

Návrh sendvičové vrstvy materiálů s optimální akustickou pohltivostí pro interiéurní aplikace

Bc. Jan Kováč

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan KOVÁČ**
Osobní číslo: **T09823**
Studijní program: **N 2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**

Téma práce: **Návrh sendvičové vrstvy materiálů s optimální akustickou pohltivostí pro interiérodní aplikace.**

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše na téma: **Akustické vlastnosti materiálů, charakteristika vybraných materiálů, akustická pohltivost, vzduchová neprůzvučnost.**
2. Experimentální měření frekvenčních závislostí koeficientu akustické pohltivosti.
3. Vyhodnocení naměřených fyzikálních charakteristik.
4. Návrh optimální sendvičové vrstvy s ohledem na akusticko-izolační vlastnosti.
5. Měření a vyhodnocení vzduchové neprůzvučnosti navržené sendvičové vrstvy.
6. Měření a vyhodnocení akustické pohltivosti navržené sendvičové vrstvy.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

1. Everest, F.A.: *Master Handbook of Acoustics*, McGraw-Hill Companies, Inc., USA (2001), 4. vydání (ISBN 0-07-136097-2).
2. Schroeder, M.R.: *Springer Handbook of Acoustics*, Stürtz AG Würzburg (2007), ISBN 0-387-30446-5.
3. SMETANA, C, a kol.: *Hluk a vibrace, měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha : Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901936-2-5.
4. JIŘÍČEK, O.: *Úvod do akustiky. Učební texty vysokých škol. ČVUT Praha* (2002), 1-146. 1. vydání (ISBN 80-01-02460-1).
5. MIŠUN, V.: *Vibrace a hluk, FS VUT v Brně* (1998), 1.vydání (ISBN 80-214-1262-3).

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Dušan Fojtů, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

14. února 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

20. května 2011

Ve Zlíně dne 14. února 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Byly naměřeny frekvenční závislosti koeficientu akustické pohltivosti pro vybrané materiály sádrokarton, papírový karton a několik druhů PUR pěn. Byly sledovány průběhy těchto závislostí pro jednotlivé materiály, a také kombinace těchto materiálů. Byl vyhodnocen koeficient redukce hluku. Byla vyhodnocena nejlepší kombinace těchto materiálů s ohledem na akusticko-izolační vlastnosti pro interiéurní použití. Jako nejlepší kombinace materiálů byla stanovena z tohoto pohledu kombinace sádrokarton + bílý PUR, kdy dochází k velké míře pohlcení akustické energie v širokém frekvenčním rozhraní. Toto řešení je poněkud finančně nákladnější než řešení při kombinaci sádrokarton + papírový karton, kdy dochází k dostatečnému pohlcení akustické energie ve frekvenčním rozmezí 100-2000 Hz.

Klíčová slova:

Sádrokarton, Papírový karton, PUR pěna, koeficient akustické pohltivosti, koeficient redukce hluku, neprůzvučnost

ABSTRACT

Were measured frequency dependence of acoustic absorption coefficient for selected materials als drywall, cardboard paper and several types of polyurethane foams. They were monitoring the progress of this dependence, for various materials and combinations of these materials. Was evaluated noise reduction coefficient. She was named the combination of these materials with respect to acoustic insulation properties for Interior use. The best combination of materials was determined from the perspective of a combination of white gypsum + PU, the doch-zi to largely absorb acoustic energy in a wide frequency interface. This solution is somewhat more expensive than the solution when combined plasterboard + paper carton, which is sufficient to absorb acoustic energy in the frequency range of 100-2000 Hz.

Keywords:

Plasterboard, Paper cardboard, polyurethane foams, sound absorption coefficient, the coefficient of re-duction of noise insulation

Chtěl bych zde uvést poděkování vedoucímu mé diplomové práce Ing. Dušan Fojtů, Ph.D. za poskytnutí odborných připomínek při řešení této práce.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor. Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně dne 31.05.2011

.....
Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 AKUSTICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ	12
1.1 HLADINY A ENERGETICKÉ VELIČINY	12
1.2 ZDROJE ZVUKU A AKUSTICKÉHO POLE	19
2 AKUSTICKÁ POHLTIVOST, ODRAZIVOST	24
3 ÚVOD DO PROBLEMATIKY AKUSTICKÝCH JEVŮ	30
3.1 ROZPTYL ZPŮSOBENÝ NĚKOLIKA TĚLESY	32
3.1.1 Rozptyl pevných těles.....	34
3.1.2 Černý rozptyl.....	35
3.1.3 Resonantní rozptyl.....	35
3.2 DIFRAKCE.....	36
3.2.1 Difrakce s otvory v úsecích	37
3.3 ODRAZ TENKÉ A TUHÉ ROVINY	38
3.4 LOM	39
3.4.1 Lomený paprsek přes stále stejný, slabý zvuk rychlostního gradientu	39
3.4.2 Lom zvuku v atmosféře	40
4 VZDUCHOVÁ NEPRŮZVUČNOST	42
4.1 PŘEHLED VYBRANÝCH PREDIKČNÍCH POSTUPŮ:.....	43
4.2 PŘESNOST PREDIKČNÍCH POSTUPŮ	45
4.3 STAVEBNÍ NEPRŮZVUČNOST V BUDOVÁCH	47
4.3.1 Základní principy:	47
4.4 POŽADAVKY NA VZDUCHOVOU NEPRŮZVUČNOST V OBYTNÝCH BUDOVÁCH	48
4.5 POŽADAVKY NA VZDUCHOVOU NEPRŮZVUČNOST MEZI MÍSTNOSTMI V OBYTNÝCH BUDOVÁCH.....	48
4.5.1 Požadavky na zvukovou izolaci obvodových plášťů obytných budov	49
4.5.2 Neprůzvučnost zděných konstrukcí.....	49
4.5.3 Izolování dutých vrstev	49
4.5.4 Neprůzvučnost jednoduchých příček a stěn.....	51
4.5.5 Neprůzvučnost dvojitých příček a stěn.....	51
4.5.6 Hlavní vlivy na neprůzvučnost cihlových stěn	51
5 CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH MATERIÁLŮ	52
5.1 SÁDROKARTON	52
5.1.1 Výroba sádrokartonu	52
5.1.2 Vlastnosti sádrokartonu	52
5.2 PĚNOVÝ POLYURETAN.....	52
5.2.1 Rozdělení typů pěnových polyuretanů MOLITAN®.....	53
II PRAKTICKÁ ČÁST	55
6 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI PRO VYBRANÉ MATERIÁLY	56
6.1 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ A PŘÍPRAVA VZORKŮ	56
6.1.1 Dvouvokofonová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206	56

6.1.2	Tříkanálový PULSE multianalyzátor Brüel & Kjaer typ 3560-B-030.....	56
6.1.3	Návod na obsluhu Brüel & Kjaer trubice s obslužným programem PULSE LabShop	57
6.2	PŘÍPRAVA A ROZMĚRY VZORKŮ	59
6.3	VYHODNOCENÍ FREKVENČNÍ ZÁVISLOSTI KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI U NAMĚŘENÝCH MATERIÁLŮ	62
7	DISKUZE	65
7.1	NÁVRH OPTIMÁLNÍ SENDVIČOVÉ VRSTVY S OHLEDEM NA AKUSTICKO- IZOLAČNÍ VLASTNOSTI.....	65
	ZÁVĚR	67
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	68
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	69
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
	SEZNAM TABULEK	73
	SEZNAM PŘÍLOH.....	74

ÚVOD

Zvuk obecně můžeme definovat jako mechanické kmitání, které je charakterizováno parametry pohybu částic pružného prostředí nebo u vlnového pohybu parametry zvukového pole. Část zvuků se projevuje jako slyšitelný zvuk - což je akustické kmitání pružného prostředí v pásmu frekvencí od 16 Hz do 20 kHz, schopné vyvolat zvukový vjem.

Aby lidé mohli dobře a efektivně pracovat, musí být obklopeni optimálním akustickým prostředím. Termín „dobrá akustika“ lze aplikovat mnoha různými způsoby. Obecně však tento termín vyjadřuje vyváženou souhru mezi dobou dozvuku, hlukem v pozadí a zvukovou izolací. V místnosti s dobrou akustikou je požadovaný zvuk zdůrazněn, zatímco nežádoucí zvuky jsou eliminovány nebo omezeny do té míry, že zanikne jejich rušivý účinek.

Stavebně technické parametry jak celé budovy, tak i jednotlivých dílčích konstrukcí zásadně ovlivňují užité vlastnosti objektu. Každý se na stavbu dívá ze svého pohledu: pro někoho je nejdůležitější architektonický dojem, jiný se soustředí na statické funkce, pojišťovna posuzuje řešení požární odolnosti a zabezpečení objektu. Pravdou je, že akustické vlastnosti prostoru posuzuje téměř každý: dokáže říci, zda je mu v dané místnosti příjemně, jak vnímá „pocit pohody prostředí“.

Při výběru materiálu pro zvukovou izolaci je nutné si uvědomit, zda je nutné izolovat interní prostory, tedy přednáškové sítě, koncertní a divadelní sály, obývací pokoj, bytové prostory a jiné, kde je důležitou akustickou vlastností izolačního materiálu veličina koeficient zvukové pohltivosti, který udává jaké procento dopadající akustické energie materiál pohltuje a jakou část odráží zpět do prostoru, nebo je nutné zamezit průchodu akustické energie skrz materiál do dalšího prostoru, tedy akusticko-izolační aplikace při výstavbě protihlukových koridorů, kdy je nutné, aby materiál co nejvíce akustické energie odrážel zpět ke zdroji hluku a nedocházelo k průniku této energie do dalšího prostoru, v mnoha případech do obydlí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 AKUSTICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ

1.1 HLADINY A ENERGETICKÉ VELIČINY

Vzrůst subjektivního sluchového i hmatového vjemu se v zásadě řídí logaritmickým zákonem. Např. akustický tlak slyšitelného rozsahu vjemů přesahuje sedm dekad, což by při vyjádření v jednotkách tlaku [Pa] vedlo k nepraktickému zápisu. Oba tyto důvody vedou k tomu, že jsou vjemové veličiny vyjadřovány v logaritmické stupnici k určité vztažné – referenční hodnotě:

$$L_y = 10 * \log\left(\frac{y^2}{y_0^2}\right) = 20 * \log\left(\frac{y}{y_0}\right) \quad (1)$$

U energetických veličin, např. výkonu či intenzity, závislých na kvadrátu sledované veličiny je:

$$L_{energ} = 10 * \log\left(\frac{y_{energ}}{y_0}\right) \quad (2)$$

Pro vztažné referenční hodnoty používaných veličin (vztažné hodnoty jsou označovány také jako „re xxx“) byly stanoveny tyto hodnoty:

	vztažná hodnota
akustický tlak	$2 \cdot 10^{-5}$ [Pa]
akustický výkon	$1 \cdot 10^{-12}$ [W]
akustická intenzita	$1 \cdot 10^{-12}$ [W/m ²]
výchylka kmitavého pohybu - nestandardizováno,	$1 \cdot 10^{-9}$ [m]
rychlost kmitavého pohybu	$1 \cdot 10^{-9}$ [m/s]
zrychlení kmitavého pohybu	$1 \cdot 10^{-6}$ [s ⁻²]
Síla	$1 \cdot 10^{-6}$ [N]

Tak je hladina akustického tlaku L_p dána vztahem:

$$L_p = 20 * \log\left(\frac{p}{p_0}\right) = 20 * \log p + 94 \quad (3)$$

a naopak platí:

$$p = 2 * 10^{-5} * 10^{\frac{L_p}{20}} = 10^{\frac{(L_p - 94)}{20}} \quad (4)$$

Převod mezi hladinou akustického tlaku a akustickým tlakem je v (Tab. 1), kde se číselné hodnoty podrobnějšího stupňování mezi 100 dB a 120 dB opakují ve všech dvacetidecibellových krocích s příslušným řádovým násobitelem.

Výkon kmitavého děje W [W] v ustáleném stavu je definován jako práce vykonaná za jednotku času, kde práce je součinem síly a dráhy. Pro diferenciálně malé časové úseky je okamžitý výkon dán součinem působící síly a rychlosti v [m/s]. Poněvadž je akustický tlak definován silou působící na jednotkovou plochu, můžeme vyjádřit akustický výkon vztahem:

$$W = p * v * S = I * S \quad (5)$$

kde: S [m²] – sledovaná plocha.

Střední akustický výkon při sinusovém průběhu upravíme na tvar:

$$W = p_{ef} * S * v_{ef} * \cos j \quad (6)$$

kde j je fázový posun mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí.

Akustická intenzita I [W/m²] je vektor a je definována jako tok akustické energie v daném směru a smyslu plochou kolmou k tomuto směru, vztažený na jednotku plochy. Z této definice je zřejmý i její vztah k akustickému výkonu:

$$W = \int_S I * dS \quad (7)$$

Z tohoto vztahu vychází řada měřících metod. Zvolíme-li S jako jednoduchou uzavřenou plochu obepínající objem V , pak minulý vztah přejde na tvar uzavřeného plošného integrálu:

$$W = \oiint_S I * dS \quad (8)$$

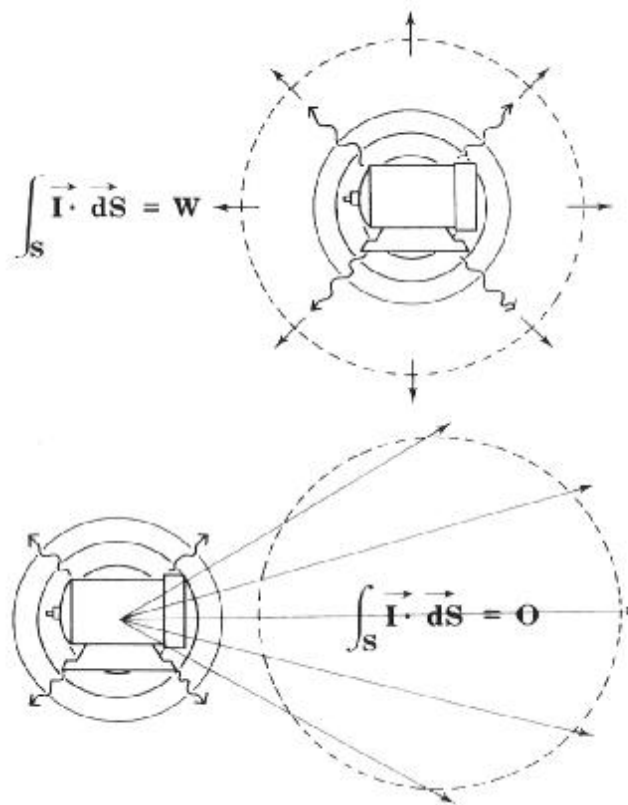
Tento vztah říká, že akustický výkon vyzářený uvnitř uzavřené plochy S získáme integrací přes tuto plochu, bez ohledu na uspořádání a typ zdrojů, které se uvnitř objemu nacházejí. Zdroje, které se nacházejí vně této plochy, k výslednému výkonu nepřispívají (Obr. 1)

Pojem akustické intenzity ve smyslu hustoty toku akustické energie zavedl již lord Rayleigh ve svém díle „The Theory of Sound“. Její zavedení do praktické akustiky přišlo ale až po roce 1977, kdy vývoj digitální elektroniky umožnil její měření. Dnes jsou již intenzitní metody běžné ve většině oboru akustiky a stále více nahrazují metody založené na měření akustického tlaku. Jako příklad aplikací je možno uvést: měření akustického výko-

nu, lokalizace zdrojů zvuku, měření pohltivosti a akustické impedance, měření vzduchové neprůzvučnosti atd.

Tab. 1. Číselné hodnoty hladin akustického tlaku a intenzity

Hladina L_p , L_I , L_w [dB]	Akustický tlak p [Pa]	Kvadrát akus- tického tlaku	Ak. int. I [W/m ²], Ak. výk. W [W]
0	$20 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-12}$
10	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$
20	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-10}$
30	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
40	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$
50	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$
60	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
70	$6,3 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
80	0,2	0,04	$1,0 \cdot 10^{-4}$
90	0,632	0,4	$1,0 \cdot 10^{-3}$
100	2	4	0,01
101	2,243	5,036	0,0126
102	2,518	6,34	0,0158
103	2,825	7,981	0,02
104	3,17	10,048	0,0251
105	3,557	12,649	0,0316
106	3,991	15,924	0,0398
107	4,477	20,047	0,0501
108	5,024	25,238	0,0631
109	5,637	31,773	0,0794
110	6,325	40	0,1
111	7,096	50,36	0,126
112	7,962	63,4	0,158
113	8,934	79,81	0,2
114	10,02	100,48	0,251
115	11,25	126,49	0,316
116	12,62	159,24	0,398
117	14,16	200,5	0,501
118	15,89	252,4	0,631
119	17,82	317,7	0,794
120	20	400	1
130	63,25	4000	10
140	200	$4 \cdot 10^4$	100
150	632,5	$4 \cdot 10^5$	1000
160	2000	$4 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^4$



Obr. 1. Akustická intenzita procházející zcela uzavřenou plochou, je-li zdroj hluku uvnitř sledovaného prostoru (a) nebo vně (b)

Pro ustálený stav lze pro akustickou intenzitu zpětně dovodit:

$$I = \frac{W}{S} = p_{ef} * v_{ef} * \cos j \quad (9)$$

Také akustickou intenzitu vyjadřujeme v logaritmické míře, kde vztažná hodnota je:

$$I_0 = 1 \frac{pW}{m^2} = 1 * 10^{-12} \quad (10)$$

tedy:

$$L_I = 10 * \log \left(\frac{I}{I_0} \right) = 10 * \log I + 120 \quad (11)$$

naopak:

$$I = I_0 * 10^{\frac{L_I}{10}} = 10^{\frac{(L_I - 120)}{10}} \quad (12)$$

Podobně pro akustický výkon L_w platí při vztažené hodnotě:

$$W_0 = 1 * 10^{-12} W \quad (13)$$

$$L_w = 10 * \log W + 120 \quad (14)$$

$$W = W_0 * 10^{\frac{L_w}{10}} \quad (15)$$

Číselné hodnoty hladin akustické intenzity jsou také udány v (Tab. 1) a všimněme si, že číselná hodnota hladiny akustického tlaku, hladiny akustické intenzity i hladiny akustického výkonu si v decibelovém vyjádření odpovídají.

V některých případech je důležitou veličinou i hustota zvukové energie w [J/m^3] a vlnový odpor prostředí, který je pro vzduch označen $z_0=407$ [$Pa \cdot s \cdot m^{-1}$] (pro 20 °C, nor. atm. tlak). Tyto veličiny jsou s ostatními vázány pro velké vzdálenosti od zdroje zvuku (kde $\cos j = 1$) vztahy (efektivní hodnoty):

$$z_0 = \frac{p}{v} = c * r \quad (16)$$

kde: ρ – hustota prostředí

$$p = v * z_0 = p * r * c \quad (17)$$

$$v = \frac{p}{z_0} = \frac{p}{(r * c)} \quad (18)$$

$$W = p * v * S = I * S = S * v^2 * z_0 = S * \frac{p^2}{z_0} = S * \frac{p^2}{(r * c)} \quad (19)$$

$$I = \frac{W}{S} = p * v = z_0 * v^2 = \frac{p^2}{z_0} \quad (20)$$

$$w = \frac{I}{c} \quad (21)$$

Pro volné zvukové pole je:

$$w_v = \frac{W}{(c * S)} \quad (22)$$

a v difúzním zvukovém poli je:

$$w_d = \frac{4 * W}{(c * A)} \quad (23)$$

kde: $A [m^2]$ - celková pohltivost prostoru.

Pokud akustický tlak p a akustická rychlost v mají proti sobě fázový posun, určuje jejich poměr tzv. akustickou vlnovou impedanci (vlnovou impedanci prostředí)

$$z = \frac{p}{v} \quad (24)$$

Pro informaci uveďme přibližné akustické výkony $W [W]$ různých typických zdrojů zvuku v (Tab.2).

Tab. 2. Akustické výkony $W [W]$ typických zdrojů zvuku

Slabý šepot, šum v tichém lese	$1 * 10^{-10} \dots 1 * 10^{-9}$
Hovorová řeč, panelový byt ve dne	$1 * 10^{-5} \dots 5 * 10^{-5}$
Luxování, hlasitá řeč	$5 * 10^{-4} \dots 2 * 10^{-3}$
Křik, bruska, písňalka	$1 * 10^{-2} \dots 0,1$
Kovářská dílna, textilka	$0,5 \dots 1$
Symfonický orchestr, fortissimo	$5 \dots 15$
Trysková stíhačka	$\approx 10\ 000$
Veliké dopravní letadlo (jumbojet)	$\approx 50\ 000$
Kosmická raketa	$\approx 50\ 000\ 000$

Sčítání signálů je zásadně rozdílné pro signály koherentní a nekoherentní. Součet dvou jednoduchých signálů se stejným kmitočtem, tedy signálů koherentních, dává opět jednoduchý signál, jehož amplituda závisí nejen na amplitudách jeho složek, ale i na jejich vzájemné fázi. Jsou-li oba signály ve fázi, může zvýšení hladiny akustického tlaku dosáhnout hodnoty 6 dB. Působí-li naopak, v proti fázi, mohou se signály vyrušit, ale prakticky jen v určitém ohraničeném místě prostoru, kde skutečně souhlasí amplituda i fáze signálů. U složených signálů je vyrušení zvuku možné spíše jen teoreticky, neboť by musely souhlasit amplitudy, kmitočty i fáze v celém prostoru, kde chceme vyrušení dosáhnout (akustické „perpetuum mobile“). Výsledná hodnota akustického tlaku dvou jednoduchých, koherentních signálů je dána vztahem:

$$p_c = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 2 * p_1 * p_2 * \cos(j_1 - j_2)} \quad (25)$$

Není snad třeba zvláště zdůrazňovat, že při součtu dvou kmitočtově velmi blízkých signálů, vznikají zázněje, které mohou dosáhnout amplitud vyplývajících ze vztahu (40).

U nekoherentních signálů, tj. signálů, které nemají shodné kmitočty složek, můžeme použít daleko jednoduššího sčítání energetického. Pro praktické postupy tento způsob dostačuje, i když je jasné, že se interferencemi vytváří daleko složitější pole. V praxi se však díkybohu skoro vždy jedná o signály nekoherentní, kde je výsledná akustická intenzita dána součtem jejich intenzit (celková hodnota má index c):

$$I_c = \sum_{i=1}^n I_i \quad (26)$$

nebo v hladinovém vyjádření:

$$10 * \log\left(\frac{I_c}{I_0}\right) = 10 * \log\left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{I_i}{I_0}\right)\right) \quad (27)$$

Dosadíme li za intenzity akustické tlaky, platí:

$$L_c = 20 * \log\left(\frac{p_c}{p_0}\right) = 10 * \log\left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{p_i^2}{p_0^2}\right)\right) = 10 * \log\left(\sum_{i=1}^n \left(10^{\frac{L_i}{10}}\right)\right) \quad (28)$$

Výpočet výrazů mocnin deseti je bez kalkulátoru pracný. Součet řady signálů získáme postupným součtováním prvotního výsledku s dalším signálem.

Máme-li stanovit součet n signálů o stejné intenzitě, nalezneme výsledek pomocí vztahů:

$$L_c = L + 10 * \log n \quad (29)$$

případně

$$p_c = p * \sqrt{n} \quad (30)$$

Dva stejné zdroje zvýší hladinu o 3 dB, tři o 4,8 dB, čtyři o 6 dB atd.

Opačným způsobem, než byl vytvořen součet, můžeme získat rozdíl hladin, tj. hladinu jednoho z působících signálů, známe-li hladinu výsledného signálu a hladiny zbývajících signálů, pak platí při $n \gg 1$:

1.2 ZDROJE ZVUKU A AKUSTICKÉHO POLE

Ve volném prostoru se vytváří různá typická zvuková pole podle typu zdroje zvuku.

Fyzikálně nejjednodušším zdrojem zvuku je pulzující („dýchající“) koule; takovýto zdroj se nazývá monopól, unipól nebo kulový zářič či zářič nultého řádu. Pulzující koule vyzařuje akustickou energii do všech směrů se stejnou amplitudou a fází, a vytváří tak zvukové pole kulových vln. Akustická intenzita klesá s druhou mocninou vzdálenosti l [m] od zdroje, akustický tlak v poli kulových vln klesá úměrně se vzdáleností. Pro přepočítání hodnot v akustickém poli z bodu 1 do bodu 2 platí pro akustický tlak, akustickou rychlost a akustickou intenzitu:

$$p_2 = p_1 * \left(\frac{l_1}{l_2} \right) \quad (31)$$

$$v_2 = v_1 * \left(\frac{l_1}{l_2} \right) \quad (32)$$

$$I_2 = I_1 * \left(\frac{l_1}{l_2} \right)^2 \quad (33)$$

a v hladinovém vyjádření:

$$L_2 = L_1 + 20 * \log \left(\frac{l_1}{l_2} \right) \quad (34)$$

Jako kulový zářič se chová většina zdrojů zvuku: ve větší vzdálenosti se tak chovají i celé „soustavy“ zdrojů zvuku, tj. celé stroje, a ve vzdálenosti relativně k rozměrům i např. celá továrna.

Šířící se kulová zvuková vlna se se zvětšujícím poloměrem kulových vln změní ve veliké vzdálenosti od zdroje zvuku (je-li vlnová délka vyzařovaného signálu zanedbatelně malá proti poloměru postupující vlnoplochy) ve zvukovou vlnu rovinnou (nebo přesněji v kvazirovinnou). Pole rovinných zvukových vln vzniká před plošným zářičem, jehož rozměr je daleko větší než délka vlny vyzařovaného zvuku. Postupující rovinné zvukové vlny se nemění, nemění se tedy ani plocha jejich vlnoploch, a proto se nemění se změnou vzdálenosti od zářiče ani akustická intenzita a akustický tlak.

$$p_2 = p_1 \quad (35)$$

$$v_2 = v_1 \quad (36)$$

$$I_2 = I_1 \quad (37)$$

$$L_2 = L_1 \quad (38)$$

Rovinnou vlnu lze nalézt např. postupovat v uzavřené trubici, do které je zvuková vlna vysílána. Tak můžeme např. zjistit, že měřená hladina zvuku je na začátku i konci dlouhého tunelu prakticky stejná, pokud neuvažujeme útlum absorpcí; využívají toho tzv. trubkové “telefony“.

Kmitá-li soufázově nekonečná řada bodových zdrojů, šíří se akustická energie do všech směrů kolmých na řadu bodových zdrojů a vytvářejí se válcové zvukové vlny. Takový zdroj zvuku nazýváme také liniový zdroj („dýchající žízála“). Veličiny akustického pole se mění se vzdáleností od osy zářiče podle vztahů:

$$p_2 = p_1 * \sqrt{\left(\frac{l_1}{l_2}\right)} \quad (39)$$

$$v_2 = v_1 * \sqrt{\left(\frac{l_1}{l_2}\right)} \quad (40)$$

$$I_2 = I_1 * \left(\frac{l_1}{l_2}\right) \quad (41)$$

a v hladinovém vyjádření:

$$L_2 = L_1 + 10 * \log\left(\frac{l_1}{l_2}\right) \quad (42)$$

Liniový - přímkový zdroj vytváří např. hustě jedoucí proud automobilů po silnici nebo dlouhý vlak. Přehled vlastností zdrojů zvuku a akustických polí je v (Tab. 3).

Ve strojních konstrukcích nalezneme v určitých případech dvojici si blízkých součástí, které kmitají proti sobě. Lze na ně pohlížet jako na dva bodové zářiče pulzující v protifázi. Takový zářič označujeme za akustický zdroj prvního druhu, nebo také jako akustický dipól. Oba unipóly interferencí svých zvukových polí vytvářejí směrově závislé zvukové pole, které můžeme znázornit dvěma kulovými plochami, dotýkajícími se svým povrchem v místě, kde se dipól nachází, a orientované ve směru spojnice obou zářičů. Ve směru dipólu je vyzařování nejúčinnější, do roviny procházející středem dipólu a kolmé na jeho osu

je vyzařování teoreticky nulové. Pokles akustického tlaku v ose dipólu je se vzdáleností z počátku 6 dB na zdvojnásobení vzdálenosti, tedy jako u kulového zářiče, ale ve větších vzdálenostech (kdy vzdálenost unipólů je zanedbatelně malá proti vzdálenosti od dipólu) narůstá až na 12 dB na zdvojnásobení vzdálenosti.

Tab. 3. Zdroje zvuku a jejich akustické pole

ZÁŘIČ	BODOVÝ	PŘÍMKOVÝ	PLOŠNÝ	JAKÝKOLIV,
ak. vlna	Kulová	válcová	Rovinná	v uzavřeném prostoru, v dostatečné vzdálenosti od zdroje zvuku
zdroj zvuku	pulsující koule	soufáz. pulsující řada	kmitající rovina	
směr šíření	od zdroje do všech stran	do všech směrů kolmých na osu	kolmo na kmitající rovinu	Náhodný
vlnplochy	Kulové	válcové	Rovinné	nedefinované
plocha S vlnoploch	zvětšuje se s r^2	zvětšuje se s r	nemění se	nelze určit
ak. výkon na vlnopl.	konstantní W [W]			konst. hustota ak. Energie
ak. intenzita I ve směru šíření	$I \approx \text{konst.}/r^2$, ($I=W/S$), [W/m ²]	pro $r \ll \lambda$ je $I \approx \text{konst.}/r$; pro $r \geq \lambda$ jako \approx bodový	$I = \text{konst.}$	$I = \text{konst.}$ a stejná ve všech směrech
ak. tlak při $r > \lambda$	$p \sim 1/r$	$p \sim \sqrt{1/r}$	$p = \text{konst.}$	$p = \text{konst.}$
pokles akust. tlaku	$p_2 = p_1 * r_1/r_2$ pro $\lambda < r$	$p_2 = p_1 * \sqrt{r_1/r_2}$ pro $\lambda < r < \lambda$	$p_2 = p_1$	$p_2 = p_1$
L_2 [dB] = pokles hl. se vzdál.	$L_1 - 20 * \log(r_2/r_1)$	$L_1 - 10 * \log(r_2/r_1)$	L_1	L_1
pokles hl. na dvojnásobek r	6 dB pro $r > \lambda$	3 dB pro $\lambda < r < \lambda$	0 dB	0 dB
vln. imped.	p/v	p/v	$c * \rho$	$c * \rho$
fázový posun mezi akustickým tlakem a rychlostí:				Neurčitý
na povrchu	$90^\circ = \pi/2$	$45^\circ = \pi/4$	0°	
pro $r \leq \lambda$	$\arctan(\lambda/2\pi r)$	$\arctan(\lambda/4\pi r)$	0°	
pro $r \gg \lambda$	$\approx 0^\circ$	$\approx 0^\circ$	0°	

Při souhře mnoha zdrojů zvuku nastávají, i ve volném prostoru, velmi složitá zvuková pole jako výsledek interferencí mezi jednotlivými zářiči, kde neplatí jednoduché vztahy mezi vzdáleností, akustickým tlakem a akustickou intenzitou.

V uzavřených prostorách se může vytvořit některý z typů dříve uvedených akustických polí pouze tehdy, pokud se neuplatní odrazy postupující - primární vlny od stěn prostoru nebo překážek. Vyjádřený typ akustického pole se tedy může vytvořit jen do určité vzdálenosti od zdroje zvuku, protože ve větších vzdálenostech se uplatní i odražené - sekundární vlny, které primární vlnu překrývají. Mnohonásobné odrazy vytvoří akustické pole odražených vln, v němž nelze určit, kterým směrem se zvuková energie šíří; směr šíření je náhodný a stále se mění, a nelze proto definovat žádnou vlnoplochu. Takové pole nazýváme pole difúzní a za hranici mezi polem volným a difúzním označujeme vzdálenost, ve které hustota akustické energie volného pole se rovná hustotě akustické energie difúzního pole (vztahy (22) a (23)). Je samozřejmé, že se odražené signály uplatňují jistým způsobem i ve volném poli, tj. v poli postupujících přímých vln.

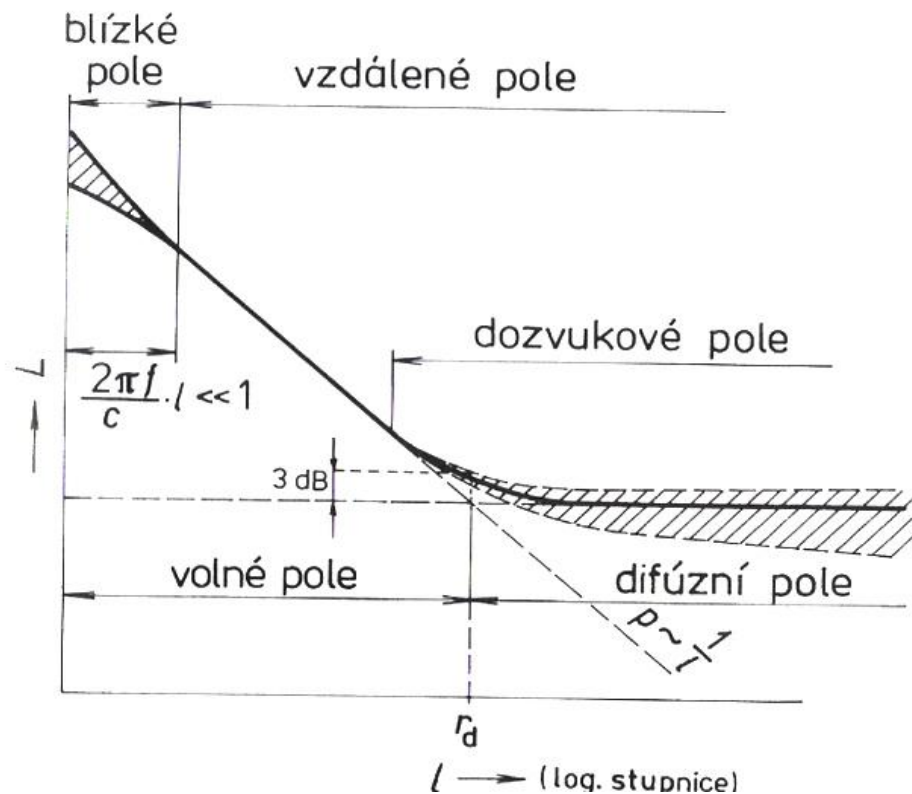
I v uzavřeném prostoru vzniká u rozměrnějších zdrojů zvuku (stroj, vibrující stěna apod.) v jejich přímé blízkosti interferencí tzv. blízké pole (nazývané také Fresnellův prostor), sahající až do vzdálenosti kdy $2\pi f \cdot l/c < 1$. Teprve ve větší vzdálenosti se vytvoří jakoby skutečně volné pole.

V uzavřených prostorách se uplatňují odražené signály vždy, ale pokud hustota akustické energie odražených vln není alespoň srovnatelná s hustotou akustické energie primárních vln, hovoříme i v uzavřeném prostoru o volném poli. Teprve při dalším zvětšování vzdálenosti od zdroje se vytvoří difúzní pole. Část v uzavřeném prostoru, kdy jsme dostatečně vzdáleni od zdroje, aby se nejednalo o blízké pole, označujeme jako vzdálené pole (vztahy (22) a (23)). Někdy je definováno ještě tzv. dozvukové pole, tj. pole, kde se poslechově uplatňují odražené signály. Dozvukové pole zasahuje oblast širší, než je oblast difúzního pole a jeho hranice není fyzikální, ale je určena postřehnutelností odražených signálů. Tuto hranici označujeme jako dozvukovou vzdálenost (nebo poloměr dozívání) r_d [m] a závisí na celkové pohltivosti prostoru A [m²] nebo na době dozvuku T [s] a objemu prostoru V [m³] vztahy:

$$r_d = 0,14 * \sqrt{A} = 0,057 * \sqrt{\frac{V}{T}} \quad (43)$$

Při měřeních si musíme být jasné vědomi, a některé z metodik měření to striktně předepisují, ve které části zvukového pole se v uzavřeném prostoru nalzáme. Ve Fresnellově prostoru a v difúzním poli totiž není poměr akustického tlaku a akustické rychlosti roven vlnové impedanci, a proto neplatí ani mnohé z běžně uváděných a při výpočtech používaných vztahů.

Dozvukové pole nalezneme v každém, i jen částečně uzavřeném prostoru (např. ulice s vysokými okolními domy), ale neznamená to ještě, že se v každém takovém prostoru vytvoří i difúzní pole. Pokud lze v dozvukovém poli určit směr šíření akustické energie a vyznačit postupující vlnoplochy, můžeme sice nalézt oblasti, kde jsou porovnatelné i hustoty akustické energie, nejde však o jasně ohraničenou oblast a v uvažované oblasti existují místa, kde lze měřením prokázat směr šíření akustické energie, a proto to není pole difúzní.



Obr. 2. Typy akustických polí v uzavřeném prostoru

2 AKUSTICKÁ POHLTIVOST, ODRAZIVOST

Vlastní absorpci zvuku lze vyšetřovat u velkých a rovných ploch absorbérů, aby tak byl vyloučen odraz a lom u hran ploch.

$$a = \frac{\text{pohlčená energie}}{\text{dopadající energie}} = 1 - |b|^2 \quad (44)$$

kde β je *součinitel odrazu*; je definován jako podíl odražené a dopadající akustické energie na rozhraní. Je dobré připomenout, že např. pro $\beta = 0,1$ je odpovídající $\alpha = 0,99$.

Na základě měření akustické impedance daného materiálu lze činitel akustické pohltivosti pro kolmý dopad akustických vln vyhodnotit ze vztahu

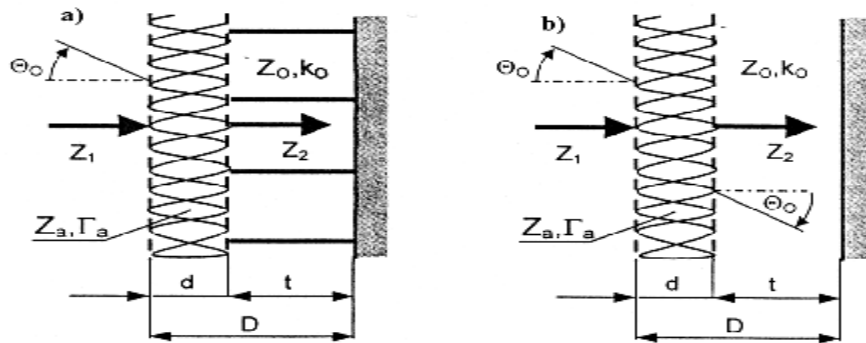
$$a = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{X}{r_0 c} + \frac{r_0 c}{X} \right)} \quad (45)$$

kde $X [Ns/m^3]$ – reálná složka měrné akustické impedance $Z = X + jY$. Je zřejmé, že činitel pohltivosti bude mít maximální hodnotu $\alpha = 1$ pro hodnotu $X = r \cdot c$.

Součinitel odrazu při šikmém dopadu akustické vlny pod úhlem Θ na rozhraní absorpční plochy – obr. 3., se vypočte ze vztahu

$$b(\Theta_o) = \frac{Z_1 \cdot \cos \Theta_o - Z_o}{Z_1 \cdot \cos \Theta_o + Z_o} \quad (46)$$

Odtud je zřejmé, že dosažení nejvyšší impedance a nejnižší hodnoty součinitele odrazu se dosáhne při úhlu incidence Θ_o , pokud je dosaženo $|Z_1| > Z_o$.



Obr. 3: Typy plošných absorbérů

Při kolmém dopadu akustické vlny na rozhraní je postačující znát normálovou komplexní specifickou impedanci stěny absorbérů

$$Z_1 = X_1 + jY_1 = \frac{P}{v_n} \quad (47)$$

a která je dána podílem akustického tlaku a normálové složky rychlosti kmitání částic na rozhraní.

Pak jsou:

- součinitel odrazu

$$b = \frac{X_1 - Z_0}{X_1 + Z_0} \quad (48)$$

součinitel pohltivosti (absorpce)

$$a = \frac{4X_1Z_0}{(X_1 + Z_0)^2 + Y_1^2} \quad (49)$$

kde $Z_0 = r_0 \cdot c_0$ je charakteristická impedance vzduchu pro rovinné vlny. Pro porézní materiály je nutno provést korekci na pórovitost, pak je

$$Z_1 = \frac{Z_1}{h} \quad (50)$$

kde h je pórovitost materiálu.

Pro homogenní pórovitost materiálů, jako např. skelná vlákna, minerální vlnu, otevřené buňky pěnitých materiálů a podobně, je vhodnější používat komplexní hodnoty charakteristických impedancí, tj.

$$b = \frac{Z_a - Z_o}{Z_a + Z_o} \quad (51)$$

Pro vrstvu absorpčního materiálu dle obr. 3. se vzduchovou mezerou před tuhou stěnou lze použít předpoklad, že ve vzdušné mezeře dopadající a odražená vlna poskytují impedanci na zadní straně porézní vrstvy ve tvaru

$$Z_2 = -j \cdot Z_o \cdot \cot g(k_o \cdot t) \quad (52)$$

kde: $k_o = w_o/c_o$ – vlnové číslo vzduchu

t – šířka vzduchové mezery.

Koeficient vnitřního odrazu na zadní straně vrstvy je

$$b_b = \frac{Z_2 - Z_a}{Z_2 + Z_a} \quad (53)$$

Pak je akustická impedance na přední straně absorpční vrstvy

$$Z_1 = \frac{Z_h \cdot (Z_2 + Z_w)}{Z_2 + Z_h} = Z_h \frac{1 + Z_w / Z_2}{1 + Z_h / Z_2} \quad (54)$$

kde: Z_h – vstupní impedance vrstvy na straně akusticky tvrdé stěny (tj. při $Z_2 \rightarrow \infty$)

Z_w – vstupní impedance vrstvy při nulové impedanci ($Z_2 = 0$) a která může být realizována umístěním vrstvy do vzdálenosti $t = I_0 / 4$ před tuhou stěnu, když I_0 je akustická délka vlny ve vzduchu.

Součinitelé odrazu a pohltivosti se pak vypočtou pomocí vztahů (48) a (49).

V dosavadních úvahách klíčové parametry G_a a Z_a závisely na jednom parametru, hlavně na odporu R_I proti proudění skrze absorpční vrstvu.

Součinitel absorpce však může být uvažován jako funkce dvou bezrozměrných proměnných:

$$F = \frac{f \cdot d}{c_o} ; \quad b = \frac{R_1 \cdot d}{Z_o} \quad (55)$$

kde: d [m] – tloušťka absorpční vrstvy

f [Hz] – frekvence

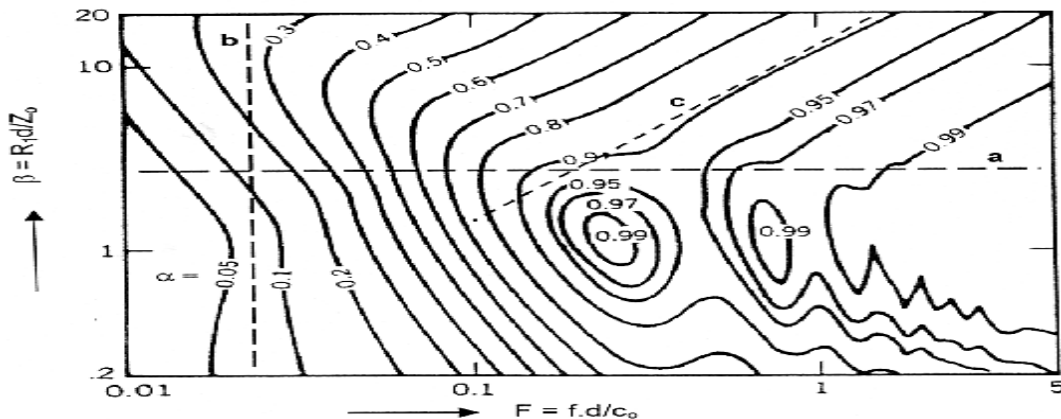
Pak jsou:

$$k_o \cdot d = 2 \cdot p \cdot F$$

$$E = \frac{r_o \cdot f}{R_1} = \frac{F}{b} \quad (56)$$

Při šikmé incidenci je úhel Θ třetím vstupním parametrem.

Mapu izolinií konstantních hodnot součinitelů akustické absorpce a lze pak zobrazit v logaritmických stupnicích obou parametrů b a F – obr. 4. Zde je mapa izolinií $a = \text{konst.}$ pro jednovrstvý absorbér z vláknitého materiálu a pro kolmou incidenci.



Obr. 4. Křivky součinitele absorpce $a = \text{konst.}$ při kolmé incidenci akustické vlny

Maximální hodnoty pohltivosti se dosahuje při parametrech okolo $b = 1,2$ a $F = 0,25$. Tomu odpovídá tloušťka vrstvy absorbéru, rovnající se čtvrtině délky vlny a při odporu oproti průchodu vrstvou rovném $1,2 Z_0$.

Frekvenční závislost parametru $a = a(f)$ se obdrží průsečnicí izolinií vodorovnou přímkou a vycházející zleva do bodu daným jednotlivými parametry případu. Z této mapy

lze sledovat vlivy jednotlivých proměnných na změnu součinitelů absorpce, jako např. závislosti $a(R_1)$, $a(f)$, $a(d)$ - přímka b .

Z mapy lze například odečíst tloušťku pohlcující vrstvy, při které součinitel absorpce má hodnotu stejnou jako při nekonečné tloušťce d_∞ . Tato reálná hodnota tloušťky vrstvy se obdrží z průběhu izolinií, tj. kde tyto izolinie začínají mít sklon 45° (přímka c), neboť pak součinitel pohltivosti a nezávisí na tloušťce vrstvy. [2]

Koeficient zvukové pohltivosti se mění s frekvencí. Typicky absorpční materiály jsou materiály porózní charakterizované tímto koeficientem, který se zvyšuje s frekvencí. Účinná pohltivost je tedy limitována frekvencí 250 Hz, pod níž nedochází k tak tlumivým účinkům jako nad touto frekvencí. Existují sice absorbéry, které tlumí i velmi nízké frekvence, ale touto problematikou se nebudeme zabývat. Nicméně v typických případech je vhodné pro charakteristiku akustických vlastností materiálu použít jednu veličinu, která se vyhodnocuje z více frekvencí.

Tato veličina byla definována Americkou Společností pro Testování Materiálů (ASTM) jako součást normy C423 a nazývá koeficient hlukové redukce (NRC). Tento koeficient je aritmetickým průměrem hodnot koeficientů zvukové pohltivosti při frekvencích 250, 500, 1000 a 2000 Hz zaokrouhleným nejbližší k 0,05. [3]

3 ÚVOD DO PROBLEMATIKY AKUSTICKÝCH JEVŮ

Zvukové vlny, které se šíří v kapalném mediu, nám zřídka budou cestovat velmi daleko, než se setkají v některé oblasti. Stav media nebo jeho dynamické vlastnosti, se nám budou lišit od dopadající vlny. Pro tyto vlny je typická rozdílnost, dle okolností. Velký rozdíl šíření vln je např. v uzavřené místnosti, kdy se vzduch odráží od betonové zdi a nevelký rozdíl, je v případě vzduchového měchýře u ryb v oceánu. Adaptace se musí vyskytovat na rozhraní, kdy dopadající vlna má za následek druhotné vlnové pole v kapalině. Toto druhotné vlnové pole je navrstvené na originálním nahodilém poli a vytváří interferenci a modifikaci tlaku a distribucí síly. Procesy z druhotného zvukového pole jsou široce klasifikované jako odraz, rozptyl a lom. Změna směru šíření vln dopadem na jiné prostředí, či nerovnoměrností podporující prostředek se nazývá lom. My jsme obeznámeni s optickým odrazem, lomem a rozptylem, jako je například ilustrace v zrcadle, zjevná falešná hloubka bazénů a matného skla.

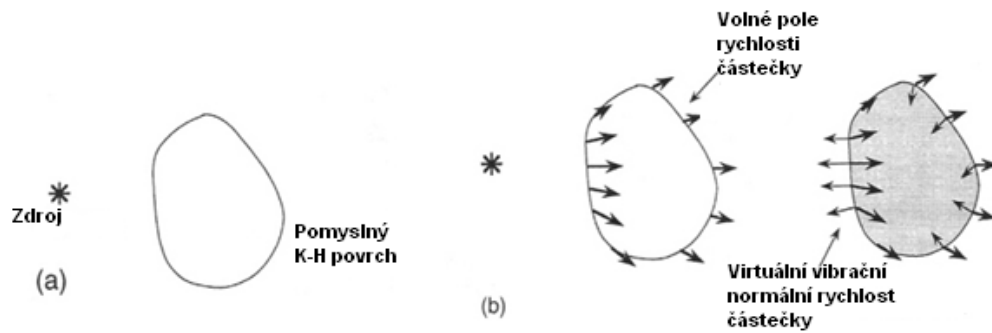
Optický ohyb je jev, se kterým se zřídka setkáváme. Zatím, co je jednoduché zařadit do kategorie viditelné objekty či rysy v rámci jejich stupnice vztažené k průměrné vlnové délce světla, nemůžeme toto dělat stejně pro zvukové vlny. Je to proto, že viditelné světlo pokryje méně oktáv, zatímco zvukový kmitočtový rozsah pokrývá deset oktáv. Například lidská hlava je malá ve srovnání s vlnovou délkou ve vzduchu ve 100Hz, ale rozsáhlá v 8000Hz. Následně je nezbytné považovat akustickou interakci se specifickými objekty či rysy ve třech širokých vlnových délkách, v rozsahu dlouhý a úměrně krátký. V úměrném rozsahu, kde stupnice objektu a rysy jsou stejného pořadí jako akustické vlnové délky, komplex pole odražených zvukových vln jsou vygenerované, rychle se mění forma se změnou frekvence. Optické příklady budou poskytovat kvalitativní analogie jistých akustických úkazů. Většina, snadno porozuměného příkladu akustické interakce mezi zvukem v tekutině a v pevném objektu, je odraz rovinné vlny z velmi rozsáhlé neohebné rovinné plochy. Generace sekundární vlnové plochy, které společně s dopadající vlnou splní podmínky nulové normální rychlosti částičky, je popsán odraz (ohyb zpět). Termínovaný odraz, v tomto specifickém smyslu, nejenže platí pro rovinné plochy, ale také pro povrchové rozměry a paprsky zakřivení, které jsou velké ve srovnání s vlnovou délkou. Když, je povrch zvukově hladký, akustický odraz je podobný, jako optický odraz z křivočarého zrcadla, s výjimkou difrakce.

Odražená pole z takových povrchů jsou prostorově souvislá a udrží přikázaný obsah informací o nahodilém poli. Odražená zrcadlová komponenta pole jsou ta, která odpovídají optickému odrazu v zrcadle, Na rozdíl od čistého zrcadlového obrazu. Některá světla se k tomu odráží zrcadlově, aby nejasný obraz generoval, ale nejvíce je roztroušený ve velkém množství směrů povrchovými neregulérnostmi uspořádání vlnové délky co do velikosti, produkují neurčitý zjevení na povrchu. Toto se nazývá rozptýleným a někdy difúzním obrazem. Optický obraz viděný v původním roztaveném skle je zdeformovaný více ve velkém měřítku odchylky od roviny, než rozptylování velmi malými povrchovými neregulérnostmi. Jestli je tenká vrstva lehce poškozená, mnohem více či méně souvislých obrazů, jsou produkovány odrazem od jednotlivých rovinných ploch, které jsou v dimenzi mnoha vlnových délek. Obvyklému chování je vystaven zvuk při setkání s nepravidelným pevným povrchem, jako ochranný kamenný násyp. Vlnoplochy zvuku mají vlnové délky úměrné stupnici povrchové neregulérnosti, fragmentována energie zvuku bude roztroušena v mnoha směrech. Kritická vlnová délka zvuku se bude odrážet většími či menšími zrcadlovými plochami. Zvuk je také roztroušený interakcí s povrchy nejednotné impedance. Tento účinek je využíván v designu víceúčelové revize, při které kousky pohlcujícího materiálu (typicky v oblasti 1m²) rozloží po tvrdých zdech, aby ovládaly nežádoucí dozvuk a podporovaly rozptyl. Fenomén okrajové difrakce zvyšuje efektivní oblasti pohlcení každého místa. Dopad zvuku v tekutině na jednotlivých různorodých tělesech, které jsou malé ve srovnání s vlnovou délkou, neprodukují odraz ve smyslu definovaném výše. Namísto toho, slabé druhotné rozptylové pole je vygenerované a malý podíl energie dopadajících částic je přesměrujete tak, aby se prostíraly křížem krážem kolem rozptylované látky. Kratší vlnová délka má silnější rozptylování, kdy vlnová délka zůstává rozsáhlá ve srovnání s rozptylovaným tělesem. To vysvětluje proč je obloha modrá, jak vysvětlil John Tyndal a analyzoval Lord Ry. v 19 století. Resonantní rozptylované látky jako u ryb plavání (pomocí měchýře) bublinky a Helmh. rezonátor ve skutečnosti rozptýlí rozsáhlý poměr nahodilé zvukové energie, dokonce v pásmech dlouhých vln. Následkem toho má povrch podobný zjev z veškerých pozic pozorovatele, ačkoliv zbytkový zrcadlový odraz koncentrovaných světelných zdrojů, jej do jisté míry prezentuje. Pole složené z pravidelně rozložených malých jednotlivých těles, produkují rozptyl, který je klasifikován jako difrakce, protože rozptylové pole je přikázané, není to náhodné rozdělení odražených rozptylových látek. Forma ohybů pole je funkce geometrie pole a poměru vlnové délky rozestupu. Rentgenová difrakční analýzy struktur materiálů se zakládá na tomto principu. Impulzivní zvuk

roztroušený od zábradlí zahrnující i paralelní bradla, či povrchy mající nepravidelné profily, je zbarvený, protože je součástí jiných četností, jsou roztroušené do jiných zřetelných směrů. Mají mnoho pevných fází ostří a rohů, které jsou jako boxy skříněk od reproduktorů. Proces, který produkuje celkový odpor sekundárního pole, který zasahuje do nahodilého pole k tomu, aby produkovalo systematické deformace vlnoploch, se nazývá difrakce. Nesouvislost vystupuje jako druhotný pramen, ne proto, že to generuje zvuk, ale protože ohybové pole se prostírá z aktivního zdroje. Difrakce také vysvětlí skutečnost, že zvukový přenos skrz otvor, který je malý ve srovnání s vlnovou délkou, se prostírá ve více směrech. Oba rozptyly a difrakce jsou způsobené přerušením nahodilých vlnoploch s přítomností zmizení celkového odporu. Sekundární pole jsou obecně způsobena velmi kolísající vlnovou délkou. Vlnoplochy jsou zdeformované při průchodu, ve kterém rychlost zvuku, či rychlost proudění kolísá. Prostorové střídání jsou pomalá na stupnici vlnové délky, kde vlnoplochy zůstanou nedotčené, ale jejich tvary se mění a rozšiřují se. Tento fenomén je známý jako lom. V případech kdy zvuková rychlost, či rychlost proudění se mění v měřítku srovnatelně s menší vlnovou délkou, proces rozdělování vlnoploch se nazývá rozptyl. Tento účinek je snadno pozorovatelný při pečlivém poslechu dozvuku přelétávajícího letadla v ohromné výšce. Akustické vlnoplochy jsou fragmentované turbulentním pohybem a teplotními nejednotnostmi atmosféry. Lom rychlosti větru a teploty má hluboký efekt na propagaci zvuku v atmosféře a tím i na životní prostředí. Lom hluku při turbulenci letadel má významný efekt na řízení leteckého vzletového hluku.

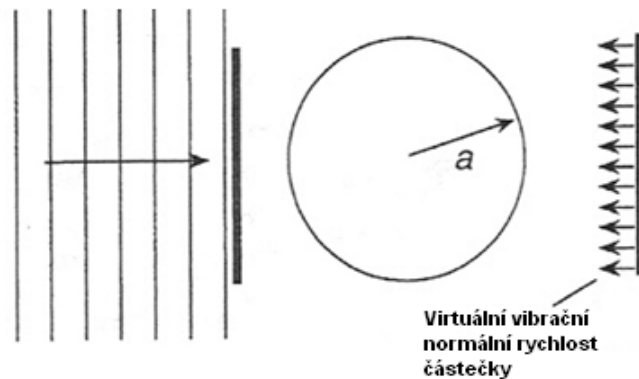
3.1 Rozptyl způsobený několika tělesy

Představte si zdroj fungující v jednotné ideální tekutině ve volném poli, a objem tekutiny chráněný zavřeným hypotetickým povrchem, lokalizovaném kdesi v tom volném poli. Externí povrchová integrační složka K-H rovnosti musí být nula, protože pole je úplně určeno objemovým integrálem. Následně, když nějaký neslučitelný materiál je uveden do tekutiny, rozdíl mezi vyplývající zvukovým polem a původním polem může být přisuzovaný K-H ploše integrálu, ve kterém měrný tlak a normální tlakový spád jsou téhož rozptylového pole. Jinými slovy, vyplývající zvukové pole je superpozice dopadajícího pole a rozptylového pole. Jestli K-H rovnost je vyjádřena v rámci Greenovy funkce, která má na povrchu nulový rozptyl, potřebuje být známa, jako normální urychlovač částic rozptylového pole na povrchu. Jestli objekt rozptylu je neohebný, tak toto zrychlení se bude rovnat, tomu, který je přítomen v nahodilém poli na tomto povrchu.

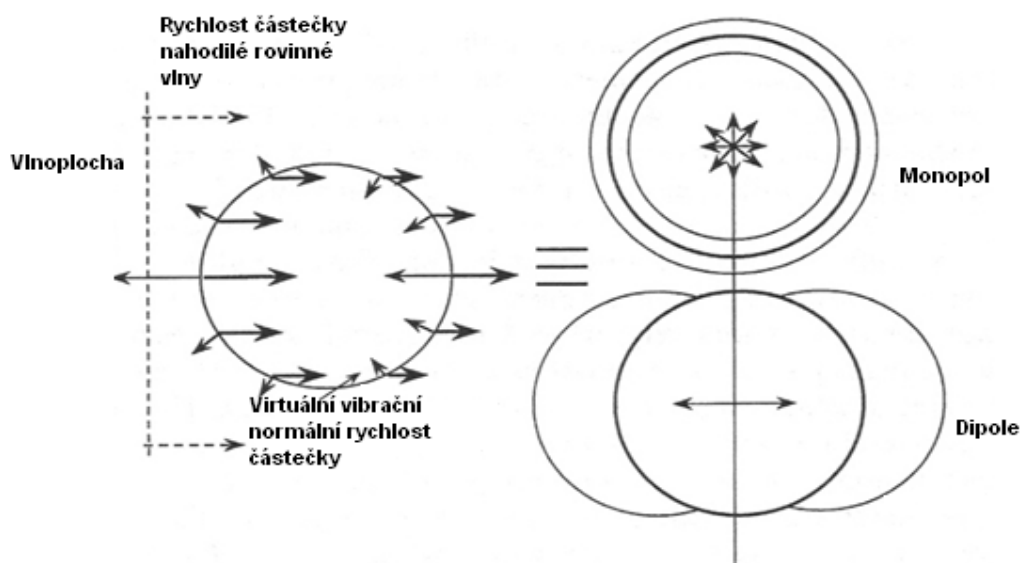


Obr. 5. (a) Zdroj ve volném poli s K-H plochou. (b) Názorný příklad z podstaty nahrazení neohebného povrchu kmitavou hraniční čarou

Zpočátku budeme považovat proces rozptylu neohebných (pevných) objektů, které jsou malé ve srovnání s vlnovou délkou. Proces rozptylování může být považován jako virtuální záření v pásmech dlouhých vln, kdy vlnová délka nahodilého zvuku je mnohem větší než maximální rozměr objektu a střídání fáze dopadající vlny přes jeho (transparentní) povrch je nevelká. Například tenký neohebný rotující disk, normálně dopadající harmonická vlna četnosti a rychlosti částičky v rovině disku, protože kmitavý disk generuje pole rovnajícího se rozkmitu protější fáze v odpovídajících pozicích po obou stranách z jeho polohy (roviny) rovnováhy, tak zvuk je roztroušený do regionů na obou stranách disku. Akustický tlak vyplývající ze superpozice dopadajících a rozptylových polí, kde r signalizuje vzdálenost od středu disku a θ je úhel z osy disku na nahodilé straně.



Obr. 6. Kruhový disk v axiálně nahodilé rovinné vlně



Obr. 7. Virtuální zářiče produkované dopadem rovinné vlny na neohebné sféře

3.1.1 Rozptyl pevných těles

O zvukových vlnách, které dopadají na rozsáhlém shromáždění rozptylových látek, se říká, že jsou mnohonásobně roztroušené. Kde vlnová délka značně převyšuje jeden nebo více rozměrů příčného průřezu, každý rozptyl je malý podíl energetického dopadu, ale každý přijímá roztroušenou energii z mnoha jiných a celkový efekt je tak značný. Zvuk se ozývá po značný čas, třebaže prostor neukazuje rezonanční chování, zde je dobrý příklad, rozdíl mezi ozvěnou a odrazem. Fenomémem je z praktického zájmu ve vztahu k boji proti hluku v kancelářích a na pracovišti. Vícenásobné rozptylování nábytkem, stroji, rourami a jinými, silně ovlivní šíření zvuku a ozvěny. Zvláště některý hluk vygenerovaný individuálními zdroji strojů je roztroušen (či odražen) směrem k zdrojovému umístění obklopujícími vhodnými kováními. Následkem toho, hladina zvuku způsobená individuálním zdrojem se zvedne nad jeho volná pole v nejbližším okolí zdroje, ale potom kontinuálně spadá do vzdálenosti. Toto chování je radikálně odlišné od pozorování v prostoru obsazeném jednotlivými mezerami zdroje. Podobný fenomén se vyskytuje v jezerech a oceánech, kdy hlasitost rozptylování je způsobena přítomností malých organismů a bublinek. Povrch rozptylování z hrubého mořského povrchu tak způsobuje formu ozvěny. Efektem rozptylování je překážet šíření zvuku, zvláště v rezonančních kmitočtech nějakých rezonančních rozptylovaných látek jako bublinky. Ve skutečnosti jsou clony vzduchových bublin činné, na

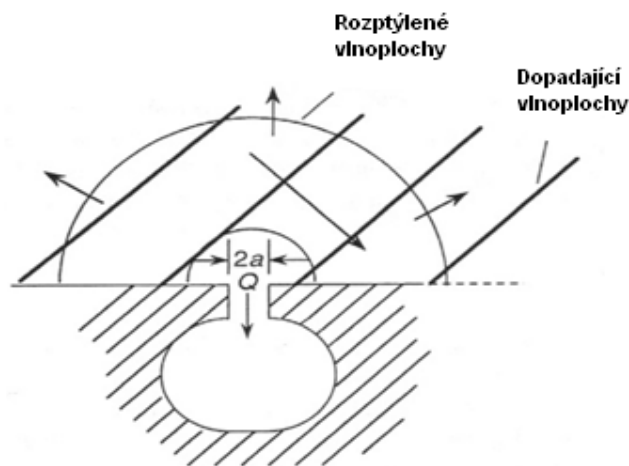
ochranu podvodních struktur proti poškození, pokud jsou pod vodou prováděny trhací práce pro zvětšení kanálu nebo strhnutí nežádoucí překážky.

3.1.2 Černý rozptyl

Černý rozptyl je používán ke zjištění hejna ryb sonarem. Analýza z vícenásobného fenoménu rozptylování odhaluje, že střídání zvukové energie následujícího času impulzivní excitace nevezme exponenciální formu vystavenou zvukovému poli v prázdných odrazných závěrách. Místo toho se to mění podle výkonového zákona, exponent se mění podle prostorové distribuce rozptylových látek, používáme ho v experimentech při střelbách z pistole v lese.

3.1.3 Resonantní rozptyl

Systemy, které ukážou resonantní chování, může rozptýlit nahodilý zvuk velmi efektivně, dokonce kdy prvek je malý ve srovnání s vlnovou délkou. Příklady zahrnují otevřené konce rour, strukturální panely a bublinky, či váčky plynu v kapalinách. Počátky rozptylování je znova-zářením zvuku velkými objemovými posunutími indukovanými v ozvěně nahodilým zvukem.

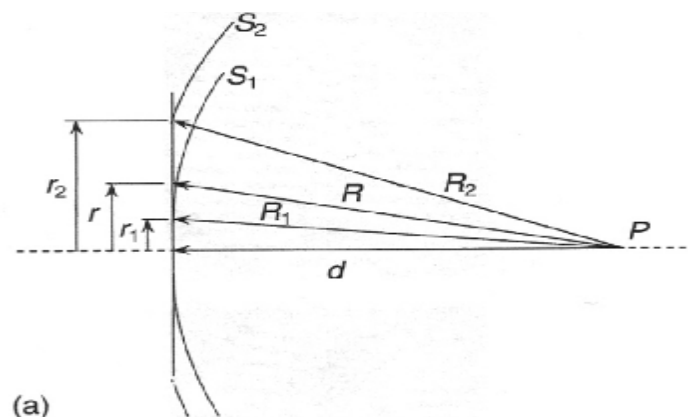


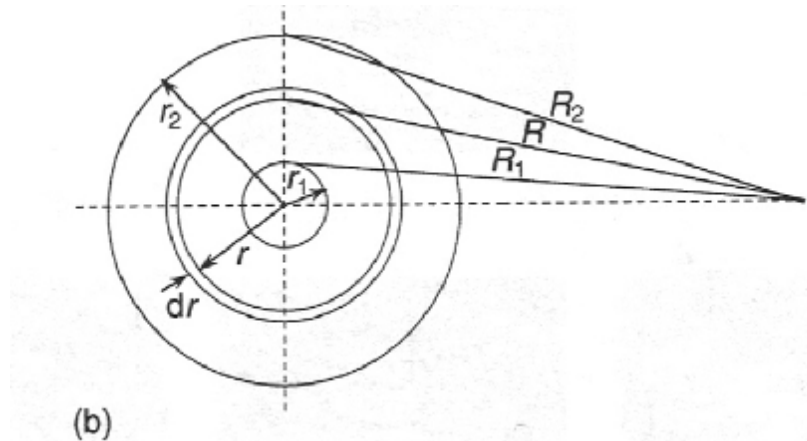
Obr. 8. Helmholtzův rezonátor

3.2 Difrakce

Difrakce, jako rozptylování je přeměrování nahodilou zvukovou energií. Ať tak nebo onak, termín je nejčastěji aplikován na formu rozptylování produkovaného nesouvislostmi impedance představené dopadající vlně, takové rysy jako okraje obrazovek, rohy pevných těles, výřezů, otvorů v úsecích a hranice materiálů pohlcujících zvuk, kde se setkávají s tvrdou nosnou konstrukcí. Je také aplikována na prostorově řízenou formu rozptylu produkovaného malými opakujícími se poli identických rozptylových látek. Optické ohybové mřížky jsou vytvořené vyhodnocením opakujícího se pole přímk rovnooběžných v intervalech seřazených podle vlnové délky. Zvukové ohybové mřížky jsou vytvořené poli pravidelně rozložených objektů jako demonstrační bariéry. Počátky difrakce okraje pevných nástaveb mohou být kvalitativně vysvětleny na Huygensově principu. Huygensův princip popsany Christianem Huygensem popisuje jednu z představ o šíření vlnění.

Předpokládá, že v každém okamžiku lze každý bod na čele šířící se vlny chápat jako nový zdroj vlnění (sekundárních vln). Nový tvar čela vlny v čase o malý okamžik pozdějším lze pak určit, jako vnější obálku vln šířících se z těchto zdrojů. Huygensův princip není zcela správný, neboť podle něj by se například vlna procházející vzduchem či vodou ze všech bodů vracela zpět do zdroje, aniž by se odrazila od nějaké překážky. Huygensovy představy doplnil francouzský fyzik Augustin-Jean Fresnel. Díky Huygensovu principu můžeme zkonstruovat vlnoplochu v určitém okamžiku, je-li známá její poloha a tvar v některém předcházejícím okamžiku. Lze také podle něj odvodit princip odrazu a lomu vlnění.





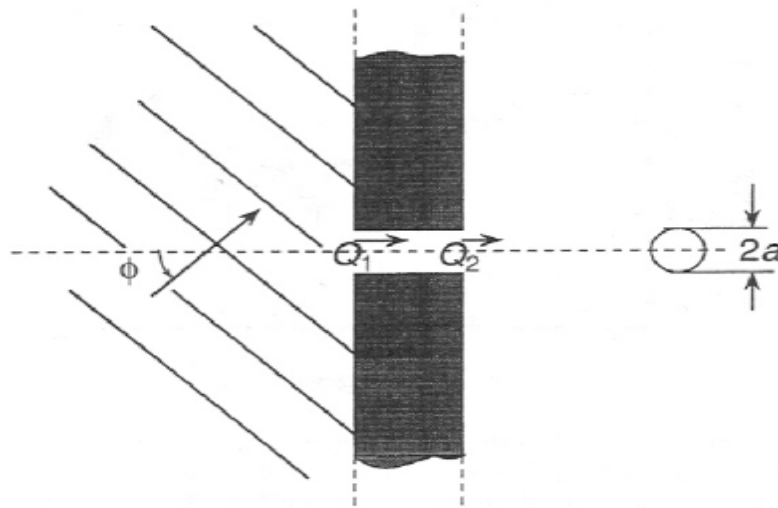
Obr. 9. Rovinná vlnoplocha a kulová vlnoplocha vyzářované z bodového unipolu v bodové (a) části pozorování, (b) projekci poloviční vlnové délky v rovině

3.2.1 Difrakce s otvory v úsecích

Ztráty vložení mnoha praktických staveb jsou omezené prosakováním zvuku skrz otvory. Hluk motoru vystupuje z auta skrz mezery kolem nožních chodidlových děr a větru i hluk pneumatik prochází nedokonalým těsněním dveří. Dopravní hluk vstupuje do staveb okenními rámy a dveřmi. Hluk způsoben letouny vstupuje do domů skrz mezery ve špatně zkonstruovaných střeších a hluk od souseda může přejít mezi obydlími přes nedostatečně utěsněnými prostupy dělicích stěn. Hluk ze strojů může uniknout přes prostory, které mohou být nevyhnutelné z provozních důvodů. Zjevně velmi důležité pro inženýry v boji proti hluku je, aby si uvědomovali závislost zvukového přenosového chování otvorů na jejich geometrických formách a na frekvenci.

Difrakce zvuku na okraji otvorů, jehož rozměry hlavního příčného řezu jsou velká ve srovnání s vlnovou délkou je trochu jiné povahy. Aplikace z Fresnelovy analýzy zóny přenosu šikmo nahodilé rovinné vlny v stejném kmitočtovém rozsahu ukáže, že přenesená síla je hlavně omezena na paprsku, který je analogický a tím tvoří přenos dopadajícího světla ze stejného směru. Naopak, zase difrakce zvuku clony, který má jeden nebo oba rozměry příčného řezu malé ve srovnání s vlnovou délkou, produkuje docela jiné přenosové chování. Považujeme první šíření zvuku energii přes kruhový otvor v pevné zdi, na harmonické rovinné dopadající vlně (obr. 10). V kmitočtovém rozsahu, pro který $ka \ll 1$, může bloko-

váný tlak považovat za rovnoměrné otevření otvoru, bez ohledu na úhel dopadu ϕ . Za předpokladu, že díra je větší než několik milimetrů v průměru a ne větší, než asi 250 mm, lze předpokládat, že viskózní ztráty jsou malé v porovnání s radiačními ztrátami. Zde můžeme také předpokládat, že zvukové pole v díře je převážně rovinná vlna, aby otvor tvořící vlnovod, na které dva-port přenos vztahu platí.



Obr. 10. Deskový otvor (díra) ve stěně s dopadající rovinnou vlnou

3.3 Odraz tenké a tuhé roviny

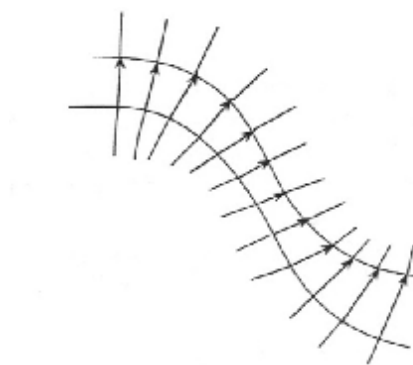
Odrazy ve tvaru listů materiálů, jako jsou překližky (plexisklo) a jsou často instalovány nad orchestrální koncertní platformy v halách, ke zlepšení komunikace mezi hráči, kteří jsou široce oddělení. Oni jsou také obvykle instalovány kolem horní části oblasti publika, kde je prostor pro zvýšení vnímání sluchové prostornosti sálu tím, že produkuje odrazy, které prostupují do uší posluchačů v příčném směru. Když zvuk padá na reflexní list, kde se pozastavuje ve volném prostoru, tak jde o částečné odrážení (v zrcadlového slova smyslu), částečné rozptýlení a částečné odchýlení hrany. V případě výskytu rovinné vlny na rovině čtvercového listu, je relativní energie těchto sekundárních složek vlnového pole závislá na úhlu dopadu ve vztahu k normálnosti listu i poměru délky boku na akustické vlnové délce. Ve vztahu k účinnosti reflektoru v hledišti, je vhodnější, aby se vlna šířila z konkrétního zdroje přímo na konkrétní pozici přijímače.

3.4 Lom

Akusticky lámané světlo v klidných tekutinách je způsobené prostorovou nerovnoměrností zvukové rychlosti. Toto může být způsobeno prostorovými ne-jednotnostmi teploty, hustoty, atmosférického tlaku, či látkového složení. Lom, který se koná v diskrétních mezíplachách mezi regiony, ve kterém je jiná zvuková rychlost nám způsobuje, že slábnutí vlnoploch se změní na úsečný, jak je pozorovaný v optickém fenoménu, ohybu vodě. Při venkovní zvukové propagaci jsou efekty lomu přes mnoho vlnových délek nejednotné ve spodních 100 m atmosféry a mají silný vliv na propagaci hluku ze zdrojů k přijímačům.

3.4.1 Lomený paprsek přes stále stejný, slabý zvuk rychlostního gradientu

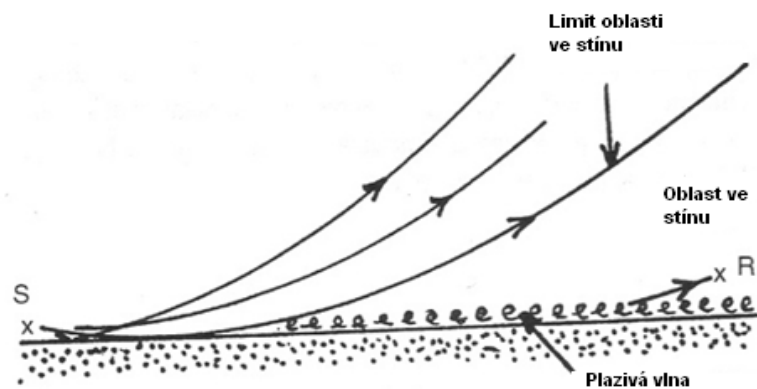
Gradients střední rychlosti zvuku v atmosféře - a opravdu, v oceánu - jsou obecně tak malé, že změna zvuku rychlosti na vzdálenost jedné audio. Frekvenční vlnové délky, je velmi malý. Pro účely výpočtu narušení vlnoploch od lomu, je proto přijatelný model šíření vln v horizontu paprsku zvuku, který směřuje obvykle na místní vlnoplochu, což dokládá Obr. 11. Pokud existuje varianta rychlostí zvuku podél vlnoploch, bude se šířit vedle zvukových paprsků různými rychlostmi a vlnoplochy naruší, jak je znázorněno na obrázku. Za předpokladu, že místní poloměr křivosti vlnoplochy je značně větší, než vlnová délka, pak je v jen skromné vzdálenosti od kompaktního zdroje a může být na místě lomu proces modelován z hlediska průchodu rovinou vlnoplochy prostřednictvím sledu v malých krocích zvukové rychlosti přes rovinné plochy.



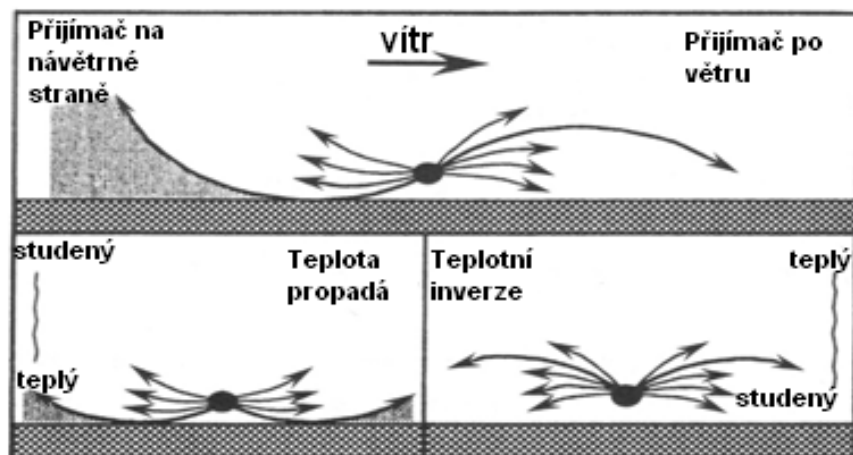
Obr. 11. Vlnoplochy a zvukové paprsky

3.4.2 Lom zvuku v atmosféře

Pro většinu času, rychlost zvuku ve vzduchu ve velké blízkosti během dne klesá s výškou. Grafické znázornění na Obr. 12. a 13. nám ukazuje cesty paprsků vyzařované ze všesměrového zdroje. Všimněte si, že vzor je symetrický. Je vidět, že tam je stinné pásmo, po kterém zdroj nemůže být vyslechnut. Teplota na typické cestovní výšce moderních letadel je řádově - 40 ° C, kde je rychlost zvuku asi 305 m/s. Lomem záporný teplotní gradient nás chrání před třesky vojenských proudových letadel. Mezi výškou asi 10 km a 30 km rychlost zvuku inklinuje ke zvýšení s výškou, a to zejména v létě na severní polokouli.



Obr. 12. Symetrická refrakce v důsledku plynoucí teploty



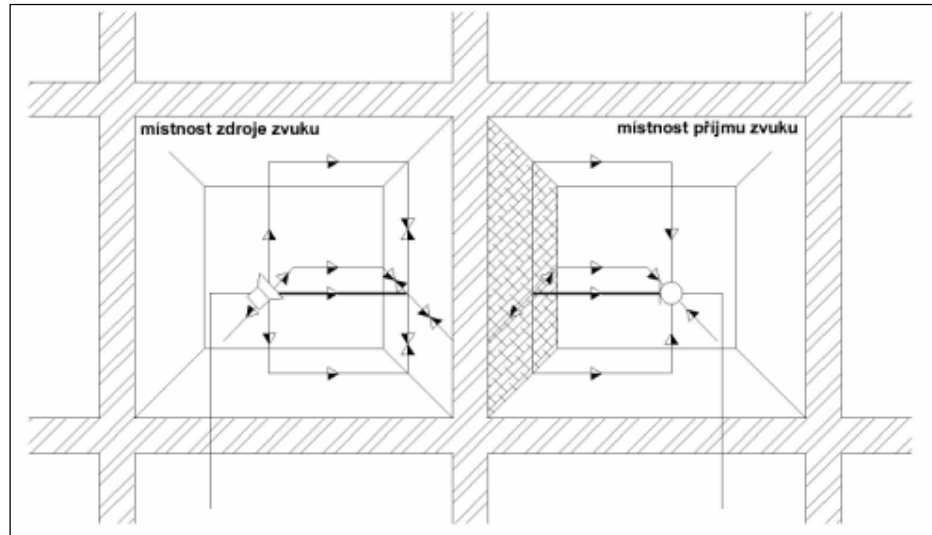
Obr. 13. Asymetrická refrakce v důsledku proudění mezní vrstvou

Tento efekt je ohýbání zvuku, záření emitovaného ze zdrojů zpět znovu na povrch. Tento jev vysvětluje mnohé anomální šíření zvuku přehlasitým zvuku, jako jsou těžké střelby a výbuchy raket kdy byla slyšet na vzdálenost v řádu 150 do 250 km od zdroje, ale ne na vzdálenosti mezi 50 a 150 km. Za určitých podmínek, část teplotně-výškového profilu poměrně blízko u země trpí inverzí, kde teplota stoupá s výškou. To způsobí, že se zvukové paprsky ohýbají směrem dolů a je rozhodující pro nejhorší případy při odhadování průmyslového dopadu letadel a hluku z dopravy na místní obyvatele. Lom světla způsobí proudění zvuku do pohybu vzduchu. Ve velké blízkosti, vítr vytváří mezní vrstvu, při které zemi je nulová rychlost na úrovni země a zvyšuje se non-lineárně s výškou do volné rychlosti větru, ve výšce v řádu 10 m. Skutečná mezní vrstva profilu je velmi závislá na topologii zdejšího terénu a je docela odlišná ve městech a otevřených krajinách. Vliv lomu mezní vrstvy je vidět na obrázku, má být asymetrický a vytváří stinnou zónu proti větru, což vysvětluje obtížnost verbální komunikaci v tomto směru. Lom gradientu rychlosti proudění přes směšovací vrstvu hraje důležitou roli při kontrole směrovosti turbulentního proudění.

4 VZDUCHOVÁ NEPRŮZVUČNOST

Predikční postupy pro odhad vzduchové neprůzvučnosti jednoduchých stavebních konstrukcí se vyvíjejí převážně od druhé poloviny 20. století. S podrobnějším poznáním teorie přenosu zvuku konstrukcemi modely umožňují zahrnout do výpočtu stále více konstrukčních vlastností prvků a stávají se obecnější a použitelnější i pro široké spektrum moderních stavebních konstrukcí. Přesto se velmi často používají zjednodušené postupy, které takové možnosti neposkytují. Tyto metody se také nazývají početně-grafické a jejich výhodou je především jednoduchost a rychlost výpočtu. V ČR se používá modifikovaná Wattersova metoda, která je založená na práci B. G. Watterse [5] s modifikacemi podle [6]. Ve světě je to například metodika B. H. Sharpa [7]. Vzhledem ke zjednodušujícímu charakteru však mají tyto metody svá omezení a nelze je použít k odhadu neprůzvučnosti libovolné stavební konstrukce. Zde mohou nalézt své uplatnění metodiky, které jsou sice náročnější, avšak umožňují vypočítat neprůzvučnost "přesně". Takové postupy uvádí zejména zahraniční odborná literatura nebo poměrně nová ČSN EN 12354-1 [12]. V ČR jsou tyto metody relativně málo známé a pro navrhování budov se prakticky nevyžívají. Důvodem může být právě pracnost výpočtů, obtížná dostupnost teoretického výkladu těchto metodik a chybějící údaje o jejich přesnosti v podmínkách českého stavebnictví.

Kromě výše zmiňovaných metod pro výpočet přenosu zvuku stavebními konstrukcemi v laboratorní situaci (s potlačeným bočním přenosem zvuku) existují i predikční postupy pro odhad přenosu zvuku mezi místnostmi v budovách, tzv. stavební neprůzvučnosti. Hodnota stavební neprůzvučnosti je na rozdíl od laboratorní situace ovlivněna přímým i nepřímým přenosem zvuku (např. bočními konstrukcemi spojenými s vlastním dělicím prvkem (obr. 14) nebo nepřímým přenosem vzduchem prostřednictvím vzduchové vrstvy v podhledu).

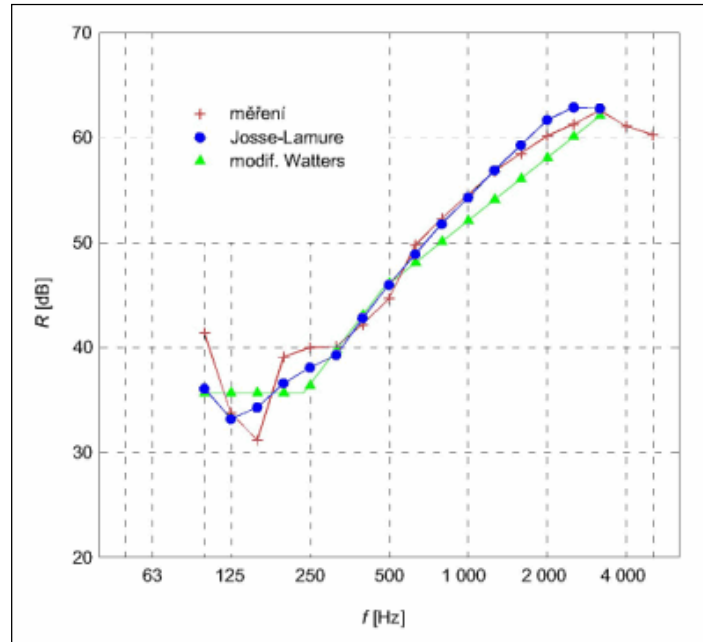


Obr. 14. Přenosové cesty zvuku mezi místnostmi

Nejjednodušší, avšak nejčastěji používané empirické predikční postupy jsou založeny na výsledcích měření stavební neprůzvučnosti in-situ v podobných stavebních situacích. Právě tato skutečnost je však také zásadní nevýhodou těchto postupů, neboť omezuje jejich použitelnost pouze na situace, pro které již byla měření někdy provedena. Z hlediska obecné použitelnosti jsou proto výhodnější postupy, které umožňují stanovit hodnotu stavební neprůzvučnosti výpočtem ze změřených nebo vypočtených akustických vlastností jednotlivých stavebních prvků (stěn, stropů, podlah apod.). Mezi tyto postupy lze zařadit i metodiku zakotvenou v ČSN EN 12354-1 [12]. Tato metodika je založená na práci E. Gerretseny [10, 11] ze 70. let 20. století a je vhodná zejména pro situace s těžkými homogenními stavebními prvky. Kromě zmiňovaných metod existují i postupy založené na bilančních výpočtech energie v navzájem propojených rezonančních systémech místnost zdroje x stavební prvek x místnost příjmu. Jedná se o metody statistické energetické analýzy (zkráceně SEA).

4.1 Přehled vybraných predikčních postupů:

Pro porovnání metod určených k odhadu neprůzvučnosti jednoduchých konstrukcí byly vybrány celkem čtyři metodiky - již zmiňovaná modifikovaná Wattersova metoda [5, 6] a metodika B. H. Sharpa [7] (obě početně-grafické), dále metoda podle J. L. Davyho [8] a nakonec nejobecnější výpočtová metodika popsaná v ČSN EN 12354-1 [9, 12] (v dalším textu označovaná podle autorů jako metodika "R. Josse a J. Lamure" (obr. 15)).



Obr. 15. Kmitočtový průběh neprůzvučnosti podle [5, 6] a [9, 10]

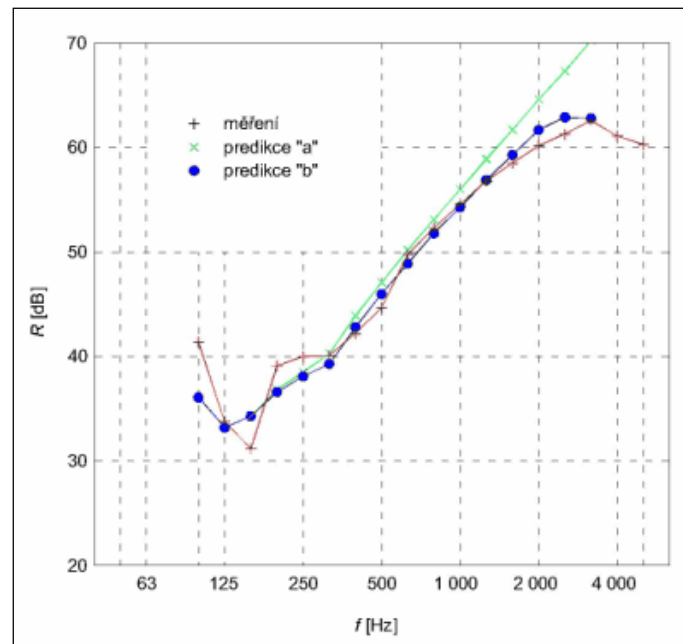
Pro výpočet neprůzvučnosti s využitím všech uváděných postupů je nutná znalost tří materiálových parametrů (dynamického modulu pružnosti E_d , objemové hmotnosti ρ_m , vnitřního ztrátového činitele η_{int}) a alespoň jednoho konstrukčního parametru (tloušťky konstrukce h) viz (tab. 4).

Tab. 4. Vstupní údaje pro výpočet neprůzvučnosti jednoduchých konstrukcí (* standardně ne, ale po úpravě metodiky je možné do výpočtu zahrnout)

Metodika	Materiálové charakteristiky	Konstrukční charakteristiky				
	E, ρ_m, η_{int}	η_{tot}	h	l_x, l_y	$c_{B,eff}$	R_{limit}
modif. Watters	x	x*)	x			x*)
Sharp	x	x*)	x			x*)
Davy	x	x*)	x	x		x*)
Josse, Lamure	x	x	x	x	x	x

Přesnější metodiky umožňují zohlednit i vliv příčných rozměrů (šířky l_x a výšky l_y) na neprůzvučnost konstrukce. To může být užitečné zejména při odhadu neprůzvučnosti prvků nestandardních rozměrů. V běžných situacích, kdy se rozměry prvku na stavbě příliš neliší od jeho rozměrů v laboratoři, lze obvykle tento vliv zanedbat. Naopak jako nezbytné se ukazuje zahrnutí vlivu tloušťky konstrukce nejen na její plošnou hmotnost, ale též na

změnu rychlosti ohybového vlnění v konstrukci. Zvláště u tlustších prvků je neprůzvučnost nad kritickým kmitočtem ovlivněna změnou rychlosti ohybových vln v důsledku zvyšujícího se podílu smykového vlnění. Tento jev zohledňuje pouze metodika Josse-Lamure a trochu překvapivě též modifikovaná Wattersova metoda. Použití zbylých dvou metod (Sharpa a Davyho), které se změnou rychlosti ohybových vln nepočítají, je teoreticky omezeno spíše na tenké desky. (Obr. 16) ukazuje rozdíl mezi změřenými a vypočtenými hodnotami neprůzvučnosti zděné příčky tl. 140 mm při zanedbání efektivní rychlosti ohybového vlnění v deskách (predikce "a") a při jejím zohlednění (predikce "b"). V obou případech je výpočet proveden s použitím metodiky Josse-Lamure. Ve druhém případě (predikce "b") je navíc zaveden horní limit neprůzvučnosti R_{limit} .

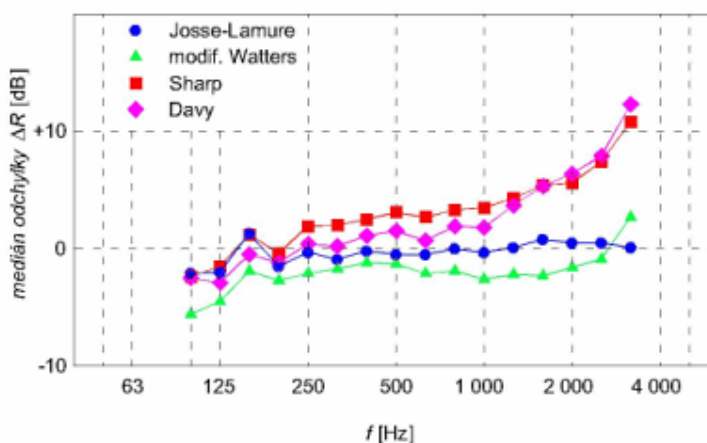


Obr. 16. Teoretický vliv smykového vlnění na průběh neprůzvučnosti

4.2 Přesnost predikčních postupů

Všechny uváděné teoretické postupy vycházejí z předpokladu homogenních jednoduchých konstrukcí. Za homogenní konstrukce lze přitom považovat jen prvky s objemem pórů do 15 % celkového objemu. Tuto podmínku splňuje jen velmi málo běžně používaných stavebních prvků. Metodiky, které by umožňovaly do výpočtu podrobně zahrnout průřezové charakteristiky stěn z vylehčených prvků, totiž nejsou k dispozici.

Přesnost modelů určených k odhadu neprůzvučnosti jednoduchých konstrukcí v laboratorní situaci byla stanovena porovnáním výsledků výpočtů a měření pro 20 různých jednoduchých příček. Soubor posuzovaných konstrukcí byl vybrán tak, aby v něm byly zastoupeny příčky z většiny běžných stavebních materiálů v ČR, tj. z hutného betonu, lehkého betonu z pórovitého kameniva, autoklávovaného pórobetonu, plných cihel, lehčených keramických bloků, vápenopískových cihel a ze sádrových tvárnic. V rámci každé materiálové skupiny bylo snahou ověřit přesnost výpočtů nejméně pro dvě odlišné tloušťky příček. Statistické vyhodnocení bylo provedeno formou mediánu a 10% a 90% kvantilu odchylky vypočtených a změřených hodnot neprůzvučnosti ΔR a vážené neprůzvučnosti ΔR_w . Z výsledků vyhodnocení vyplývá, že nejpřesnějšího odhadu neprůzvučnosti je dosaženo při použití metodiky Josse, Lamure a modifikované Wattersovy metody. Metodika Josse, Lamure vykazuje nejmenší hodnotu mediánu odchylky vážené neprůzvučnosti ($\Delta R_w = -0,6$ dB) a rovněž se nejvíce shoduje s výsledky měření v celém zvukověizolačním pásmu, jak dokazuje (obr. 17).



Obr. 17. Přesnost metod pro stanovení neprůzvučnosti jednoduchých konstrukcí

Hodnoty vypočtené pomocí modifikované Wattersovy metody jsou o něco více na straně bezpečnosti, avšak stále je lze považovat za dostatečně přesné ($\Delta R_w = -1,5$ dB). Pro obě metodiky dále platí, že nejpřesnějšího odhadu je dosaženo v oblasti středních a vyšších kmitočtů, zatímco na nízkých kmitočtech se vypočtené hodnoty od naměřených liší výrazněji. Teorie Sharp a Davy nejsou z pohledu dalšího využití výsledků dostatečně přesné (zejména v oblasti vyšších kmitočtů může medián odchylky ΔR dosáhnout hodnoty až +10 dB).

4.3 Stavební neprůzvučnost v budovách

4.3.1 Základní principy:

Příspěvek bočního přenosu zvuku k celkovému přenesenému akustickému výkonu mezi místnostmi se běžně uvažuje zjednodušeně, empiricky stanovenou korekcí laboratorní neprůzvučnosti dělicího prvku

$$R'_w = R_{w,lab} - k \quad (56)$$

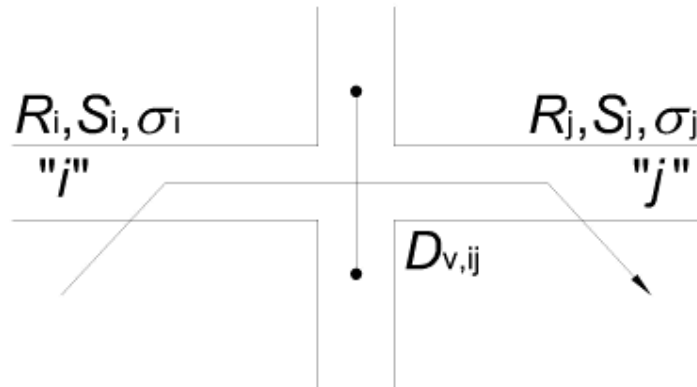
kde hodnota korekce k [dB] vychází z výsledků měření neprůzvučnosti v obdobných stavebních situacích. Například pro jednoduché homogenní dělicí konstrukce z klasických stavebních materiálů (cihla, beton) lze podle ČSN 73 0532 [13] uvažovat $k \approx 2$ dB. Vážená neprůzvučnost pro přímý přenos $R_{w,lab}$ se stanoví měřením v laboratoři nebo výpočtovým odhadem s použitím metod uváděných v odstavci 3.1. Odstavec 3.3.1 se zabývá výhradně problematikou výpočtu bočního přenosu zvuku, tedy v podstatě výpočtem korekce k . Množství bočních přenosových cest v reálné stavební situaci může být velké a jejich charakter může být různorodý (od nepřímého přenosu konstrukcemi až po nepřímý přenos vzduchem). Pokud spolu místnosti přímo nesousedí, může být boční přenos zvuku dokonce jediným způsobem přenosu zvuku mezi oběma místnostmi. V běžných případech se uvažuje boční přenos pouze prostřednictvím konstrukcí bezprostředně spojených s dělicím prvkem (přenos od zadní stěny místnosti se obvykle zanedbává). Celkový přenos zvuku se pak sestává z 12 bočních přenosových cest a z jednoho přímého přenosu (obr. 14). Stavební neprůzvučnost R' lze stanovit ze vztahu

$$R' = -10 * \log \Sigma 10^{-0,1 * R_{ij}} \quad (57)$$

Pro výpočet bočního přenosu zvuku jsou k dispozici různé metodiky. Tento článek je zaměřen na metodiku obsaženou v ČSN EN 12354-1, která vychází z práce E. Gerretseny [10, 11]. Neprůzvučnost R_{ij} pro boční přenosovou cestu ij se určí ze vztahu

$$R_{ij} = R_i + D_{v,ij} + 10 * \log(S_s \div S_j) + 10 * \log(s_i \div s_j) \quad (58)$$

kde R_i [dB] je neprůzvučnost prvku "i" v místnosti zdroje, $D_{v,ij}$ [dB] je rozdíl hladin rychlosti ve styku, S_i [m²] je plocha dělicího prvku, S_j [m²] je plocha prvku "j" vyzařujícího zvuk do místnosti příjmu a σ_i , resp. σ_j - jsou činitele vyzařování prvku "i", resp. prvku "j" (obr. 18).



Obr. 18. Schématické znázornění veličin pro určení bočního přenosu zvuku

4.4 Požadavky na vzduchovou neprůzvučnost v obytných budovách

Základním kritériem pro hodnocení akustické jakosti prostředí v budovách je průkaz dodržení nejvýše přípustných hodnot hluku, stanovených legislativními předpisy o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, a na ně navazujícími předpisy.

Vlastní posouzení z hlediska stanovených požadavků se provádí podle požadavkové normy ČSN 73 0532. Splnění stanovených minimálních požadavků na zvukově izolační vlastnosti dělicích a obvodových konstrukcí pak s velkou pravděpodobností zajišťuje dodržení limitů hlučnosti v chráněných místnostech podle nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací.

V dalším textu jsou uvedeny požadavky a kritéria na ochranu vnitřního prostředí budov před hlukem, a na zvukovou izolaci stavebních konstrukcí a mezi místnostmi na stavbách.

4.5 Požadavky na vzduchovou neprůzvučnost mezi místnostmi v obytných budovách

Vážené jednočíselné hodnoty vzduchové neprůzvučnosti mezi místnostmi v budovách, určené vážením podle ČSN EN ISO 717-1 z třetinooktávových hodnot veličin změřených podle ČSN EN ISO 140-4, nesmí překročit nejvýše přípustné hodnoty stanovené v Tab. 5.

- váženou stavební neprůzvučností R'_w , pro místnosti se společnou celou plochou stěny, příčky nebo stropu,
- váženým normalizovaným rozdílem hladin $D_{nT,w}$, pro místnosti, které nemají
- společnou dělicí konstrukci, tj. bezprostředně spolu nesousedí.

U místností, které mají společnou jen část dělicí konstrukce, menší než je plocha příslušné stěny, příčky nebo stropu při pohledu z vysílací nebo přijímací místnosti, musí požadavek stanovený v tabulce 1 splňovat alespoň jedna z vážených hodnot $D_{nT,w}$ nebo R'_w .

4.5.1 Požadavky na zvukovou izolaci obvodových plášťů obytných budov

Vzduchová neprůzvučnost obvodových plášťů budov musí vyhovovat minimálním požadovaným hodnotám, které jsou pro hodnocení vnějších obvodových konstrukcí stanoveny v tabulce 2 jednočíselnými veličinami, váženou neprůzvučností R'_w , $R'_{45,w}$, $R'_{tr,s,w}$ nebo $R'_{rt,s,w,a}$ pro hodnocení ochrany místnosti před venkovním hlukem váženým rozdílem hladin $D_{nT,w}$, $D_{ls,2m,nT,w}$, $D_{tr,2m,nT,w}$ v závislosti na venkovním hluku, vyjádřeném ekvivalentní váženou hladinou akustického tlaku $A_{L_{Aeq,2m}}$. Přípustná je interpolace. Uvedené jednočíselné vážené veličiny se určují metodou stanovenou v ČSN EN ISO 717-1 z veličin v třetinooktávových kmitočtových pásmech, definovaných v ČSN EN ISO 140-5.

4.5.2 Neprůzvučnost zděných konstrukcí

Zděné konstrukce mají z akustického hlediska řadu výhod, týkajících se zejména šíření zvuku konstrukcí. Tyto výhody spočívají zejména v nižší rychlosti šíření zvukových ohybových vln zdivem a ve vysokém útlumu při šíření podélných zvukových vln na rozhraní střídajících se hmot cihla - zdící malta.

4.5.3 Izolování dutých vrstev

Stojaté podélné vlny, které vznikají v dutých vrstvách konstrukcí, např. mezi sádkartónovou předstěnou a cihelnou příčkou, mohou vyvolat citelné snížení celkové neprůzvučnosti. Z toho důvodu je nutné vyplnit tyto vzduchové vrstvy zvukově pohltivými materiály.

Tab. 5. Požadavky na vzduchovou neprůzvučnost mezi místnostmi v obytných budovách

Chráněná místnost				
Položka	Hlučný prostor	Požadavky na vzduchovou neprůzvučnost		
		mezi místnostmi		dveří
		R' _w , D _{nT,w} dB ve směru		R _w dB
		horizontálním	vertikálním	
A. Bytové domy (kromě rodinných domů) - Jedna obytná místnost bytu o 3 a více obytných místnostech				
1	Všechny ostatní místnosti téhož bytu, pokud nejsou funkční součástí chráněného prostoru	42	42	–
B. Bytové domy - Obytné místnosti bytu				
2	Všechny místnosti druhých bytů	52	52	–
3	Společně používané prostory domu (schodiště, vestibuly, chodby, terasy)	52	58	32
4	Společné uzavřené prostory domu (např. půdy)	47	63	–
5	Průchody, podchody	52	53	32
6	Průjezdy, podjezdy, garáže	57	48	
7	Provozovny s hlukem $L_{A,max} \leq 85$ dB s provozem nejvýše do 22.00 h	57	53	–
8	Provozovny s hlukem $L_{A,max} \leq 85$ dB s provozem i po 22.00 h	62	48	–
9	Provozovny s hlukem $85 \text{ dB} < L_{A,max} \leq 95$ dB s provozem i po 22.00 h	72	38	–
C. Řadové rodinné domy a dvojdomy - Obytné místnosti bytu				
10	Místnosti v sousedním domě	57	53	–

4.5.4 Neprůzvučnost jednoduchých příček a stěn

Neprůzvučnost jednovrstvých stavebních konstrukcí je v zásadě tím lepší, čím jsou tyto konstrukce těžší. Zároveň platí, že vzduchová neprůzvučnost vzrůstá s kmitočtem dopadajícího a vyzařovaného zvuku. Pouze v oblasti koincidence se vzduchová neprůzvučnost zhoršuje, protože se v této kmitočtové oblasti vzájemně ruší účinek setrvačné hmoty a ohybové tuhosti. Ohybová tuhost může na zvukovou izolaci působit rozdílným způsobem. Účinek ohybové tuhosti je nevýhodný u jednovrstvých stavebních konstrukcí, pokud kritická frekvence leží v rozsahu 200 Hz až 2000 Hz - to jsou např. zděné příčky s plošnou hmotností 20 kg/m² až 100 kg/m². Vysoká ohybová tuhost je naopak výhodná u silných zdí, pokud kritický kmitočet je nižší než cca. 200 Hz. To platí pro všechny zděné konstrukce s plošnou hmotností min. 150 kg/m².

4.5.5 Neprůzvučnost dvojitých příček a stěn

Pokud se má u jednovrstvých stavebních dílců dosáhnout vysoké zvukové izolace, vycházejí nutně velmi vysoké plošné hmotnosti. Tak vysoké plošné hmotnosti nejsou nutné, pokud se zvolí dvouvrstvé konstrukce. Z akustického hlediska označuje termín dvouvrstvý dvě jednotlivé vrstvy, které jsou odděleny resp. spojeny vzduchovou nebo pružnou izolační vrstvou. Obě vrstvy jsou natuho spojeny pouze po obvodě, ve styku s navazující boční konstrukcí. Další konstrukční spoje by měly být pružné a měly by přenášet co možná nejméně zvukové energie. Pokud mezi vrstvami je pouze vzduchová mezera, musí být opatřena zvukově pohltivým izolačním materiálem.

4.5.6 Hlavní vlivy na neprůzvučnost cihlových stěn

Pro neprůzvučnost je rozhodující zejména plošná hmotnost stěny. Je výhodné, jestliže výchozí objemová hmotnost střepu tvárnice je co nejvyšší, stejně tak je výhodný vyšší poměr hmoty a nižší poměr dutin. Z akustického hlediska je obecně výhodné, jestliže dutiny nejsou stejně velké (vzhledem k jejich rezonanci), jestliže mají nepravidelný tvar, a jestliže jsou co nejmenší (příčný rozměr dutiny by neměl být větší, než 1/4 tloušťky příčky). Neprůzvučnost může výrazně ovlivnit tloušťka omítkové vrstvy a její hmotnost. Výrazný vliv na neprůzvučnost má přesnost rozměrů zdících prvků, která umožňuje zdění s pravidelnými spárami. Důležitá je kvalita zdění. Rovnoměrné a úplné vyplnění spár je podmínkou dobré neprůzvučnosti. Neprůzvučnost stěn z tvárnice zděných na pero a drážku, kde vertikální spoj je suchý, je závislá také na tvaru a přesnosti spoje. [14]

5 CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH MATERIÁLŮ

5.1 Sádrokarton

5.1.1 Výroba sádrokartonu

Hlavní surovinou při výrobě sádrokartonu je sádra, která se získává ze sádrovce. Ten se rozdělí na dvě části, kdy se první část pomocí kalcinace vaří tak dlouho, než se z ní odpaří voda. Druhá část se vysušuje a pak se tato suchá směs smíchá se sádrrou a vodou a vzniká suspenze, která se na výrobním pásu rovnoměrně rozprostírá na odvíjející papír.

Pevnost papíru, který se pro výrobu používá, určuje z cca 85% pevnost sádrokartonové desky.

Vysoce pevný papírový karton se zahnutím okrajů směrem nahoru a přilepením dalšího (rubového) papíru formuje do tvaru nekonečného pásu desky. Nařezané desky se poté vysušují. [15]

5.1.2 Vlastnosti sádrokartonu

Ze sádrokartonu je možné montovat veškeré vnitřní nenosné konstrukce. Jeho největšími přednostmi jsou:

- rychlost montáže
- čistota prostředí
- naprostá ekologická nezávadnost
- snadná demontovatelnost
- vynikající estetické vlastnosti
- snadné možnosti kombinací s jinými materiály (dřevo, kov, sklo apod.)
- příznivé vlastnosti pro mikroklima prostředí
- příznivá cena [16]

5.2 Pěnový polyuretan

Pěnové polyuretany rozdělujeme na polyetherové a polyesterové a jsou vyráběné na bázi polyetheru a polyesteru bezfreonovou technologií. Dodávají se ve formě bloků, desek, pásů, tvarovek a lepených výrobků. Pěnové polyuretany se vyrábí pod ochranou značkou MOLITAN®.

- Pěnové polyethery mají dobré deformační a hysterzní vlastnosti, jsou vhodné jako čalounický, výplňový, zvukově-izolační materiál a materiál pro obalovou techniku. Rozlišujeme typy standardní, měkké, tvrdé a speciální.
- Pěnové polyestery jsou pro svojí schopnost využívané k laminaci v textilním, obuvnickém a spotřebním průmyslu a také v obalové technice. Pěny se sníženou hořlavostí a hodnotou foggingu jsou preferované v automobilovém průmyslu a jako zvukové izolace.

5.2.1 Rozdělení typů pěnových polyuretanů MOLITAN®

MOLITAN® N a MOLITAN® H se používají pro výrobu čalouněného, bytového a kancelářského nábytku, nebo k výrobě matrací.

MOLITAN® N - standardní typ, používá se jako základná objemová složka čalounění a matrací ve formě desek, pásů nebo tvarových dílů, tak samostatně jako ve spojení s dalšími vrstvami různých PUR MOLITAN® pro dosažení optimálních vlastností. Nejčastěji používané typy PUR jsou N1820 , N2538 , N3038.

MOLITAN® H – PUR se zvýšeným odporem proti stlačení, používá se jako zpevňující vrstva na silněji namáhané místa, nebo na místa s vysokým dynamickým zatížením. Nejčastější používané typy PUR jsou H2545.

MOLITAN® W – PUR se sníženým odporem proti stlačení, používá se jako změkčující vrstva pro sedací nábytek pro dosažení optimálního pocitu pohodlí a komfortu při sedění. Nejčastěji se používá PUR W2519, W3530.

MOLITAN® RE - lepený lehčený PUR, používá se jako zpevňující (nosná) vrstva čalounění, sedacích částí a matrací, kde zároveň snižuje deformaci, nebo oddělují vrstvu na místech, kde je čalounění spojené s konstrukcí nábytku. Obecně je možné využít PUR MOLITAN® jako výplňový materiál všude tam, kde je potřeba vyplnit prostor nebo objem pružnou měkkou hmotou. Drť z pěnových PUR MOLITAN® v podobě pravidelných a

nepravidelných tyčinek slouží jako výplňový materiál do polštářů a příkrývek, sedacích a opěrných částí čalouněného nábytku a pro obalovou techniku. MOLITAN® patří vzhledem ke svým vlastnostem a zpracováním mezi nejlepší materiály v oblasti akustických izolací. Vzhledem k svojí otevřené komorové struktuře nachází uplatnění tam, kde je požadované snížení hlučnosti, případně vytvoření anebo zlepšení požadovaných akustických vlastností prostoru. Akustické tvarovky se používají pro akustické úpravy nahrávacích, televizních a dabingových studií, sálů a zkušeben, při odhlučnění veřejných a průmyslových prostorů přímou aplikací na povrch stěn. Pásy a tvarové díly se používají k odhlučnění skříňových strojních zařízení a u podobných aplikací. Tyto vlastnosti jsou zvláště výrazné u PUR MOLITAN® RE, která díky vyšší objemové hustotě současně působí jako zvuková i tepelná izolace a dobře snáší mechanické zatížení jako izolace podlah pod názvem IZOTAN®.

MOLITAN® S – PUR se speciálním provedením, používá se v aplikacích se sníženou hořlavostí pro akustické a tepelné izolace. V kombinaci s textilním materiálem se používá pro čalouněný interiér vozidel, kde se vhodně spojují akustické a tepelně-izolační vlastnosti s poddajností a měkkostí. Do této skupiny patří také náš měřený vzorek MH23.

MOLITAN® E - polyesterový typ, je určený pro výrobu pouzder a tvarových výplní sloužících na balení výrobků v elektrotechnickém anebo sklářském průmyslu. Ve formě pásové PUR, nebo pásů textilu kaširovaného pěnou slouží pro obuvnické a textilní firmy na výrobu výstelek, zateplených vložek a změkčovacích vrstev obuvi a oděvů.

MOLITAN®HR (High Resilience) je polyesterový typ a díky svým vynikajícím vlastnostem používán pro komfortní sedací nábytek a matrace. Struktura materiálu zaručuje vysokou elasticitu, dobré odvětrávání, odvod tepla a prostupnost vzduchu. Tento typ PUR je určen pro komfortní sedací nábytek a zejména matrace, řazené do střední a vyšší třídy čalouněného nábytku [17].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI PRO VYBRANÉ MATERIÁLY

6.1 Měřicí zařízení a příprava vzorků

6.1.1 Dvouvokřonová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206

Používaná ke zjišťování koeficientu zvukové pohltivosti, koeficientu zvukové odrazivosti pro malé vzorky. Skládá se ze dvou trubic o průměru 100 a 29 mm umožňující měření ve frekvenčním rozsahu od 50 Hz do 1.6 kHz a od 500 Hz do 6.4 kHz. Pro samotnou analýzu využívá dvoukanálový signální analyzátor Brüel & Kjaer typ 2034.



Obr. 19. Dvouvokřonová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206.

6.1.2 Tříkanálový PULSE multianalyzátor Brüel & Kjaer typ 3560-B-030

Přenosný přístroj umožňující zpracování a analýzu signálů v reálném čase ve frekvenčním rozsahu od 0 Hz do 25,6 kHz. V kombinaci s dvouvokřonovou trubicí Brüel & Kjaer 4206 se používá k měření absorpčních charakteristik materiálů. V kombinaci se zdrojem vibrací Brüel & Kjaer 4810 slouží ke zjišťování přenosového útlumu, komplexního modulu pružnosti a činitele vnitřních ztrát. Používá se taky jako analyzátor hladiny zvuku.



Obr. 20. Tříkanálový PULSE multianalyzátor Brüel & Kjaer typ 3560-B-030

6.1.3 Návod na obsluhu Brüel & Kjaer trubice s obslužným programem PULSE LabShop

Spustit program PULSE LABSHOP.

V programu otevřít PROJECT ve složce C:PULSE\...

Spustit položku PROJECT SETUP – nastavit trubici (large pro velkou trubici, small pro malou trubici).

Spustit položku TRANSFER FUNCTION CALIBRATION

- Přepnout na INVERT MIKROPHONE POSITIONS .
- Přesunout mikrofony do opačných pozic.
- Spustit START.
- Po provedení kalibrace vrátit mikrofony do původních pozic.
- Přepnout na NORMAL MIKROPHONE POSITIONS.
- Spustit START.

Spustit položku MEASUREMENT

- NAME – založit název souboru .
- Klepnutím na ADD přidat soubor do databáze .
- Spustit START.

Po ukončení měření soubor uložit.

Stejný postup opakovat pro všechny vzorky měřeného materiálu.

Spustit POST PROCESSING.

- Spustit COMBINATION.
- Označením vybrat soubory měření pro malou i velkou trubici k příslušnému materiálu.
- Spustit COMBINE.

Klepnout pravým tlačítkem myši na aktuální křivku a uložit ji do textového souboru.

6.2 Příprava a rozměry vzorků

Pro měření závislosti koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci byly použity následující materiály:

- Modrý PUR
- Bílý PUR
- Papírový Karton
- Perforovaný PUR1
- Perforovaný PUR2
- Sádrokarton

Vzorky jednotlivých použitých materiálů při měření byly vyseknuty ocelovým nožem a bylo připraveno šest vzorků každého materiálu o průměru 100 mm a 30 mm. Dále jsou uvedeny průměrné hodnoty při jednotlivých měření.

Tab. 6. Rozměry vzorků

Materiál	Tloušťka (mm)
Modrý PUR	30,0
Bílý PUR	20,0
Papírový karton	30,0
Perforovaný PUR1	20,0
Perforovaný PUR2	20,0
Sádrokarton	13,0



Obr. 21. Materiál Modrý PUR



Obr. 22. Materiál Bílý PUR



Obr. 23. Materiál Perforovaný PUR2



Obr. 24. Materiál Sádrokarton



Obr. 25. Materiál Papírový karton



Obr. 26. Materiál Perforovaný PURI

6.3 Vyhodnocení frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti u naměřených materiálů

Měření koeficientu zvukové pohltivosti bylo provedeno na dvoumikrofonové impedanční trubici Brüel & Kjaer typ 4206.

Naměřené závislosti koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci jednotlivých měřených materiálů jsou uvedeny v přílohách (PI-PXVI).

Pro vyhodnocení akustických vlastností měřených materiálů byla uvažována frekvenční oblast 100 – 6400 Hz pro koeficient zvukové pohltivosti a 100 – 2000 Hz pro stanovení koeficientu redukce hluku. Srovnání koeficientů redukce hluku jednotlivých materiálů jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7. Hodnoty NRC měřených materiálů

Materiál	α_{\max} [-]	NRC [-]
Bílý PUR	0,906	0,263
Bílý PUR + Sádrokarton P	0,966	0,408
Bílý PUR + Sádrokarton Z	0,976	0,359
Modrý PUR	0,697	0,253
Modrý PUR + Sádrokarton P	0,933	0,366
Modrý PUR + Sádrokarton Z	0,876	0,325
Perfor. PUR1	0,776	0,157
Perfor. PUR1 + Sádrokarton P	0,980	0,406
Perfor. PUR1 + Sádrokarton Z	0,942	0,248
Perfor. PUR2	0,801	0,127
Perfor. PUR2 + Sádrokarton P	0,877	0,395
Perfor. PUR2 + Sádrokarton Z	0,917	0,212
Papír. Karton	0,800	0,251
Papír. Karton + Sádrokarton P	0,739	0,368
Papír. Karton + Sádrokarton Z	0,847	0,303
Sádrokarton	0,743	0,222

Každý materiál byl měřen samostatně, dále v kombinaci se sádrokartonem v pozici I, tedy napřed akustická energie dopadala na sádrokarton a poté na kombinovaný materiál, tedy uložení v sérii sádrokarton + kombinovaný materiál. Při pozici II byl sádrokarton za kombinovaným materiálem také v sériovém uložení.

Z naměřené závislosti koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro materiál Bílý PUR lze vyhodnotit, že tento materiál dosahuje nejvyšší hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha_{\max}=0,906$ a to při frekvenci 2960 Hz a hodnoty koeficientu redukce zvuku $NRC=0,263$.

Při kombinaci Bílého PUR se Sádrokartonem v pozici I dosahoval nejvyšší hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha_{\max}=0,966$ při frekvenci 480 Hz a koeficientu redukce hluku $NRC=0,408$. Při stejné kombinaci Bílého PUR se sádrokartonem v pozici II dosahoval nejvyšší hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha_{\max}=0,976$ při frekvenci 2576 Hz a redukce hluku $NRC=0,359$.

Z naměřených hodnot závislosti koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci u materiálu Modrý PUR vyplývá, že dosahoval nejvyšší hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha_{\max}=0,697$ dosahoval při frekvenci 3144 Hz a redukce hluku dosahovala hodnoty $NRC=0,253$.

Při kombinaci modrého PUR se sádrokartonem v pozici I byla vyhodnocena hodnota koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci s nejvýše dosahující hodnotou koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha_{\max}=0,933$ při frekvenci 398 Hz a redukce hluku byla naměřena $NRC=0,366$.

Při kombinaci modrého PUR se sádrokartonem v pozici II, byla naměřená závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci dosažena nejvyšší hodnota koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha_{\max}=0,876$ a to při frekvenci 3872 Hz a redukce hluku měla hodnotu $NRC=0,325$.

Z naměřených hodnot závislosti koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci u materiálu perforovaný PUR1 byla dosažena nejvyšší hodnota koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha_{\max}=0,776$ při frekvenci 4608 Hz a vypočtená redukce hluku dosahovala hodnoty $NRC=0,157$.

V případě kombinace materiálu perforovaný PUR1 se sádrokartonem v pozici I byla nejvyšší hodnota koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha_{\max}=0,980$ a tomu bylo při frekvenci 506 Hz a hodnota redukce hluku činila $NRC = 0,406$.

V kombinaci materiálu perforovaný PUR1 a sádrokarton v pozici II byla naměřena závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci s nejvyšší dosaženou hodnotou koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha_{\max}=0,942$ při dosažené frekvenci 4136 Hz a koeficient redukce hluku byl $NRC = 0,248$.

Při měřené závislosti koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci u materiálu perforovaný PUR2 byla zaznamenána nejvyšší hodnota koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha_{\max}=0,801$ při frekvenci 6104 Hz a koeficient redukce hluku dosahoval hodnoty $NRC = 0,127$.

U kombinace materiálu perforovaný PUR2 se sádrokartonem v pozici I byla závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci s nejvýše dosaženou hodnotou koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha_{\max}=0,877$ při frekvenci 502 Hz a redukce hluku činila $NRC = 0,395$.

V případě kombinace materiálu perforovaný PUR2 se sádrokartonem v pozici II, byla dosažena nejvyšší hodnota koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha_{\max}=0,917$ při frekvenční závislosti 4472Hz při koeficientu redukce hluku s hodnotou $NRC = 0,212$.

Naměřená závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci u materiálu papírový karton vykazuje nejvyšší hodnotu koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha_{\max}=0,800$ při frekvenci 5672 Hz a vypočtená hodnota koeficientu redukce hluku byla $NRC= 0,251$.

U kombinace papírového kartonu se sádrokartonem v pozici I byla naměřená závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci s nejvyšší dosaženou hodnotou koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha_{\max}=0,739$ při frekvenci 1494 Hz a koeficient redukce hluk dosahovala hodnoty $NRC = 0,368$.

V případě kombinace papírového kartonu se sádrokartonem v pozici II dosahovala závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci s nejvýše dosaženou hodnotou koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha_{\max}=0,847$ a to při frekvenci 5688 Hz a koeficient redukce hluku měl hodnotu $NRC = 0,303$.

Z naměřené závislosti koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci u materiálu sádrokarton u jehož dosahovala nejvyšší hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha_{\max}=0,743$ při dosažené frekvenci 1824 Hz a koeficient redukce hluku byla $NRC = 0,222$.

7 DISKUZE

Cílem této diplomové práce bylo stanovit optimální kombinaci sádrokartonu a polyuretanu, případně papírového kartonu, za účelem stanovení optimální kombinace s ohledem na co největší akusticko-izolační schopnost vrstvy ve směru z místnosti.

Tedy sledovanou fyzikální veličinou byl koeficient redukce hluku, který se stanovuje z průměrných hodnot koeficientu akustické pohltivosti při frekvencích 250, 500, 1000 a 2000 Hz a tento koeficient vyjadřuje kolik akustické energie je pohlceno materiálem a kolik se vrací zpět do místnosti.

Na základě všech naměřených výsledků vyplývá, že při měření koeficientu v celém frekvenčním rozhraní, vykazuje nejlepší akusticko-izolační vlastnosti materiál bílý PUR, jelikož ve velkém frekvenčním spektru vykazuje hodnotu koeficientu akustické pohltivosti nad 0,75.

Velmi dobrým akustickým izolanty jsou také perforovaný PUR1 a modrý PUR, kdy hodnoty koeficientů akustické pohltivosti v širokém spektru se pohybovaly od 0,5 – 0,75.

Dobrymi izolanty jsou také materiály perforovaný PUR 2 a papírový karton, kdy v širokém frekvenčním rozmezí bylo dosaženo hodnoty koeficientu akustické pohltivosti 0,3-0,5.

Nejhorším akustickým izolantem byl stanoven sádrokarton, kdy v širokém frekvenčním rozhraní dosahoval koeficientu akustické pohltivosti do 0,3.

Z pohledu koeficientu redukce hluku, tedy z pohledu frekvenční oblasti pro lidské ucho nejvýznamnější vykazuje nejlepší akusticko-izolační vlastnosti bílý PUR, poté modrý PUR a papírový karton, v oblastech do 2000 Hz také sádrokarton a nejhorší hodnoty NRC vykazují perforovaný PUR1 a perforovaný PUR2.

7.1 Návrh optimální sendvičové vrstvy s ohledem na akusticko-izolační vlastnosti

Při kombinaci sádrokartonu s ostatními materiály v pozici I tedy sádrokarton před kombinovaným materiálem nejlepší akusticko-izolační vlastnosti vykazovala kombinace sádrokarton + bílý PUR nebo sádrokarton + perforovaný PUR1. Relativně dobrých výsledků dosahovala také kombinace materiálu sádrokarton s materiálem perforovaný PUR2. Relativně nejhorší výsledky (vzhledem k ostatním materiálům) vykazovaly kombinace sádrokartonu s modrým PUR a s papírovým kartonem.

Při kombinaci sádrokartonu s ostatními materiály v pozici II tedy sádrokarton za kombinovaným materiálem nejlepší akusticko-izolační vlastnosti vykazovala kombinace sádrokarton + bílý PUR. Velmi dobré hodnoty NRC také dosáhla kombinace materiálu sádrokarton + modrý PUR. Relativně horších výsledků vykazovala kombinace materiálů sádrokarton + papírový karton.

Relativně nejhorších výsledků dosahovaly kombinace materiálu sádrokarton s materiály perforovaný PUR1 a perforovaný PUR2.

Jako nejlepší kombinace tedy vyplývá materiál sádrokarton + bílý PUR při uložení v pozici I, ale také v pozici II. A pro uložení v pozici II se také z celkového průběhu závislosti koeficientu zvukové pohltivosti jeví jako dobrým izolantem kombinace papírový karton + sádrokarton.

Je velmi nutné dodat, že pro optimální kombinace je uvažováno frekvenční rozmezí 100-2000 Hz, tedy rozmezí pro lidské ucho nejzajímavější.

Na základě všech naměřených výsledků a stanovených hodnot sledovaných veličin koeficientu akustické pohltivosti a koeficientu redukce hluku lze říci, že z pohledu akusticko-izolačního je nejlepší akusticko-pohltivou kombinací sádrokarton + bílý PUR, kdy dochází k velké míře pohlcení akustické energie v širokém frekvenčním rozhraní. Toto řešení je poněkud finančně nákladnější než řešení při kombinaci sádrokarton + papírový karton, kdy dochází k dostatečnému pohlcení akustické energie ve frekvenčním rozmezí 100-2000 Hz.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá návrh sendvičové vrstvy materiálů s optimální akustickou pohltivostí pro interiéurní aplikace.

V teoretické části je zpracována problematika akustických vlastností materiálů, kdy jsou popsány sledované veličiny – koeficient zvukové pohltivosti a koeficient redukce hluku, dále jsou v této části zpracovány soudobé informace problematiky akustických jevů – tedy rozptylu, rezonance, difrakce a lomu akustické vlny. V této rešeršní části je také zpracována problematika požadavků na zvukovou neprůzvučnost v obytných budovách a na závěr teoretické části jsou uvedeny charakteristiky jednotlivých sledovaných materiálů – tedy sádrokartonu, papírového kartonu a polyuretanu.

Cílem této diplomové práce bylo stanovit optimální kombinaci sádrokartonu a polyuretanu, případně papírového kartonu, za účelem stanovení optimální kombinace s ohledem na co největší akusticko-izolační schopnost vrstvy ve směru z místnosti.

Na základě všech naměřených výsledků a stanovených hodnot sledovaných veličin koeficientu akustické pohltivosti a koeficientu redukce hluku lze říci, že z pohledu akusticko-izolačního je nejlepší akusticko-pohltivou kombinací sádrokarton + bílý PUR, kdy dochází k velké míře pohlcení akustické energie v širokém frekvenčním rozhraní. Toto řešení je poněkud finančně nákladnější než řešení při kombinaci sádrokarton + papírový karton.

Při výběru materiálu pro zvukovou izolaci je nutné si uvědomit, zda je nutné izolovat interní prostory, tedy přednáškové sítě, koncertní a divadelní sály, obývací pokoj, bytové prostory a jiné, kde je důležitou akustickou vlastností izolačního materiálu veličina koeficient zvukové pohltivosti, který udává jaké procento dopadající akustické energie materiál pohlcuje a jakou část odráží zpět do prostoru, nebo je nutné zamezit průchodu akustické energie skrz materiál do dalšího prostoru, tedy akusticko-izolační aplikace při výstavbě protihlukových koridorů, kdy je nutné, aby materiál co nejvíce akustické energie odrážel zpět ke zdroji hluku a nedocházelo k průniku této energie do dalšího prostoru, v mnoha případech do obydlených oblastí.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

This thesis describes the design of sandwich layers of materials with an optimal acoustic absorption for Interior Applications.

The theoretical part deals with the problem of acoustic material properties, which are described in the monitored variables - the coefficient of sound absorption and noise reduction coefficient, are further elaborated in this section details the problems of contemporary acoustic phenomena - a scattering resonance, diffraction and refraction of acoustic waves. In search of this part also analyzes the problem of the requirements for sound insulation in residential buildings and at the end of theoretical part shows the characteristics of the monitored material - that is, drywall, paper cardboard and polyurethane.

The aim of this thesis was to determine the optimal combination of plaster and polyurethane, paper or cardboard to determine the optimal combination with respect to the maximum acoustic-insulation layer in the direction of the room.

On the basis of all measurement results and set the values of monitored variables coefficient of acoustic absorption coefficient and noise reduction can say that from the acoustic-insulation is the best combination of acoustic-absorbing polyurethane white gypsum +, which leads to a large extent absorb acoustic energy in a wide frequency interface. This solution is somewhat more expensive than the solution when combined plasterboard + paper carton.

When selecting material for sound insulation is necessary to realize the need to isolate the internal spaces, so the lecture hall, concert and theater halls, living room, housing and other areas where significant acoustic insulation properties of the material value of sound absorption coefficient, which indicates how percentage of incident acoustic energy absorbing material and what part reflects back into space, or is necessary to avoid the passage of acoustic energy through the material to another area, namely acoustic insulation applications in the construction noise corridors, where it is necessary that the material is the most acoustic energy reflected back to sources of noise and prevent penetration of energy into another area, in many cases into populated areas.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Monografie:

- [1] SMETANA, Ctírad a kol. „Hluk a vibrace, měření a hodnocení.“ 1. vyd. Praha : Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901936-2-5
- [2] MIŠUN, V. Vibrace a hluk, FS VUT v Brně (1998), 1. vydání (ISBN 80-214-1262-3)
- [3]SCHROEDER M.R., Springer Handbook of Acoustics, Stürtz AG Würzburg (2007), ISBN 0-387-30446-5
- [4]FRANK FAHY, Foundations of Engineering Acoustics, Academic Press 2001, ISBN 0-12-247665-4
- [5]KURTZE G., Watters B. G., New wall design for high transmission loss or high damping, Journal of Acoustic Society of America 31, 1959, s. 739-748
- [6]ČECHURA J., Stavební fyzika 10 - Akustika stavebních konstrukcí, učební skriptum ČVUT, 1999
- [7]SHARP B. H., Prediction Methods for the Sound Transmission of Building Elements, Noise Control Engineering 11/2, 1978, s. 53-63
- [8]BIES A. D., Hansen C. H., Engineering Noise Control, Theory and Practice, 3rd Edition, 2003, Chapter eight, Partitions, Enclosures and Barriers, Spon Press
- [9]JOSSE R., Lamure J., Transmission du son par une paroi simple (Přenos zvuku jednoduchou příčkou), Acustica 14, 1964, s. 266-280
- [10]GERRETSEN E., Calculation of Airborne and Impact Sound Insulation between Dwellings, (Výpočet vzduchové a kročejové zvukové izolace mezi byty), Applied Acoustics 19, 1986, s. 245-264
- [11]GERRETSEN E., European Developments in Prediction Models for Building Acoustics (Evropský vývoj v predikčních modelech pro stavební akustiku) Acta Acustica 2, 1994, s. 205-214
- [12]ČSN EN 12354-1 STAVEBNÍ AKUSTIKA - Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebních prvků - Část 1: Vzduchová neprůzvučnost mezi místnostmi, 2001
- [13]ČSN 73 0532 AKUSTIKA - Ochrana proti hluku v budovách a souvisící akustické vlastnosti stavebních výrobků - Požadavky, 2000

Internetové odkazy:

- [14] <http://www.jaktodelaji.cz/novinka/Pozadavky-na-vzduchovou-nepruzvucnost-v-obytnych-budovach>
- [15] eStav.cz – stavební katalog, Rigips – o společnosti, [online], Dostupné z WWW: <http://www.rigips.cz/pages/about/plate.aspx>
- [16] dotom-stavba.cz – sádrokartonové systémy, [online], Dostupné z WWW: http://www.dotom-stavba.cz/cz/sadrokartonove_systemy.html
- [17] Parex-g.sk – MOLITAN®-rozdělení typů polyuretanových pěn, [online], Dostupné z WWW: <http://www.parex-g.sk/molitan/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<i>a</i>	M	vzdálenost, rozměr
<i>a</i>	m/s ²	zrychlení
<i>A</i>	m ²	pohltivost
<i>b</i>	M	vzdálenost, rozměr
<i>c</i>	m/s	rychlost šíření rozruchu
<i>d</i>	M	průměr kruhu
<i>D</i>	dB	zvuková izolace
<i>E</i>	Pa	modul pružnosti v tahu
<i>f</i>	Hz	kmitočet
<i>F</i>	N	síla
<i>G</i>	Pa	modul pružnosti ve smyku
<i>i</i>	1	čítač, kolikátý
<i>I</i>	W/m ²	akustická intenzita
<i>k</i>	rad/m	úhlový vlnočet
<i>K</i>	1	korekce (faktor)
<i>L</i>	dB	hladinové vyjádření veličiny
<i>m</i>	Kg	hmotnost
<i>n</i>	1	počet, číslo
<i>n</i>	s ⁻¹	frekvence otáčení
<i>N</i>	Son	hlasitost
<i>p</i>	Pa	tlak
<i>r</i>	M	poloměr kruhu, vzdálenost
<i>R</i>	dB	vzduchová neprůzvučnost
<i>s</i>	M	dráha, výchylka
<i>S</i>	m ²	plocha
<i>t</i>	S	čas
<i>T</i>	S	doba, časový interval
<i>v</i>	m/s	rychlost
<i>V</i>	m ³	objem
<i>w</i>	J/m ³	objemová hustota energie
<i>W</i>	W	výkon
<i>z</i>	N*s/m ³	akustická vlnová impedance
<i>Z</i>	N*s/m	mechanická impedance
<i>z₀</i>	Pa*s/m	vlnový odpor prostředí
<i>α</i>	1	činitel zvukové pohltivosti
<i>β</i>	°	úhel
<i>δ</i>	dB/m	útlum zvuku
<i>λ</i>	M	vlnová délka
<i>τ</i>	S	časová konstanta
<i>ω</i>	rad/s ⁻¹	úhlový (kruhový) kmitočet
<i>j</i>		fázový úhel
<i>ρ</i>	kg/m ³	hustota prostředí

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Akustická intenzita procházející zcela uzavřenou plochou, je-li zdroj hluku uvnitř sledovaného prostoru (a) nebo vně (b)</i>	15
<i>Obr. 2. Typy akustických polí v uzavřeném prostoru.....</i>	23
<i>Obr. 3: Typy plošných absorbérů</i>	25
<i>Obr. 4. Křivky součinitele absorpce $\alpha = \text{konst.}$ při kolmé incidenci akustické vlny</i>	28
<i>Obr. 5. (a) Zdroj ve volném poli s K-H plochou. (b) Názorný příklad z podstaty nahrazení neohebného povrchu kmitavou hraniční čarou</i>	33
<i>Obr. 6. Kruhový disk v axiálně nahodilé rovinné vlně.....</i>	33
<i>Obr. 7. Virtuální zářiče produkované dopadem rovinné vlny na neohebné sféře</i>	34
<i>Obr. 8. Helmholtzův rezonátor</i>	35
<i>Obr. 9. Rovinná vlnoplocha a kulová vlnoplocha vyzařované z bodového unipolu v bodové (a) části pozorování, (b) projekci poloviční vlnové délky v rovině.....</i>	37
<i>Obr. 10. Deskový otvor (díra) ve stěně s dopadající rovinnou vlnou</i>	38
<i>Obr. 11. Vlnoplochy a zvukové paprsky.....</i>	39
<i>Obr. 12. Symetrická refrakce v důsledku plynoucí teploty.....</i>	40
<i>Obr. 13. Asymetrická refrakce v důsledku proudění mezní vrstvou</i>	40
<i>Obr. 14. Přenosové cesty zvuku mezi místnostmi</i>	43
<i>Obr. 15. Kmitočtový průběh neprůzvučnosti podle [5, 6] a [9, 10]</i>	44
<i>Obr. 16. Teoretický vliv smykového vlnění na průběh neprůzvučnosti.....</i>	45
<i>Obr. 17. Přesnost metod pro stanovení neprůzvučnosti jednoduchých konstrukcí</i>	46
<i>Obr. 18. Schématické znázornění veličin pro určení bočního přenosu zvuku.....</i>	48
<i>Obr. 19. Dvouválcová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206.....</i>	56
<i>Obr. 20. Tříkanálový PULSE multianalýzátor Brüel & Kjaer typ 3560-B-030.....</i>	57
<i>Obr. 21. Materiál Modrý PUR</i>	60
<i>Obr. 22. Materiál Bílý PUR.....</i>	60
<i>Obr. 23. Materiál Perforovaný PUR2.....</i>	60
<i>Obr. 24. Materiál Sádrokarton</i>	61
<i>Obr. 25. Materiál Papírový karton</i>	61
<i>Obr. 26. Materiál Perforovaný PUR1.....</i>	61

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Číselné hodnoty hladin akustického tlaku a intenzity</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 2. Akustické výkony W [W] typických zdrojů zvuku</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 3. Zdroje zvuku a jejich akustické pole</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 4. Vstupní údaje pro výpočet neprůzvučnosti jednoduchých konstrukcí (* standardně ne, ale po úpravě metodiky je možné do výpočtu zahrnout)</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 5. Požadavky na vzduchovou neprůzvučnost mezi místnostmi v obytných budovách</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 6. Rozměry vzorků</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 7. Hodnoty NRC měřených materiálů</i>	<i>62</i>

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro všechny použité materiály při měření bez kombinací pro rozmezí 100-6400 Hz

PŘÍLOHA P II: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro všechny použité materiály při měření bez kombinací pro rozmezí 100-2000 Hz

PŘÍLOHA P III: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro Modrý PUR + Sádrokarton P, Z a Sádrokarton pro rozmezí 100-6400 Hz

PŘÍLOHA P IV: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro Modrý PUR + Sádrokarton P, Z a Sádrokarton pro rozmezí 100-2000 Hz

PŘÍLOHA P V: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro Papír. Karton + Sádrokarton P, Z a Sádrokarton pro rozmezí 100-6400 Hz

PŘÍLOHA P VI: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro Papír. Karton + Sádrokarton P, Z a Sádrokarton pro rozmezí 100-2000 Hz

PŘÍLOHA P VII: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro Bílý PUR + Sádrokarton P, Z a Sádrokarton pro rozmezí 100-6400 Hz

PŘÍLOHA P VIII: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro Bílý PUR + Sádrokarton P, Z a Sádrokarton pro rozmezí 100-2000 Hz

PŘÍLOHA P IX: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro Perfor. PUR1 + Sádrokarton P, Z a Sádrokarton pro rozmezí 100-6400 Hz

PŘÍLOHA P X: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro Perfor. PUR1 + Sádrokarton P, Z a Sádrokarton pro rozmezí 100-2000 Hz

PŘÍLOHA P XI: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro Perfor. PUR2 + Sádrokarton P, Z a Sádrokarton pro rozmezí 100-6400 Hz

PŘÍLOHA P XII: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro Perfor. PUR2 + Sádrokarton P, Z a Sádrokarton pro rozmezí 100-2000 Hz

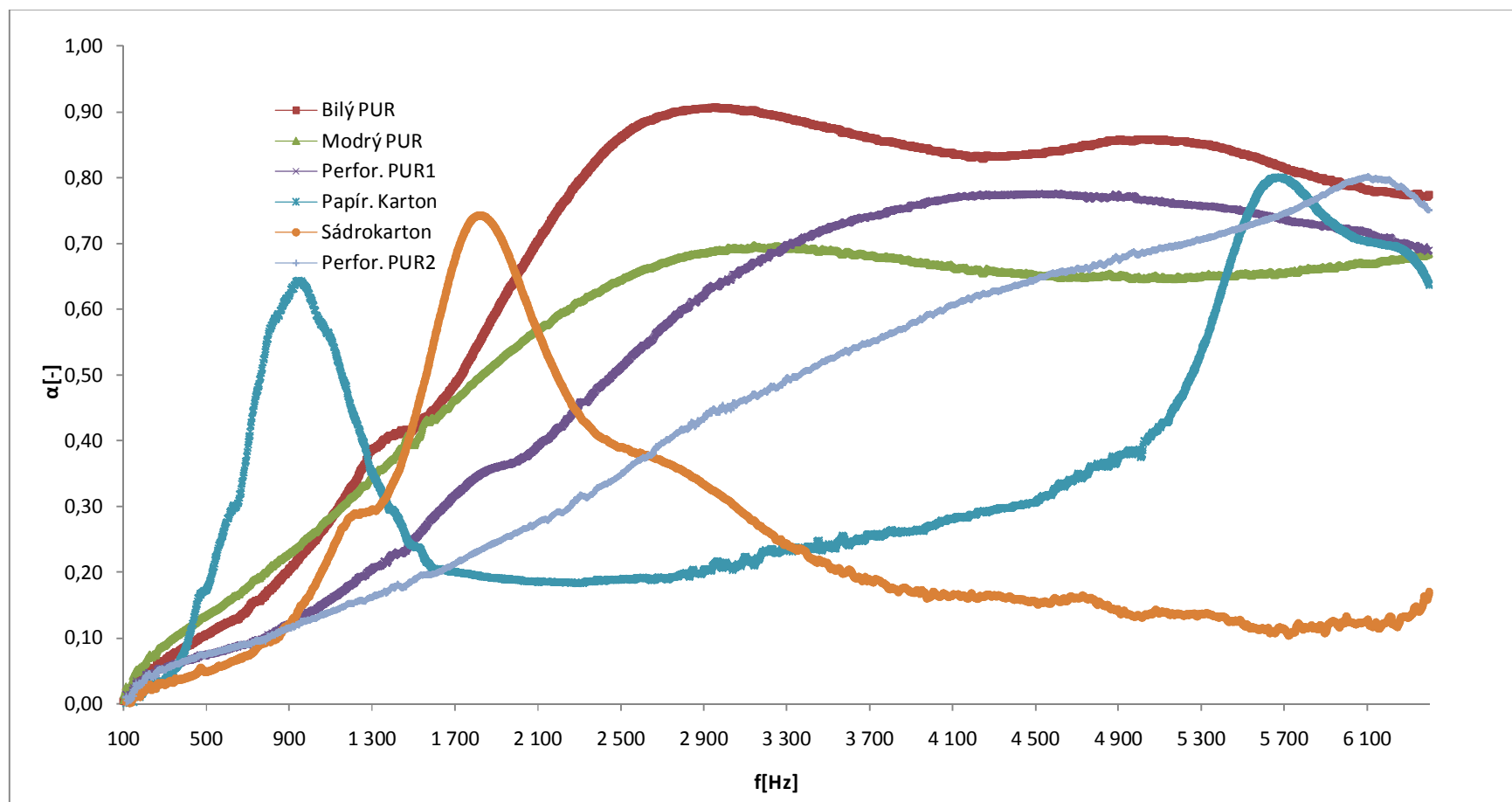
PŘÍLOHA P XIII: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro Modrý PUR + Sádrokarton P, Papír. Karton + Sádrokarton P, Bílý PUR + Sádrokarton P, Perfor. PUR1 + Sádrokarton P, Perfor. PUR2 + Sádrokarton P, a Sádrokarton pro rozmezí 100-6400 Hz

PŘÍLOHA P XIV: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro Modrý PUR + Sádrokarton P, Papír. Karton + Sádrokarton P, Bílý PUR + Sádrokarton P, Perfor. PUR1 + Sádrokarton P, Perfor. PUR2 + Sádrokarton P, a Sádrokarton pro rozmezí 100-2000 Hz

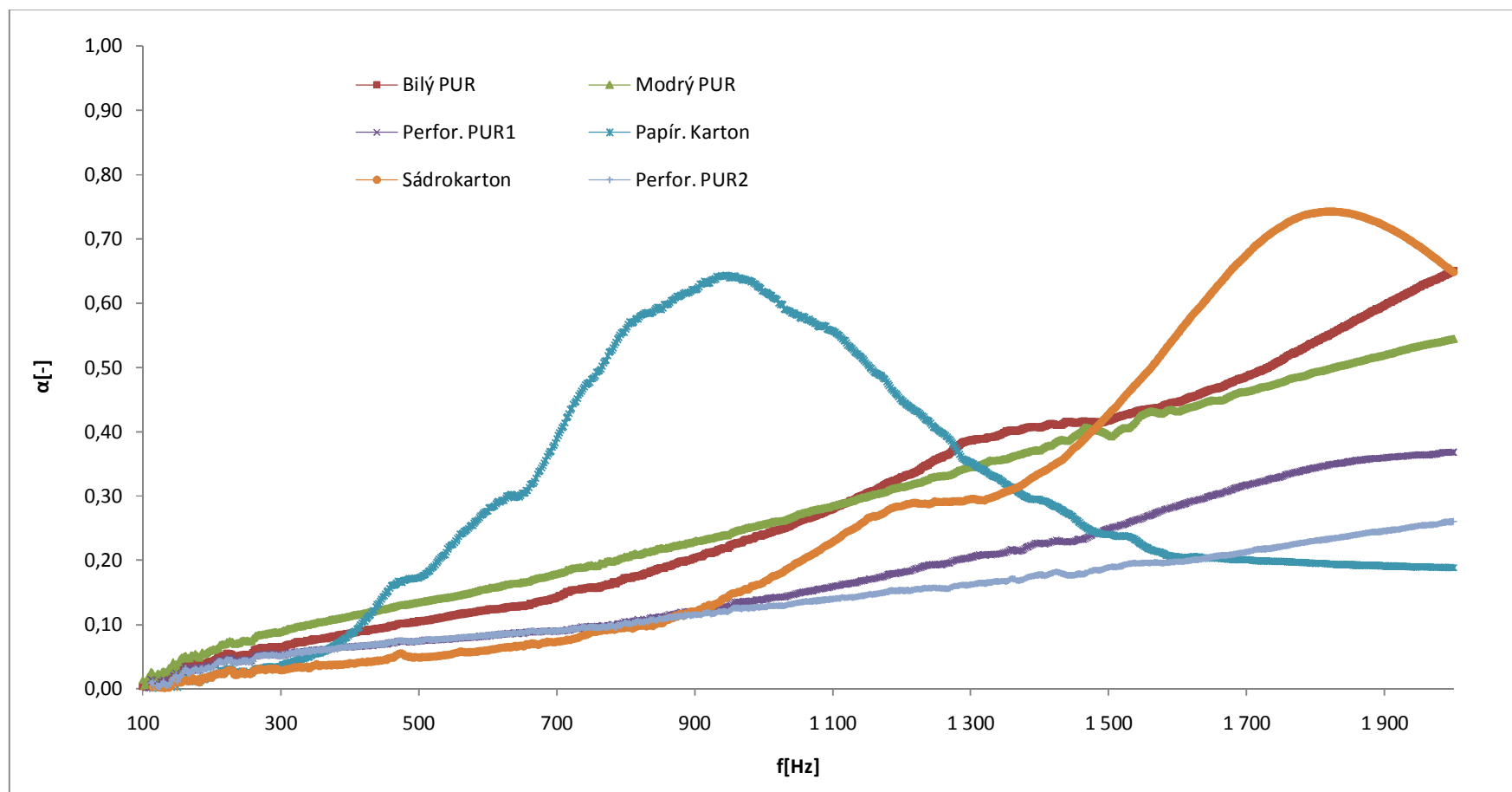
PŘÍLOHA P XV: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro Modrý PUR + Sádrokarton Z, Papír. Karton + Sádrokarton Z, Bílý PUR + Sádrokarton Z, Perfor. PUR1 + Sádrokarton Z, Perfor. PUR2 + Sádrokarton Z, a Sádrokarton pro rozmezí 100-6400 Hz

PŘÍLOHA P XVI: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro Modrý PUR + Sádrokarton Z, Papír. Karton + Sádrokarton Z, Bílý PUR + Sádrokarton Z, Perfor. PUR1 + Sádrokarton Z, Perfor. PUR2 + Sádrokarton Z, a Sádrokarton pro rozmezí 100 -2000 Hz

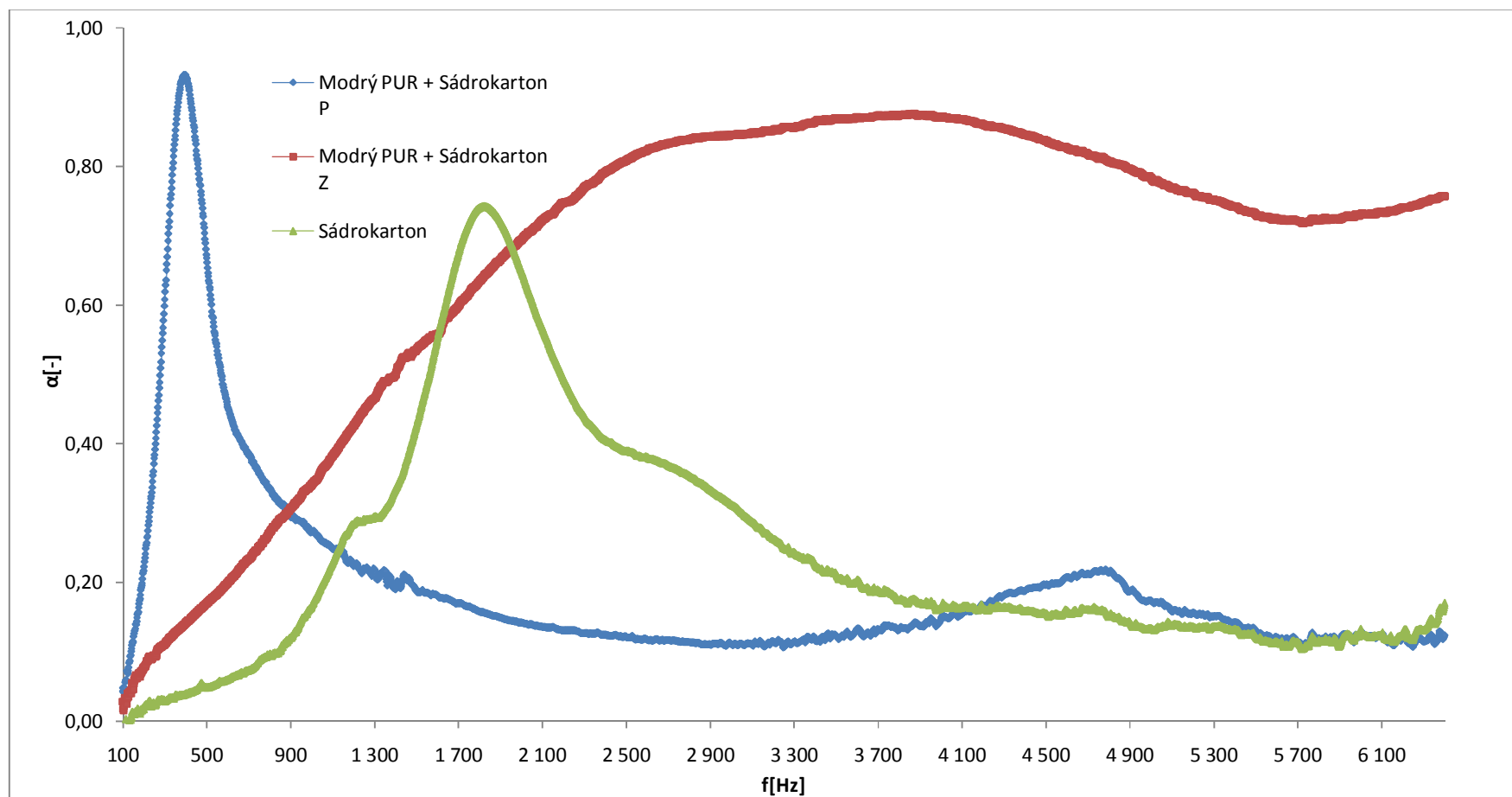
PŘÍLOHA P I: GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO VŠECHNY POUŽITÉ MATERIÁLY PŘI MĚŘENÍ BEZ KOMBINACÍ PRO ROZMEZÍ 100-6400 Hz



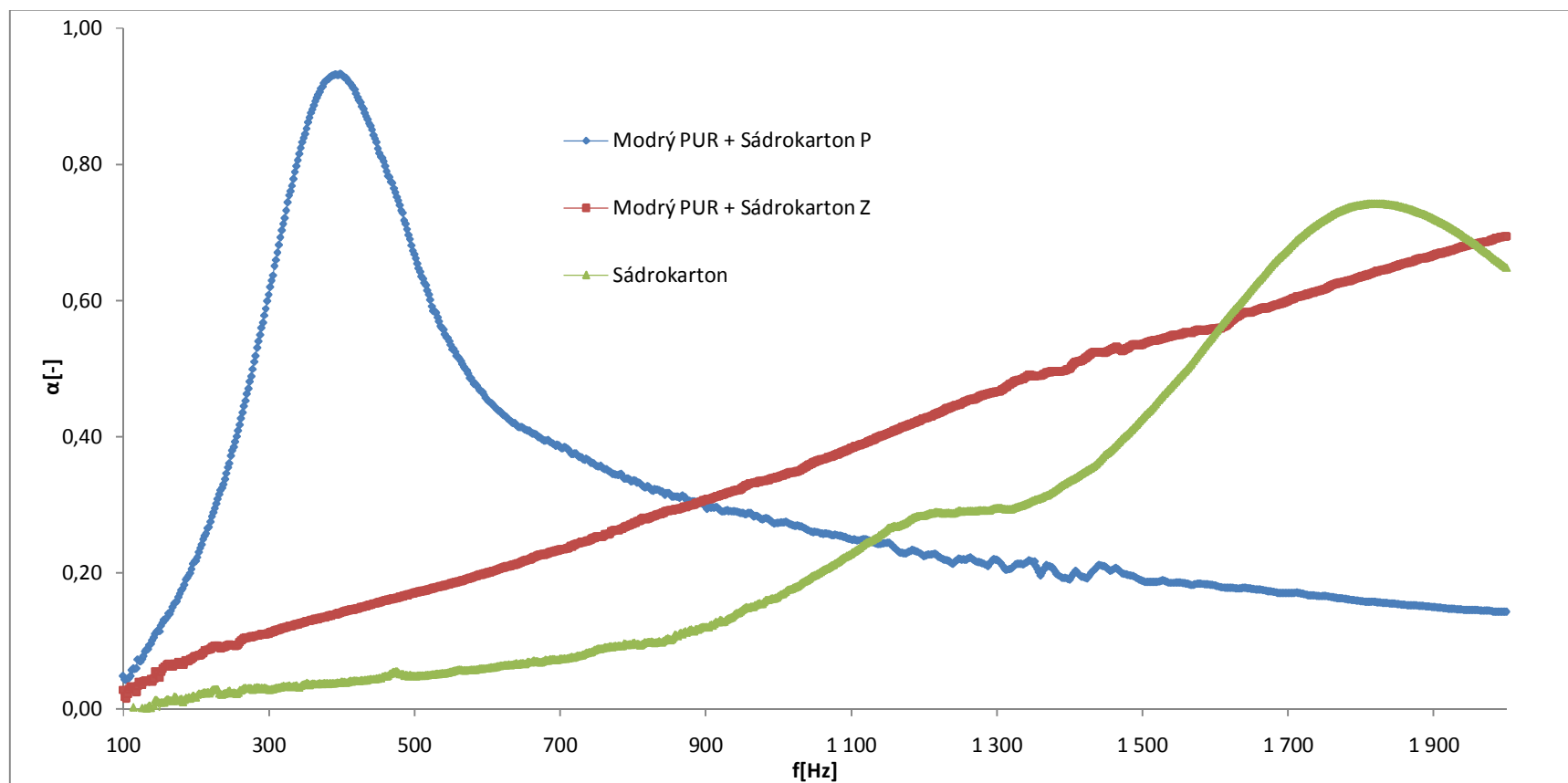
PŘÍLOHA P II: GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO VŠECHNY POUŽITÉ MATERIÁLY PŘI MĚŘENÍ BEZ KOMBINACÍ PRO ROZMEZÍ 100-2000 Hz



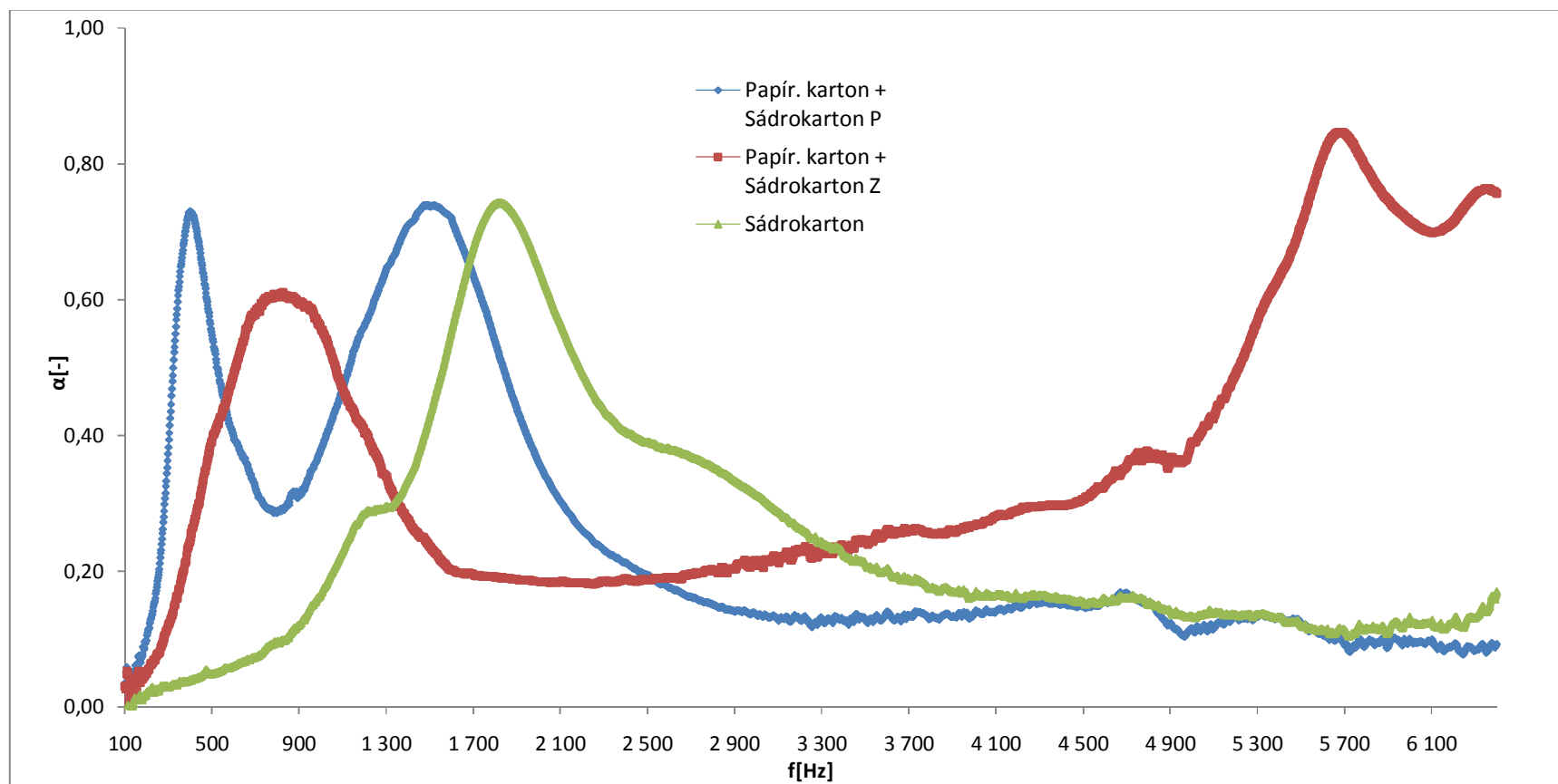
PŘÍLOHA P III: GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO MODRÝ PUR + SÁDROKARTON P, Z A SÁDROKARTON PRO ROZMEZÍ 100-6400 Hz



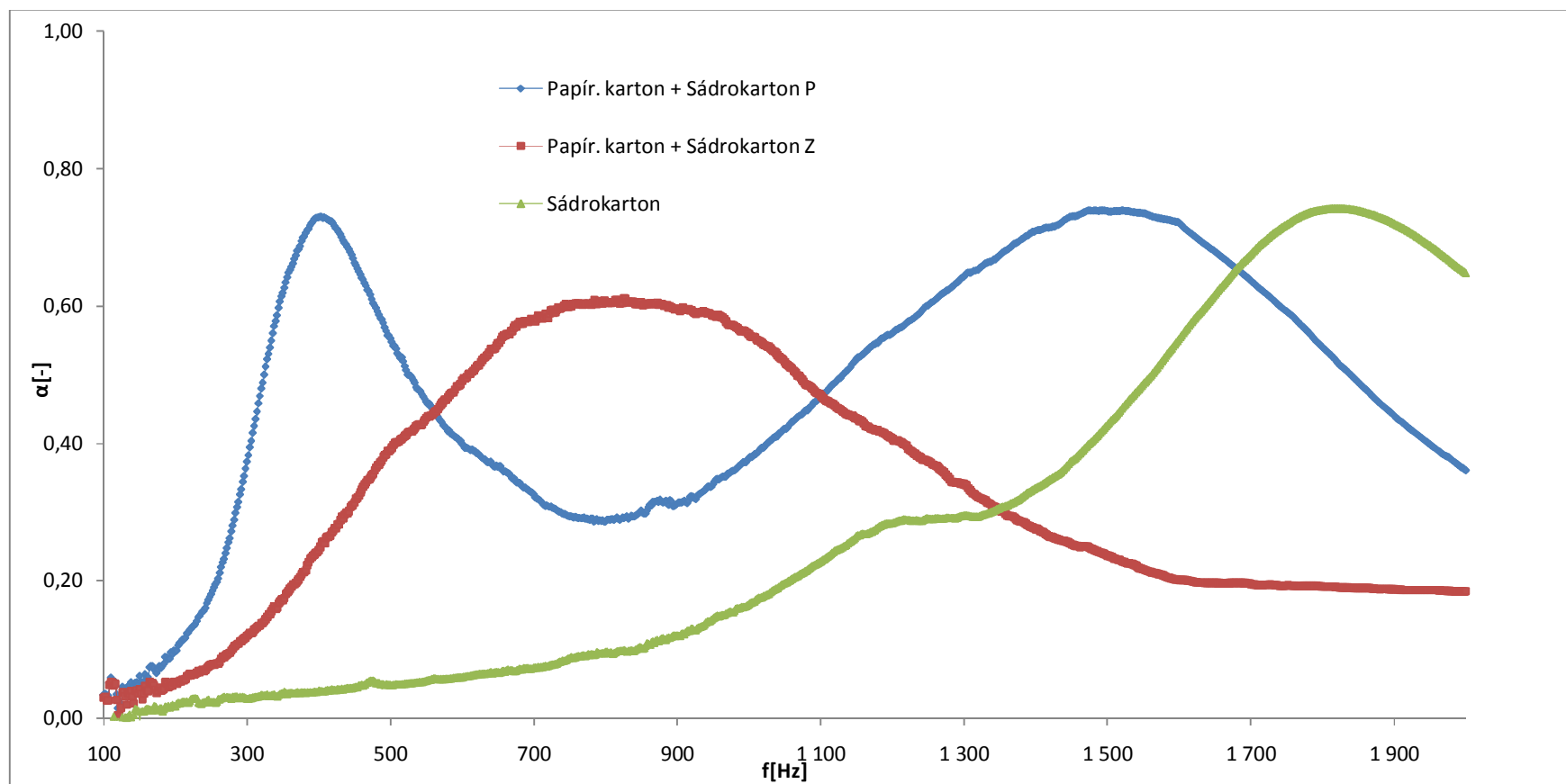
PŘÍLOHA P IV: GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO MODRÝ PUR + SÁDROKARTON P, Z A SÁDROKARTON PRO ROZMEZÍ 100-2000 Hz



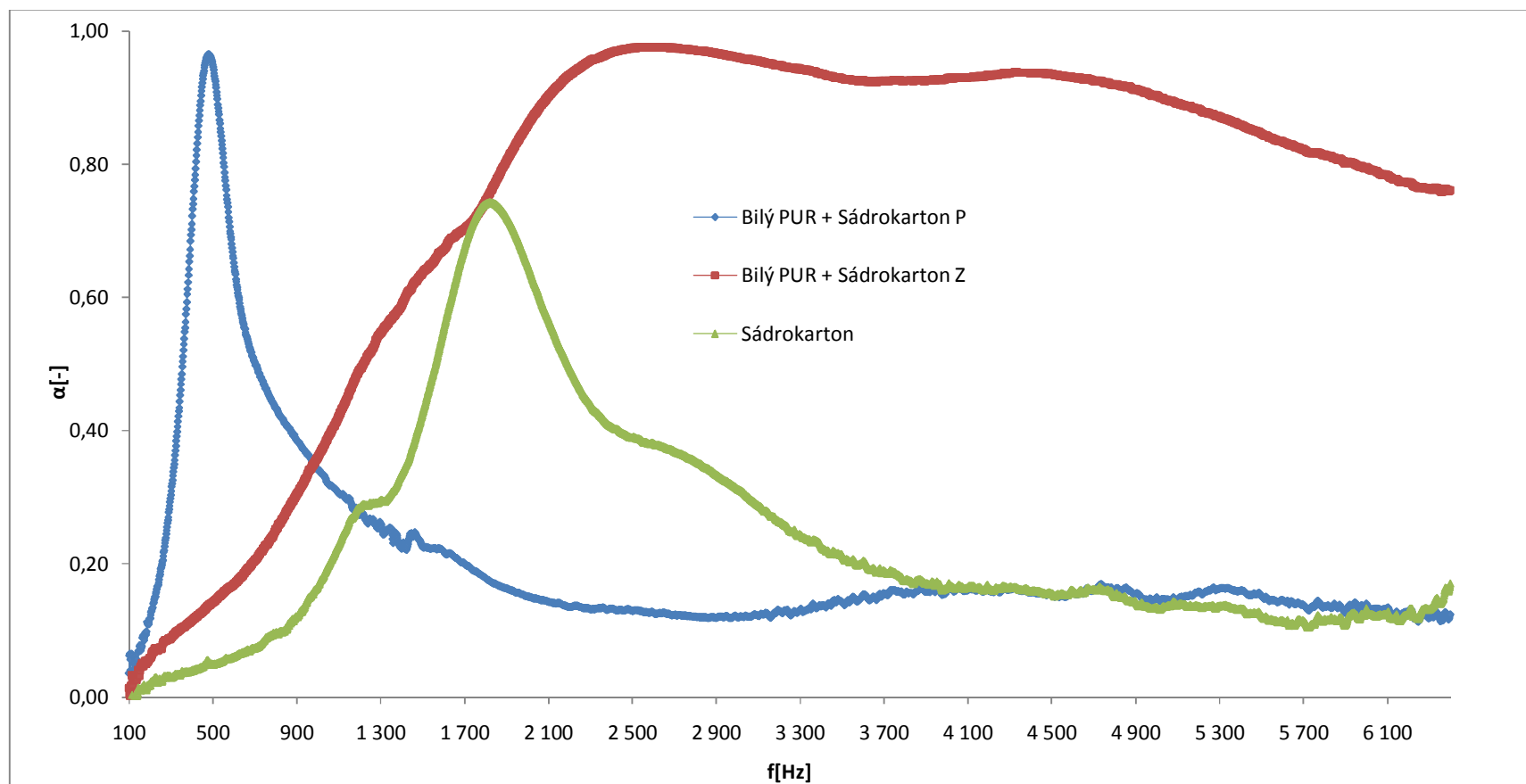
PŘÍLOHA P V: GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO PAPÍR. KARTON + SÁDROKARTON P, Z A SÁDROKARTON PRO ROZMEZÍ 100-6400 Hz



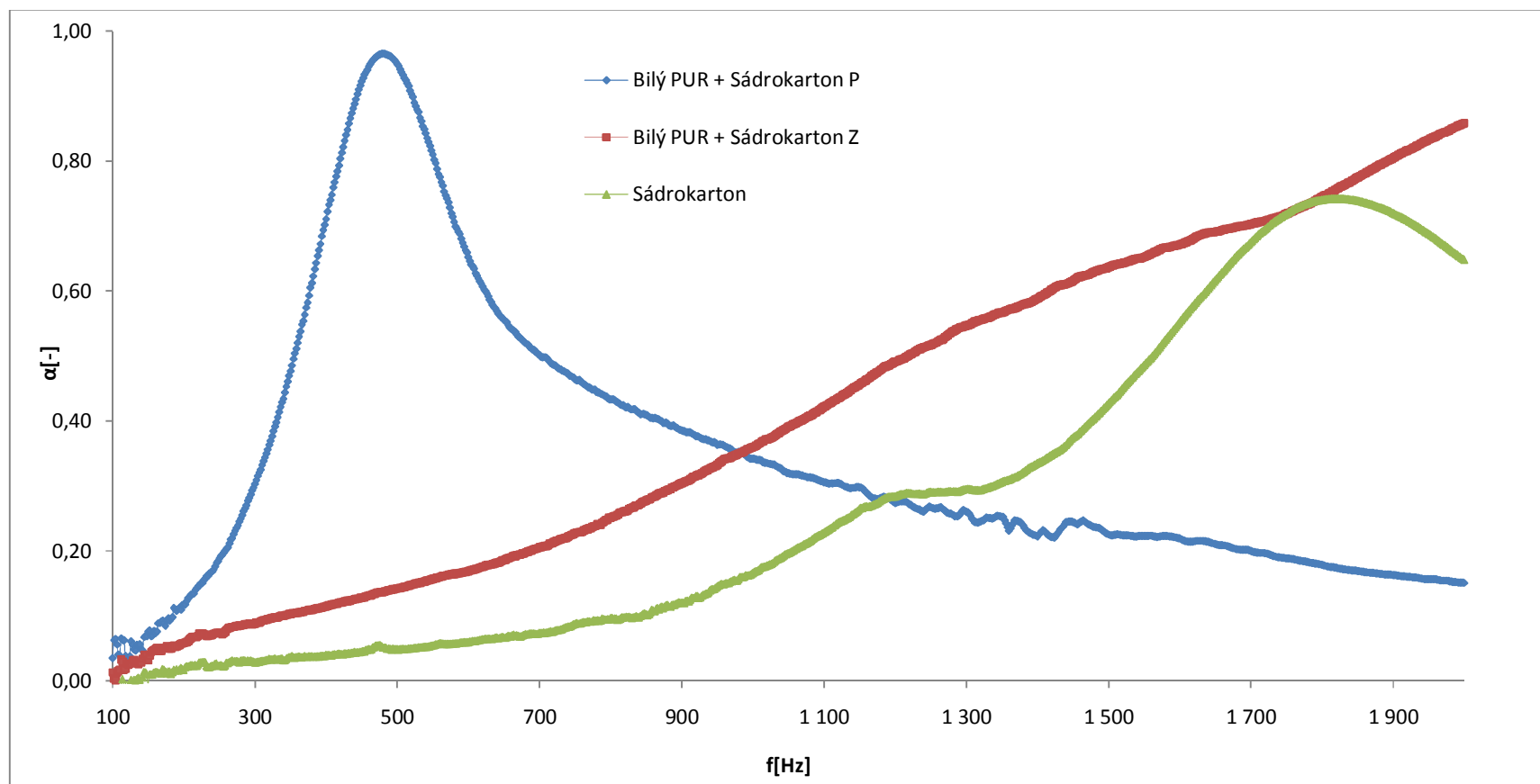
PŘÍLOHA P VI: GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO PAPÍR. KARTON + SÁDROKARTON P, Z A SÁDROKARTON PRO ROZMEZÍ 100-2000 Hz



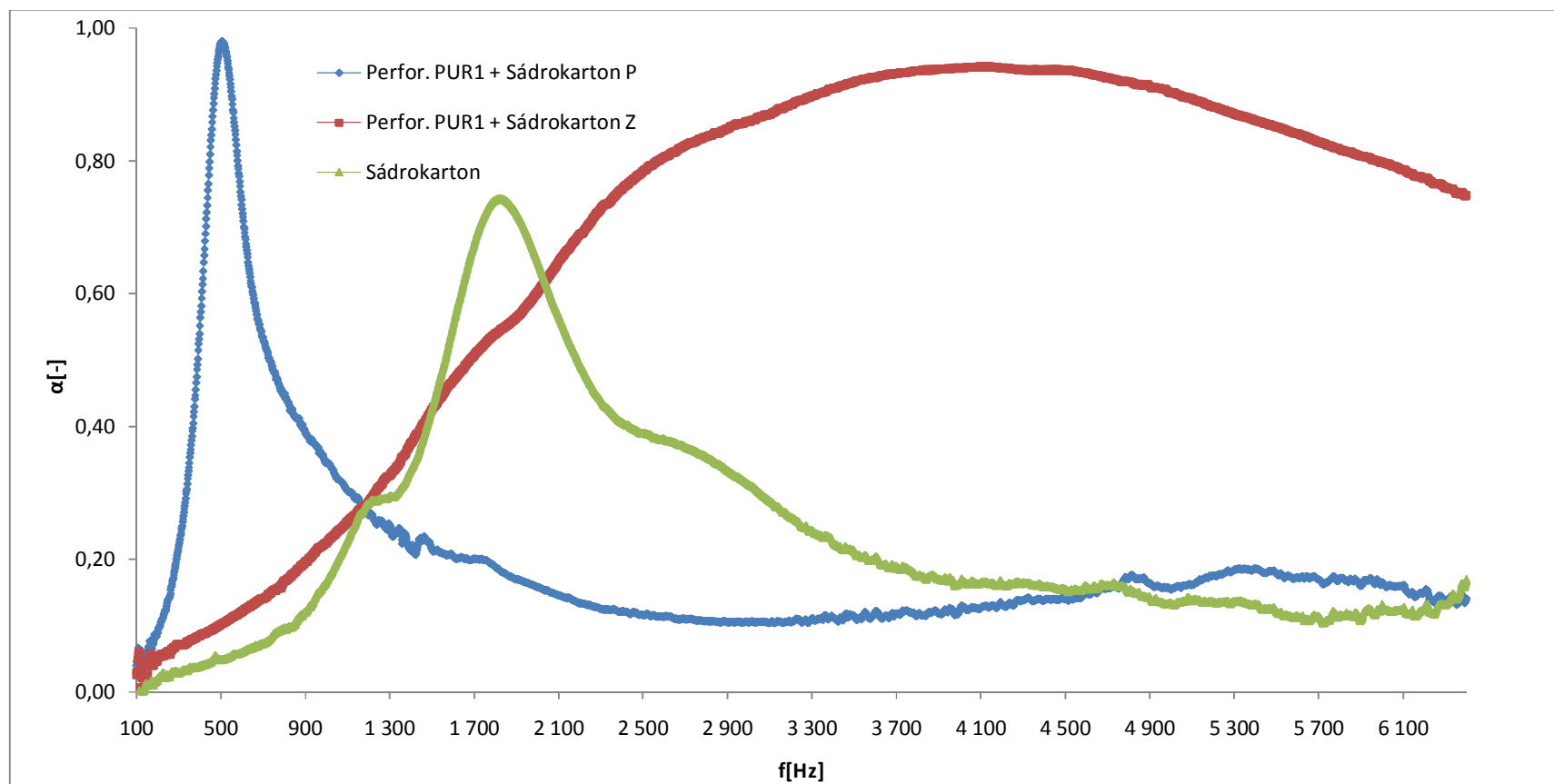
**PŘÍLOHA P VII: GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCÍ PRO
BÍLÝ PUR + SÁDROKARTON P, Z A SÁDROKARTON PRO ROZMEZÍ 100-6400 Hz**



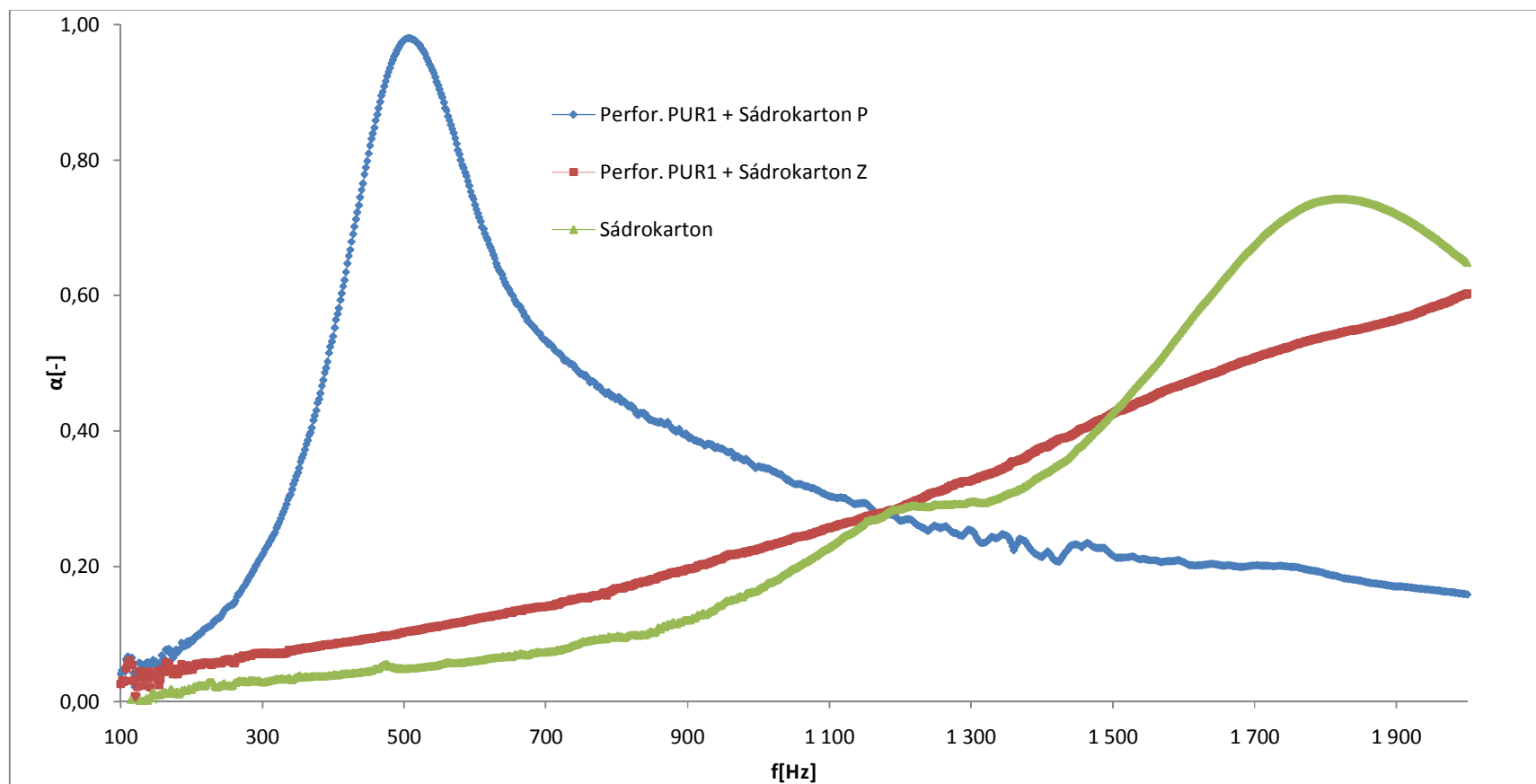
PŘÍLOHA P VIII: GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO BÍLÝ PUR + SÁDROKARTON P, Z A SÁDROKARTON PRO ROZMEZÍ 100-2000 Hz



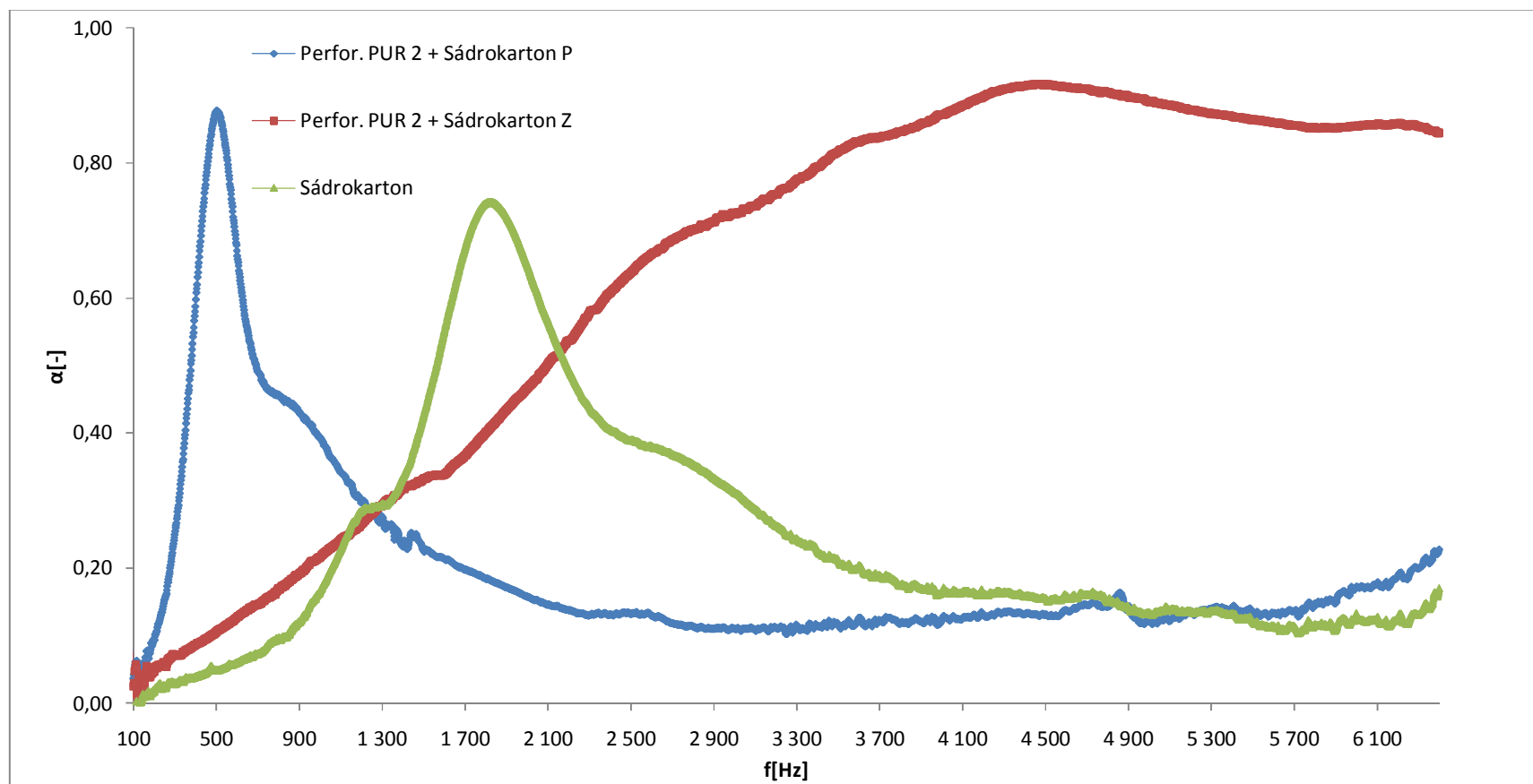
PŘÍLOHA P IX: GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO PERFOR. PUR1 + SÁDROKARTON P, Z A SÁDROKARTON PRO ROZMEZÍ 100-6400 Hz



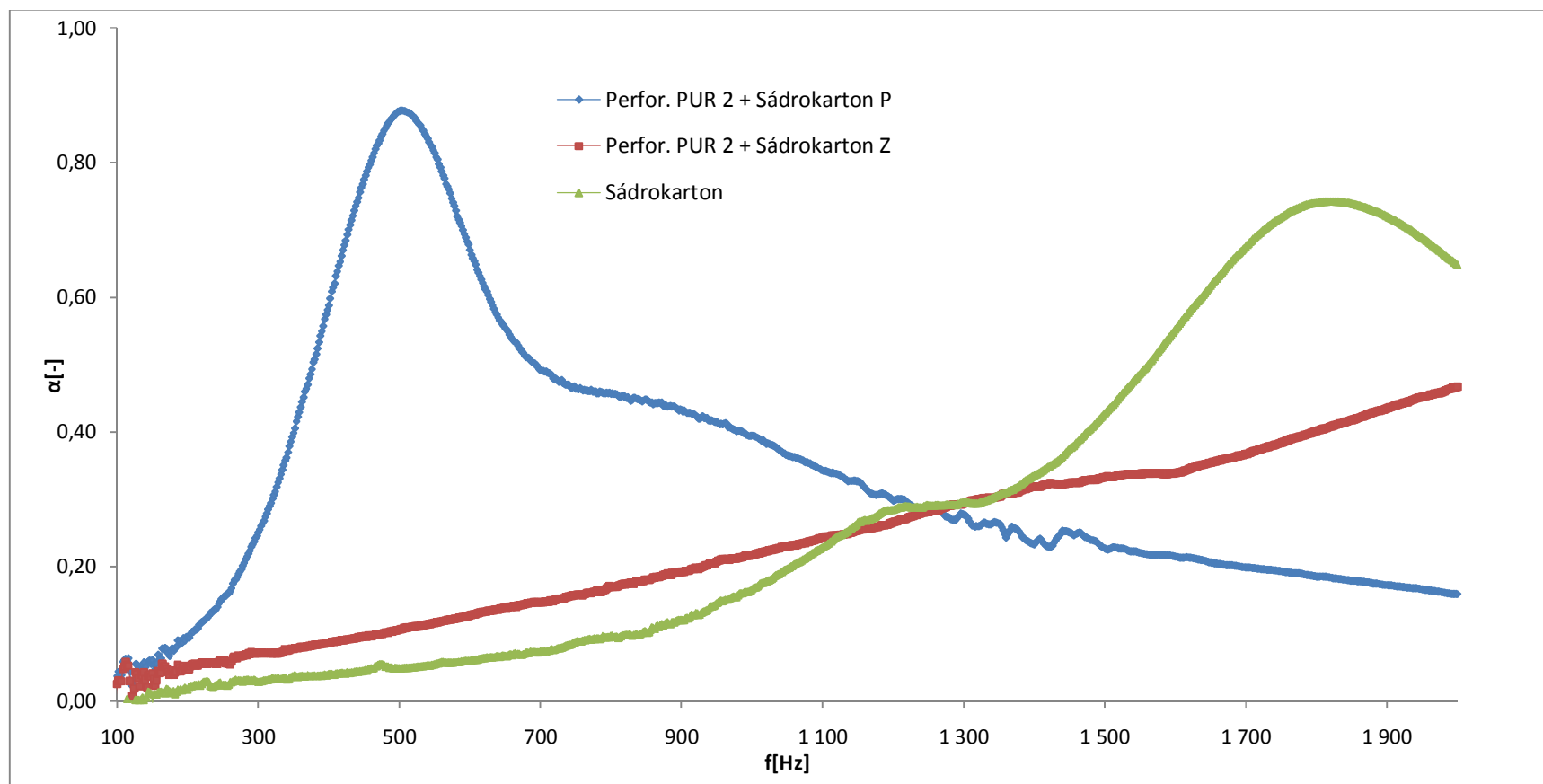
PŘÍLOHA P X: GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCÍ PRO PERFOR. PUR1 + SÁDROKARTON P, Z A SÁDROKARTON PRO ROZMEZÍ 100-2000 Hz



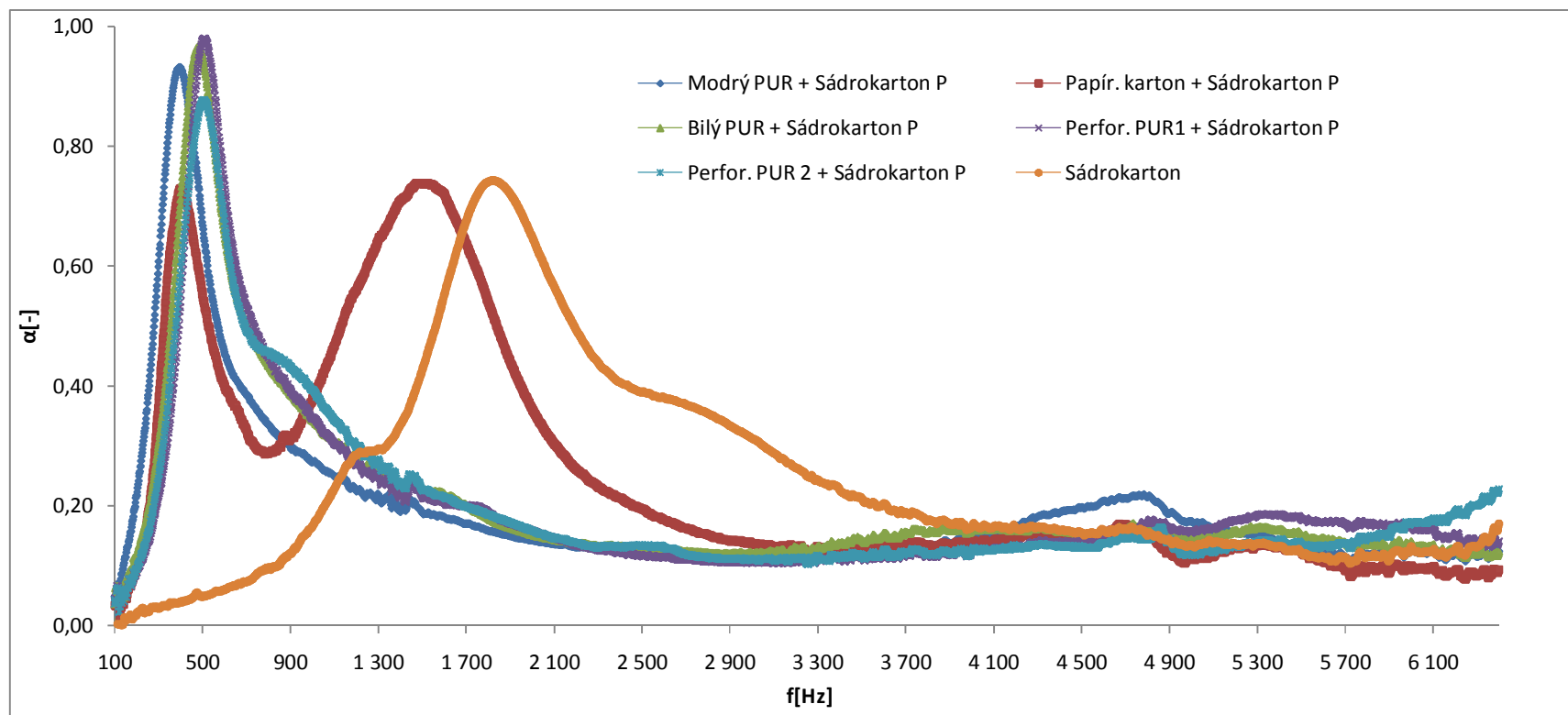
PŘÍLOHA P XI: GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO PERFOR. PUR2 + SÁDROKARTON P, Z A SÁDROKARTON PRO ROZMEZÍ 100-6400 Hz



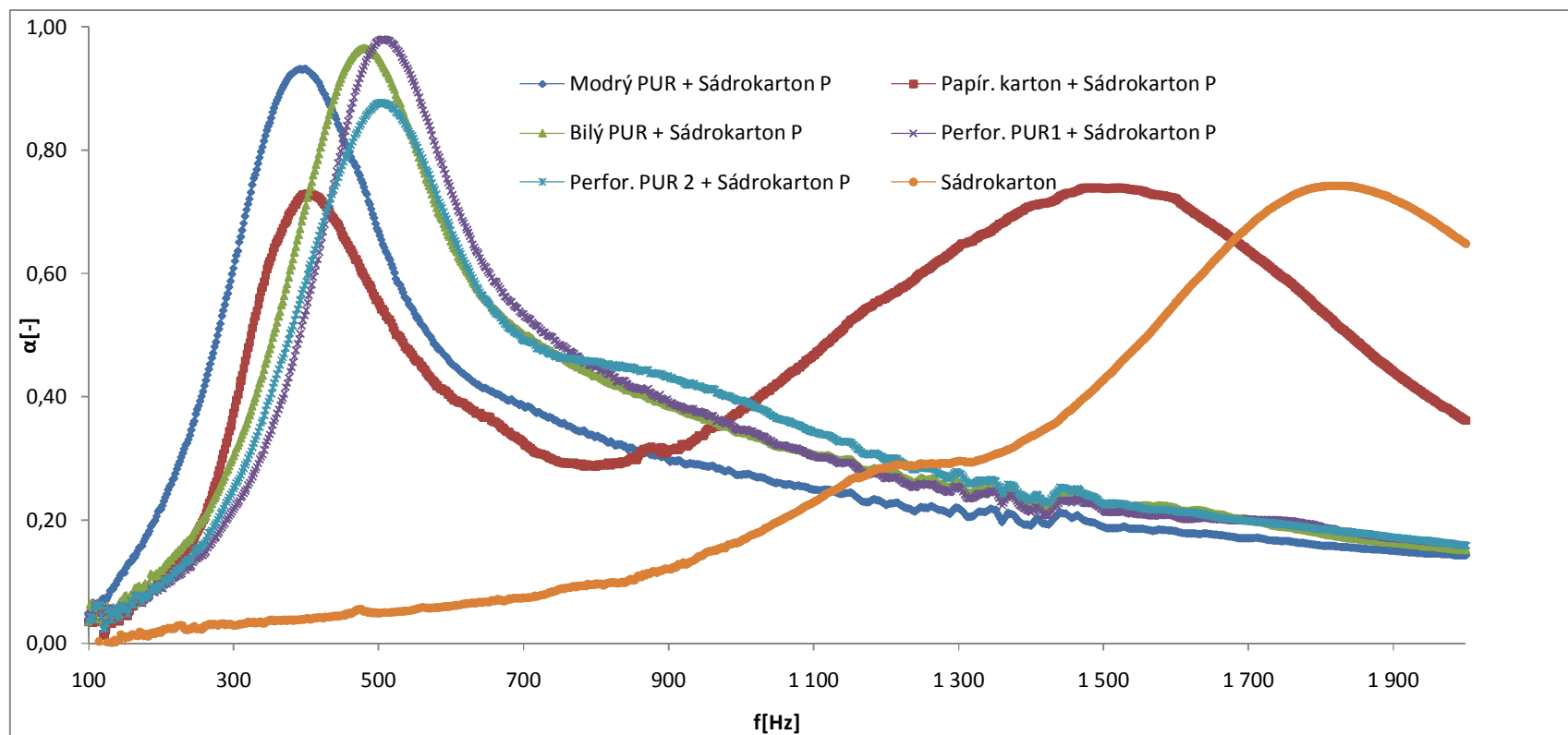
PŘÍLOHA P XII: GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCÍ PRO PERFOR. PUR2 + SÁDROKARTON P, Z A SÁDROKARTON PRO ROZMEZÍ 100-2000 Hz



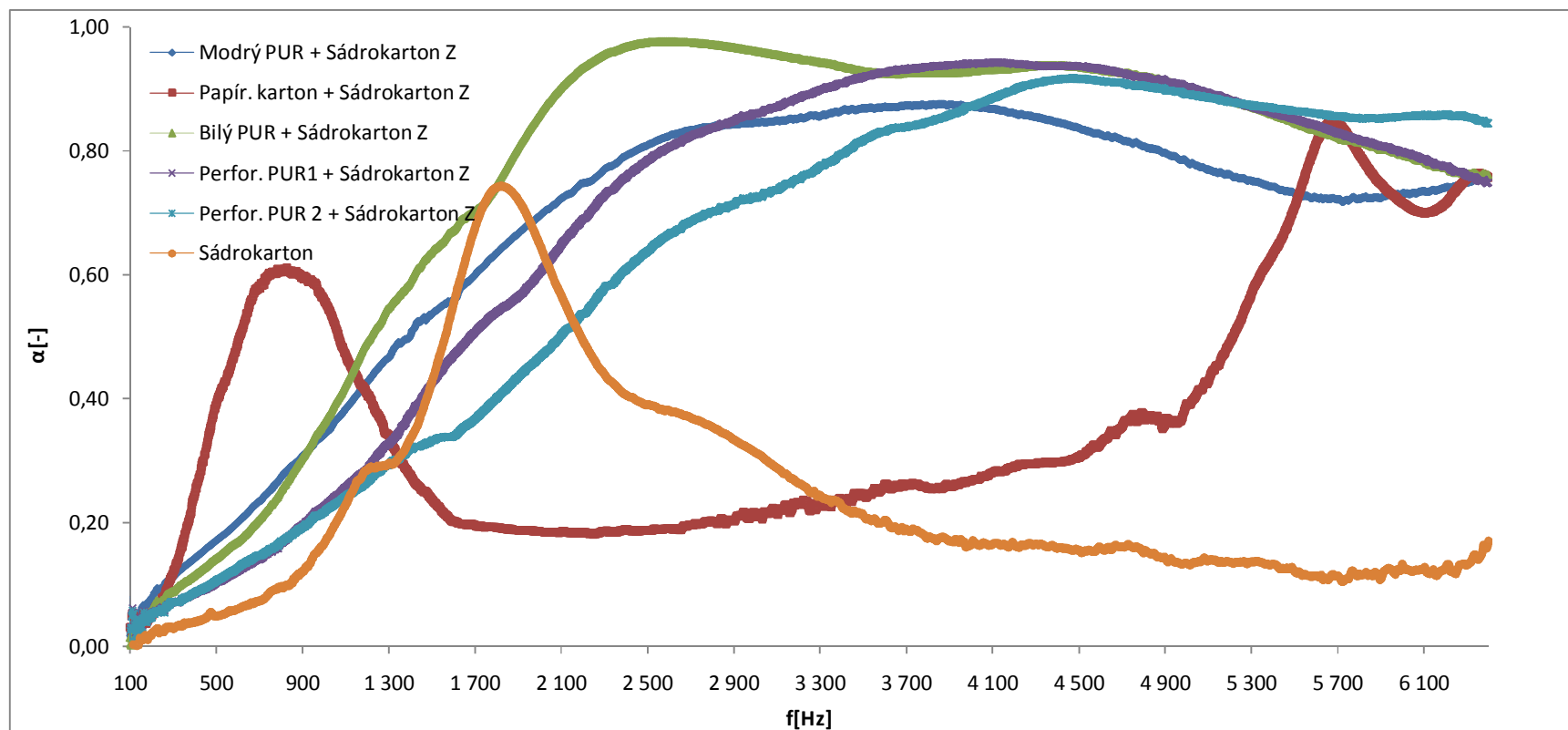
PŘÍLOHA P XIII: GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO MODRÝ PUR + SÁDROKARTON P, PAPÍR. KARTON + SÁDROKARTON P, BÍLÝ PUR + SÁDROKARTON P, PERFOR. PUR1 + SÁDROKARTON P, PERFOR. PUR2 + SÁDROKARTON P, A SÁDROKARTON PRO ROZMEZÍ 100-6400 Hz



PŘÍLOHA P XIV: GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO MODRÝ PUR + SÁDROKARTON P, PAPIR. KARTON + SÁDROKARTON P, BÍLÝ PUR + SÁDROKARTON P, PERFOR. PUR1 + SÁDROKARTON P, PERFOR. PUR2 + SÁDROKARTON P, A SÁDROKARTON PRO ROZMEZÍ 100-2000 Hz



PŘÍLOHA P XV: GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO MODRÝ PUR + SÁDROKARTON Z, PAPIR. KARTON + SÁDROKARTON Z, BÍLÝ PUR + SÁDROKARTON Z, PERFOR. PUR1 + SÁDROKARTON Z, PERFOR. PUR2 + SÁDROKARTON Z, A SÁDROKARTON PRO ROZMEZÍ 100-6400 Hz



PŘÍLOHA P XVI: GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO MODRÝ PUR + SÁDROKARTON Z, PAPIR. KARTON + SÁDROKARTON Z, BÍLÝ PUR + SÁDROKARTON Z, PERFOR. PUR1 + SÁDROKARTON Z, PERFOR. PUR2 + SÁDROKARTON Z, A SÁDROKARTON PRO ROZMEZÍ 100 -2000 Hz

