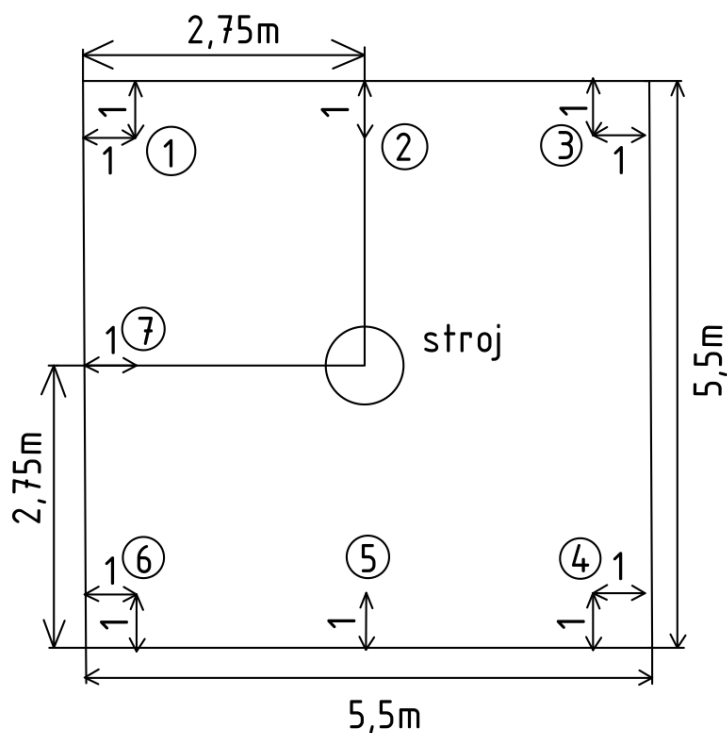
provedeno 6-krát se změnou výšky ( $h = 1,5m, h = 2,75m$ ) a směru mikrofonu ( na referenční stroj, dále na strop a posléze do strany) pro dosažení přesnějších hodnot (výsledky měření hladin akustického tlaku viz. příloha č.2).

Cílem měření je výpočet středního činitele zvukové pohltivosti z vypočtených hodnot hladin akustického výkonu vyzařovaných zdrojem z experimentu č.1 (ověření hladin akustického zdroje) a naměřených hodnot hladiny akustického tlaku na základě principu popsanych v teoretické části (Kapitola č.1 až č.3).

Z naměřených hodnot hladin akustického tlaku pro každou výšku, směr a polohu mikrofonu byli vypočítány činitele zvukové pohltivosti pro příslušné frekvenční pásma podle vzorce odvozeného ze vztahu (č.5, kapitola 1). Výsledky těchto výpočtu jsou v příloze č.2.

$$\alpha_m = \frac{4}{4 + S \cdot \left( 10^{(L_p + L_w)} - \frac{Q}{4\pi R^2} \right)}, \quad (38)$$

kde  $Q$  je činitel směrovosti zdroje, pro daný experiment je zvolená hodnota  $Q=1$  [-].  $R$  je vzdálenost, určující rozhraní mezi polem přímých a polem odražených vln [ m ].



Obr. 21 Rozmístění mikrofonů (měření č.2 a č.3)

Ze stanovených hodnot byli vypočteny hodnoty logaritmického průměru činitele zvukové pohltivosti pro příslušné frekvenční pásma:

$f [Hz]$	<b>31,5</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>63</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>125</b>
$\alpha_m [-]$	0,447	0,806	0,792	0,784	0,900	0,935	0,831
$f [Hz]$	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>
$\alpha_m [-]$	0,671	0,685	0,782	0,793	0,766	0,757	0,781
$f [Hz]$	<b>800</b>	<b>1 000</b>	<b>1 250</b>	<b>1 600</b>	<b>2 000</b>	<b>2 500</b>	<b>3 150</b>
$\alpha_m [-]$	0,755	0,703	0,742	0,791	0,751	0,719	0,787
$f [Hz]$	4 000	5 000	6 300	8 000	10 000	12 500	16 000
$\alpha_m [-]$	0,785	0,784	0,797	0,792	0,819	0,836	0,870

Tab. 7 Vypočteny hodnoty středního činitele zvukové pohltivosti pro příslušné frekvenční pásma (logaritmický průměr) v oktávových pásmech

Měření bylo provedeno v oktávovém pásmu a následně přepočítáno do třetinooktávového pásma dle vztahu pro přepočet hladin na jinou šířku pásma:

$$L_p = 10 \log(10^{0,1L_{p1}} + 10^{0,1L_{p2}} + 10^{0,1L_{p3}}), \quad (39)$$

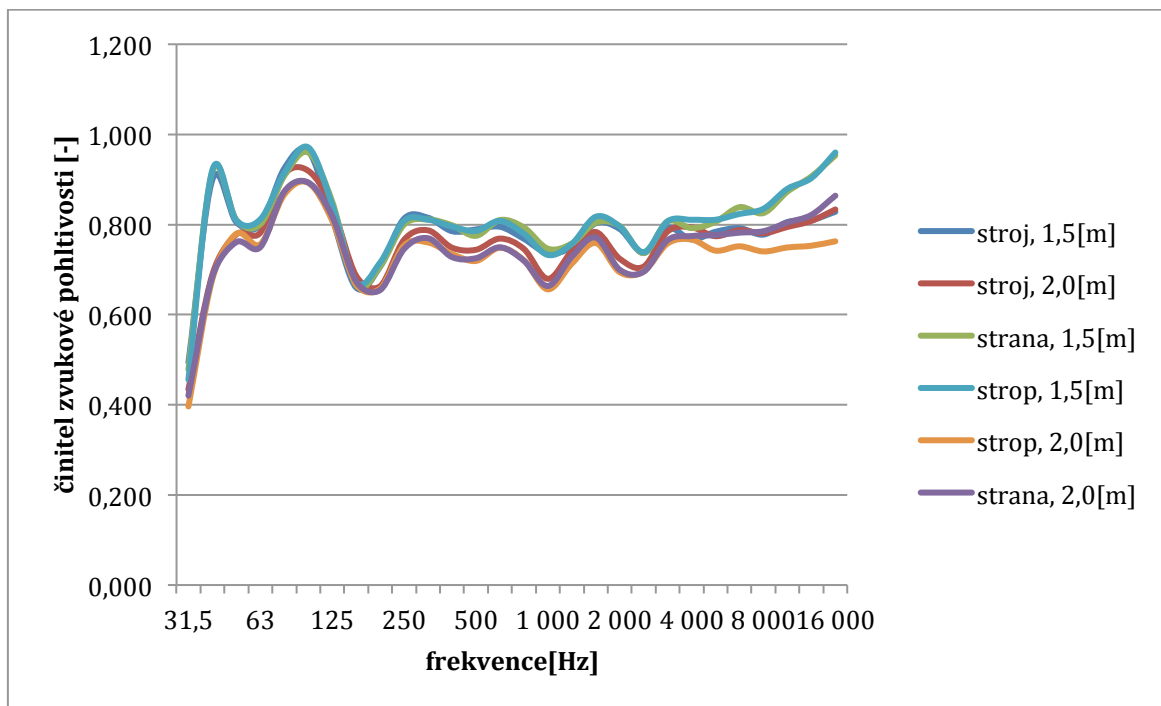
Výsledky těchto přepočtu jsou uvedeny v tab. 8.

$f [Hz]$	<b>31,5</b>	<b>63</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>
$\alpha_m [-]$	0,556	0,806	0,802	0,738	0,768
$f [Hz]$	<b>1 000</b>	<b>2 000</b>	<b>4 000</b>	<b>8 000</b>	<b>16 000</b>
$\alpha_m [-]$	0,726	0,759	0,784	0,799	0,857

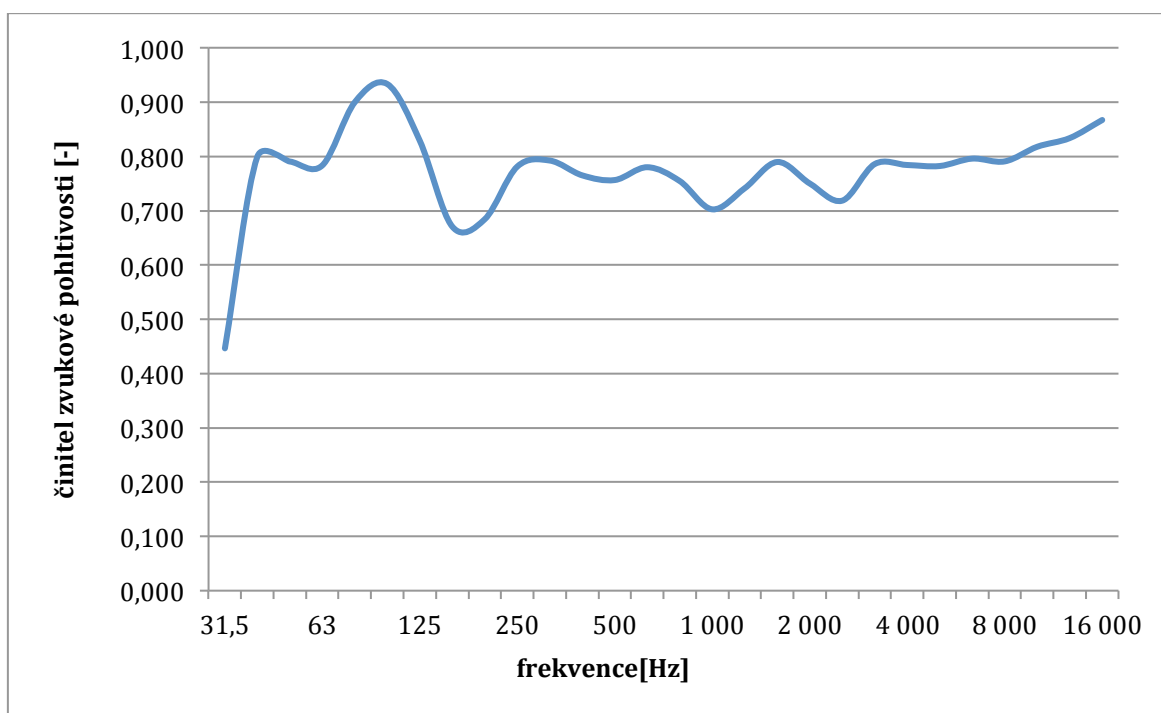
Tab. 8 Vypočteny hodnoty středního činitele zvukové pohltivosti pro příslušné frekvenční pásma (logaritmický průměr) v třetinooktávových pásmech



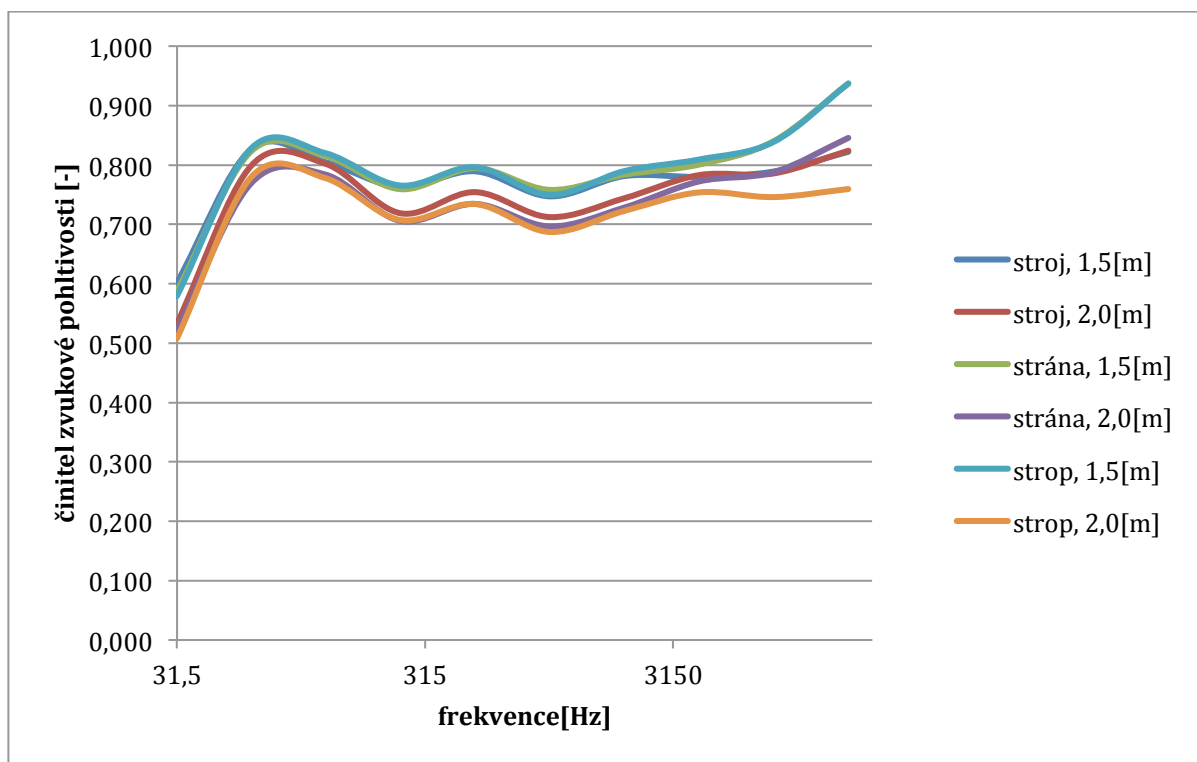
Výsledkem druhého měření jsou hodnoty činitele zvukové pohltivosti v tab. 7 a tab. 8 a jejich grafické znázornění v závislosti na kmitočtových pásmech uvedeny na obr. 22 až 25.



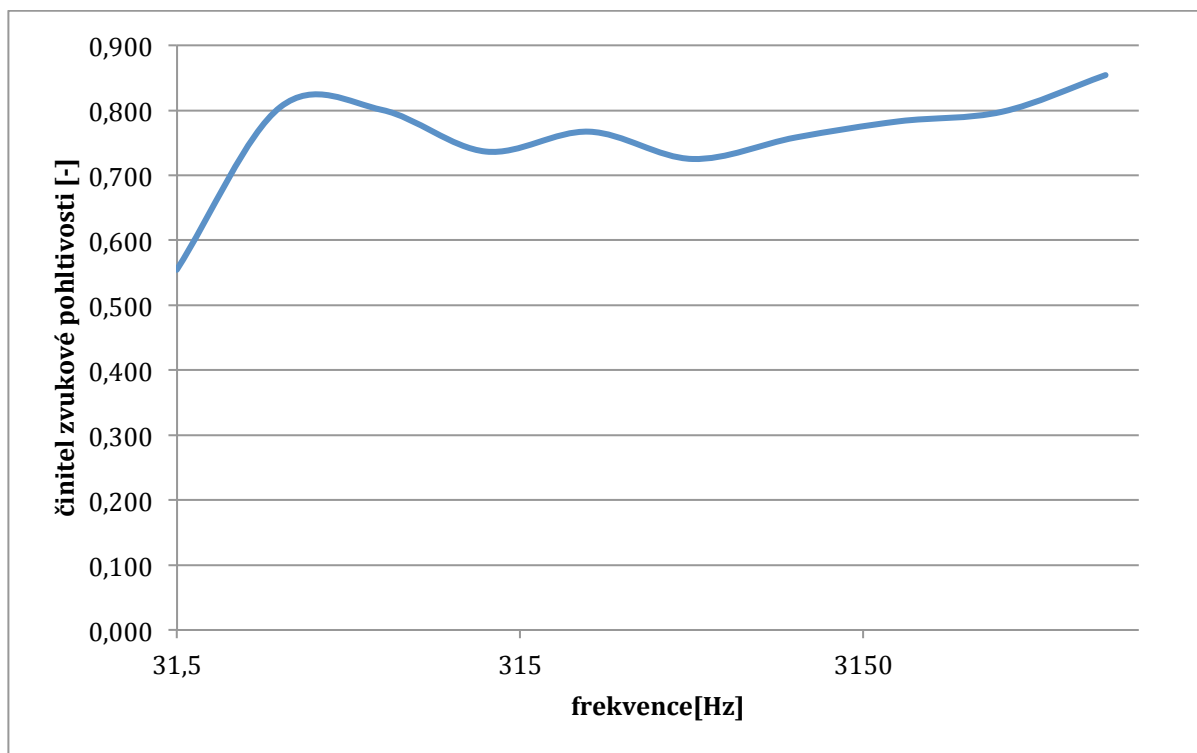
Obr. 22 Činitele zvukové pohltivosti pro každou výšku a směr mikrofonu v oktávových pásmech (měření č.2)



Obr. 23 Logaritmický průměry činitelů zvukové pohltivosti v oktávových pásmech (měření č.2)



Obr. 24 Činitele zvukové pohltivosti pro každou výšku a směr mikrofonu v třetinooktávových pásmech (měření č.2)



Obr. 25 Logaritmičké průměry činitelů zvukové pohltivosti v třetinooktávových pásmech (měření č.2)

### 5.3 STANOVENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI 2

Třetí měření se opakuje měření číslo 2 (stanovení hladin akustického zdroje) se změnou výšky polohy referenčního zdroje a hodnoty činitele směrovosti, zvolená hodnota je  $Q = 2$  [-].

Polohy mikrofону a referenčního zdroje jsou uvedeny na obr. 21. Nejvyšší bod referenčního zdroje se nachází ve výšce 0,83 m nad podlahou.

Výsledky třetího měření jsou hodnoty činitele zvukové pohltivosti v tab. 9 a tab. 10 a jejich grafické znázornění v závislosti na kmitočtových pásmech uvedeny na obr. 26 až obr. 29.

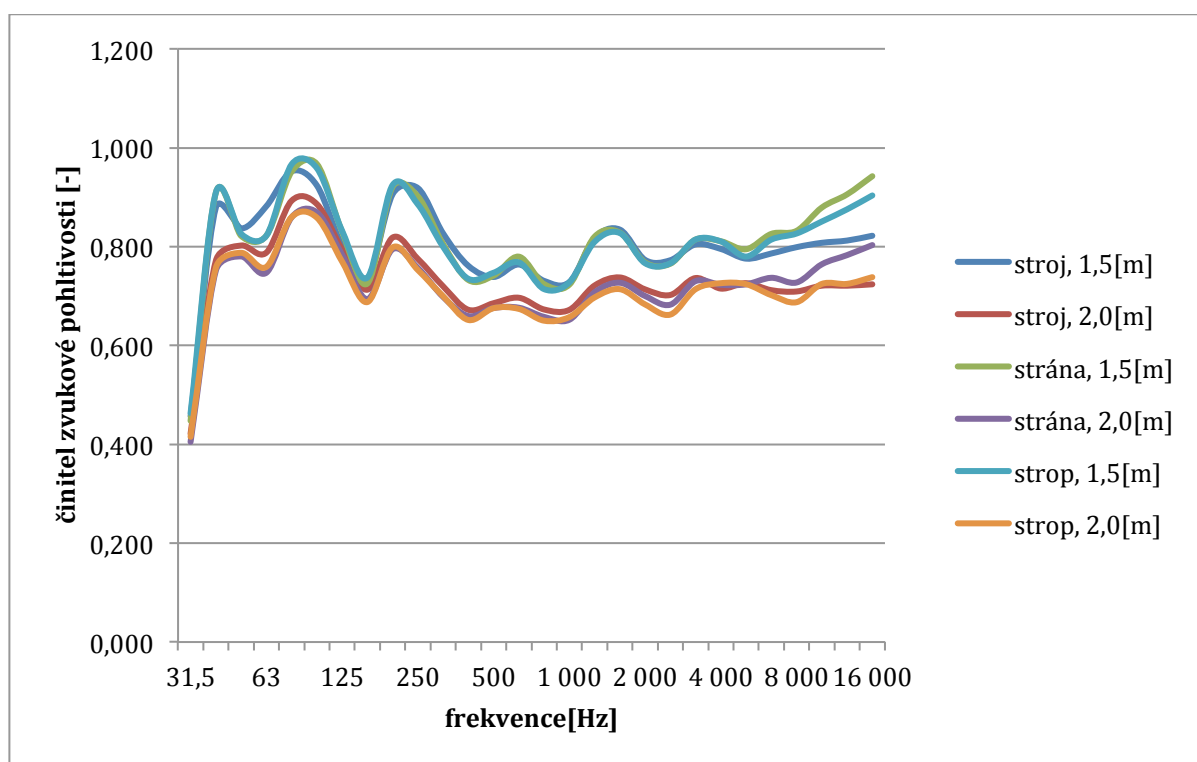
$f$ [Hz]	<b>31,5</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>63</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>125</b>
$\alpha_m$ [-]	0,436	0,835	0,810	0,805	0,916	0,913	0,803
$f$ [Hz]	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>
$\alpha_m$ [-]	0,716	0,864	0,833	0,759	0,703	0,712	0,727
$f$ [Hz]	<b>800</b>	<b>1 000</b>	<b>1 250</b>	<b>1 600</b>	<b>2 000</b>	<b>2 500</b>	<b>3 150</b>
$\alpha_m$ [-]	0,692	0,694	0,763	0,779	0,735	0,726	0,770
$f$ [Hz]	<b>4 000</b>	<b>5 000</b>	<b>6 300</b>	<b>8 000</b>	<b>10 000</b>	<b>12 500</b>	<b>16 000</b>
$\alpha_m$ [-]	0,765	0,755	0,764	0,765	0,793	0,806	0,825

Tab. 9 Vypočtené hodnoty středního činitele zvukové pohltivosti pro příslušné frekvenční pásma (logaritmický průměr) v jednooktávných pásmech

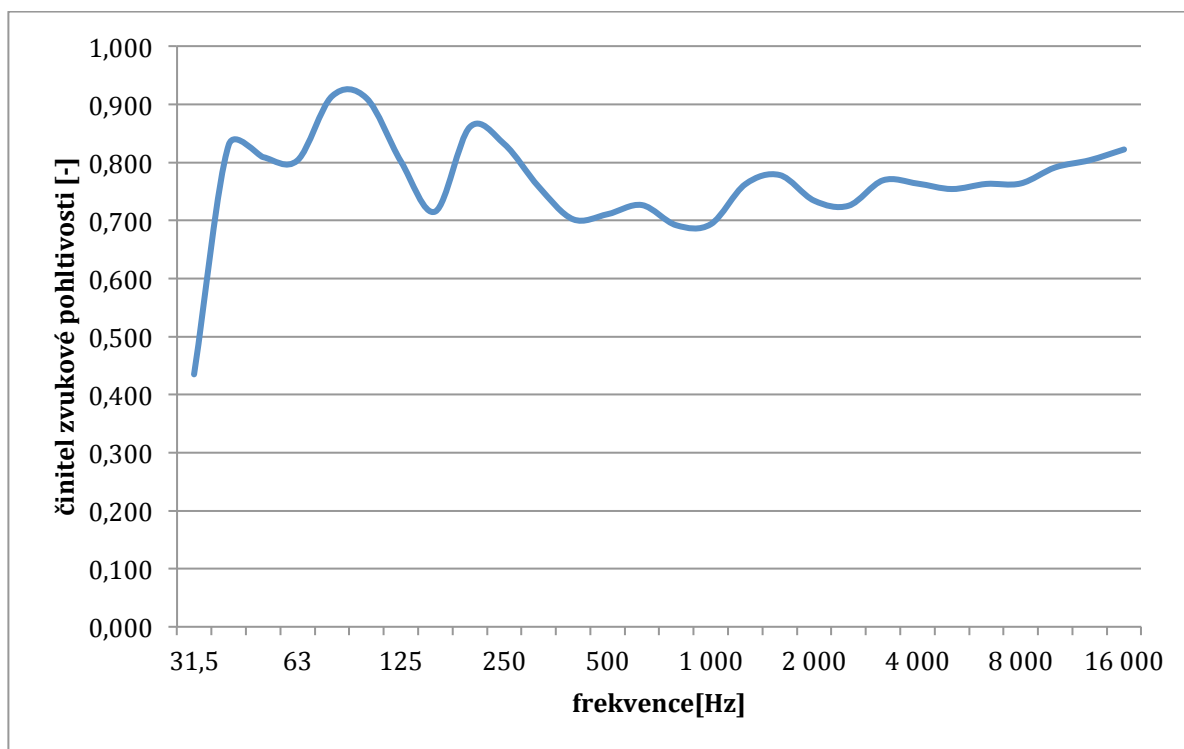
Měření bylo provedeno v oktávném pásmu a následně přečítáno do třetinoctávného pásma dle vztahu (39).

$f [Hz]$	<b>31,5</b>	<b>63</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>
$\alpha_m [-]$	0,550	0,828	0,817	0,803	0,712
$f [Hz]$	<b>1 000</b>	<b>2 000</b>	<b>4 000</b>	<b>8 000</b>	<b>16 000</b>
$\alpha_m [-]$	0,718	0,753	0,761	0,770	0,819

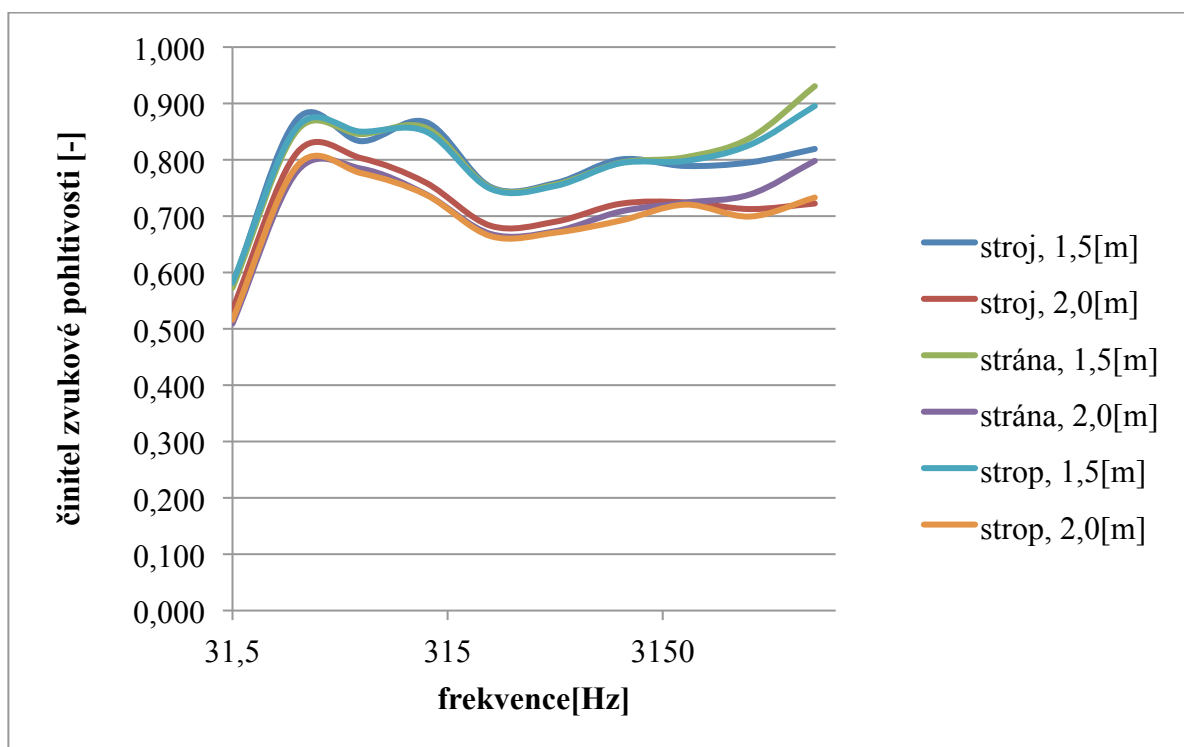
Tab. 10 Vypočtený hodnoty středního činitele zvukové pohltivosti pro příslušné frekvenční pásma (logaritmický průměr) v třetinooktávových pásmech



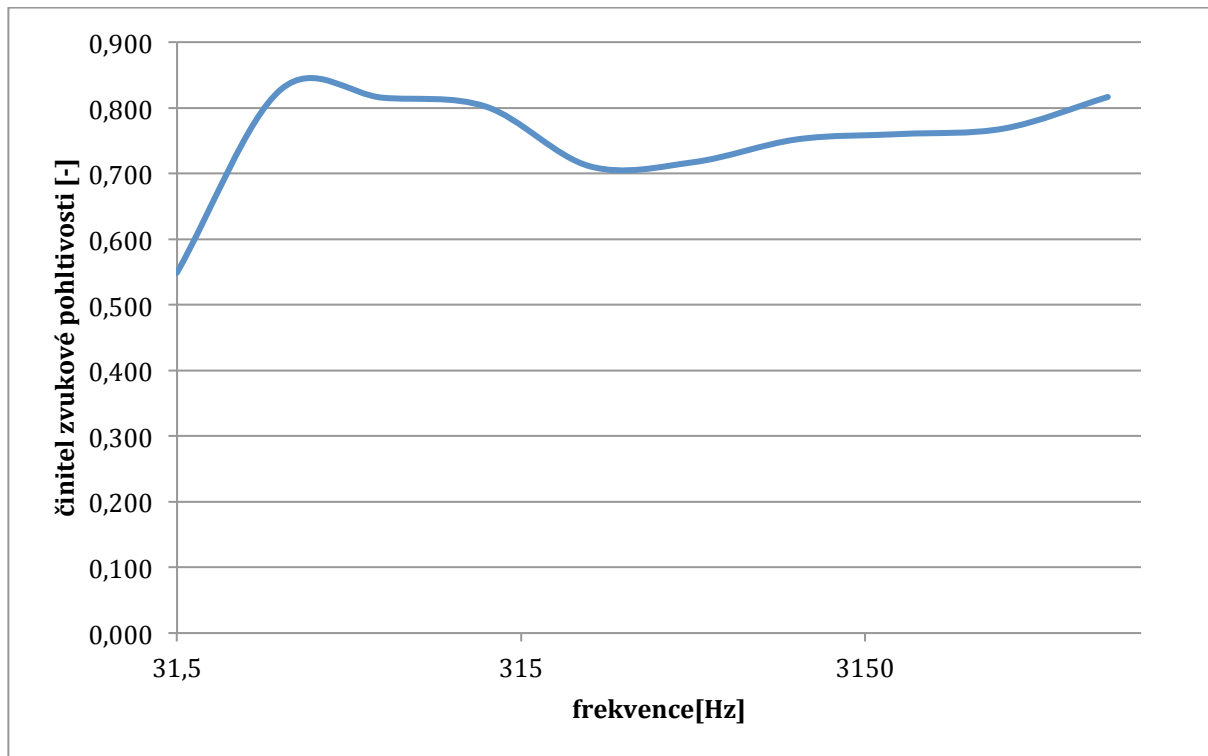
Obr. 26 Činitele zvukové pohltivosti pro každou výšku a směr mikrofonu v oktávových pásmech (měření č.3)



Obr. 27 Logaritmický průměry činitelů zvukové pohltivosti v oktávných pásmech (měření č.3)



Obr. 28 Činitele zvukové pohltivosti pro každou výšku a směr mikrofonu v třetinooktávných pásmech (měření č.3)

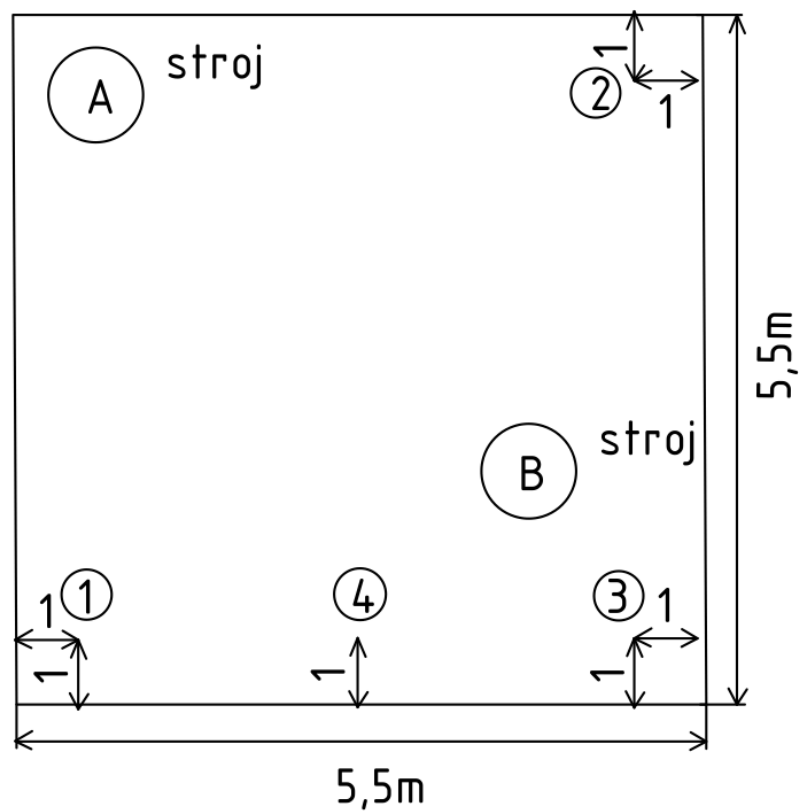


Obr. 29 Logaritmický průměry činitelů zvukové pohltivosti v třetinooktávových pásmech (měření č.3)

## 5.4 STANOVENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI Z DOBY DOZVUKU

Další možností určení celkové pohltivosti prostoru je výpočet z doby dozvuku. V tomto experimentu byla změřena doba dozvuku (viz. příloha č.3) akustické místnosti a z výsledku byli spočítány hodnoty středního činitele zvukové pohltivosti dvěma způsoby dle Sabina a dle Eyringa ze vztahu (21) a (24) z kapitoly 4.

Příprava měření byla provedena podle postupu, který je popsán v podkapitole 5.3. Měření bylo provedeno 4-krát se změnou výšky ( $h=1,0, h=1,8$ ) Poloha mikrofonu a zdroje jsou uvedeny na obr. 30.



Obr. 30 Rozmístění mikrofonů a zdroje (měření č.4)

K měření bylo použito:

- zvukový analyzátor PULSE (4-kanalový)
- třetinooktávová analýza
- ½“ mikrofon BRUEL&KJAER 4189

Doba dozvuku podle Sabineho  $T_s$ :

$$T_s = 0,164 \frac{V}{\alpha_m S}, \quad (40)$$

Doba dozvuku podle Eyringa  $T_E$

$$T_E = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_m) + 4mV}, \quad (41)$$

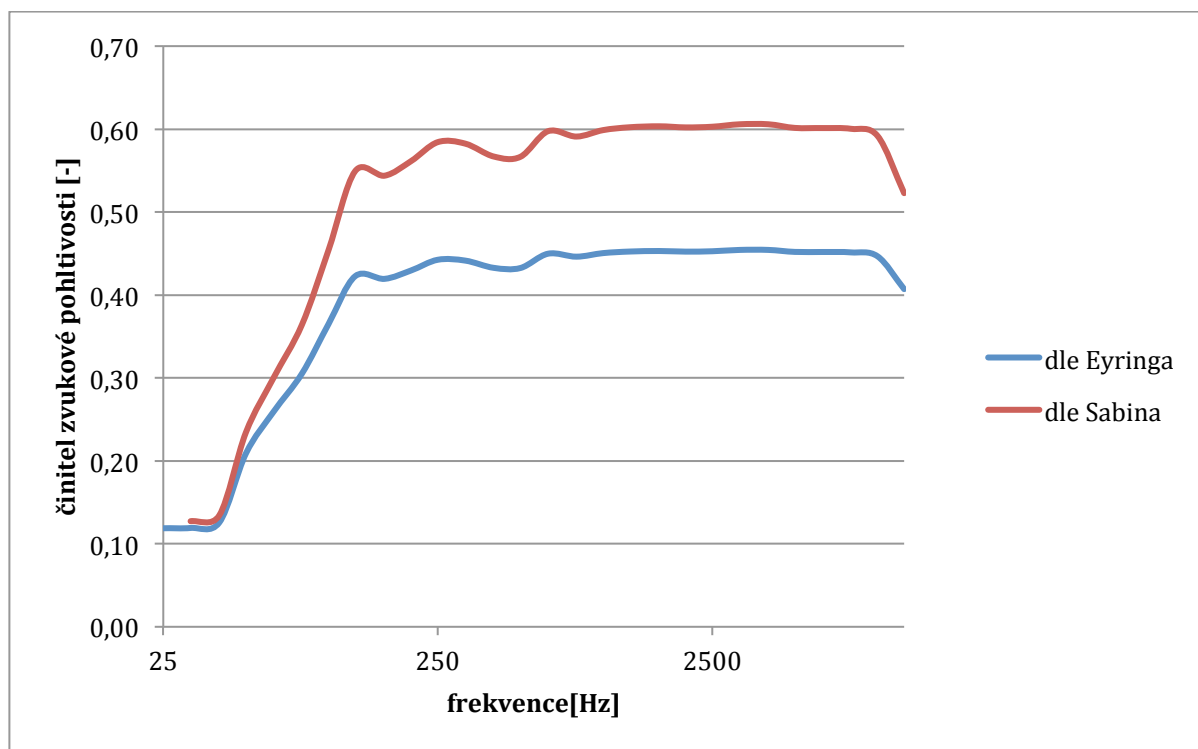
$f [Hz]$	<b>25</b>	<b>31,5</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>63</b>	<b>80</b>	<b>100</b>
$\alpha_m [-]$	0,13	0,13	0,13	0,23	0,30	0,36	0,45
$f [Hz]$	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>
$\alpha_m [-]$	0,55	0,54	0,56	0,58	0,58	0,57	0,57
$f [Hz]$	<b>630</b>	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1250</b>	<b>1600</b>	<b>2000</b>	<b>2500</b>
$\alpha_m [-]$	0,60	0,59	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
$f [Hz]$	<b>3150</b>	<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>6300</b>	<b>8000</b>	<b>10000</b>	<b>12500</b>
$\alpha_m [-]$	0,61	0,61	0,60	0,60	0,60	0,59	0,52

Tab. 11 Vypočtený hodnoty středního činitele zvukové pohltivosti pro příslušné frekvenční pásma (logaritmický průměr) v třetinooktávových pásmech dle Sabina

$f [Hz]$	<b>25</b>	<b>31,5</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>63</b>	<b>80</b>	<b>100</b>
$\alpha_m [-]$	0,12	0,12	0,13	0,21	0,26	0,31	0,37
$f [Hz]$	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>
$\alpha_m [-]$	0,42	0,42	0,43	0,44	0,44	0,43	0,43
$f [Hz]$	<b>630</b>	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1250</b>	<b>1600</b>	<b>2000</b>	<b>2500</b>
$\alpha_m [-]$	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
$f [Hz]$	<b>3150</b>	<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>6300</b>	<b>8000</b>	<b>10000</b>	<b>12500</b>
$\alpha_m [-]$	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,41

Tab. 12 Vypočtený hodnoty středního činitele zvukové pohltivosti pro příslušné frekvenční pásma (logaritmický průměr) v třetinooktávových pásmech dle Eyringa





Obr. 31 Činitele zvukové pohltivosti dle Sabina a dle Eyringa v oktávových pásmech

## 5.5 STANOVENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI VÝPOČTEM

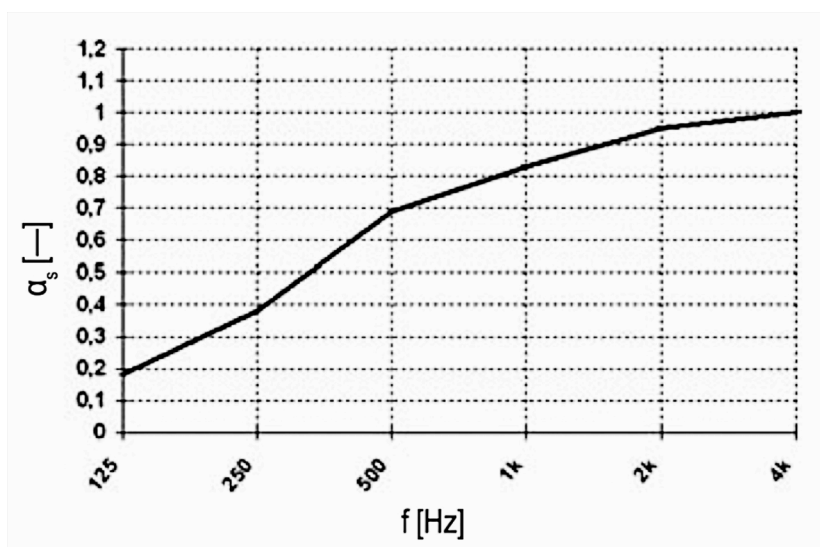
Stanovení hodnoty středního činitele zvukové pohltivosti výpočtem podle známých hodnot činitele zvukové pohltivosti materiálů obklopujících místnost (podle norem a podle výrobce) ze vztahu:

$$\alpha_m = \frac{\sum \alpha_i S_i}{\sum S_i}, \quad (42)$$

Akustická laboratoř Ústavu techniky prostředí ČVUT o rozměru 5,5x5,5x3,5[m]. Místnost má betonovou podlahu, strop a stěny obložené akustickým širokopásmovým materiálem POLYSON pro akustické úpravy uzavřených prostorů - kanceláře, dílny, malá TV a zvuková studia apod. S akustickou funkcí: absorpce zvuku na středních a vysokých kmitočtech.



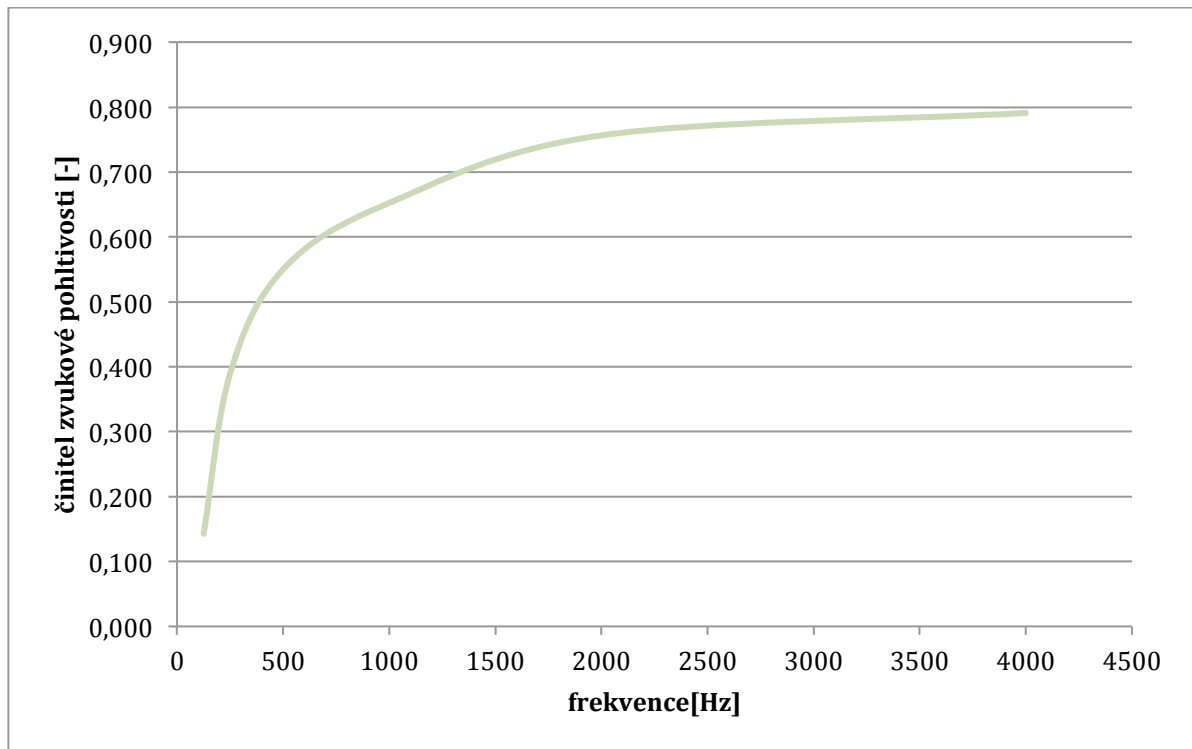
Obr. 32 POLYSON



Obr. 33 Činitele zvukové pohltivosti pro POLYSON v třetinooktákových pásmech

$f [Hz]$	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha_{beton} [-]$	0,01	0,016	0,019	0,023	0,035	0,05
$\alpha_{polyson} [-]$	0,18	0,38	0,7	0,83	0,96	1
$\alpha_{m(místnost)} [-]$	0,143	0,389	0,550	0,652	0,757	0,791

Tab. 13 Hodnoty činitele zvukové pohltivosti pro příslušné frekvenční pásma stanovní výrobce (pro polyson), podle norem (beton) a výpočtem pro  $\alpha_{m(místnost)}$

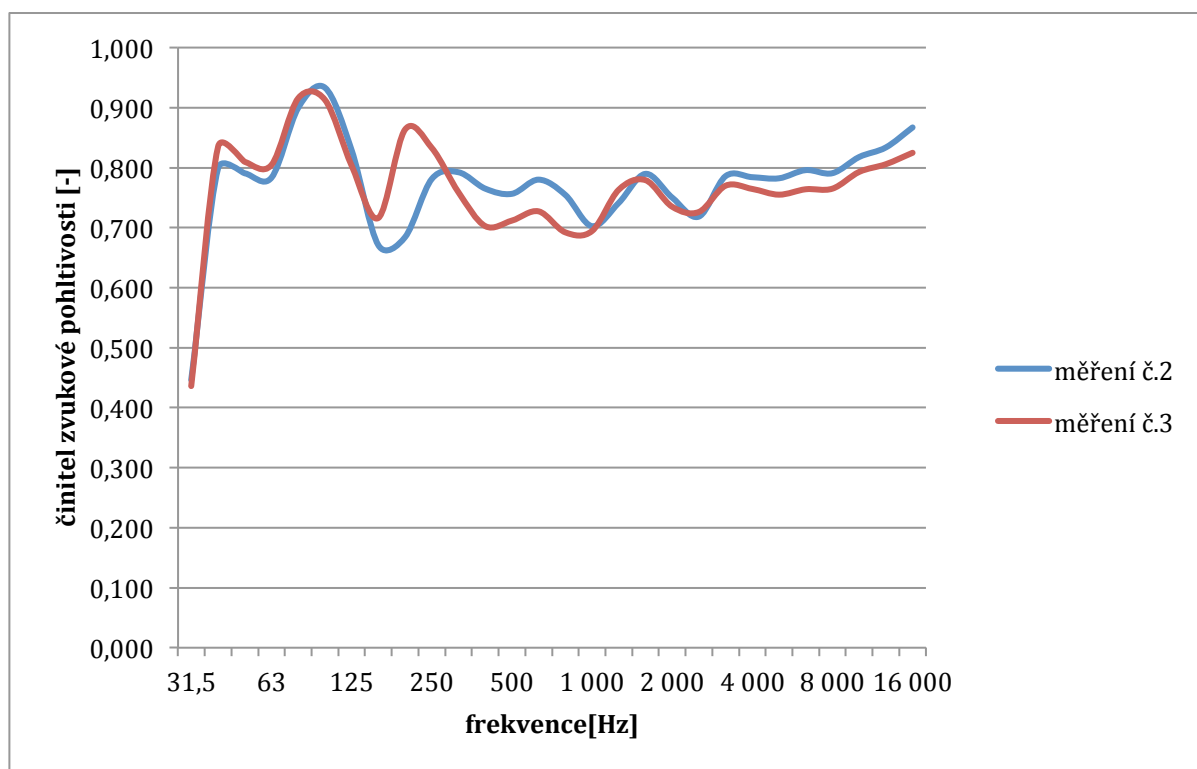


Obr. 34 Činitele zvukové pohltivosti stanoveny výpočtem v třetinooktávových pásmech

## 6. ZÁVĚR

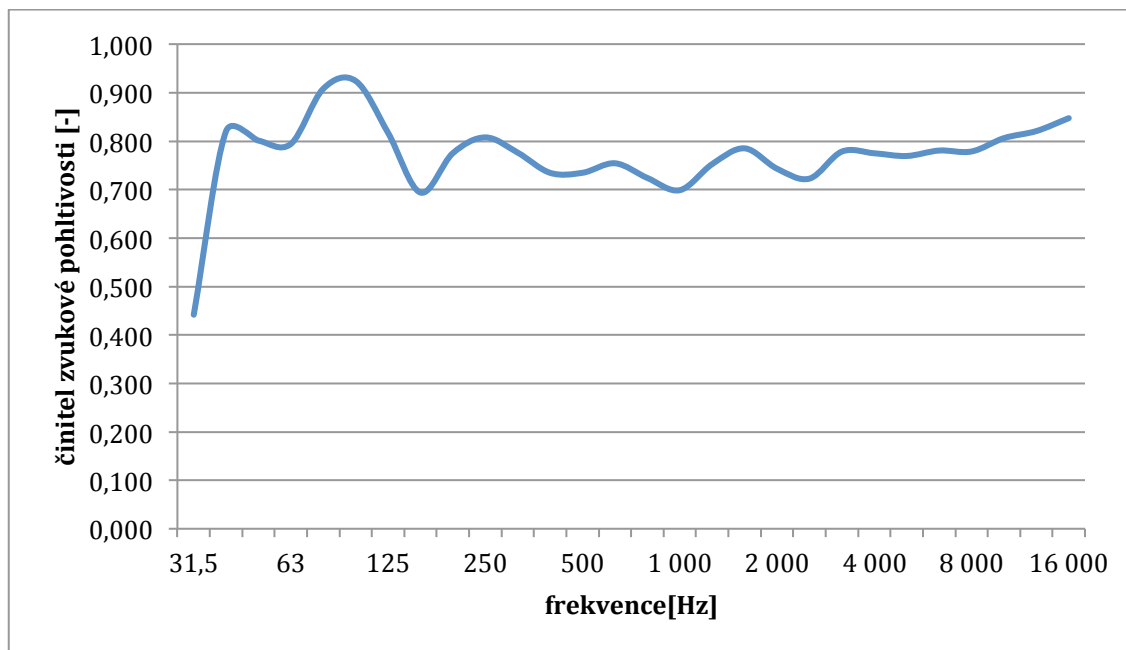
V této kapitole provedené zhodnocení výsledků měření provedených v akustické laboratoři Ústavu techniky prostředí ČVUT a jejich následné porovnání mezi sebou a s výsledky z předchozích měření.

### 6.1 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ Č.2 A Č.3



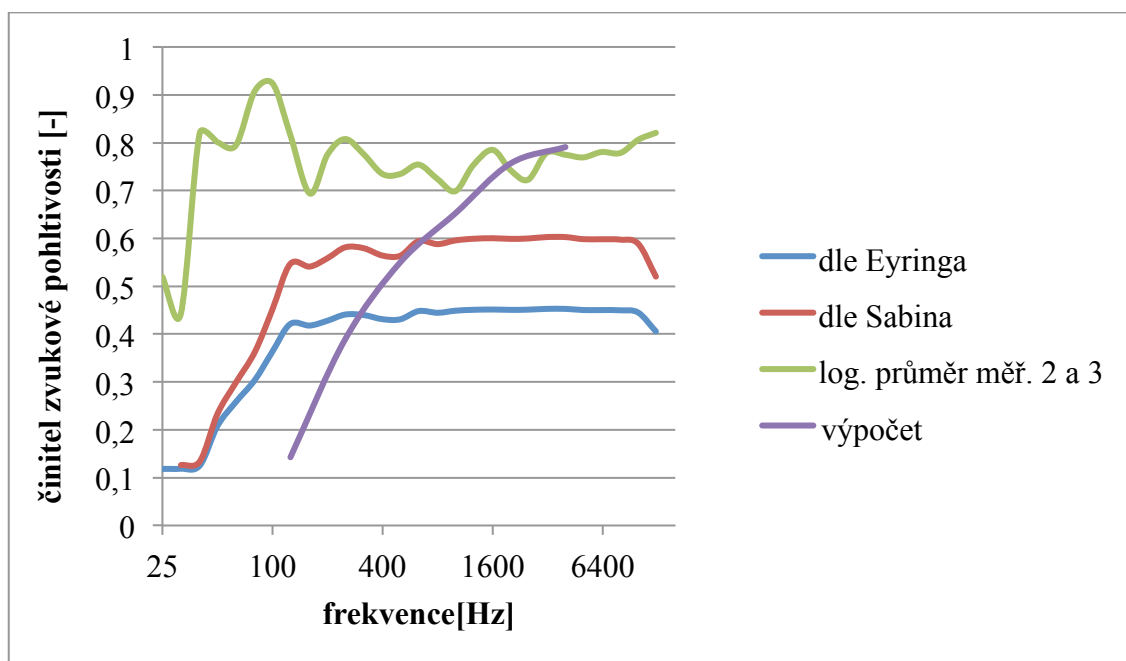
Obr. 35 Logaritmický průměry činitelů zvukové pohltivosti v oktávních pásmech

Podle obr. 35 výsledky druhého a třetího měření můžeme považovat za stejné. Odchytky jsou minimální a mohou být zanedbány.



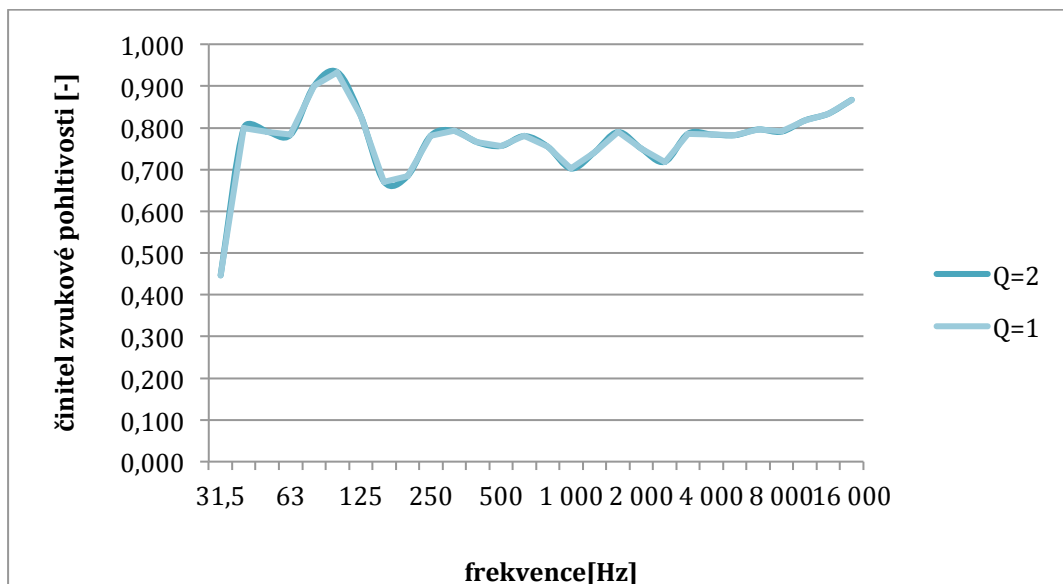
Obr. 36 Logaritmický průměry činitelů zvukové pohltivosti z měření č.2 a č.3 v oktávových pásmech

## 6.2 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ Č.2/3, Č.4 A VÝPOČTU

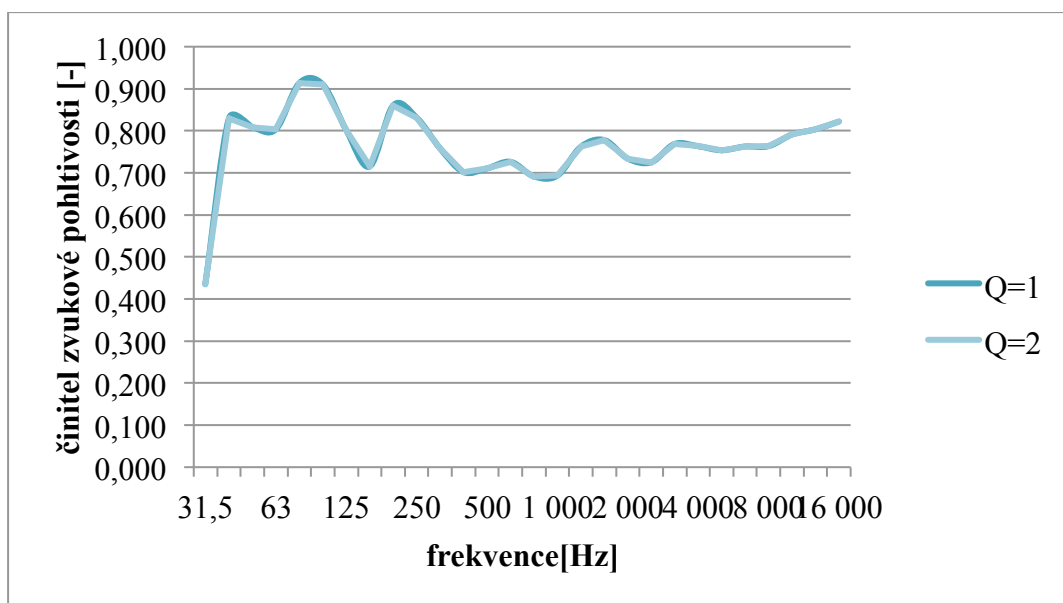


Obr. 37 Činitele zvukové pohltivosti v oktávových pásmech

Rozdíl mezi hodnotami středního činitele pohltivosti z měření 2 a 3 a hodnotami středního činitele zvukové pohltivosti stanoveným výpočtem podle známých hodnot činitele zvukové pohltivosti materiálů obklopujících místnost je rozdílný. Z důvodu zanedbaní vybavenosti místnosti a neznámé reálné tloušťky akustického materiálu ohraničujícího místnost.



Obr. 38 Logaritmičké průměry činitelů zvukové pohltivosti v jednooktávných pásmech pro různé hodnoty činitele směrovosti (měření č.2)



Obr. 39 Logaritmičké průměry činitelů zvukové pohltivosti v oktávných pásmech pro různé hodnoty činitele směrovosti (měření č.3)

Porovnání výsledků z 2 a 3 měření a výsledku z měření doby dozvuku ukázalo značný rozdíl mezi získanými hodnotami. Tento rozdíl může být vyvolán z několika různých důvodů:

- nesprávně provedené měření: každý druh měření byl proveden několikrát a podle předepsaných norem, pravděpodobnost chyby je velmi nízká
- počet a rozmístění předmětů v místnosti během měření: reálné rozestavení předmětů v místnosti nemá takový vliv na výsledky měření
- chyba hlukoměru: podle současných předpisů jsou hlukoměry jsou každé dva roky cejchované v laboratoři, která provádí kalibraci v souladu s příslušnými normami. Z těchto důvodů je chyba způsobená samotným hlukoměrem zanedbatelná.
- chyba výpočtu: výpočty byly provedeny několikrát a pozorně zkontrolovány
- nesprávně zvolená hodnota činitele směrovosti: podle obr. 38 a 39 vychází, že změna činitele směrovosti má minimální vliv na výsledné hodnoty činitele zvukové pohltivosti

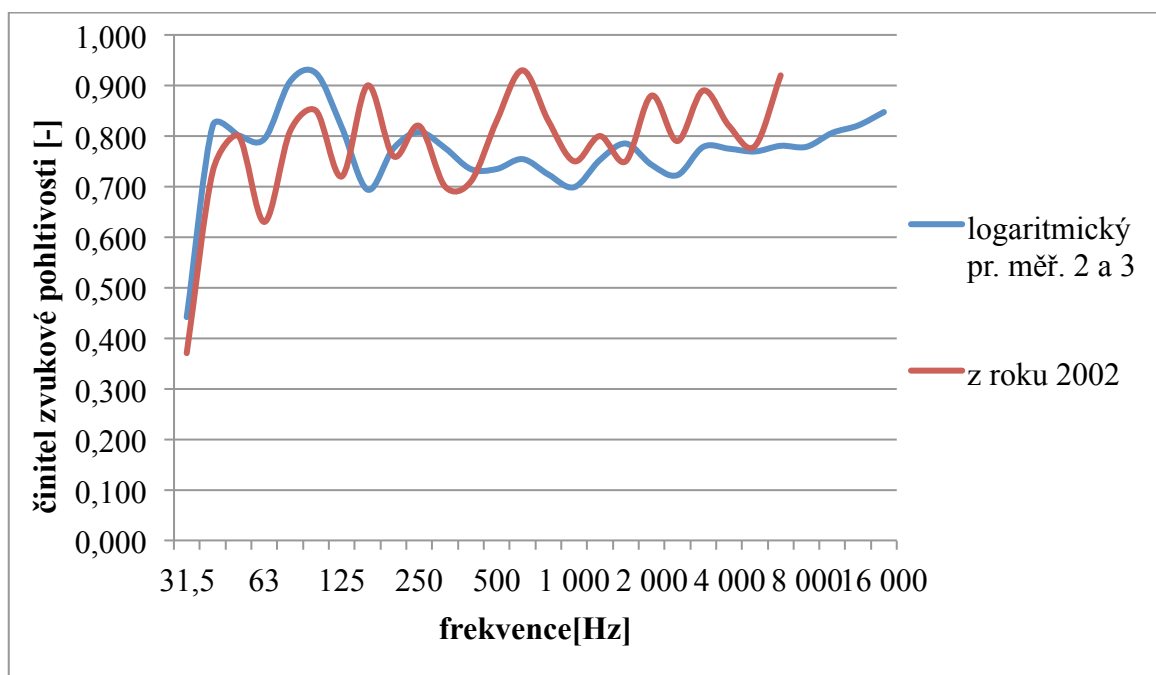
Abychom zjistili příčinu rozdílu dosadíme hodnoty  $\alpha$ , vypočítané z doby dozvuku (viz. příloha 5) do vztahu (8). Z výsledků je patrné, že vzdálenost mezi polem přímých a polem odražených vln  $R$ , pro příslušné frekvenční pásma, se pohybuje v rozmezí 2 až 3 m. Stanovení činitele pohltivosti  $\alpha$  ze vztahu (5) je tedy v našem případě nepřesné, protože v oblasti, kde jsme měření prováděli je významnější pole přímých vln nad polem odražených vln.

Pokud bychom měřili v místnosti s velkým podílem odrazivých ploch (betonový strop, podlaha, stěny), tak po dosazení hodnot  $\alpha$  např. pro beton (viz. tab. 2) do vztahu (8), vychází  $R$  v rozmezí 0,2 až 0,6 m. V tom případě by šlo o měření v poli odražených vln a výsledky měření by lépe odpovídaly skutečnosti. Bohužel nebyla k dispozici místnost podobných rozměrů s výše popsány vlastnostmi a měření tak nebylo možné realizovat.

Odpověď na to zda je možné vztah (5) použít v praxi pro stanovení činitele pohltivosti není prokázána ani vyvrácena, protože nebylo možné provést dostatečný počet měření v místnostech s různou pohltivostí a porovnat je s metodikou doby dozvuku.

### 6.3 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ Č.2/3 A VÝSLEDKŮ Z PŘEDCHOZÍCH MĚŘENÍ

Pro porovnání byly použity výsledky měření hluku zařízení z roku 1981 a výsledky měření součinitele pohltivosti stěn hlukové laboratoře Ústavu techniky prostředí z roku 2002.



Obr. 40 Činitele zvukové pohltivosti v oktávových pásmech

Po provedení porovnání výsledků (obr. 40) měření č.2 a č.3 s výsledky měření součinitelů hlukové pohltivosti z roku 2002 (viz. příloha č.5) stanovíme, že měření č.2 a č.3 byly provedeny správně. Dosažené měření č. 2 a 3 hodnoty splňují předpoklady hodnot středního činitele pohltivosti stěn v reálním prostoru. Chování charakteristik naměřených hodnot znázorněných na obr. 42 jsou podobné. Rozdíly jsou velmi malé a mohou být vyvolané různou vybaveností místnosti během provedení experimentu a rozlišností vlastností materiálu ohraničujících místnost.



## 7. POUŽITÉ ZDROJE

[1] Základy akustiky

<http://www.tzb-info.cz/1156-navrh-expanzni-nadoby>

[2] Akustika

[http://www.amfgrafenau.de/dynamic/files/pros/14-121628\\_Akustik\\_CZ\\_neu\\_.pdf](http://www.amfgrafenau.de/dynamic/files/pros/14-121628_Akustik_CZ_neu_.pdf)

[3] Měření zvukové pohltivosti materiálů

[http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env\\_fyzika/EF\\_lab\\_02.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_lab_02.pdf)

[4] Odborné setkání při příležitosti zahájení měření zvukové pohltivosti pomocí  $\alpha$  kabiny

[http://www.kvm.tul.cz/skolici\\_pracoviste/alfa%20kabina%20zahájen%C3%AD.pdf](http://www.kvm.tul.cz/skolici_pracoviste/alfa%20kabina%20zahájen%C3%AD.pdf)

[5] Zvuková pohltivost

[http://www.amfgrafenau.de/index.php?&l=14&mode=listarticles&subcatid=369&ipage=produkt\\_info\\_akustik\\_schall](http://www.amfgrafenau.de/index.php?&l=14&mode=listarticles&subcatid=369&ipage=produkt_info_akustik_schall)

[6] Doba dozvuku v místnosti

<http://www.fce.vutbr.cz/fyz/ficker.t/navod.pdf>

[7] Měření doby dozvuku

[http://acoust.feld.cvut.cz/teach/uak\\_files/uloha6.pdf](http://acoust.feld.cvut.cz/teach/uak_files/uloha6.pdf)

[8] Návrh a realizace akustických úprav laboratoře

[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=42791](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42791)

[9] Stanovení hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku – Provozní metoda ve volném poli nad odrazivou plochou podle ČSN ISO 3746

[http://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni\\_materialy/EXM/EXM\\_uloha\\_ak\\_vykon.pdf](http://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/EXM/EXM_uloha_ak_vykon.pdf)

## **8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

[10] Hluk a chvění / doc. Ing. Richard Nový, CSc. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2009

[11] Praktická elektroakustika / Ctirad Smetana, 1. vyd. Praha: SNTL, 1981. 692 s.

[12] Snižování hluku a vibrací / doc. Ing. Richard Nový a Ing. Miroslav Kučera. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2009

## **9. SEZNAM PŘÍLOH**

1. Výpočet hladin akustického výkonu
2. Činitele zvukové pohltivosti pro jednooktávové a třetinoctávové pásma (měření č.2)
3. Činitele zvukové pohltivosti pro jednooktávové a třetinoctávové pásma (měření č.2)
4. Naměřená doba dozvuku
5. Součinitel pohltivosti stěn hlukové laboratoře (rok 2002), Osvedčení o měření hluku zařízení (rok 1981)