



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

APLIKACE ZVUK POHLTIVÉHO MATERIÁLU V OKOLÍ VÁLCOVÉHO DYNAMOMETRU

APPLICATION OF SOUND-ABSORBING MATERIAL AROUND A CHASSIS DYNAMOMETER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Kašpárek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Řehák, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Bc. Jan Kašpárek
Studijní program:	Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Kamil Řehák, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aplikace zvuk pohltivého materiálu v okolí válcového dynamometru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době jsou nejen při vývoji vozidel hojně využívány testy na válcovém dynamometru, jež mohou být součástí laboratoří, kde je realizováno měření hluku. Tím jsou na jednotlivé komponenty v laboratoři kladeny zvýšené nároky na snížení hluku. Jednou z možností je využití zvuk pohltivého materiálu a vytvoření obalové plochy pro kritická místa. Se vzrůstajícím využíváním numerických simulací při vývoji je nutné vytvořit a validovat výpočtové modely pro jednotlivé používané materiály pro jejich následnou implementaci do více komplexních modelů.

Cíle diplomové práce:

Provést rešerši z hlediska v současné době používaných materiálů a přístupů k tvorbě a validaci výpočtových modelů

Provést technický experiment na malém segmentu několika vzorků

Provést technický experiment uvnitř bezdozvukové místnosti

Vytvořit výpočtový model

Provést analýzu dosažených výsledků a porovnat výsledky jednotlivých přístupů

Seznam doporučené literatury:

SMETANA, Ctirad. Hluk a vibrace. Praha: Sdělovací technika, 1998, 250 s. ISBN 8090193625.

CHEN, Xiaolin a Yijun LIU. Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench. Second edition. Boca Raton: Taylor and Francis ; CRC Press, 2018, xiii, 457 stran, ISBN: 9781138486294

LAWRENCE, Kent L. ANSYS workbench tutorial: structural & thermal analysis using the ANSYS workbench release 14 environment. Mission: SDC Publications, 2012, ISBN 978-1-58503-754-4.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá stanovením akusticky pohltivých vlastností konkrétních vzorků materiálů. Cílem práce je experimentální určení těchto vlastností pomocí experimentu v impedanční trubici a bezdozvukové komoře. Tyto experimenty jsou později simulovány pomocí softwaru ANSYS. Výsledky obou metod jsou porovnány a jsou zjišťovány příčiny jejich případných odchylek.

KLÍČOVÁ SLOVA

akustika, impedanční trubice, bezdozvuková komora, činitel absorpce

ABSTRACT

This diploma thesis deals with determination of an absorption properties of samples made of specific materials. The aim is to determine these properties with the help of impedance tube and anechoic chamber. These experiments are later simulated with ANSYS software. Results of both methods are compared and reasons of differences are studied.

KEYWORDS

acoustics, impedance tube, anechoic chamber, absorption coefficient

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KAŠPÁREK, Jan. *Aplikace zvuk pohltivého materiálu v okolí válcového dynamometru*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140190>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Kamil Řehák.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Kamila Řeháka, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 20. května 2022

.....

Jan Kašpárek

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Kamilovi Řehákovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, vstřícný přístup a jeho přínosné rady a připomínky. Dále bych rád poděkoval zastoupení společnosti AVL Moravia s.r.o., obzvláště panu Petrovi Hauschkemu, za možnost zpracovat toto téma a za poskytnutí vzorků zvuk pohltivých materiálů. V neposlední řadě bych zde rád poděkoval svým rodičům a své přítelkyni za jejich podporu během celé doby mého studia.

OBSAH

Úvod	12
1 Měření akustického komfortu na válcových dynamometrech	13
2 Teorie akustiky	14
2.1 Akustické vlnění	14
2.1.1 Rychlost zvuku	14
2.1.2 Vlnová délka	16
2.2 Základní akustické veličiny	16
2.2.1 Akustický tlak a hladina akustického tlaku	16
2.2.2 Akustický výkon a hladina akustického výkonu	17
2.2.3 Akustická intenzita a hladina akustické intenzity	17
2.2.4 Akustická impedance	18
2.2.5 Akustická admitance	18
2.3 Šíření vlnění	18
2.3.1 Odraz	19
2.3.2 Ohyb	19
2.3.3 Lom	20
2.3.4 Pohlcení	20
2.4 Akusticky pohltivé materiály	21
2.5 Kmitočtová pásma	22
2.5.1 Oktávové kmitočtové pásmo	23
2.5.2 Třetinooktávové frekvenční pásmo	23
3 Experiment podle ČSN ISO 10534	26
3.1 Metoda poměru stojaté vlny	26
3.2 Metoda přenosové funkce	27
3.3 Měřicí zařízení	27
3.3.1 Impedanční trubice	28
3.3.2 Držák vzorku	28
3.3.3 Mikrofon	29
3.3.4 Zařízení pro pohyb a umístování mikrofonu (sondy)	29
3.3.5 Zařízení pro zpracování signálu	29
3.3.6 Reprodukční	30
3.3.7 Generátor signálu	31
3.3.8 Reprodukční uzávěr	31
3.3.9 Teploměr	31
4 Experiment podle ČSN EN ISO 354	32
4.1 Zkušební zařízení	32
4.1.1 Dozvuková místnost	32
4.1.2 Zkušební vzorek	32
4.1.3 Klimatické podmínky	32
4.1.4 Mikrofony	33
4.1.5 Zdroje	33
4.2 Metoda přerušovaného šumu	33
4.3 Metoda integrované impulsové odezvy	33

4.3.1	Přímá metoda	33
4.3.2	Nepřímá metoda	34
4.3.3	Příjímací řetězec	34
4.3.4	Vlastní integrace impulsové odezvy	34
4.4	Postup výpočtu	34
4.4.1	Doby dozvuku	34
4.4.2	Ekvivalentní pohltivé plochy	34
4.4.3	Činitel zvukové absorpce příslušného vzorku	35
5	Experimenty uvnitř bezdozvukové komory	36
6	Současný stav poznání v oblasti numerických simulací	37
6.1	Modeling of 3D Impedance Tube with a Complex Termination Impedance using Finite Element Method	37
6.2	Experimental Investigation and Numerical Simulation of the Acoustic Waves Propagation in a Standing Wave Tube: Testing with a Sample of Rockwool	38
6.3	Study of Sound Absorption Properties on Rigid Polyurethane Foams using FEA ...	40
6.4	Sound insulation properties of sandwich structure with hemispheric shell cores: Numerical and experimental studies	41
6.5	A study of sound pressure level (SPL) inside the truck cabin for new acoustic materials: An experimental and FEA approach	43
6.6	Shrnutí	44
7	Experiment s využitím impedanční trubice	45
7.1	Měření	45
7.1.1	Akustická pěna – ROCKFONIK	46
7.1.2	Izolační pěna – Kaiflex/Armaflex	47
7.1.3	Polymerová pěna – AIREX T92 130	48
7.1.4	Polymerová pěna – AIREX T92 200	49
7.1.5	Sendvičový panel – WILLBRANDT Contrabel	50
7.1.6	Překližka	51
7.2	Numerická simulace	52
7.2.1	Geometrie	52
7.2.2	Sít'	53
7.2.3	Okrajové podmínky	54
7.2.4	Porovnání jednotlivých přístupů	55
7.2.5	Diskuze	63
8	Experiment s využitím bezdozvukové komory	67
8.1	Sestavení experimentálního zařízení	68
8.2	Příprava měřicí aparatury	68
8.3	Měření	70
8.4	Numerická simulace	72
8.4.1	Geometrie	72
8.4.2	Sít'	73
8.4.3	Okrajové podmínky	74
8.4.4	Porovnání jednotlivých přístupů	76
8.4.5	Diskuze	77

Závěr	78
Použité informační zdroje.....	81
Seznam použitých zkratek a symbolů.....	84

ÚVOD

Válcové dynamometry jsou nezastupitelným nástrojem při vývoji nových či testování stávajících automobilů. Klientela automobilek začíná během let čím dál tím více vedle jízdních parametrů automobilu řešit také prvky komfortní. Kromě klasických komfortních prvků, jako je topení či klimatizace, se ve velké míře začíná řešit i hluk, který proniká do kabiny automobilu. Proto se kromě klasických testů ke zjišťování výkonnostních parametrů vozidla, stává rozšířené i testování na válcových dynamometrech spojené s akustickým komfortem posádky. U těchto testů je nezbytné odhlučnění jakýchkoliv ostatních zdrojů hluku tak, aby mohl být zkoumán pouze hluk generovaný samotným provozem automobilu.

Tyto testy ve většině případů probíhají uvnitř bezdozvukových komor, díky čemuž jsou potlačeny všechny zdroje zvuku vznikající v okolí automobilu. Problémem je zde ale použití samotného dynamometru, jehož součástí při své funkci také působí jako zdroje přídavného hluku. Tento hluk narušuje měření hluku generovaného automobilem a je tedy nutné jej potlačit. Jednou z možností, jak tohoto dosáhnout, je použít v okolí válcového dynamometru zvuk pohltivý materiál, resp. obklady z něj. Tyto materiály dokážou snížit energii akustického vlnění, které na ně dopadá; a to tak, že se díky jejich geometrii akustická energie při průchodu mění na energii tepelnou.

Při průchodu akustické vlny materiálem, který má pohltivé vlastnosti, je pro určení jeho vhodnosti použití podstatné, jaká část akustické energie materiálem projde a jaká se absorbuje (popř. se odrazí zpět). K popisu tohoto jevu slouží činitel zvukové absorpce α . Tato veličina je silně závislá na frekvenci dané vlny, z čehož vyplývá, že pro každou praktickou aplikaci je vhodný jiný zvuk pohltivý materiál. Pro porovnání jednotlivých zkoumaných materiálů z pohledu akustické pohltivosti je nutné zjistit činitel zvukové absorpce pro každý z nich. Ke zkoumání akustických vlastností existuje více metod. Mezi ty nejnámější patří experimenty s využitím impedanční trubice, dozvukových, či bezdozvukových komor.

Proběhnuté experimenty jsou pro lepší věrohodnost často validovány numerickými simulacemi. Nejčastěji se jedná o simulace na základě metody konečných prvků. V průmyslové praxi je použití numerických simulací velice častým jevem. Vytvoření a vyladění numerického modelu není jednoduchou záležitostí, proto se při jeho tvorbě často čerpá z prací ostatních autorů ze stejných oblastí.

Prvním cílem této práce je provést rešerši z hlediska používaných akusticky pohltivých materiálů a z hlediska přístupů k tvorbě numerických modelů analýz spojených právě s problematikou akustiky. Dalším cílem je provést vybrané experimenty na konkrétních vzorcích akusticky pohltivých materiálů a tím zjistit jejich absorpční vlastnosti a vhodnost jejich použití. V neposlední řadě je pak cílem vytvořit numerické modely těchto experimentů tak, aby jejich nastavení co nejlépe reflektovalo proběhnuté experimenty. Výsledky těchto numerických analýz je poté nutno interpretovat, porovnat je s výsledky proběhnutých experimentů a vysvětlit případné rozdíly mezi nimi.

1 MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO KOMFORTU NA VÁLCOVÝCH DYNAMOMETRECH

Testování vozidel na válcových dynamometrech je v posledních několika desetiletích velice rozšířenou metodou testování parametrů automobilu. Hlavní výhodou takového měření je, že lze testovat parametry vozidla v laboratorních podmínkách, což s sebou nese mnoho výhod např. oproti testování na testovacím polygonu. Nejčastěji se tyto testy používají pro zjišťování výkonnostních parametrů vozidla, jako je výkon či točivý moment. Kromě těchto testů však válcové dynamometry mohou sloužit pro měření akcelerace, emisí, spotřeby paliva apod.

V posledních letech je velice rozšířené i měření akustického komfortu pomocí válcových dynamometrů. Automobil se při takových testech ustaví na válcový dynamometr, čímž se simuluje jeho jízda. Uvnitř automobilu se potom pomocí mikrofonů umístěných nejčastěji v poloze uší členů posádky měří akustický tlak, což je hlavní ukazatel akustického pohodlí. Automobil při jízdě (nebo při simulaci jízdy na válcovém dynamometru) generuje hluk hned pomocí několika zdrojů. Mezi ty nejdominantnější patří např. samotný spalovací motor, převodovka, aerodynamický hluk, či hluk vznikající v kontaktu pneumatiky a vozovky (válece dynamometru).

Vzhledem k tomu, že použité mikrofony jsou velice citlivé, je nežádoucí, aby do měření vstupovaly i jiné zdroje hluku než ty generované samotným automobilem. Pro odfiltrování okolního hluku je celé zkušební zařízení nejčastěji situováno do bezdozvukové komory (viz Obr. 1.1). Ta zajistí, že jakýkoliv jiný hluk než ten, vznikající přímo uvnitř komory, nijak do měřeného akustického tlaku uvnitř kabiny nepřispívá. Dalším problémem je použití samotného válcového dynamometru. Válcové dynamometry jsou velice komplexní zařízení, které při své funkci také generují hluk a vstupují tak do měření hluku uvnitř kabiny automobilu. Mezi ty nejdominantnější zdroje hluku z mechanismu válcového dynamometru patří zejména elektromotor dynamometru, uložení rotačních částí ve valivých ložiscích, či proudění vzduchu. Tyto zdroje hluku je nutné během měření utlumit, čehož lze nejsnadněji dosáhnout použitím akustických obkladů.



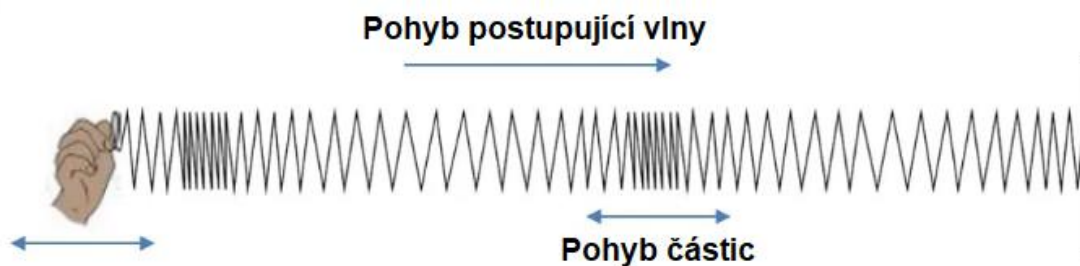
Obr. 1.1 Testování vozidla na válcovém dynamometru uvnitř polobezdozvukové komory [1]

2 TEORIE AKUSTIKY

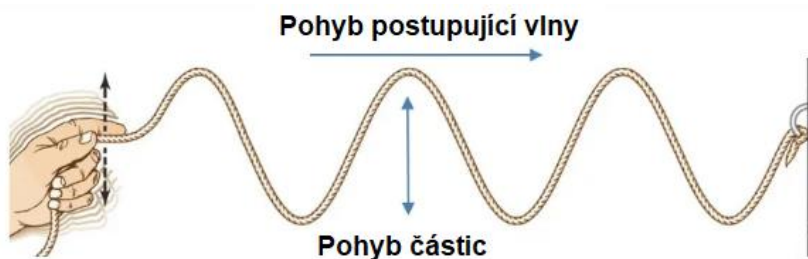
Akustika je podoborem fyziky, který se zabývá ději spojenými se vznikem, šířením a vnímáním zvukových vln. Tyto vlny vznikají jako důsledek mechanického kmitání. Akustické vlnění se může vyskytovat v plynném, kapalném i pevném prostředí. Vnímání tohoto vlnění lidským uchem je velice subjektivní, obecně lze však říct, že oblast lidským uchem rozeznatelného zvukového vlnění je 16 Hz - 20 kHz [2].

2.1 AKUSTICKÉ VLNĚNÍ

Jak již bylo zmíněno výše, akustické vlny se šíří v každém prostředí. Částice oscilují okolo rovnovážného stavu, a to se může dít buď podélně (podélné vlnění) nebo příčně (příčné vlnění). V případě podélného vlnění se částice pohybují rovnoběžně s postupující vlnou, viz Obr. 2.1. Tento druh akustického vlnění se typicky objevuje v plynném a kapalném prostředí. Naopak v případě vlnění příčného se částice pohybují kolmo na směr šíření vlny, viz Obr. 2.2. Toto vlnění je pak typické pro šíření akustických vln pevnými látkami (tyč, lano, drát atd.) [2].



Obr. 2.1 Podélné vlnění [3] (upraveno)



Obr. 2.2 Příčné vlnění [3] (upraveno)

2.1.1 RYCHLOST ZVUKU

Rychlost zvuku je jednou z veličin popisujících akustickou vlnu. Je definována jako rychlost šíření akustických vln prostředím. Rychlost zvuku nezávisí na frekvenci vlnění. Závisí pouze na tom, jakým prostředím se vlna šíří, přičemž největší vliv na rychlost zvuku má teplota tohoto prostředí [2], [8]. Pro rychlost zvuku v ideálním plynu platí následující rovnice:

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p_p}{\rho}} \quad (1)$$

kde c [m/s] je rychlost zvuku, κ [-] je Poissonova konstanta, p_p [Pa] je tlak v prostředí a ρ [kg/m³] je hustota prostředí

Ze znalosti stavové rovnice ideálního plynu lze rychlost zvuku také počítat pomocí následující rovnice:

$$c = \sqrt{\kappa RT} \quad (2)$$

kde R [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$] je molární plynová konstanta a T [K] je termodynamická teplota prostředí

Pro porovnání je v následující Tab. 2.1 uvedena rychlost zvuku ve vybraných plynech při konkrétních teplotách:

Tab. 2.1 Rychlost zvuku ve vybraných plynných prostředích [2]

Látka	c [m/s]
Vzduch 0 °C	332
Vzduch 20 °C	344
Dusík 0 °C	334
Helium 0 °C	971
Vodík 0 °C	1286

V případě šíření akustických vln pevnou látkou je nutné do výpočtu zahrnout materiálové charakteristiky, a to konkrétně modul pružnosti v tahu E a modul pružnosti ve smyku G [7], [8]. Pro podélné vlnění tyčí platí:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

kde E [Pa] je modul pružnosti v tahu

Pro podélné vlnění deskou platí:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{1 - \mu^2}} \quad (4)$$

kde μ [-] je Poissonův poměr

Pro příčné vlnění platí:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5)$$

kde G [MPa] je modul pružnosti ve smyku

Poměr rychlosti zvuku podélného vlnění v pevných látkách ku rychlosti zvuku příčného vlnění v pevných látkách je vždy konstantní [2].

2.1.2 VLNOVÁ DÉLKA

Je to veličina popisující jakékoliv vlnění. Je definována jako vzdálenost mezi dvěma opakujícími se periodami daného vlnění. Je nepřímo úměrná frekvenci kmitu [2]:

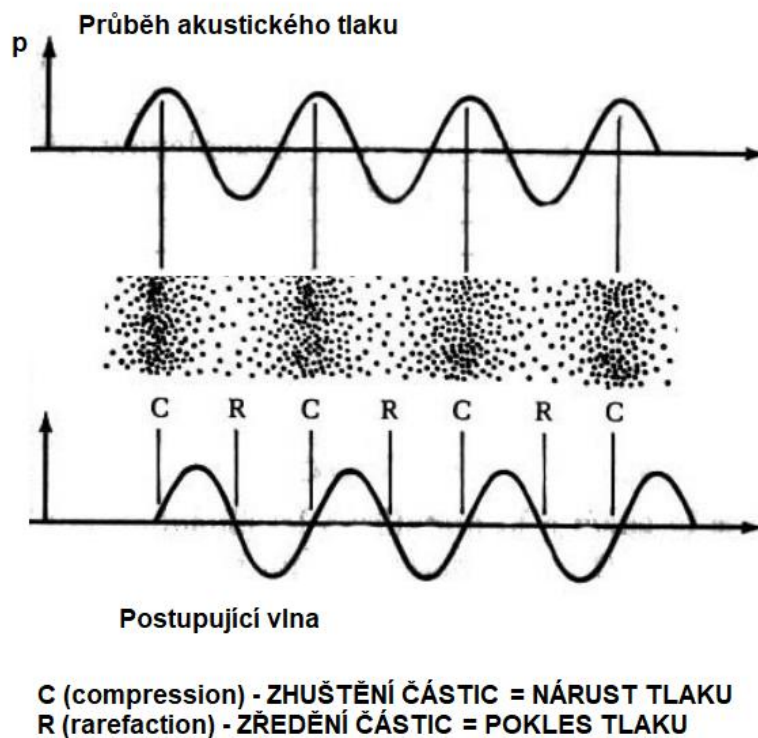
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (6)$$

kde λ [m] je vlnová délka a f [Hz] je frekvence kmitu

2.2 ZÁKLADNÍ AKUSTICKÉ VELIČINY

2.2.1 AKUSTICKÝ TLAK A HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU

Jak lze vidět na Obr. 2.3, během vlnění částic, ať už podélného nebo příčného, vznikají zákonitě místa, kde je koncentrace částic nižší nebo vyšší, tedy místa se zředěním nebo zhuštěním částic. Tyto místa odpovídají místům podtlaku, respektive přetlaku. Tímto kolísáním se mění hodnota celkového statického tlaku vzduchu. **Akustický tlak p [Pa]** je definován jako rozdíl právě tohoto celkového tlaku a barometrického tlaku ($\approx 10^5$ Pa) [1], [7], [8].



Obr. 2.3 Změna akustického tlaku [4] (upraveno)

Změna tlaku vůči tlaku okolnímu je velice malá. Lidské ucho ale dokáže zaznamenat změnu tlaku už o $2 \cdot 10^{-5}$. Na tyto změny navíc lidské ucho nereaguje lineárně. Vnímání je úměrné logaritmu tohoto podnětu [8]. Z těchto důvodů se pro základní akustické veličiny definují tzv. hladiny. V případě akustického tlaku je tedy definována **hladina akustického tlaku L_p [dB]**, která charakterizuje akustickou doménu v daném místě [8].

Lze ji vypočítat dle následující rovnice:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (7)$$

kde L_p je hladina akustického tlaku, p je akustický tlak a p_0 je referenční hodnota akustického tlaku, $p_0 = 20 \cdot 10^{-6}$ Pa

2.2.2 AKUSTICKÝ VÝKON A HLADINA AKUSTICKÉHO VÝKONU

Akustický výkon P [W] je při šíření rovinné vlny definován jako množství přenesené energie za časovou jednotku [5]. Je to ideální veličina k popisu zdroje zvuku [7], [8].

$$P = \frac{dE_a}{dt} \quad (8)$$

kde P je akustický výkon, E_a je akustická energie a t je čas.

Všeobecně lze však akustický výkon definovat jako součin vektorů síly akustické vlny a rychlosti pohybu částic [7], [8]:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{u} \quad (9)$$

kde \vec{F} je vektor síly od akustické vlny a \vec{u} je vektor rychlosti pohybu částic kmitajících ve vlně

Stejně jako v případě akustického tlaku, je i zde ze stejných důvodů zavedena **hladina akustického výkonu L_w [dB]**, která je praktičtější k popisu zdrojů hluku. Je definována jako:

$$L_w = 10 \log \frac{P}{P_0} \quad (10)$$

kde L_w je hladina akustického výkonu, P je akustický výkon a P_0 je referenční hodnota akustického výkonu, $P_0 = 10^{-12}$ W

Z rovnice (9) je tedy zřejmé, že pokud se akustický výkon zvýší o jeden řád, hladina akustického výkonu se zvýší o 10 dB.

2.2.3 AKUSTICKÁ INTENZITA A HLADINA AKUSTICKÉ INTENZITY

Akustická intenzita \vec{I} [W/m²] je vektorová veličina, která představuje množství a směr toku akustické energie v určitém prostředí. Obecně je definována jako podíl akustického výkonu ku velikosti kontrolní plochy (konkrétní plocha, na kterou vlna dopadá):

$$|I| = \frac{dP}{dS} \quad (11)$$

kde S je velikost plochy, na kterou vlna dopadá (a v jejíž místě nás zajímá velikost akustické intenzity)

Důležitou vlastností akustické intenzity je její závislost na směru šíření akustické vlny. Pokud je vektor akustické intenzity kolmý na směr šíření vlny, je akustická intenzita vždy 0 [7], [8]. Svého maxima akustická intenzita nabývá v případě, že je vektor intenzity se směrem šíření vlny rovnoběžný. Pokud vyjdeme z rovnice (9) a za sílu dopadající akustické vlny dosadíme

součin $p \cdot S$, toto dosadíme do rovnice (11) a vezmeme v úvahu směrovost akustické intenzity, lze její velikost počítat takto [5]:

$$I = p \cdot u \cdot \cos\varphi \quad (12)$$

kde φ je úhel mezi vektorem akustické intenzity a směrem postupující akustické vlny.

Tak jako v předcházejících případech, i akustická intenzita má definovanou svou hladinu. **Hladina akustické intenzity L_I [dB]** charakterizuje akustickou doménu v určitém místě a v určitém směru [7], [8]. Je definována jako:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (13)$$

kde L_I je hladina akustické intenzity, I je akustická intenzita a I_0 je referenční hodnota akustické intenzity, $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

Z rovnice (12) je patrné, že pokud se akustická intenzita zvýší o jeden řád, hladina akustické intenzity se zvýší o 10 dB. I z tohoto důvodu je hladina akustické intenzity pro popis akustické domény praktičtější než prostá akustická intenzita.

2.2.4 AKUSTICKÁ IMPEDANCE

Akustická impedance Z [$\text{Pa} \cdot \text{s/m}$] charakterizuje míru odporu prostředí při průchodu akustické vlny. Je závislá na hustotě prostředí a na rychlosti šíření zvuku v daném prostředí [6]:

$$Z = \rho \cdot c \quad (14)$$

2.2.5 AKUSTICKÁ ADMITANCE

Akustická admitance Y [$\text{m/Pa} \cdot \text{s}$] je opakem akustické impedance, tedy charakterizuje, jak snadno akustické vlny dokážou postupovat daným prostředím [7], [8]. Je tedy převrácenou hodnotou impedance:

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (15)$$

2.3 ŠÍŘENÍ VLNĚNÍ

Po vzniku vlnění pomocí nějakého zdroje je pro další jeho šíření zapotřebí prostředí, které se skládá z hmotných částí a vyznačuje se svou stlačitelností (plyny, částečně kapaliny) nebo pružností (pevné látky, částečně kapaliny). Při prostupu vlny prostředím se šíří určité množství energie. Ta postupuje od zdroje do prostoru rychlostí zvuku c . Vlnění v plynném nebo kapalném prostředí se označuje jako zvuk. Jeho obdobou v pevných látkách je mechanické vlnění, které se označuje jako vibrace [7].

Při šíření vlnění prostředím se zákonitě může stát, že vlna dopadne na nějakou překážku, od které se může odrazit či ohýbat. Při vniknutí vlny do jiného prostředí může také dojít k lomu vlny. O míře těchto skutečností rozhodují vlastnosti daných prostředí, zejména pak jejich impedance (viz kap. 2.2.4) [7]. V neposlední řadě se může také stát, že materiál překážky zvukovou vlnu pohltí, a to buď částečně, nebo celkově.

2.3.1 ODRAZ

K odrazu dojde při nárazu vlny na překážku. Část vlny se odrazí, ale část se může i pohltit, což závisí na pohltivých vlastnostech materiálu překážky. V neposlední řadě se část energie dopadající vlny může transformovat do jiné formy (nejčastěji do formy tepelné energie) [7], [8]. Dalším důležitým parametrem, na kterém schopnost odrazu závisí, je vlnová délka daného signálu. Pokud vlna dopadá na plochu, která je podstatně větší než vlnová délka, lze se řídit zákonem odrazu, který udává, že úhel dopadu vlny na překážku je totožný s úhlem odrazu vlny od překážky. Podmínka odrazu lze matematicky zapsat takto [7]:

$$\lambda \leq l \quad (16)$$

kde l je nejmenší rozměr překážky

Ze znalosti rovnice (6) lze podmínku přepsat do tvaru:

$$f \geq \frac{c}{l} \quad (17)$$

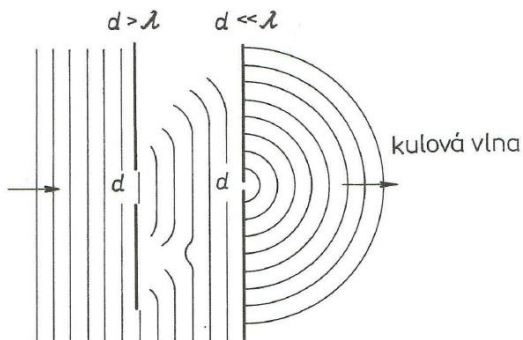
V případě prostupu vlnění pevnou látkou k těmto skutečnostem dochází zejména na rozhraní materiálu s rozdílným modulem pružnosti v tahu E [7].

U ploch zakřivených je odraz složitější. Záleží na vzájemných poměrech vlnové délky, poloměru zakřivení těchto ploch a jejich celkových rozměrech. Lze použít tzv. Huygensova principu, dle kterého se dá každý bod vlnoplochy považovat za zdroj nového vlnění, které se šíří v kulových vlnoplochách. U vydutých ploch dochází ke koncentraci energie, u ploch vypouklých k rozptylu energie [7].

Schopnost materiálu odrazit akustickou vlnu je určena **činitelem zvukové odrazivosti β** [-]. Je definován jako poměr energie odražené akustické vlny ku energii vlny dopadající.

2.3.2 OHYB

Zde lze opět použít Huygensova principu, který udává, že každá hrana překážky je nový zdroj kulových vln. Při spojení více těchto účinků dojde ke změně směru šíření, tedy k ohybu vlny. Velikost změny směru pohybu vlny je závislá především na vlnové délce a na velikosti překážky [7]. Jak lze vidět na Obr. 2.4, pokud je otvor v překážce větší než vlnová délka ($d > \lambda$), vlna se šíří dál. Pokud je však vlnová délka výrazně větší než velikost otvoru v překážce ($d \gg \lambda$), dochází dle Huygensova principu k tvoření nových zdrojů zvuku a tím k tvoření kulových vln [7], [8].



Obr. 2.4 Prostup vlny otvorem v překážce [7] (upraveno)

2.3.3 LOM

Lom paprsku vlny vzniká, pokud vlna prostupuje z jednoho prostředí do druhého. Důležitým parametrem je pak rychlost šíření vlny v jednotlivých prostředích. Pokud je rychlost šíření v novém prostředí vyšší než ta původní, lomí se paprsek od kolmice ke styčné ploše prostředí. Přesáhne-li však úhel dopadu jistou hodnotu (mezní úhel), paprsek se neláme a dochází k úplnému odrazu. V tuhých látkách už takto popsané zákonitosti nefungují a konstrukce drah lomu či odrazu jsou velice komplikované [7].

Jako odlišné prostředí fungují i vrstvy vzduchu s různou teplotou. Jak lze vidět na Obr. 2.5, lom zvukového paprsku nastává od teplejších vrstev do těch chladnějších. Děje se tak jak v uzavřených, tak v otevřených prostředích [7].



Obr. 2.5 Lom zvukového paprsku vlivem různých teplotních vrstev vzduchu [7]

2.3.4 POHLČENÍ

Šířící se akustická vlna má určitou energii. Vzhledem k zákonu zachování energie je zřejmé, že tato energie se nemůže nijak ztratit, pouze přeměnit do jiné formy. Pohlcováním zvuku máme na mysli právě tuto přeměnu energie akustické do formy energie jiné, v praxi však nejčastěji do formy energie tepelné [9], [18], [19], [20].

Schopnost látky pohltit akustickou energii vlny je určena **činitelem zvukové absorpce** α [-]. Je definován jako poměr pohlcené (absorbované) akustické energie určitou plochou ku energii dopadající akustické vlny na tuto plochu. Nemá jednotku a nabývá tedy hodnot od 0 do 1 [18]. Je zřejmé, že činitel zvukové absorpce souvisí s činitelem zvukové odrazivosti (viz kap. 2.3.1), a to tak, že platí [18]:

$$\alpha + \beta = 1 \quad (18)$$

Tedy dokonale absorbující materiály mají $\alpha = 1$ a $\beta = 0$. Naopak dokonale odrazivé materiály mají $\beta = 1$ a $\alpha = 0$.

Tyto dva parametry závisí zejména na druhu materiálu a jeho tloušťce. Kromě toho má na tyto veličiny také velký vliv i frekvence dopadajícího akustického vlnění [18].

Při dopadu na pevnou překážku (zvuk-pohltivý materiál) lze způsob přeměny energie rozdělit na tři druhy [9]:

- přeměna třením
- přeměna poklesem akustického tlaku
- přeměna nepružnou deformací těles

PŘEMĚNA TŘENÍM

Tato přeměna nastává, pohybují-li se vzduchové částice podél nějaké plochy. Čím je tato plocha větší, tím je větší i množství přeměněné energie, proto se pro tyto aplikace používají látky s porézní strukturou. Plocha těchto pórů je značná a napomáhá k absorpci zvuku [9].

Tyto akustické obaly, jsou-li tvaru desky nebo stěny, se mají tendenci po dopadu akustické vlny rozkmitat. Toto mechanické kmitání se projeví vznikem nových akustických vln vyzařovaných za touto překážkou. Podíl této „nové“ akustické energie je však malý a značná část energie akustické vlny se při dopadu na takovou překážku mění na energii tepelnou [9]. Principu absorpce akustické energie lze však využít znovu, a to tak, že energie nově vyzářené akustické vlny se opět mění v energii tepelnou vlivem vnitřního tření v pórech zvuk-pohltivého materiálu, který je umístěn za takovouto stěnou či deskou [9].

PŘEMĚNA POKLESEM AKUSTICKÉHO TLAKU

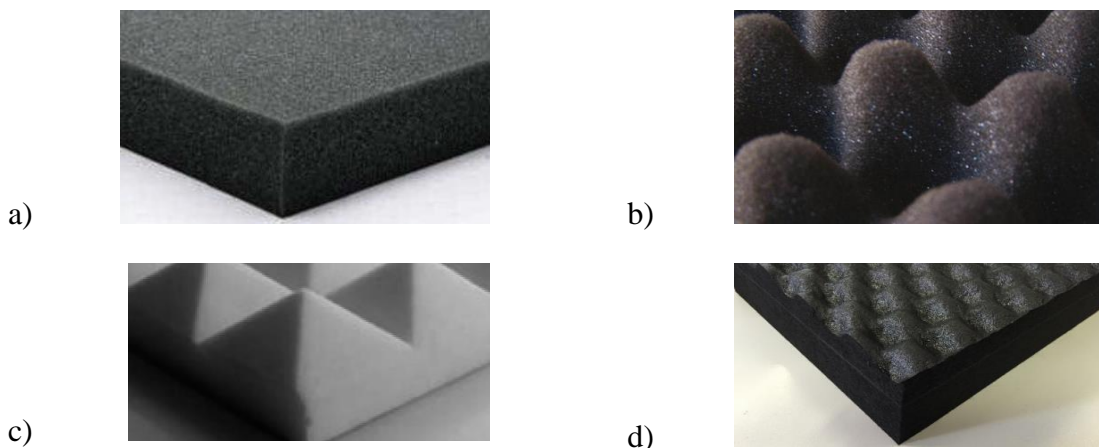
Jak bylo uvedeno v kap. 2.2.1, při šíření akustické vlny vznikají místa s minimem a maximem akustického tlaku. Právě tyto minima akustického tlaku způsobené zředěním částic mají za následek pokles potenciální energie, což vede i k poklesu energie akustické vlny [9].

PŘEMĚNA NEPRUŽNOU DEFORMACÍ TĚLES

Tato přeměna nastává u látek vykazujících tzv. pružnou hysterizi, tedy neschopnost takových látek vrátit se po stlačování silou do původního stavu i po tom, co síla přestane působit. Energie vynaložená na stlačení takové látky je tedy vyšší než práce získaná pružností látky při návratu do původního stavu. Rozdíl těchto energií představuje úbytek energie akustické [9].

2.4 AKUSTICKY POHLTIVÉ MATERIÁLY

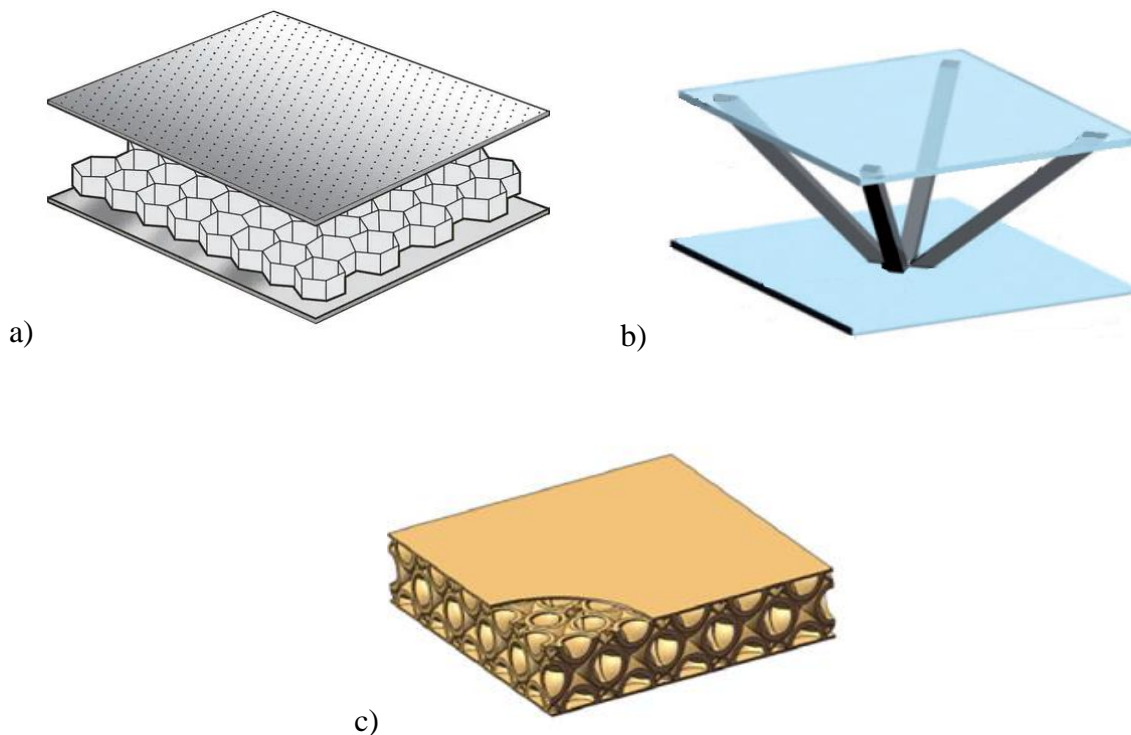
Akusticky pohltivých materiálů existuje velké množství, liší se však vhodností své aplikace. Mezi ty nejrozšířenější patří např. akustické pěny, polymerové pěny, minerální vaty, molitan, sklolaminát, sádrokarton, překližka, či různé druhy akustických nátěrů a tmelů [10]. Velice rozšířené jsou pěny z polymerů, přičemž každý výrobce má svoje exaktní složení, čímž se od sebe jednotlivé pěny liší, a díky čemuž jich je na trhu velké množství. Výběr z portfolia firmy 2B Resine lze vidět na Obr. 2.6.



Obr. 2.6 Akusticky pohltivé materiály z portfolia firmy 2B Resine: a) AIRPREN (polyester + polyuretan), b) ROCKFONIK (polyester + polyuretan), c) BASFON PIRAMIDALE (melamin), d) FIBERFON (polyester) [11]

V praxi díky své využitelnosti mezi ty nejpoužívanější však patří sendvičové panely. Tyto panely se skládají ze tří vrstev. Po stranách jsou umístěny dvě tenké nosné vrstvy (často z tenkého plechu či překližky), díky čemuž mají tyto panely samonosnou konstrukci a snadněji se s nimi manipuluje. Uprostřed se pak nachází jádro o nízké hustotě a často s pórovitou strukturou. Toto jádro má hlavní vliv na akustické vlastnosti celého panelu. Existuje mnoho variant jádra panelu, nejčastěji se od sebe liší použitým materiálem (molitan, minerální vata, polystyren apod.) či geometrií jádra (viz dále). Díky takovéto konstrukci je docíleno požadovaných akustických vlastností, při zachování nízké hustoty (a tím hmotnosti) a samonosné konstrukce, což je výhodné při skládání těchto panelů do sestav; a také tato konstrukce poskytuje ideální mechanické vlastnosti [12].

Kromě klasických variant jádra, kdy je použitým materiálem např. vrstva molitanu či minerální vlny, se v posledních letech často experimentuje s panely, které mají jádra tvarově komplikovanější. Mezi tyto patří např. jádra ve tvaru včelích úlů (Obr. 2.7 a)), pyramidových struktur (Obr. 2.7 b)), hemisfér (Obr. 2.7 c)), či jsou tyto jádra tvořena dvěma různými materiály, jejichž objemová koncentrace se mění po šířce jádra. Velkou výhodou je zde široká škála použitelnosti pro různé aplikace, protože akustické vlastnosti daného panelu lze velice snadno měnit jednoduchými modifikacemi geometrie jádra (to je nejčastěji vyrobeno 3D tiskem) [13], [14], [15], [16].



Obr. 2.7 Sendvičové struktury s různými druhy jádra: a) jádro ve tvaru včelích úlů [17], b) jádro ve tvaru pyramidových struktur [14] (upraveno), c) jádro ve tvaru hemisfér [15]

2.5 KMITOČTOVÁ PÁSMA

Akustické veličiny jsou zpravidla silně závislé na frekvenci. Z toho důvodu, že určovat akustické veličiny pro kmitočty s krokem 1 Hz, by bylo velice pracné, zavádí se tzv. kmitočtová pásma. Ty jsou charakteristické svou střední frekvencí a krajními mezemi. Nejčastěji se používají dva základní typy. První typ využívá konstantní šířku pásma (např.

100 Hz) nezávisle na hodnotě střední frekvence, což je v praxi většinou nevhodné. Druhý typ využívá procentuálně konstantní šířku pásma, tedy šířka pásma se zvětšuje s rostoucí střední frekvencí. Mezi pásma tohoto typu patří pásma oktávové a pásma třetinooktávové [5], [8].

2.5.1 OKTÁVOVÉ KMITOČTOVÉ PÁSMO

Oktávové pásmo neboli oktáva (viz Obr. 2.8), je charakterizováno svými krajními (mezními) frekvencemi. Vždy platí, že [5]:

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \quad (19)$$

kde f_2 [Hz] je horní mez frekvenčního pásma, f_1 [Hz] je spodní mez frekvenčního pásma

Střední frekvence frekvenčního pásma f_m [Hz] jsou standardně zaokrouhleny a normovány dle ČSN 35 6870 a platí, že [8]:

$$f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad (20)$$

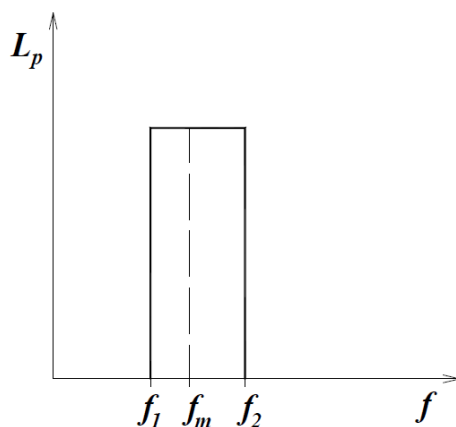
Vzhledem k tomu, že normovány jsou střední frekvence, je obvykle potřeba zjistit krajní frekvence (horní a spodní mez). Úpravou předchozích výrazů je lze určit následovně [8]:

$$f_1 = \frac{f_m}{\sqrt{2}} \quad (21)$$

$$f_2 = f_m \cdot \sqrt{2} \quad (22)$$

Šířka pásma (oktávy) se tedy s rostoucí střední frekvencí zvětšuje dle následující rovnice [8]:

$$f_2 - f_1 = f_m \cdot \left(\sqrt{2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = \frac{f_m}{\sqrt{2}} \quad (23)$$



Obr. 2.8 Oktávové pásmo [5]

2.5.2 TŘETINOOKTÁVOVÉ FREKVENČNÍ PÁSMO

V principu má stejné využití jako pásmo oktávové, jen je menší – vznikne rozdělením oktávového pásma na třetiny (v logaritmických souřadnicích) (viz Obr. 2.9) [5]. Používá se, pokud je potřeba stanovit spektrum hladiny akustického tlaku z většího počtu pásem [8]. Platí zde, že [8]:

$$\log \frac{f_2}{f_1} + \log \frac{f_3}{f_2} + \log \frac{f_4}{f_3} = \log \frac{f_4}{f_1} = \log 2 \quad (24)$$

kde f_1 [Hz] a f_4 [Hz] jsou krajní frekvence jedné oktávy a f_2 [Hz] a f_3 [Hz] jsou krajní frekvence třetinové oktávy uvnitř této oktávy.

Odlogaritmováním a úpravou rovnice (24) lze získat zákonitost pro poměr krajních frekvencí jednotlivých třetinooktávoových pásem jedné oktávy, který je konstantní [5]:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{f_3}{f_2} = \frac{f_4}{f_3} = \sqrt[3]{2} \cong 1,26 \quad (25)$$

Úpravou předchozích vztahů lze opět získat vyjádření pro krajní meze třetinooktávoového pásma [5]:

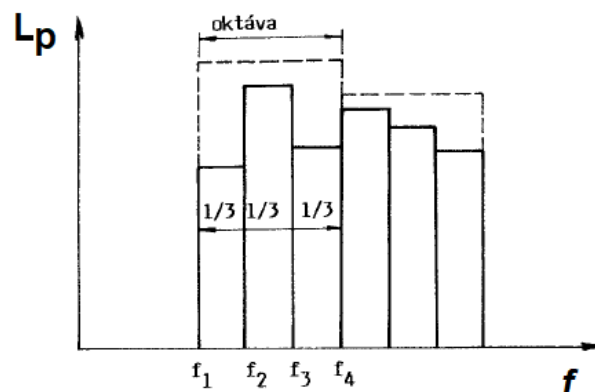
$$f_1 = \frac{f_m}{\sqrt[6]{2}} \quad (26)$$

$$f_2 = f_m \cdot \sqrt[6]{2} \quad (27)$$

A obecně lze zapsat závislost pro dvě střední frekvence dvou po sobě následujících třetinooktávoových pásem [5]:

$$f_{m_{i+1}} = \sqrt[3]{2} \cdot f_{m_i} \quad (28)$$

kde $i = 1, 2, \dots, n-1$



Obr. 2.9 Třetinooktávové kmitočtové pásmo [8] (upraveno)

Ve slyšitelném spektru (25 Hz – 20 kHz) se nachází 10 oktávoových, a tedy 30 třetinooktávoových pásem. Jak již bylo zmíněné výše, střední frekvence jsou normovány dle ČSN 35 6870 a jsou uvedeny v Tab. 2.2 i s příslušnými mezními frekvencemi [5].

Tab. 2.2 Přehled oktávových a třetinooktávových pásem [5]

Střední frekvence pásma f_m [Hz]		Mezní frekvence	
oktávového	třetinooktávového	dolní f_1 [Hz]	horní f_2 [Hz]
31,5	25	22	28
	31,5	28	35
	40	35	44
63	50	44	57
	63	57	71
	80	71	88
125	100	88	113
	125	113	141
	160	141	176
250	200	176	225
	250	225	283
	315	283	353
500	400	353	440
	500	440	565
	630	565	707
1000	800	707	880
	1000	880	1130
	1250	1130	1414
2000	1600	1414	1760
	2000	1760	2250
	2500	2250	2825
4000	3150	2825	3530
	4000	3530	4400
	5000	4400	5650
8000	6300	5650	7070
	8000	7070	8800
	10000	8800	11300
16000	12500	11300	14140
	16000	14140	17600
	20000	17600	22500

3 EXPERIMENT PODLE ČSN ISO 10534

Základní charakteristikou zvuk-pohltivých materiálů je jejich činitel zvukové absorpce α (viz kap. 2.3.4). K jeho zjištění existuje několik přístupů. Tato norma popisuje měření akustické pohltivosti pomocí impedanční trubice, což je jedna ze základních metod pro jeho určování. Impedanční trubice je uzavřená trubice kruhového nebo pravoúhlého (nejčastěji čtvercového) průřezu, která má na jedné straně reproduktor a na straně druhé je umístěn vzorek zkoumaného materiálu [23].

Tento experiment je možné použít pouze pro kolmý dopad akustické vlny na zvuk pohltivý materiál, tudíž je vhodná k testování zvuk pohltivých materiálů především ve fázi jejich vývoje, popř. pro porovnávání dvou či více různých materiálů [24]. Hlavními výstupy tohoto experimentu jsou určení činitele zvukové absorpce α , činitele odrazu r a povrchové impedance Z (popř. admitance Y) zkoumaných materiálů a obkladů [24].

Mezi nejznámější výrobce těchto zařízení patří např. dánská společnost Brüel & Kjær zabývající se vývojem a výrobou techniky pro měření v oblasti vibrací a hluku. V praktické části této práce bude však použita impedanční trubice, kterou disponuje Ústav automobilního a dopravního inženýrství (ÚADI) VUT FSI v Brně. Návrh a zhotovení tohoto zařízení byli předmětem diplomové práce studentky ÚADI, kdy bylo snahou vyrobit a otestovat zařízení, které by pro určité aplikace dokázalo dosahovat kvalit komerčně dostupných zařízení při značném poklesu celkových nákladů, viz [26].

Měření zvuk-pohltivých vlastností pomocí impedanční trubice a jejich vyhodnocování je popsáno výše zmiňovanou normou. Ta je rozdělena na dvě hlavní části, které se liší principem měřicí metody. Mezi tyto metody patří:

- metoda poměru stojaté vlny
- metoda přenosové funkce

3.1 METODA POMĚRU STOJATÉ VLNY

Principem je umístění vzorku do jednoho konce rovné, tuhé a hladké impedační trubice. Reproktorem je buzena akustická sinusová vlna, která dopadá na zkoumaný vzorek na opačné straně trubice, od kterého se část vlny odráží a část je absorbována. Superpozicí buzené a odražené vlny vzniká v trubici stojatá vlna. K vyhodnocení je potřeba za pomoci mikrofonové sondy změřit hodnoty amplitudy akustického tlaku v tlakových minimech p_{min} a v tlakových maximech p_{max} . Tyto hodnoty dostačují ke zjištění činitele zvukové absorpce α [24].

Je známo, že [24]:

$$s = \frac{|p_{max}|}{|p_{min}|} \quad (29)$$

kde s [-] je poměr stojaté vlny, p_{min} je amplituda akustického tlaku v tlakovém minimu a p_{max} je amplituda akustického tlaku v tlakovém maximu

$$|r| = \frac{s - 1}{s + 1} \quad (30)$$

kde r [-] je činitel odrazu

Z těchto znalostí jsme již schopni vypočítat činitel zvukové absorpce α pro rovinné vlny [24]:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (31)$$

V případě, že je akustický tlak uvnitř trubice měřen v logaritmickém měřítku (v dB) a rozdíl hladin mezi tlakovým maximem a tlakovým minimem je ΔL , pak pro výpočet poměru stojaté vlny platí, že [24]:

$$s = 10^{\frac{\Delta L}{20}} \quad (32)$$

A pro činitel zvukové absorpce potom platí [24]:

$$\alpha = \frac{4 \cdot 10^{\frac{\Delta L}{20}}}{(10^{\frac{\Delta L}{20}} + 1)^2} \quad (33)$$

3.2 METODA PŘENOSOVÉ FUNKCE

Tak jako v předchozím případě se do jednoho konce trubice umístí vzorek zkoumaného materiálu a do druhého konce zdroj zvuku (nejčastěji náhodný signál, pseudonáhodný sled nebo přeladovaný tón). Akustický tlak se potom měří ve dvou místech po délce trubice. Tímto postupem lze určit komplexní akustickou přenosovou funkci dvou mikrofonních signálů a ta se dále použije k výpočtu komplexního činitele odrazu pro kolmý dopad, činitele zvukové absorpce pro kolmý dopad a akustické impedance vyšetřovaného vzorku. Toto měření lze provést dvěma způsoby [25]:

- metoda dvou mikrofonů (dva mikrofony v pevných místech)
- metoda jednoho mikrofonu (jeden mikrofon, který je přemísťován)

Tato metoda je alternativou metody předchozí, obecně je však považována za rychlejší, než metoda zmíněná v kap. 3.1 [25].

Výsledný vztah pro určení činitele zvukové absorpce je v podstatě stejný jako v předchozím případě, tedy [25]:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (34)$$

kde r je činitel odrazu, r_r je reálná složka činitele odrazu, r_i je imaginární složka činitele odrazu

3.3 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

V následující kapitole bude popisováno měřicí zařízení pro metodu stojaté vlny, protože pro tuto metodu měření byla později použitá impedační trubice navržena a konstruována [26]. Měřicí zařízení pro zhotovení experimentu metodou poměru stojaté vlny vychází z normy ČSN ISO 10534-1, která mimo jiné popisuje měřicí aparaturu, přičemž určuje náležitosti jednotlivých komponent, které je nutné dodržet, případně určuje různá doporučení, kterých je vhodné se držet. Mimo to budou v jednotlivých bodech popsány konkrétní měřicí pomůcky, které vychází ze zmiňované diplomové práce ([26]).

Měřicí zařízení se tedy skládá z impedanční trubice, držáku vzorku zkoumaného materiálu, mikrofону a mikrofonní sondy, zařízení pro pohyb a umístění sondy, zařízení ke zpracování mikrofonního signálu, reproduktoru, generátoru signálu, uzávěru impedační trubice a teploměru [24].

Před samotným měřením musí proběhnout řada zkoušek jednotlivých komponent pro zajištění jejich správného fungování a vyloučení případných chyb. Postupy těchto zkoušek jsou taktéž uvedeny v příslušné normě [24].

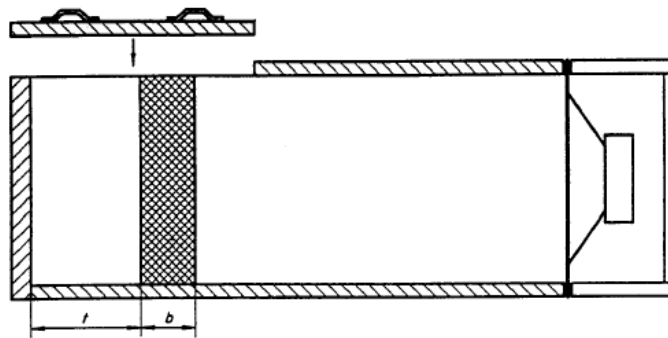
3.3.1 IMPEDANČNÍ TRUBICE

Klade se důraz na rovinnost, tuhost, hladkost povrchu a na konstantní průřez po celé délce (dovolená je odchylka 0,2 %). Stěny nesmí ve zkušebním úseku obsahovat díry či štěrby. Doporučovaný materiál stěny je kov, popř. pevný a hlazený beton (pro trubice velkých průměrů). Stěny nesmí být při zkoušení rozkmitávány, aby nehrozila jejich rezonance. Tvar průřezu je libovolný, doporučuje se však průřez kruhový, či pravoúhlý (nejlépe čtvercový). Pro trubice kruhového průřezu se doporučuje tloušťka stěn cca 5 % příčného rozměru, u pravoúhlých 10 % [24].

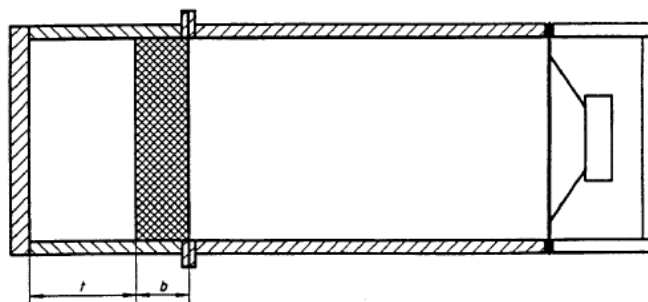
Pro pozdější měření bude použito, jak již bylo avizováno na začátku kap. 3, impedační trubice, kterou disponuje ÚADI FSI VUT (viz [26]). Pracovní úsek této trubice je dlouhý 2 m a pracovní frekvenční rozsah byl určen jako 141 Hz až 2621 Hz [26].

3.3.2 DRŽÁK VZORKU

Držák může být do trubice buď zabudován (viz Obr. 3.1) nebo tvoří samostatnou část, která je pevně spojena s koncem trubice (viz Obr. 3.2) [24].



Obr. 3.1 Zabudovaný odnímatelný držák [24]



Obr. 3.2 Držák tvořící samostatnou oddělitelnou část [24]

Po instalaci držáku je nutné, aby za ním zůstal dostatečně velký vzduchový polštář [24].

Jedná-li se o držák vyobrazený na obr. 3.2, musí jeho vnitřní rozměry souhlasit s rozměry trubice, dovolená odchylka je 0,2 %. Připevnění k trubici musí být pevné (např. pomocí vazelíny) [24].

U použité trubice je držák vzorku dlouhý 1 m a je k impedační trubici připevněn pomocí přírub, se kterými je trubice spojena čtyřmi šrouby [26]. Toto uspořádání respektuje provedení uvedeno na Obr. 3.2.

3.3.3 MIKROFON

Musí být umístěn pohyblivě (popř. pouze sonda) a slouží ke snímání obrazce stojaté vlny uvnitř impedační trubice ke zjištění poloh tlakových minim a amplitud akustického tlaku v maximech a minimech této stojaté vlny [24].

Pokud se mikrofon pohybuje vně impedační trubice, je k němu upevněna sondážní trubka s otvorem pro snímání zvuku, popř. se přímo samotný pohyblivý mikrofon přemísťuje uvnitř trubice. Je třeba zabránit buzení mikrofonu vibracemi konstrukce, protože je obtížné takové buzení kontrolovat [24].

V použité trubici bude užito mikrofonu s označením EMM-7101-CHTB od firmy iSEMcon [26]. Jeho specifikace jsou uvedené v produktovém listě, viz [27].

TRUBKOVÁ MIKROFONNÍ SONDA

Musí být kovová, o dostatečné tloušťce stěn, aby do ní nepronikalo zvukové pole. Pokud je impedanční trubice vodorovná, musí být trubka sondy podepřena, kvůli eliminaci jejího průhybu. Tyto podpěrky se nesmí nacházet blízko otvoru pro snímání zvuku. Ve svislé impedanční trubici může trubka sondy volně viset [24].

Je třeba dbát na to, aby se impedační trubice a trubka sondy mechanicky nestýkaly. To by mohlo vnášet do trubky vibrace, zvláště pak u otvoru, kterým trubka ústí do trubice. Zde se doporučuje sondu podložit měkkým pěnovým materiálem [24].

3.3.4 ZAŘÍZENÍ PRO POHYB A UMISŤOVÁNÍ MIKROFONU (SONDY)

Mělo by zajišťovat jak samotný pohyb, tak čtení současné polohy, což by mělo být umožněno s přesností $\pm 0,5$ mm. Tato tolerance se může lineárně zvyšovat s klesající frekvencí vlny (od 300 Hz k 50 Hz až k toleranci ± 2 mm). Tolerance musí být dodržena v obou směrech pohybu sondy [24].

V použité trubici se mikrofon pohybuje připevněný na konci sondy, která se uvnitř trubice pohybuje přes držák reproduktoru pomocí kolečka vedeného v kolejnici tvaru U [26].

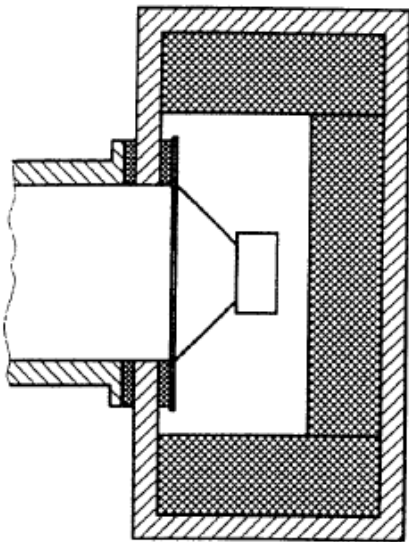
3.3.5 ZAŘÍZENÍ PRO ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU

Skládá se ze zesilovače, filtru, měřidla akustického tlaku (popř. hladiny akustického tlaku vztaženého k referenční hodnotě) a přednostně plynulého zapisovače obrazce stojaté vlny. Filtr musí zajistit, aby po umístění mikrofonu (nebo sondy) do tlakového maxima byli šum a obsah harmonických v signálu alespoň 50 dB pod základní frekvencí [24].

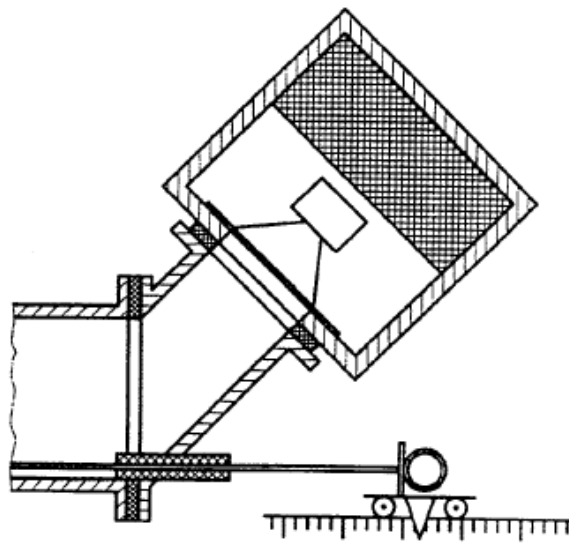
3.3.6 REPRODUKTOR

Nejčastěji se používá membránový reproduktor, který funguje jako uzávěr impedační trubice na opačném konci, než je držák zkušební vzorku. Plocha membrány musí pokrývat alespoň dvě třetiny celkového průřezu impedační trubice. Reproduktor může být umístěn třemi různými způsoby [24]:

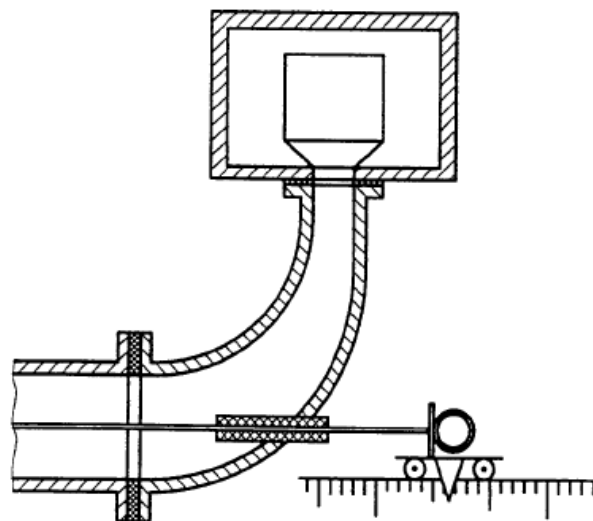
- osa reproduktoru a osa trubice je shodná (Obr. 3.3)
- osa reproduktoru je od osy trubice odkloněná (Obr. 3.4)
- osa reproduktoru přechází do trubice kolenem - snadnější zavedení sondy (Obr. 3.5)



Obr. 3.3 Osa reproduktoru souběžná s osou trubice [24]



Obr. 3.4 Osa reproduktoru odkloněná od osy trubice [24]



Obr. 3.5 Reproduktor připojený k trubici kolenem [24]

Reproduktor musí být zabudován do zvukově izolované skříně, aby se zvuk přímo nepřenášel do mikrofonu. Mezi reproduktorovou skříň a trubici z jedné strany a koš reproduktoru z druhé strany se musí vložit izolační těsnění k zabránění buzení trubice zvukem šířeným konstrukcí [24].

V použité trubici bude použitý reproduktor Monacor SPH-75/8 [26]. Jeho specifikace jsou uvedeny v produktovém listě, viz [28]. Reproduktor je k tělu trubice připevněn pomocí kolena pod úhlem 30° . Přes koleno vede dovnitř trubice sonda držící mikrofon [26]. Koleno je uzavřeno krytem připevněným pomocí sedmi šroubů [26].

3.3.7 GENERÁTOR SIGNÁLU

Skládá se z generátorů sinusových vln, výkonového zesilovače a čítače kmitů. Přesnost naladění a čtení musí být lepší než 2 %, což platí i pro neřízené kmitočtové změny během měření [24].

V našem případě bude použito zařízení Phon-X, pomocí kterého bude generován harmonický signál. Frekvence signálu, stejně jako ostatní parametry, budou nastavovány pomocí softwaru m+p Analyzer [26].

3.3.8 REPRODUKTOROVÝ UZÁVĚR

V případě, že je mechanická impedance membrány reproduktoru vysoká, může uvnitř trubice docházet k rezonanci vzduchového sloupce, což povede k rušení, protože hladina akustického tlaku se při rezonancích bude silně měnit. Tomuto lze zabránit tím, že se dovnitř trubice před reproduktor umístí porézní absorpční obklad [24].

Řešení uzávěru viz kap. 3.3.6.

3.3.9 TEPLOMĚR

Vzhledem k tomu, že rychlost šíření zvuku c a s tím spojená vlnová délka λ jsou závislé na teplotě prostředí, kterým vlnění prostupuje (viz kap. 2.1), je nutné teplotu uvnitř trubice měřit a udržovat s tolerancí ± 1 K [24].

4 EXPERIMENT PODLE ČSN EN ISO 354

Tato norma popisuje další z možností měření zvukové pohltivosti materiálů. Pokud zdroj zvuku působí v uzavřené místnosti (prostoru), jsou hladina akustického tlaku v tomto prostoru a doznívání tohoto zvuku po vypnutí zdroje dány zvuk-pohltivými vlastnostmi materiálů, které obklopují stěny tohoto prostoru; vzduchu vyplňujícího tento prostor a předmětů (překážek) v tomto prostoru [29].

Metoda představuje měření v difuzním poli, tedy v takovém prostoru, kdy je akustická intenzita nezávislá na místě v tomto prostoru. Dopad zvuku na povrch prostoru se označuje jako dopad náhodný [23], [29].

Podstatou této metody je změření průměrné doby dozvuku určitého zvukového signálu uvnitř dozvukové místnosti, a to jak s namontovaným zkušebním vzorkem, tak bez něj. Pomocí těchto dob dozvuku se použitím tzv. Sabineových rovnic vypočítá ekvivalentní plocha A_T [m^2] zkušebního vzorku, která bude použita dále k výpočtu činitele zvukové absorpce [29].

Pro měření v dozvukové místnosti se uplatňují dvě metody: metoda přerušného šumu a metoda integrované impulsové odezvy.

Výstupem experimentu je číselný faktor zvukové absorpce pro všesměrový dopad akustické vlny, tudíž je tato metoda vhodná pro přímé zjišťování této veličiny.

4.1 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ

4.1.1 DOZVUKOVÁ MÍSTNOST

Objem dozvukové místnosti by měl být alespoň $150 m^3$, ideálně $200 m^3$ a zároveň by neměl přesáhnout $500 m^3$, protože by zde pohltivost ve vzduchu, obzvláště na vysokých frekvencích, ovlivňovala měření [29].

4.1.2 ZKUŠEBNÍ VZOREK

Každý vzorek zkoumaného materiálu musí mít plochu 10 až $12 m^2$. Pokud se objem dozvukové místnosti liší od ideální hodnoty ($200 m^3$), zvyšují se hodnoty plochy vzorku činitelem $(V/200)^{2/3}$, kde $V [m^3]$ je objem dozvukové místnosti. Přesná hodnota plochy vzorku by měla vycházet z velikosti zkušební místnosti, tedy větší místnost – větší plocha vzorku [29].

Tvar by měl být pravoúhlý s poměrem stran 0,7:1. Žádná jeho část by neměla být umístěna blíže než 1 m ke stěně místnosti, minimálně však 0,75 m [29].

4.1.3 KLIMATICKÉ PODMÍNKY

Jak bylo zmíněno již dříve, teplota, a také relativní vlhkost prostředí, ve kterém měření probíhá, má velký vliv na rychlost zvuku c , a tím pádem i na měřené doby dozvuku. Snahou je provést měření v prázdné místnosti a v místnosti se vzorkem za co nejbližších podmínek, co se teploty a relativní vlhkosti týče. Relativní vlhkost by v každém případě neměla jít pod 30 % a překročit 90 %. Teplota by neměla jít pod $15 ^\circ C$ [29]. Obsahem normy jsou dále i korekce, které je nutno použít na základě konkrétních klimatických podmínek.

Testovaný vzorek by měl před měřením uvnitř místnosti být dostatečně dlouho, aby se vyrovnaly hodnoty teploty a vlhkosti vzorku s podmínkami uvnitř místnosti [29].

4.1.4 MIKROFONY

Musí mít všesměrovou charakteristiku. Míst mikrofonu musí být víc, minimálně tři. Jednotlivá místa od sebe musí být vzdálena alespoň 1,5 m, od zdroje pak 2 m a od povrchu místnosti a od zkušebního vzorku 1 m [29].

4.1.5 ZDROJE

Zvuk musí být buzen zdrojem se všesměrovým vyzařovacím diagramem. Míst zdroje musí být víc, minimálně dvě. Kombinací mikrofon/zdroj musí pak být nejméně 12. Jednotlivá místa zdrojů od sebe musí být vzdálena alespoň 3 m [29].

4.2 METODA PŘERUŠOVANÉHO ŠUMU

Výstupem metody je dozvuková křivka (grafické znázornění poklesu hladiny akustického tlaku v uzavřeném prostoru v závislosti na čase po vypnutí budícího zdroje), která je výsledkem statistického procesu, tedy průměrováním několika dozvukových křivek změřených pro jednu konfiguraci mikrofon/reproduktor, což je nezbytné k docílení vyhovující opakovatelnosti [29].

Doba, po kterou je signál buzen, musí být dostatečně dlouhá, aby předtím, než se signál vypne, byla vytvořena ustálená hladina akustického tlaku ve všech uvažovaných kmitočtových pásmech. Pro dosažení ustáleného stavu je vhodné, aby se doba buzení rovnala nejméně polovině předpokládané doby dozvuku [29].

Pro dostatečnou opakovatelnost a pro maximální potlačení nejistoty měření je vhodné, aby počet průměrů několika měření uskutečněných v jedné konfiguraci mikrofon/zdroj byl nejméně 3 (v případě snahy přiblížení se opakovatelnosti metody integrované impulsové odezvy by jich mělo být alespoň 10) [29].

Při průměrování dozvukových křivek se uplatňuje vzorec [29]:

$$L_p(t) = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{pn}(t)}{10}} \right] \quad (35)$$

kde $L_p(t)$ [dB] je hladina průměrného akustického tlaku v čase t [s] vypočítaná pro celkový počet N [-] poklesů a $L_{pn}(t)$ [dB] je hladina akustického tlaku n -tého poklesu v čase t

Ze znalosti průběhu akustického tlaku v závislosti na čase je pak potřeba zjistit příslušné doby dozvuku T [s], tedy doby, během které po vypnutí zdroje došlo k poklesu hladiny akustického tlaku o 60 dB.

4.3 METODA INTEGROVANÉ IMPULSOVÉ ODEZVY

4.3.1 PŘÍMÁ METODA

V tomto případě může být impulsová odezva vyhodnocena ihned po užití zdroje impulsu, jako je např. výstřel z pistole, prasknutí balónu, či jiskrový výboj. Podmínkou je, aby měl zdroj tohoto impulsu dostatečnou šířku pásma a energii [29].

4.3.2 NEPŘÍMÁ METODA

V případě použití této metody se místo přímých zdrojů impulsů použije speciální zvukový signál, který dává impulsovou odezvu pouze po speciálním zpracování určitého mikrofonního signálu. Tento postup má za následek zlepšení odstupu signálu od šumu. Díky tomuto jsou dynamické nároky na zdroj signálu značně nižší než ty, které jsou potřeba v případě metody přímé. Signály jsou generovány přístroji, ke kterým se buď připojuje vnější technické a programové vybavení, nebo je toto vybavení součástí měřicího přístroje [29].

4.3.3 PŘIJÍMACÍ ŘETĚZEC

Skládá se z mikrofону, zesilovače, popř. přídavného přístroje k digitalizaci zaznamenaného signálu a ke zpracování dat, včetně integrace impulsově odezvy a vyhodnocení dozvukové křivky. V případě nepřímé metody bude přijímací řetězec obsahovat také technické a programové vybavení pro zpracování impulsově odezvy ze zaznamenaného signálu, a také pro generování zkušebního signálu [29].

Impulsová odezva musí být filtrována po třetinooktávových pásmech. Tato filtrace může být provedena buď před nebo po její digitalizaci, v každém případě před její integrací. Používají se jak analogové, tak digitální filtry [29].

4.3.4 VLASTNÍ INTEGRACE IMPULSOVÉ ODEZVY

Po filtrování se impulsová odezva integruje zpětně. Teoreticky by se výsledky měly shodovat s výsledky získané metodou poměrného šumu. Komerční systémy zpravidla nabízejí zabudované nástroje k provedení této integrace, proto není nutné, aby uživatel integraci sám programoval. Vlastní výpočet je poměrně komplikovaný a je podrobně popsán v příslušné normě. Výstupem tohoto výpočtu je opět doba dozvuku T , která bude potřeba pro další výpočet [29].

4.4 POSTUP VÝPOČTU

4.4.1 DOBY DOZVUKU

Následující postup se používá pro obě výše zmiňované metody. Prvotními vstupy do výpočtu jsou tedy zjištěné doby dozvuku T . Doba dozvuku místnosti se v každém kmitočtovém pásmu vyjádří aritmetickým průměrem z celkového počtu měření doby dozvuku v příslušném kmitočtovém pásmu. Měření a výpočet je proveden jak pro prázdnou místnost, tak pro místnost se zkušebním vzorkem, zjistí se tedy doby dozvuku T_1 a T_2 , příslušně. Tyto doby dozvuku se vyjadřují na nejméně dvě desetinná místa [29].

4.4.2 EKVIVALENTNÍ POHLTIVÉ PLOCHY

EKVIVALENTNÍ POHLTIVÁ PLOCHA A_1 PRÁZDNÉ DOZVUKOVÉ MÍSTNOSTI

$$A_1 = \frac{55,3V}{cT_1} - 4Vm_1 \quad (36)$$

kde V [m^3] je objem prázdné dozvukové místnosti, c [m/s] je rychlost šíření zvuku ve vzduchu, T_1 [s] je doba dozvuku prázdné dozvukové místnosti a m_1 [m^{-1}] je součinitel útlumu ve vzduchu pro podmínky při měření bez vzorku, přičemž ten lze vypočítat jako: $m = \frac{\alpha_v}{10 \log(e)}$, kde α_v [m^{-1}] je součinitel útlumu způsobeného pohlcováním v atmosféře pro čisté tóny [29].

EKVIVALENTNÍ POHLTIVÁ PLOCHA A_2 DOZVUKOVÉ MÍSTNOSTI SE ZKUŠEBNÍM VZORKEM

$$A_2 = \frac{55,3V}{cT_2} - 4Vm_2 \quad (37)$$

kde V a c mají stejný význam jako v předchozím případě, T_2 [s] je doba dozvuku dozvukové místnosti s vloženým vzorkem a m_2 [m^{-1}] je součinitel útlumu ve vzduchu pro podmínky při měření s vloženým vzorkem, přičemž ten lze vypočítat stejným způsobem jako v předchozím případě [29].

EKVIVALENTNÍ POHLTIVÁ PLOCHA A_T

$$A_T = A_2 - A_1 \quad (38)$$

4.4.3 ČINITEL ZVUKOVÉ ABSORPCE PŘÍSLUŠNÉHO VZORKU

$$\alpha = \frac{A_T}{S_z} \quad (39)$$

kde S_z [m^2] je plocha pokrytá zkušebním vzorkem [29]

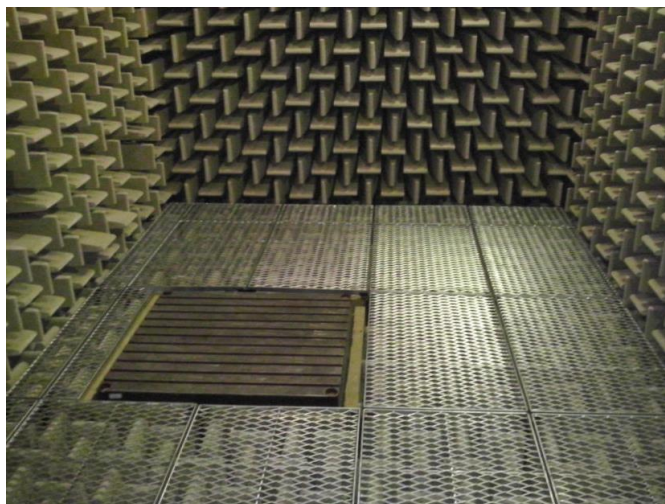
5 EXPERIMENTY UVNITŘ BEZDOZVUKOVÉ KOMORY

Další metodou zjišťování zvuk-pohltivých vlastností materiálu jsou různé experimenty uvnitř bezdozvukové komory. Tyto komory mají stěny pokryté absorpčními klíny, které hlavní část dopadající akustické energie pohltí a zbylou část odrazí do více směrů. Taková úprava stěn místnosti má dvě základní výhody [30]:

- Eliminace vnějšího hluku: měření je tímto ochráněno před vnějším hlukem (hlukem pozadí), který může výrazně zkreslovat naměřené hodnoty $SPL [dB]$ [30].
- Vznik volného akustického pole: akustická vlna se po dopadu na stěnu místnosti neodráží přímo zpět, je absorbována, nevzniká tak ozvěna a měření není ovlivněno odraženým akustickým signálem [30].

Těchto principů bude využito v praktické části této práce. Využije se následujícího přístupu: Bude vyrobeno experimentální zařízení (krabice), jehož stěny budou tvořeny akusticky pohltivými panely. Uvnitř bude umístěn všesměrový zdroj zvuku, který bude vysílat akustický signál ve formě sférických vln. Měřením hladiny akustického tlaku $SPL [dB]$ uvnitř i vně tohoto zařízení se zjistí pohltivost akustických panelů ve všech směrech, což je pro reálné aplikace výhodnější a využitelnější než měření pohltivých vlastností pouze pro kolmý dopad vlny (tak jak je tomu v případě impedanční trubice).

Pro provedení experimentu bude využito plně bezdozvukové místnosti v laboratořích ÚADI VUT FSI v Brně a postup experimentu bude blíže popsán v kapitole 8.



Obr. 5.1 Bezdozvuková komora v laboratořích ÚADI VUT FSI [31]

6 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V OBLASTI NUMERICKÝCH SIMULACÍ

Numerické simulace jsou v inženýrské praxi velice rozšířeným a dnes již nenahraditelným nástrojem. Umožňují ušetřit náklady na drahé prototypy a experimenty, popř. tyto experimenty validovat a porovnávat výsledky těchto experimentů s výsledky obdržené numerickými simulacemi.

Typů numerických analýz, stejně jako softwarů, ve kterých je možné tyto analýzy vytvářet, existuje mnoho. Nejrozšířenějšími analýzami v inženýrské praxi jsou analýzy strukturální (statické, dynamické, únavové atd.) a analýzy proudění tekutin (CFD). Vedle nich lze ale simulovat i analýzy spojené např. s problematikou akustiky, čehož bude v této práci také později využito.

Běžným jevem těchto analýz je validace proběhnutého experimentu (např. experimentu v impedanční trubici). Shodou (ne však přesnou), popř. shodou trendu výsledných dat je experiment validován a lze ho považovat za úspěšný a správně provedený. Pokud je pak potřeba, aby experiment proběhl znovu, např. s novými vzorky, lze experiment vynechat a pro získání výsledných dat rovnou použít pouze numerického modelu, což enormně šetří čas a náklady.

V následující kapitole bude představeno několik konkrétních případů experimentu z oblasti akustiky, které byly po provedení validovány numerickou simulací. Bude poukázáno na porovnání výsledků experimentálního a numerického řešení. Mimo to bude také popsáno vhodné nastavení okrajových podmínek a MKP sítě, které vede ke konvergenci řešení a k přijatelné shodě výsledků experimentu a numerické simulace, a tedy k co nejpřesnějšímu nasimulování daného problému. Z této kapitoly se později bude čerpat při tvorbě numerického modelu v kapitolách následujících.

Dále prezentované práce byly publikovány v zahraničních vědeckých časopisech a psány výhradně v angličtině, proto nebudou názvy prací překládány.

6.1 MODELING OF 3D IMPEDANCE TUBE WITH A COMPLEX TERMINATION IMPEDANCE USING FINITE ELEMENT METHOD

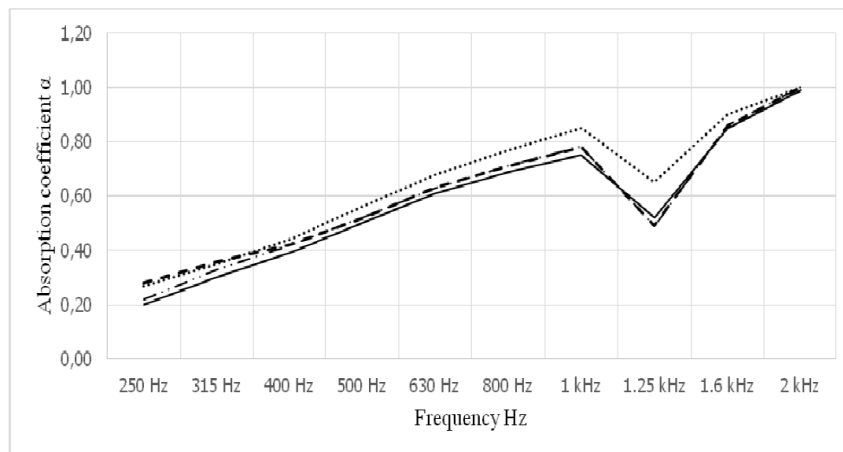
Tato práce [32] se zabývala porovnáním experimentálního a numerického přístupu při zjišťování činitele zvukové absorpce α porézních akustických materiálů. K zjištění této veličiny bylo využito impedanční trubice, ve které proběhlo měření metodou přenosové funkce s použitím metody dvou mikrofonů (viz kap. 3.2).

Autor předpokládá nižší přesnost měření v nižších frekvenčních pásmech z toho důvodu, že vzorek musí být uložen volně, a tudíž mu musí být umožněno volně vibrovat. Tyto vlastní vibrace vzorku mohou ovlivňovat měření.

Pro numerickou simulaci bylo použito softwaru ANSYS. Byla vytvořena akustická doména, tedy vnitřní objem impedanční trubice, kde se šíří akustické vlnění. Tomuto objemu musí být přiřazena hustota a rychlost zvuku. Na jedné straně trubice je testovaný vzorek a na druhé straně je zdroj zvuku modelovaný prvkem Mass Source. Po délce trubice jsou umístěny dva mikrofony, které snímají hladinu akustického tlaku v daném místě. Pomocí těchto veličin je pak vypočítán činitel zvukové absorpce α .

Autor se také věnuje citlivostní studii spojené s velikostí prvků MKP sítě. Vychází z obecné poučky, že pro nejvyšší frekvenci šíření akustických vln, a tedy pro nejkratší vlnovou délku je vhodné tuto délku vlny proložit nejméně 16 prvky, přičemž ve většině případů stačí pouze 8. Byly vytvořeny 3 modely, všechny s lineárními prvky. První model měl pro všechny frekvenční pásma stejnou velikost prvku určenou z nejvyšší frekvence, konkrétně 10 mm. Druhý model měl pro každé frekvenční oktávové pásmo vypočtenou novou nejmenší velikost prvku, která klesala s vyšší frekvencí. Třetí model uvažoval pro rychlejší konvergenci konstantní velikost v nižších frekvenčních pásmech. V těch vyšších byly použity hodnoty z modelu č. 2.

Bylo zjištěno, že nejlepší shodu s výsledky získané z experimentu se dosáhne použitím modelu č. 3, tedy bylo vhodné pro nejnižší frekvenční pásma (250–400 Hz) použít konstantní velikost prvku (velikost z modelu č. 1 zvětšena o 40 %), čehož se dosáhne rychlejší konvergence a pro vyšší frekvenční pásma (500–2000 Hz) vypočítat pro každé jedno třetinooktávové pásmo novou minimální velikost prvku. Tento model se pak experimentálními datům přibližoval nejlépe, což lze vidět na Obr. 6.1 [32].



Obr. 6.1 Porovnání experimentálního a numerického přístupu pro zjištění činitele zvukové absorpce: a) — experimentální data; b) model 1; c) --- model 2; d) -·-· model 3 [32]

6.2 EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND NUMERICAL SIMULATION OF THE ACOUSTIC WAVES PROPAGATION IN A STANDING WAVE TUBE: TESTING WITH A SAMPLE OF ROCKWOOL

V této práci [33] se autoři zabývali vlivem akusticky pohltivého materiálu na vlastní frekvence soustavy impedanční trubice. Byl proveden experiment v impedanční trubici, který byl následně simulován pomocí softwaru ANSYS.

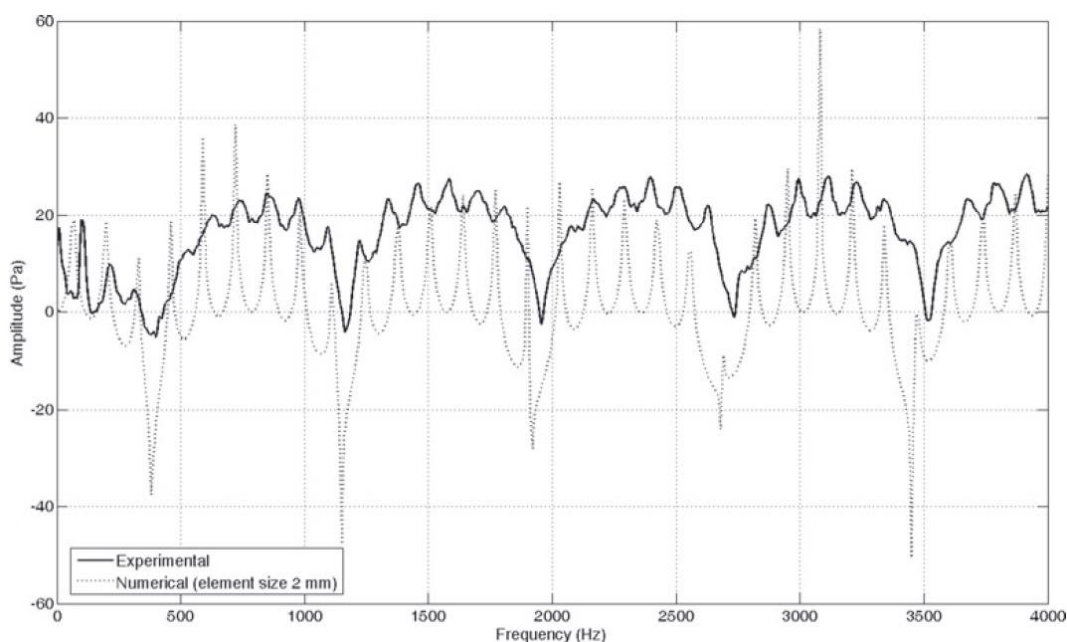
Při experimentu bylo využito metody stojaté vlny, kdy k zachycení této vlny slouží dva mikrofony v konkrétních vzdálenostech od konce trubice. Výstupem experimentu bylo určení vlastních frekvencí soustavy. Experiment proběhl nejprve s prázdnou trubicí (bez vzorku na jejím konci) a následně se vzorkem z minerální vlny. Při porovnání výsledků experimentů bez vzorku minerální vlny a s ním se zjistilo, že v nižších frekvencích nemá minerální vlna téměř žádný vliv na vlastní frekvence soustavy, ale v pásmu středních a vyšších frekvencí (což je pásmo vhodné pro použití minerální vlny jako zvuk pohltivého materiálu) jsou rozdíly ve vlastních frekvencích soustav se vzorkem a bez něj výrazné.

Jako vstup numerického modelu byla použita geometrie vnitřního objemu impedanční trubice, která musí být definována svou hustotou a rychlostí zvuku. Autoři využili geometrické symetrie, což umožnilo řešit celý problém jako dvourozměrný, a tím výrazně ušetřili výpočetní čas. Opět se použila obecná poučka ohledně velikosti MKP sítě, kdy autoři rozhodli, že nejkratší vlnovou délku stačí proložit 6 prvky, což jim pomohlo vypočítat minimální velikost prvku. Materiál akustické domény (tedy vzduch) se považuje za nestlačitelný, s konstantní hustotou. Tlumení se v modelu neuvažuje.

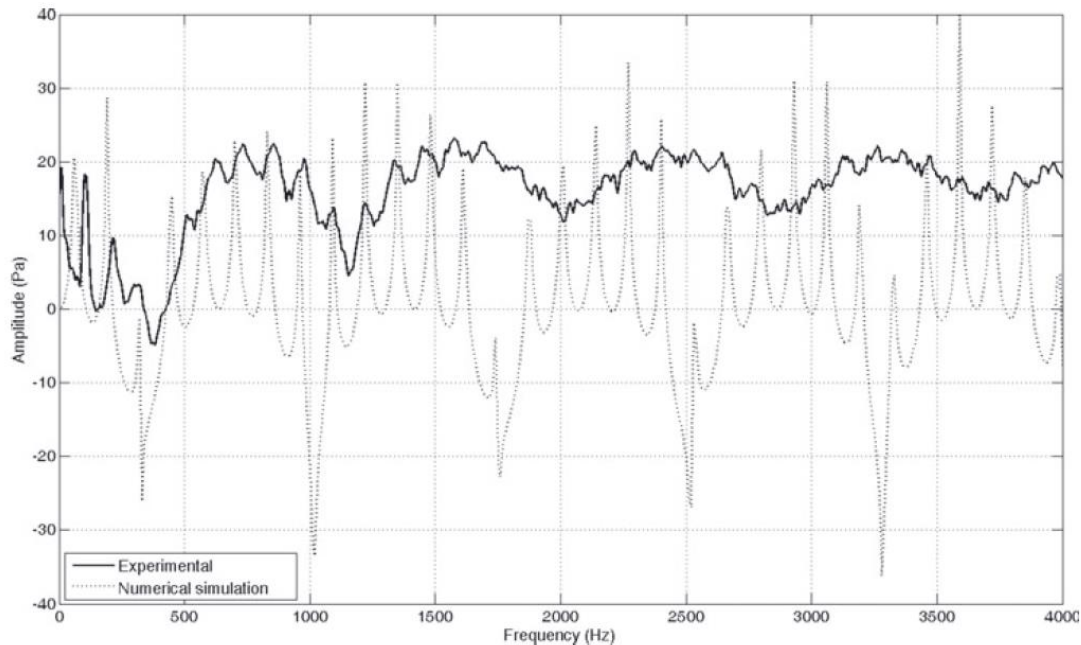
Autoři uvádí, že pro simulování trubice s akusticky pohltivým vzorkem je velice vhodné uvažovat akustický porézní materiál jako tekutinu, tedy jako akustickou doménu, stejně jako zbytek vnitřního objemu trubice, namísto simulování jej jako pevný prvek. V softwaru ANSYS existují předdefinované matematické modely vhodné pro řešení akusticky pohltivých vlastností porézních materiálů (dále jen disipační modely) (Delany-Bazley, JCA, Miki atd.), kdy každý z nich vyžaduje jiné vstupy. Pro řešení byl zde vybrán model Delany-Bazley.

V závěru jsou porovnány oba přístupy určení vlastních frekvencí soustavy (Obr. 6.2 a Obr. 6.3). Jsou znát určité rozdíly, ale trendy výkyvů a poklesů lze sledovat u obou přístupů stejné. Tyto rozdíly jsou dle autorů způsobeny zejména tím, že numerický model neuvažuje tlumení, zatímco v experimentu je vždy určité tlumení zahrnuto. Další odchylky jsou způsobeny nedokonalým povrchem vzorku při experimentu (numerický přístup uvažuje dokonale hladký povrch), rozdílnou hustotou (uvažovanou a skutečnou) či uvažováním konstantní rychlosti zvuku apod.

Z výsledků je dále patrné, že v nižších frekvencích se výsledky obou přístupů častěji shodují, tudíž v těchto oblastech lze uvažovat lepší využití modelu. Je demonstrováno, že tento numerický model (a akustické numerické analýzy obecně) lze v každém případě využít pro tuto problematiku, zejména pak při studiu a porovnávání vlastností nových zvuk pohltivých materiálů, problémem však může být zjišťování vstupních veličin, které přednastavené modely vyžadují.



Obr. 6.2 Vlastní frekvence soustavy s uzavřenou trubicí bez vzorku:
a) — experimentální data, b) ··· data získaná numerickou simulací [33]



Obr. 6.3 Vlastní frekvence soustavy se vzorkem minerální vlny:
a) — experimentální data, b) data získaná numerickou simulací [33]

6.3 STUDY OF SOUND ABSORPTION PROPERTIES ON RIGID POLYURETHANE FOAMS USING FEA

Předmětem této práce [34] bylo opět zjistit činitel akustické absorpce α pomocí experimentálního a numerického přístupu. Zkoumala se polyuretanová pěna (molitan). Výsledky obou přístupů byly potom porovnány.

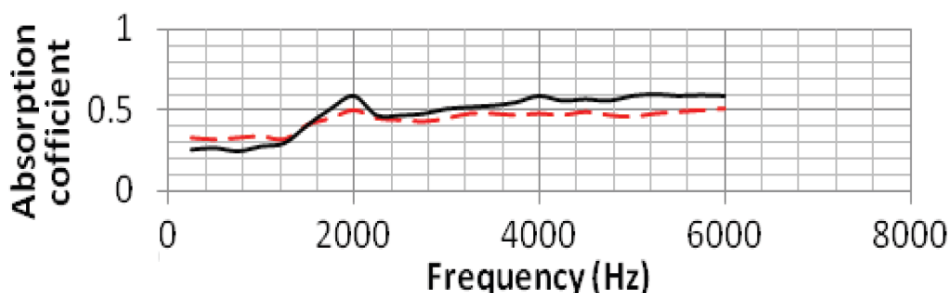
Experiment probíhal v impedanční trubici, kde bylo využito opět metody přenosové funkce s použitím dvou mikrofónů (viz kap. 3.2). Autoři předpokládají (stejně jako v kap. 6.1), že v nižších frekvencích měření nebude přesné opět z toho důvodu, že vzorek musí být upevněn vzduchotěsně, ale zároveň mu musí být umožněno volně vibrovat, což může v nižších frekvencích ovlivňovat výsledky.

Pro numerickou simulaci bylo opět použito softwaru ANSYS. Pro vytvoření sítě se tentokrát zvolilo 16 prvků pro nejkratší délku vlny (při nejvyšší frekvenci). Maximální frekvence, pro kterou měření probíhalo, zde byla 6 kHz.

Akustická doména byla opět definována pomocí hustoty a rychlosti zvuku. Akustický zdroj byl definován prvkem Mass Source. Testovaný vzorek není v modelu geometricky modelován, je pouze definován určením akustické impedance na čelní ploše trubice, kde není zdroj, pomocí okrajové podmínky Impedance Boundary. Výstupem bylo určení hodnot hladiny akustického tlaku napříč doménou. Ve dvou bodech domény, které představovaly umístění dvou mikrofónů, byla změřena hladina akustického tlaku, přičemž jeden snímal hladinu akustického tlaku odražených vln a druhý hladinu akustického tlaku příchozích vln. Pomocí těchto hodnot byl vypočítán činitel zvukové absorpce α .

Výsledné porovnání experimentálního a numerického přístupu lze vidět na Obr. 6.4. Největší odchylky jsou dle očekávání autorů v nižších frekvenčních pásmech. Dále lze značné odchylky numerického řešení od experimentálního pozorovat i ve vysokých frekvencích

(4000 Hz a víc). Nejvhodnější hodnoty frekvencí, pro které je tento numerický model použitelný, lze tedy stanovit jako pásmo od 2200 do 3600 Hz.

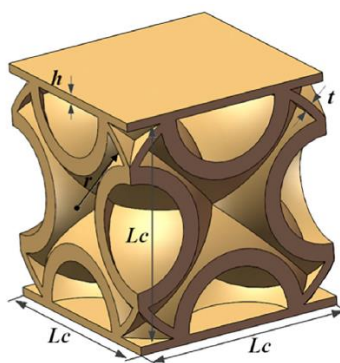


Obr. 6.4 Porovnání experimentálního a numerického přístupu pro zjištění činitele zvukové absorpce (upraveno): a) černá plná čára – experimentální data, b) červená čerchovaná čára – data získaná numerickou simulací [34]

6.4 SOUND INSULATION PROPERTIES OF SANDWICH STRUCTURE WITH HEMISPHERIC SHELL CORES: NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES

Cílem této práce [15] byla výroba nového sendvičového materiálu pro akustické aplikace, přičemž bylo následně potřeba zjistit akustické vlastnosti tohoto materiálu, konkrétně ztrátu přenosem STL [dB] (rozdíl mezi akustickou energií před vzorkem a za vzorkem). K tomu bylo použito jak experimentálního, tak numerického přístupu. Použití tohoto materiálu se předpokládá pro nízkofrekvenční aplikace, proto byli jak experiment, tak numerická simulace provedeny pouze pro nižší frekvence (200–1600 Hz).

V úvodu práce se nachází výčet používaných sendvičových materiálů pro akustické aplikace, odkud je patrné, že tyto se liší zejména geometrií jádra sendviče, která má hlavní vliv na akustické vlastnosti materiálu. Byl vyvinut a pomocí 3D tisku vyroben nový sendvičový materiál, který má jádro složené ze skořepinových polokoulí (viz Obr. 6.5). Materiálem byl pryskyřicový filament, jehož mechanické vlastnosti byly zjištěny tahovou zkouškou.



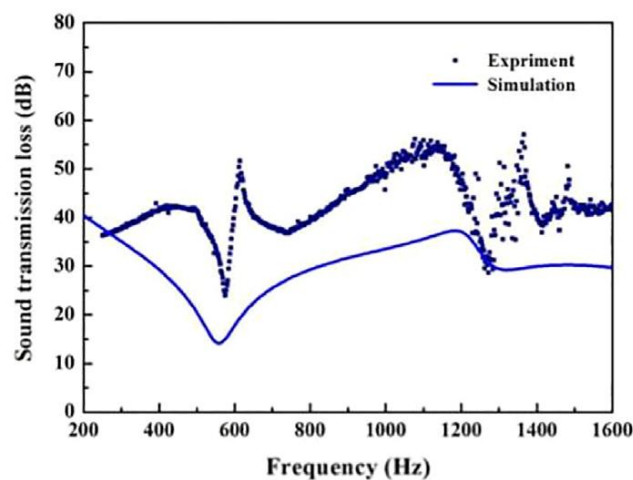
Obr. 6.5 Detail geometrie sendviče se skořepinovým polokulovým jádrem a jeho parametry: r – rádius polokoule, t – tloušťka skořepiny, L_c – délka jedné buňky, h – tloušťka spodního a dolního panelu [15]

Experiment byl opět proveden v impedanční trubici, bylo využito metody stojaté vlny. V jedné části trubice se nacházel zdroj zvuku generující vodorovné vlny, které byly snímány 4 mikrofony. Signály byly převedeny do digitální podoby, kde se pomocí vhodných softwarů určila ztráta přenosem STL.

K numerické simulaci experimentu bylo využito MKP softwaru LMS Virtual.Lab, který obsahuje přímo modul vhodný právě pro zjišťování STL. Při tvorbě MKP sítě se opět vycházelo z obecného pravidla, kdy tentokrát autoři zvolili minimálně 6 prvků pro nejvyšší frekvenci. Vzhledem k nízkým frekvencím, pro které byla simulace prováděna, se však velikost prvku může pro vyšší přesnost ještě snížit, aniž by byl razantně navyšován výpočetní čas.

Pro zjišťování STL je nutné, aby se akustická doména nacházela před i za vzorkem. Proto tedy byly vymodelovány dvě akustické domény a zkoumaný vzorek. První doména je určena pro příchozí vlnu, druhá je určena pro vlny, které vzorkem projdou. Vnější plocha druhé domény je modelována jako neodrazivá, čímž je zajištěna absorpce akustické energie a její vyzáření do vnějšího prostoru. Do modelu bylo přidáno tlumení.

Porovnáním obou přístupů se zjistilo, že ačkoliv nejsou hodnoty ztráty přenosem STL totožné, lze sledovat trendy které jsou téměř identické pro oba přístupy. Téměř ve všech případech STL zjištěno experimentem vykazuje vyšší hodnoty než data získané numerickou simulací. Autoři uvádí, že hlavním důvodem rozdílů ve výsledcích je fakt, že experiment nebyl proveden v bezdozvukové místnosti, a tedy prostředí, ve kterém experiment proběhl, mohlo mít vliv na výsledky. Druhým důvodem je to, že nízkofrekvenční hluk (200-450 Hz) má silnou schopnost procházet trubici, což výrazně ovlivňuje výsledky. V neposlední řadě může mít na výsledky vliv nesprávně zadané tlumení v numerickém modelu, které je ve skutečnosti nejspíš vyšší, a je způsobeno použitím adhesiva ke slepení jednotlivých hemisfér k sobě. Výsledné porovnání výsledků obou přístupů pro vzorek s jednou konkrétní geometrií lze vidět na Obr. 6.6.



Obr. 6.6 Porovnání experimentálního a numerického přístupu pro zjištění ztráty přenosem:
a) tečkovaná čára – experimentální data, b) plná čára – data získaná numerickou simulací [15]

Z výsledků je patrné, že vyladit numerický model tak, aby plně odpovídal experimentu, je velice komplikovaná záležitost. Z grafů lze však vidět, že se podařilo tyto přístupy přiblížit natolik, aby vykazovaly alespoň stejné trendy poklesů a nárůstů zkoumané veličiny. Tento model autor považuje za ověřený a funkční a používá ho v další části.

Další část této práce se potom zabývá parametrickou studií, kdy se změnou geometrie modelu, konkrétně změnou parametrů buňky jádra sendviče (viz Obr. 6.5), mění akustické vlastnosti daného materiálu a tím i jeho vhodnost použití pro konkrétní aplikace. Vzhledem

k tomu, že funkčnost numerického modelu byla již ověřena, tato studie probíhá již pouze jako numerická simulace bez provádění dalších experimentů.

Z výsledků této studie je pak patrné, že např. tloušťka spodního a horního panelu h má velice výrazný vliv na změnu STL ve vyšších frekvenčních pásmech. Naopak tloušťka skořepiny t na výsledné akustické vlastnosti příliš velký vliv nemá. Lze taky vidět, že pro zkoumané frekvenční pásmo (0-1600 Hz) nejsou změny v STL natolik výrazné, větší rozdíly lze pak spatřit ve frekvencích vyšších (>2000 Hz). Hodnoty STL nelze malými změnami geometrie výrazně zlepšovat, lze však posouvat celým spektrem k vyšším či nižším frekvencím, a tím vytvořit pro konkrétní aplikaci jeden konkrétní a nejvhodnější materiál pouze změnou vhodných parametrů buňky jádra sendviče (více viz [15]).

6.5 A STUDY OF SOUND PRESSURE LEVEL (SPL) INSIDE THE TRUCK CABIN FOR NEW ACOUSTIC MATERIALS: AN EXPERIMENTAL AND FEA APPROACH

Předmětem této práce [35] bylo měření hladiny akustického tlaku uvnitř kabiny nákladního automobilu. Později bylo měření opakováno s použitím vhodných materiálů mezi kabinou a motorovým prostorem, které měly za úkol hladinu akustického tlaku v kabině snížit a zlepšit tak komfort posádky. Tento experiment provedený na reálném automobilu byl simulován pomocí softwaru ANSYS, pomocí čehož byl experiment validován. Následně šlo vybrat nejvhodnější materiál k minimalizaci přenosu vibrací a hluku do kabiny automobilu.

Experiment proběhl tedy pro automobil bez izolace i s izolací a probíhal vždy pro 4 ustálené stavy: volnoběh motoru, rychlost 30 km/h, rychlost 50 km/h a plná akcelerace. Celá práce má za úkol zejména zlepšit komfort posádky, proto byly mikrofony snímající hladinu akustického tlaku umístěny do místa uší pasažérů. Použité izolace byly z různých materiálů a z velkého počtu jejich kombinací (celkem 18), např. panel z polyesteru, polyethylenu, vinylu, polyuretanová pěna apod.

Pro numerickou simulaci bylo nutné vymodelovat zjednodušený model kabiny automobilu. Podvozkové části a části nákladového prostoru mohly být pro simulaci zanedbány. Jako první byla provedena harmonická analýza, kdy při zadaném buzení od motoru byly výsledkem tlaky na kontaktních plochách motorového prostoru a kabiny. Výstup harmonické analýzy byl zároveň vstupem do následné analýzy akustické. Byl vymodelován vnitřní objem kabiny automobilu a výsledkem akustické harmonické analýzy bylo rozdělení hladiny akustického tlaku napříč touto doménou. Sledované pak byly zejména místa, ve kterých byly při experimentu umístěny mikrofony.

Při porovnání výsledků stavu bez a s izolačními materiály bylo patrné, že použití vhodné izolace mezi zdrojem vibrací a doménou, ve které zjišťujeme hladinu akustického tlaku, má velký vliv na přenos hluku z motorového prostoru do prostoru kabiny. Opakovaným měřením a opakovanými numerickými simulacemi pak byly zvoleny nejvhodnější materiály pro konkrétní provozní stavy. Jako nejvhodnější materiál byla určena kombinace vinylového panelu a polyesteru. Autoři uvádí, že výsledky experimentu se s výsledky zjištěnými numerickou simulací shodují ve všech případech alespoň z 90 %, a tudíž je experiment validován. Příklad částečné shody výsledků obou přístupů lze vidět např. na Obr. 6.1, kde je porovnání experimentálního a numerického přístupu pro stav plné akcelerace pro všech 18 materiálů a jejich kombinací (M1-M18, viz Obr. 6.7).



Obr. 6.7 Porovnání experimentálního a numerického přístupu pro zjištění hladiny akustického tlaku uvnitř kabiny nákladního automobilu pro různé materiály a jejich kombinace:

a) červená čára – experimentální data, b) modrá čára – data získaná numerickou simulací [35]

6.6 SHRNUÍ

Jak lze vidět v předchozích kapitolách (6.1 až 6.5), akustické numerické simulace mají v průmyslové praxi nezastupitelné místo. Nejčastěji slouží k validaci proběhnutých experimentů, které můžou v dalších fázích vývoje nahradit, a tím extrémně šetřit čas a náklady celého procesu.

Z výsledků jednotlivých uvedených prací je patrné, že výsledky experimentu nikdy nebudou zcela souhlasit s výsledky numerických simulací. Při vytváření modelu pro numerickou simulaci (zejména pak pro akustickou numerickou simulaci) je mnoho prostoru, kde se ať už vědomě či nevědomě vyskytne odchylka od experimentálního řešení. Na výstupech citovaných prací však můžeme vidět, že cílem numerických simulací zde nebylo zjistit přesné hodnoty sledovaných veličin, ale spíše validovat proběhnutý experiment tím, že experimentální a numerická data budou mít stejné trendy poklesů a nárůstů sledovaných veličin.

Správně vytvořený a odladěný numerický model je potom možné využít např. pro parametrickou studii při vývoji nových akustických materiálů, kdy lze jednoduše sledovat rozdíly mezi jednotlivými materiály, čímž lze materiály mezi sebou porovnávat a určovat, pro jaké aplikace jsou vhodné. Tudíž i když akustické numerické simulace neposkytují přesný výsledek, jsou ideálním nástrojem při vývoji nových materiálů či při porovnávání těch stávajících.

7 EXPERIMENT S VYUŽITÍM IMPEDANČNÍ TRUBICE

7.1 MĚŘENÍ

K vlastnímu experimentu bylo využito trubice vytvořené v rámci diplomové práce (viz [26]). Použitá aparatura je blíže popsána v kapitole 3. Použité vzorky materiálu byly dodány společností AVL Moravia s.r.o. ve formě tabulí 300x300 mm. Z těchto tabulí byly připraveny vzorky o průměru cca 76 mm, což respektuje vnitřní průměr impedanční trubice. Dodanými vzorky byly tyto materiály (viz Obr. 7.1) o těchto tloušťkách:

1. akustická pěna - ROCKFONIK
2. izolační pěna - Kaiflex/Armaflex (17 mm)
3. polymerová pěna - AIREX T92 130 (10 mm)
4. polymerová pěna - AIREX T92 200 (40 mm)
5. sendvičový panel - WILLBRANDT Contrabel (49 mm)
6. překližka (dle ČSN EN 13986) (12 mm)

Měření probíhalo v rozmezí 500 – 2000 Hz s krokem 150 Hz. Vzorky byly umístěny do držáku vzorku, sonda s mikrofonom se umístila co nejbližší vzorku a měřily se hodnoty hladiny akustického tlaku. Pohybem sondy s mikrofonom směrem od vzorku se hledaly tlaková minima a maxima. Měření končilo nalezením prvního minima hladiny akustického tlaku a jeho následujícího tlakového maxima. Při znalosti rozdílu ΔL těchto hodnot již bylo možno vyhodnotit činitel zvukové absorpce α . Hladina akustického tlaku uvnitř trubice byla měřena v logaritmickém měřítku, proto bylo k vyhodnocení využito vzorce (33):

$$\alpha = \frac{4 \cdot 10^{\frac{\Delta L}{20}}}{(10^{\frac{\Delta L}{20}} + 1)^2}$$



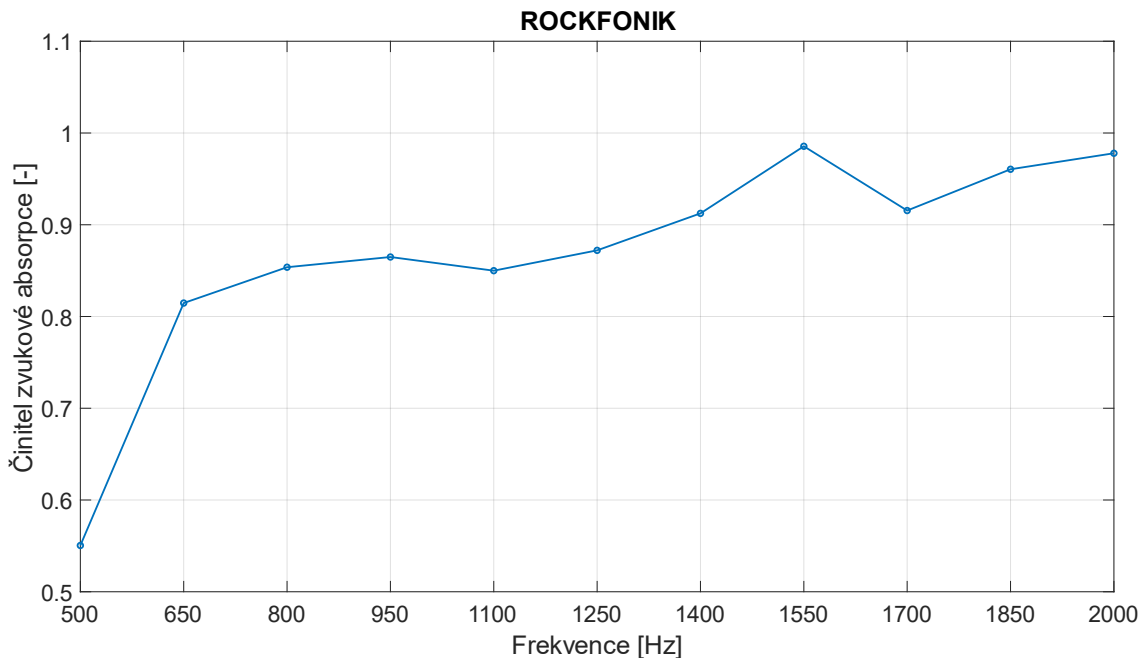
Obr. 7.1 Vzorky zkoumaných akustických materiálů: 1. ROCKFONIK, 2. Kaiflex/Armaflex, 3. AIREX T92 130, 4. AIREX T92 200, 5. WILLBRANDT Contrabel, 6. Překližka

7.1.1 AKUSTICKÁ PĚNA – ROCKFONIK

Výsledky z měření jsou zapsány v Tab. 7.1 a grafická závislost činitele zvukové absorpce na frekvenci je zakreslena na Obr. 7.2. Kromě nejnižší uvažované frekvence činitel zvukové absorpce tohoto materiálu neklesá pod 0,8 a s rostoucí frekvencí pozvolně roste (kromě výkyvu při 1700 Hz) až do hodnoty 0,978 při frekvenci vlnění 2000 Hz.

Tab. 7.1 Činitel zvukové absorpce pro pěnu ROCKFONIK

f [Hz]	L_{pmax} [dB]	L_{pmin} [dB]	ΔL [dB]	α [-]
500	103,1	89	14,1	0,550
650	101,8	93,8	8	0,815
800	99,3	92,3	7	0,854
950	94,4	87,7	6,7	0,865
1100	90,3	83,2	7,1	0,850
1250	88,1	81,6	6,5	0,872
1400	86,4	81,1	5,3	0,912
1550	90,1	88	2,1	0,986
1700	88,5	83,3	5,2	0,915
1850	84,5	81	3,5	0,960
2000	81,3	78,7	2,6	0,978



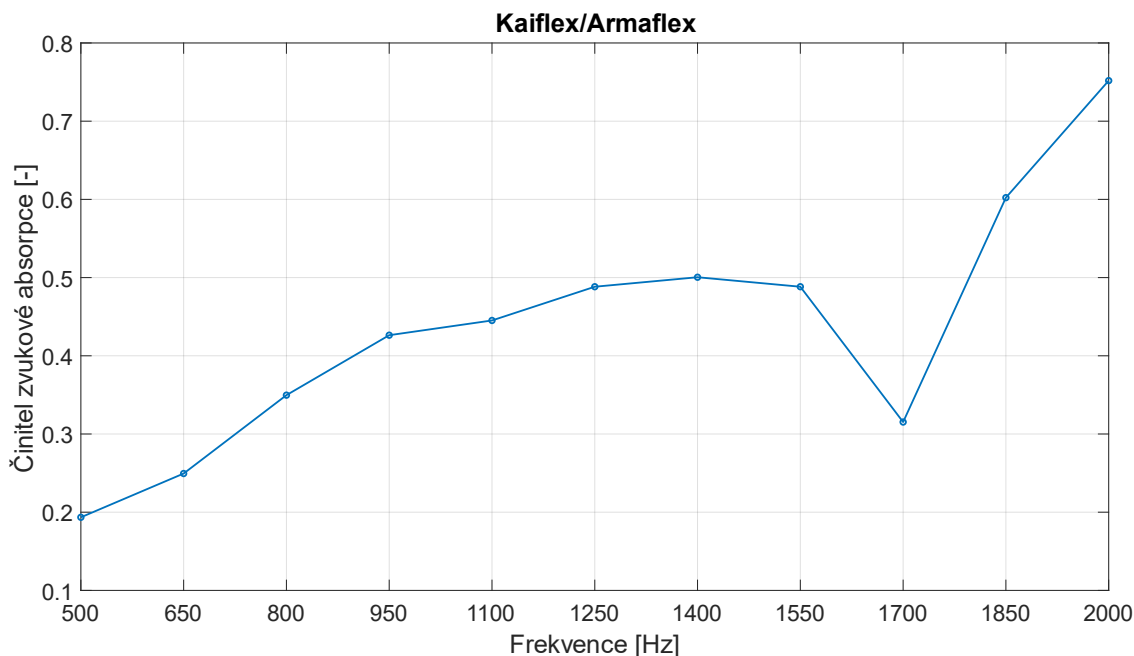
Obr. 7.2 Grafická závislost činitele zvukové absorpce na frekvenci pro akustickou pěnu ROCKFONIK

7.1.2 IZOLAČNÍ PĚNA – KAIFLEX/ARMAFLEX

Výsledky z měření jsou zapsány v Tab. 7.2 a grafická závislost činitele zvukové absorpce na frekvenci je zakreslena na Obr. 7.3. Činitel zvukové absorpce tohoto materiálu pozvolně roste s rostoucí frekvencí, svého maxima nabývá při 2000 Hz, kde dosahuje hodnoty 0,752. Za zmínku zde stojí prudký propad na hodnotu 0,315 u frekvence 1700 Hz.

Tab. 7.2 Činitel zvukové absorpce pro pěnu Kaiflex/Armaflex

f [Hz]	L_{pmax} [dB]	L_{pmin} [dB]	ΔL [dB]	α [-]
500	108,6	83,2	25,4	0,193
650	111,8	88,9	22,9	0,249
800	101,8	82,4	19,4	0,350
950	95,1	77,9	17,2	0,426
1100	90,2	73,5	16,7	0,445
1250	88,1	72,5	15,6	0,488
1400	87,3	72	15,3	0,500
1550	91,6	76	15,6	0,488
1700	96,2	75,7	20,5	0,315
1850	84,3	71,4	12,9	0,602
2000	79,6	70,1	9,5	0,752



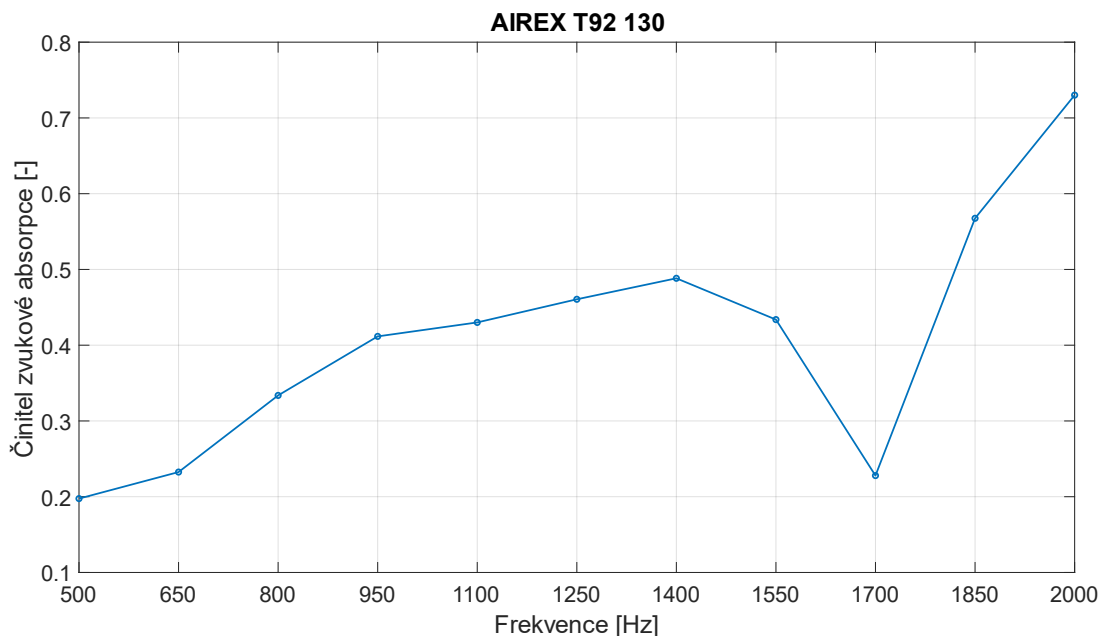
Obr. 7.3 Grafická závislost činitele zvukové absorpce na frekvenci pro izolační pěnu Kaiflex/Armaflex

7.1.3 POLYMEROVÁ PĚNA – AIREX T92 130

Výsledky z měření jsou zapsány v Tab. 7.3 a grafická závislost činitele zvukové absorpce na frekvenci je zakreslena na Obr. 7.4. Průběh činitele zvukové absorpce tohoto materiálu je velice podobný s předchozím případem, činitel opět roste s rostoucí frekvencí až do svého maxima 0,73 při 2000 Hz. Opět lze pozorovat prudký propad v případě vlnění o frekvenci 1700 Hz, a to na 0,228.

Tab. 7.3 Činitel zvukové absorpce pro pěnu AIREX T92 130

f [Hz]	L_{pmax} [dB]	L_{pmin} [dB]	ΔL [dB]	α [-]
500	110,3	85,1	25,2	0,198
650	110,2	86,6	23,6	0,233
800	100,8	80,9	19,9	0,334
950	94,7	77,1	17,6	0,412
1100	90,1	73	17,1	0,430
1250	88,1	71,8	16,3	0,461
1400	87,5	71,9	15,6	0,488
1550	91,9	74,9	17	0,434
1700	97,4	73,6	23,8	0,228
1850	84,7	71	13,7	0,568
2000	79,7	69,7	10	0,730



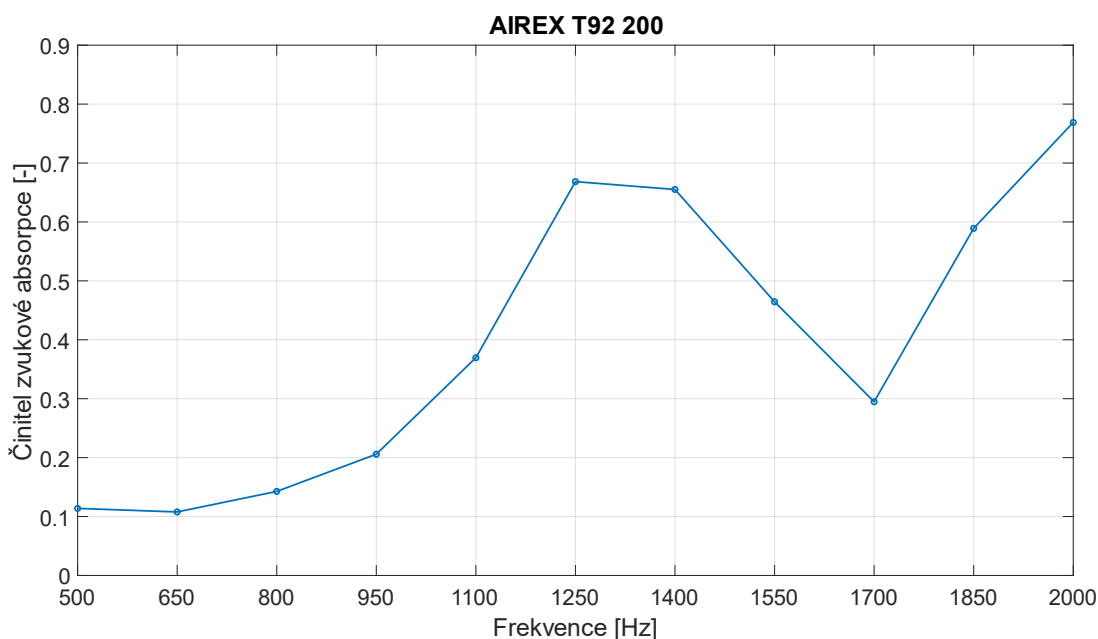
Obr. 7.4 Grafická závislost činitele zvukové absorpce na frekvenci pro polymerovou pěnu AIREX T92 130

7.1.4 POLYMEROVÁ PĚNA – AIREX T92 200

Výsledky z měření jsou zapsány v Tab. 7.4 a grafická závislost činitele zvukové absorpce na frekvenci je zakreslena na Obr. 7.5. U tohoto materiálu lze v porovnání s předchozím materiálem s velice podobným chemickým složením sledovat horší absorpční vlastnosti v nižších frekvencích, ale lepší absorpční vlastnosti ve středních a vyšších frekvencích. Opět lze sledovat propad na frekvenci 1700 Hz, a to na hodnotu 0,295.

Tab. 7.4 Činitel zvukové absorpce pro pěnu AIREX T92 200

f [Hz]	L_{pmax} [dB]	L_{pmin} [dB]	ΔL [dB]	α [-]
500	109,8	79,4	30,4	0,114
650	112,7	81,8	30,9	0,108
800	101,4	73,1	28,3	0,143
950	95,4	70,6	24,8	0,206
1100	90,5	71,7	18,8	0,370
1250	87,9	76,5	11,4	0,668
1400	87,7	76	11,7	0,655
1550	93,6	77,4	16,2	0,464
1700	94,4	73,2	21,2	0,295
1850	83,8	70,6	13,2	0,589
2000	79,4	70,3	9,1	0,769



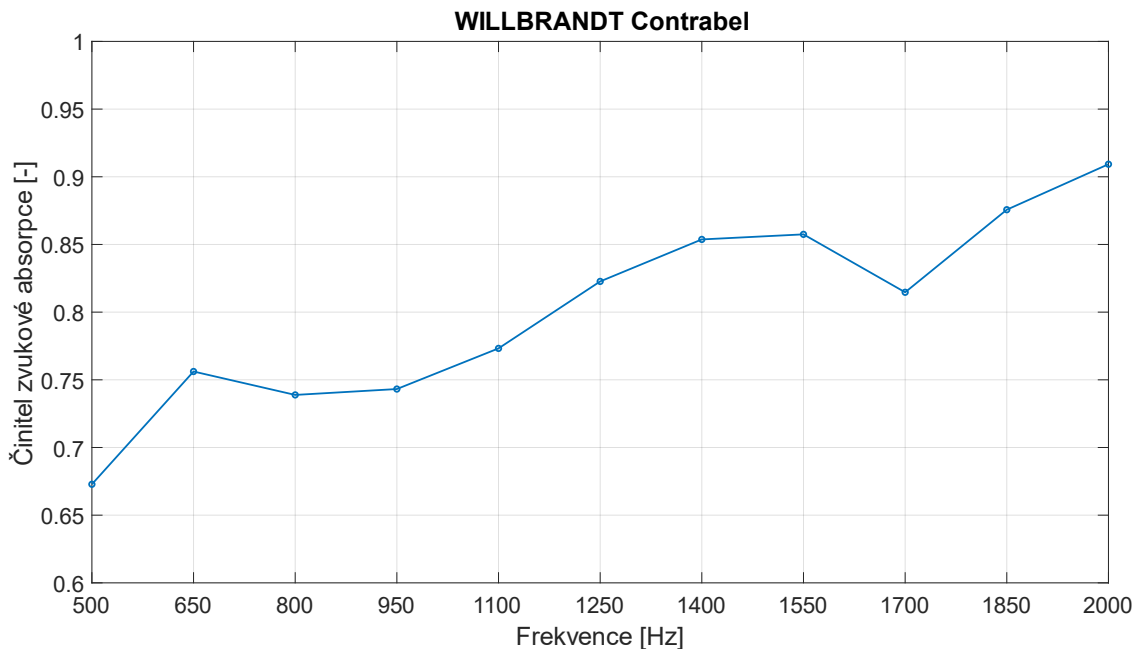
Obr. 7.5 Grafická závislost činitele zvukové absorpce na frekvenci pro polymerovou pěnu AIREX T92 200

7.1.5 SENDVIČOVÝ PANEL – WILLBRANDT CONTRABEL

Výsledky z měření jsou zapsány v Tab. 7.5 a grafická závislost činitele zvukové absorpce na frekvenci je zakreslena na Obr. 7.6. Kromě nejnižší uvažované frekvence činitel zvukové absorpce tohoto materiálu neklesl pod 0,7; což z něj dělá druhý nejlepší akusticky pohltivý materiál z šesti testovaných. Až na pár malých výchylek lze sledovat pozvolný nárůst činitele zvukové absorpce s rostoucí frekvencí, a to až do maxima 0,909 na frekvenci 2000 Hz.

Tab. 7.5 Činitel zvukové absorpce pro sendvičový panel WILLBRANDT Contrabel

f [Hz]	L_{pmax} [dB]	L_{pmin} [dB]	ΔL [dB]	α [-]
500	108	96,7	11,3	0,673
650	108,1	98,7	9,4	0,756
800	104,8	95	9,8	0,739
950	99,7	90	9,7	0,743
1100	94,8	85,8	9	0,773
1250	92,2	84,4	7,8	0,823
1400	90,4	83,4	7	0,854
1550	92,1	85,2	6,9	0,857
1700	93,1	85,1	8	0,815
1850	87,7	81,3	6,4	0,876
2000	83,3	77,9	5,4	0,909



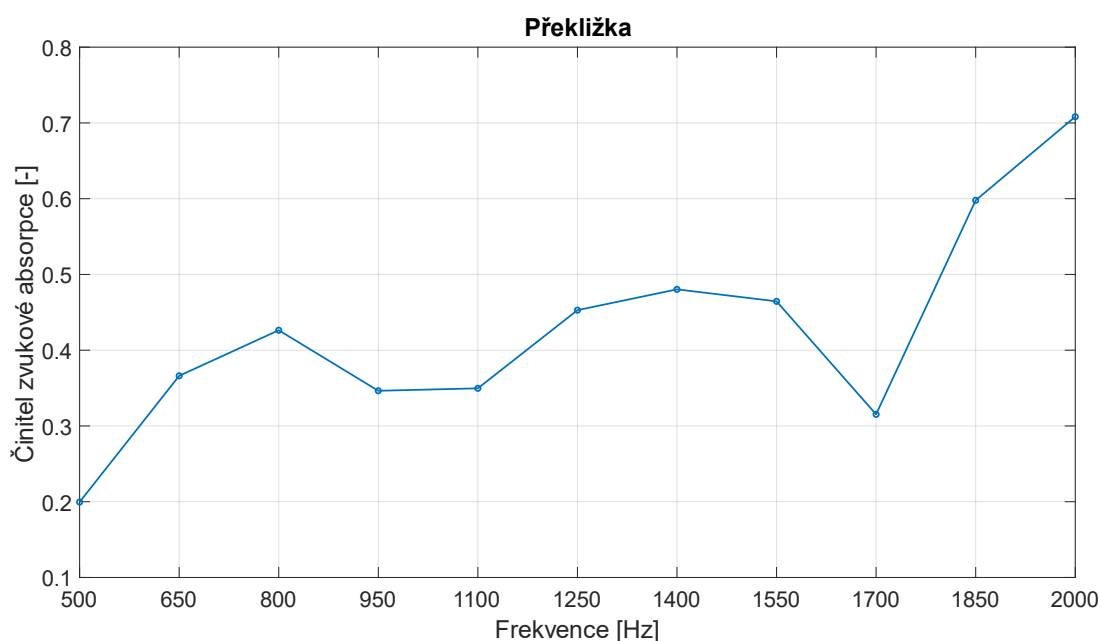
Obr. 7.6 Grafická závislost činitele zvukové absorpce na frekvenci pro sendvičový panel WILLBRANDT Contrabel

7.1.6 PŘEKLIŽKA

Výsledky z měření jsou zapsány v Tab. 7.6 a grafická závislost činitele zvukové absorpce na frekvenci je zakreslena na Obr. 7.7. Závislost činitele zvukové absorpce tohoto materiálu na frekvenci vlny je velice nestálá. V měřeném spektru lze sledovat několik nárůstů a propadů, avšak pro nejvyšší měřenou frekvenci tento materiál dosahuje dobrých absorpčních vlastností, konkrétně hodnoty činitele zvukové absorpce 0,708.

Tab. 7.6 Činitel zvukové absorpce pro překližku

f [Hz]	L_{pmax} [dB]	L_{pmin} [dB]	ΔL [dB]	α [-]
500	108,2	83,1	25,1	0,200
650	110	91,1	18,9	0,366
800	100,6	83,4	17,2	0,426
950	94,8	75,3	19,5	0,346
1100	90,3	70,9	19,4	0,350
1250	88,2	71,7	16,5	0,453
1400	87,4	71,6	15,8	0,480
1550	91,7	75,5	16,2	0,464
1700	96,1	75,6	20,5	0,315
1850	83,9	70,9	13	0,598
2000	79,5	69	10,5	0,708

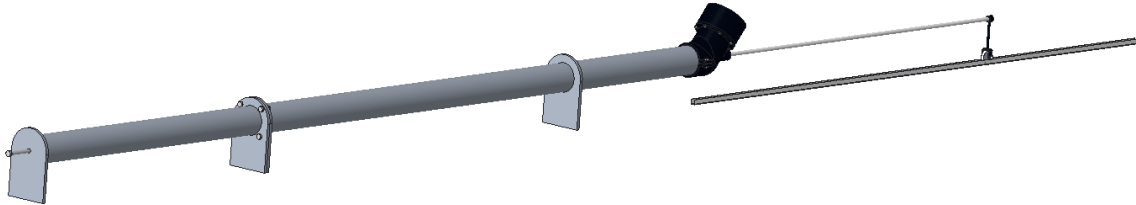


Obr. 7.7 Grafická závislost činitele zvukové absorpce na frekvenci pro překližku

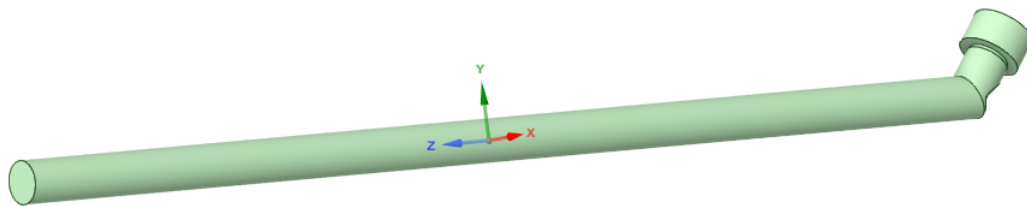
7.2 NUMERICKÁ SIMULACE

7.2.1 GEOMETRIE

Geometrie modelu vychází z modelu impedanční trubice (viz Obr. 7.8), která byla (včetně modelu) vytvořena v rámci diplomové práce na ÚADI (viz [26]). Akustická analýza probíhala v prostředí softwaru ANSYS Workbench 2021 R1. Do integrované aplikace SpaceClaim pro přípravu 3D modelu pro analýzu byl nahrán model impedanční trubice. Pomocí nástrojů byl vytvořen model vnitřního objemu trubice (viz Obr. 7.9), s kterým se dále pracovalo v MKP analýze.

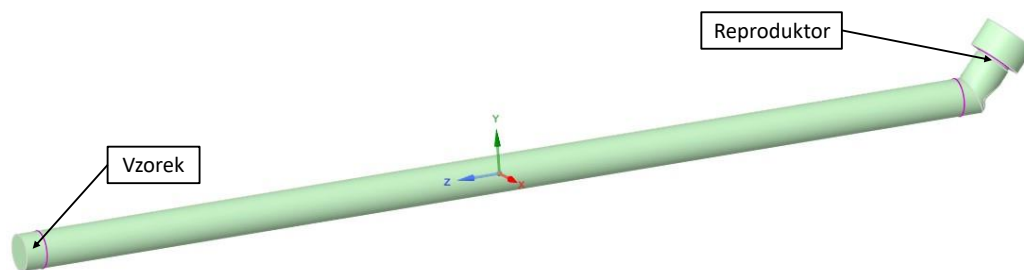


Obr. 7.8 Model impedanční trubice vytvořený v softwaru Creo Parametric [26]



Obr. 7.9 Model vnitřního objemu trubice

K modelu vnitřního objemu byl vytvořen model vzorku zkoušeného materiálu, který byl umístěn do levé části (viz Obr. 7.10) a jehož geometrie se upravovala dle konkrétního případu. Vnitřní objem trubice byl pro jednodušší síťování rozdělený na dvě části, z nichž jedna je rovinná a druhou tvoří zahnuté koleno s reproduktorem. Část s reproduktorem byla rozdělena v místě, ve kterém se na reálném zařízení nachází membrána reproduktoru. Na plochu vzniklou rozdělením byl později aplikován zdroj akustického signálu (viz kap. 7.2.3).



Obr. 7.10 Model vnitřního objemu trubice (se vzorkem) rozdělený na části pro vstup do MKP analýzy

Byla nastavena sdílená topologie všech vzniklých objemových prvků. Díky této volbě se všechny dílčí objemy v analýze chovaly jako jedno těleso, a tudíž se nemusely řešit kontakty mezi nimi a jejich síť se při diskretizaci provázaly. Všem objemům představující vnitřní prostor trubice byl jako materiál přiřazen vzduch o teplotě 22 °C. Objemu představující zkoumaný vzorek byl jako materiál přiřazen vždy příslušný materiál vzorku (viz kap. 7.1).

7.2.2 Síť

Jak bylo popsáno v rešerši prací v kapitole 6, pro velikost prvků MKP sítě pro akustických analýz existuje pravidlo, že vlna o nejvyšší uvažované frekvence, a tudíž o nejkratší vlnové délce, by měla být proložena více prvky (elementy). Tento počet prvků na jednu vlnu není pevně stanovený a lišil se dle každé práce (6/8/16). Vzhledem k nízké nejvyšší frekvenci, pro kterou byl experiment i numerický výpočet uvažován, bylo možné vlnu o nejkratší vlnové délce proložit 16 prvky, což poskytlo vyšší přesnost výpočtu při zachování přípustné délky výpočetního času. Délka nejkratšího uvažovaného vlnění tedy byla:

$$\lambda_{min} = \frac{c_{vz-22}}{f_{max}} = \frac{346,25}{2000} = 0,173 \text{ m} \quad (40)$$

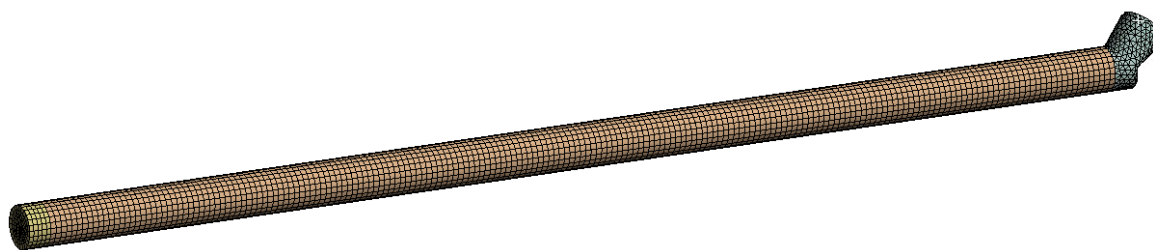
kde c_{vz-22} je rychlost zvuku ve vzduchu o teplotě 22 °C a f_{max} je nejvyšší uvažovaná frekvence analýzy

Maximální přípustná velikost prvku (elementu) byla potom tedy určena jako:

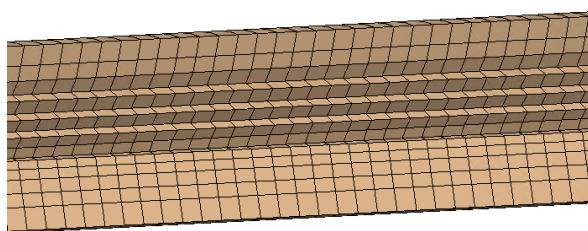
$$el_{min} = \frac{\lambda_{min}}{16} = \frac{0,173}{16} = 0,011 \text{ m} = 11 \text{ mm} \quad (41)$$

Pro jednodušší dělení jednotlivých objemů byla velikost nejmenšího prvku zvolena jako 10 mm.

Válcové vzorky i rovinná část vnitřního objemu trubice byly vsítovány pomocí metody Sweep, která je vhodná pro sítování válcových těles a vytváří strukturovanou síť. Vzorek byl po své délce rozdělen na více částí. Rovinné části byla pomocí nástroje Body Sizing přiřazena velikost prvku 10 mm, čímž se celý tento objem po délce rozdělil po 10 mm. Zahnuté části (části se zdrojem akustického signálu) byla opět pomocí nástroje Body Sizing přiřazena velikost prvku 10 mm. Tento objem byl pak vyplněn automaticky tetragonálními prvky – vznikla nestrukturovaná síť. Výsledná síť je pak na Obr. 7.11. a detail prvků v podélném řezu v rovinné části vnitřního objemu trubice lze vidět na Obr. 7.12.



Obr. 7.11 Výsledná MKP síť



Obr. 7.12 Detail na prvky sítě v podélném řezu rovinné části

7.2.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Jako první bylo nutné nastavit frekvenční rozsah analýzy a počet jejich kroků. Vzhledem k tomu, že pro každou frekvenci musel být veden separátní výpočet (viz dále), mohl být rozsah jednotlivých analýz volen pro snížení výpočetního času velice malý, pouze s ohledem na počet kroků musel být schopný zachytit konkrétní měřenou frekvenci.

Následně bylo nutné nastavit akustickou doménu analýzy. Jak bylo uvedeno v kapitole 6.2, ANSYS Workbench má v modulu materiálových vlastností přednastaveny numerické disipační modely pro zvuk pohltivé porézní materiály. Tyto modely se liší frekvenčními oblastmi, pro které jsou nejvhodnější, a tím se liší i jejich požadované vstupní hodnoty. Pro porézní materiály (akustické pěny, polymerové pěny, pěna sendviče, překližka) byl tedy zvolen disipační model Delany-Bazley. Tyto modely uvažují disipaci akustické energie uvnitř materiálu a jsou vhodné právě pro úlohy spojené s absorpcí zvuku. Objem vzorku je potom považován za akustickou doménu, ve které se snižuje energie vlnění (energie disipuje – mění se na teplo). Jako akustická doména byl tedy zvolen jak celý vnitřní objem impedanční trubice, tak objem vzorku.

Následně bylo nutné zadat buzení – zdroj akustické energie. Ten byl zadán na rovinnou plochu vzniklou rozdělením zahnuté části vnitřního objemu trubice (viz Obr. 7.10). Velikost buzení vycházela z použitého zdroje a pro zjištění bylo potřeba ji změřit na reálném zařízení. Sonda byla vysunuta až na maximální hodnotu, aby byl mikrofon co nejbližší reproduktoru. Následně byl spuštěn signál o příslušné frekvenci a byla měřena průměrná hodnota amplitudy akustického tlaku.

Pro každou frekvenci byla velikost amplitudy odlišná, proto musel pro každou frekvenci proběhnout separátní výpočet. Naměřené hodnoty akustického tlaku byly kvadratickým průměrem zjišťovaných hodnot (RMS hodnoty), proto se pro vstup do numerické simulace ještě musely vynásobit $\sqrt{2}$. Z toho důvodu, že ANSYS v akustických analýzách uvažuje akustický tlak (popř. hladinu akustického tlaku) jako stupeň volnosti, není vhodné buzení zadávat přímo ve formě akustického tlaku. Proto byl akustický tlak přepočítán na povrchovou rychlost (okrajová podmínka Surface Velocity) dle vzorce (42). Naměřené i přepočítané hodnoty buzení pro vstup do numerické simulace jsou pak shrnuty v Tab. 7.7.

$$v = \frac{p_a}{\rho \cdot c} \quad (42)$$

kde v je povrchová rychlost (buzení), p_a je amplituda akustického tlaku, ρ je hustota prostředí a c je rychlost zvuku v prostředí

ANSYS v harmonické akustické analýze uvažuje ve výchozím nastavení všechny vnější plochy akustické domény jako odrazivé, což (teoreticky) dokonale simuluje vnitřní prostor impedanční trubice. Jediná neodrazivá plocha uvnitř trubice je plocha samotného zdroje akustického vlnění. Na tuto plochu tedy byla aplikována radiační okrajová podmínka (Radiation Boundary), která umožňuje vyzáření akustické energie touto plochou, při uvažování nulové odrazivosti. Po nastavení okrajových podmínek byl výpočet spuštěn.

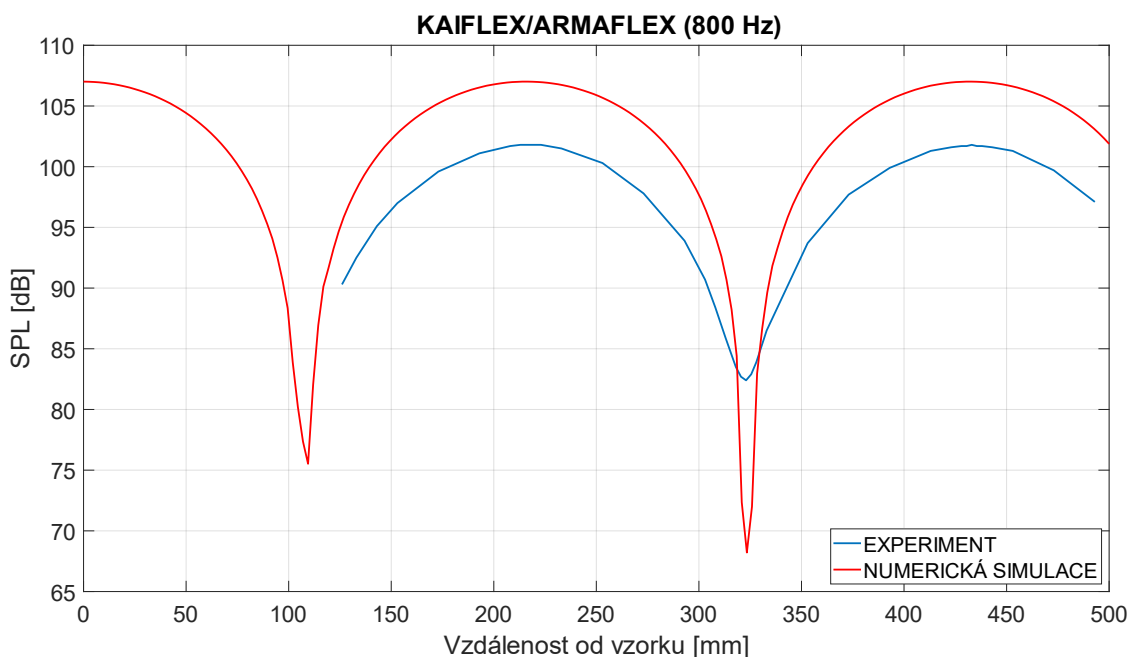
Tab. 7.7 Hodnoty akustického tlaku a povrchové rychlosti zdroje v závislosti na frekvenci

f [Hz]	p_{aRMS} [Pa]	p_a [Pa]	v [m/s]
500	2,46	3,48	0,0082
650	2,27	3,21	0,0076
800	2,28	3,22	0,0076
950	2,51	3,55	0,0084
1100	2,38	3,37	0,0079
1250	0,88	1,24	0,0029
1400	2,3	3,25	0,0077
1550	2,62	3,71	0,0087
1700	2,18	3,08	0,0073
1850	0,8	1,13	0,0027
2000	0,83	1,17	0,0028

7.2.4 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH PŘÍSTUPŮ

Pro vyhodnocení výsledků numerického výpočtu bylo zvoleno stejného přístupu jako v případě experimentu. Bylo tedy potřeba nalézt minimum akustického tlaku, jeho následující maximum a z rozdílu těchto hodnot vypočítat činitel zvukové absorpce.

Pro zjištění případných odchylek obou přístupů byl vždy jako první porovnán průběh hladiny akustického tlaku (SPL) podél impedanční trubice s průběhem této veličiny zjištěným experimentálně. Příklad takového porovnání lze vidět na Obr. 7.13, a to pro pěnu Kaiflex/Armaflex při uvažování akustického vlnění o frekvenci 800 Hz.



Obr. 7.13 Porovnání průběhu SPL podél impedanční trubice pro oba přístupy

Při porovnání průběhů hladiny akustického tlaku pro všechny materiály a všechny uvažované frekvence je patrné, že polohy minim a maxim se pro oba přístupy shodují, odchylky činí pouze jednotky mm, což lze přisoudit nepřesnosti měření či geometrie. Z tohoto lze usoudit, že geometrie je vymodelována správně a stejně tak je vhodně zvolena jemnost sítě.

Z porovnání je však dále patrné, že hodnoty akustického tlaku zjištěné numerickým přístupem se od toho experimentálního do jisté míry liší. Hodnoty maxima jsou závislé hlavně na velikosti buzení, tudíž odchylky v maximech akustického tlaku lze přisoudit nepřesnosti měření akustického tlaku zdroje, popř. nedokonalosti metody jeho měření (popsané v kap. 7.2.3), kdy naměřená hodnota amplitudy akustického tlaku mohla být ovlivněna odraženým akustickým vlněním. Tyto odchylky však nejsou pro určení činitele zvukové absorpce stěžejní, protože ten závisí na rozdílu maxima a minima akustického tlaku, nikoliv na samotné hodnotě maxima.

Z porovnání je dále patrné, že hodnoty minim akustického tlaku obou přístupů se značně liší. Hodnoty akustického tlaku zjištěné numerickým přístupem vykazují v oblasti minim velice prudký pokles, který při experimentu v žádném měřeném případě nalezen nebyl. Tyto prudké výkyvy pak silně ovlivňují rozdíl maxima a minima, a tím je značně ovlivněn i vypočítaný činitel zvukové absorpce.

Byla provedena citlivostní studie, jejímž cílem bylo zjistit vliv vstupních hodnot na výsledky analýzy a tím najít hlavní důvod těchto prudkých poklesů akustického tlaku. Akustická doména je charakterizována dvěma základními veličinami – hustota prostředí a rychlost zvuku. Tyto hodnoty nebyly pro materiály vzorků do numerické simulace zadány přesně, protože se nepodařilo pro použité materiály zjistit konkrétní hodnoty. Při znalosti složení jednotlivých materiálů byly tyto parametry však odvozeny přibližně pomocí materiálů podobných, u kterých tyto parametry dohledatelné byly. Tento přístup pomohl k tomu, aby hodnoty těchto parametrů souhlasily s určitou přípustnou odchylkou.

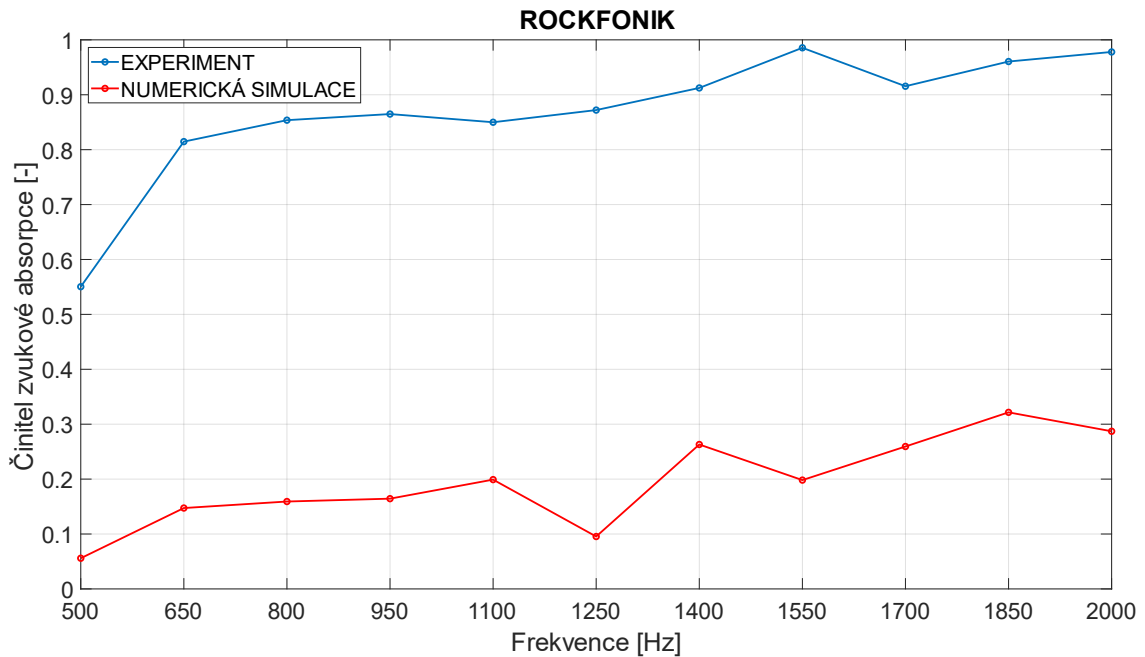
Změnou těchto parametrů a sledováním změny na výstupu se však přišlo na to, že tyto parametry mají na výsledný rozdíl minima a maxima akustického tlaku velice malý vliv, a tedy nebudou příčinou těchto prudkých poklesů.

Další možností byl vliv vstupních parametrů samotných disipačních modelů, v tomto případě modelu Delany-Bazley. Tento model požaduje jako vstupní parametr jedinou veličinu označovanou jako Fluid Resistivity [$\text{kg/s}\cdot\text{m}^3$]. Tato veličina by tedy měla mít hlavní vliv na absorpční vlastnosti daného materiálu, a tedy hlavní vliv na rozdíl maxima a minima akustického tlaku v trubici (který tyto vlastnosti určuje). Řádovou změnou tohoto parametru bylo však zjištěno, že ani tento nemá na rozdíl maxima a minima hladiny akustického tlaku nijak výrazný vliv, a že i s nelogicky velkou hodnotou této vstupní veličiny se prudké poklesy v oblasti minim akustického tlaku stále vyskytují a činitel zvukové absorpce tak nabývá nerealisticky nízkých hodnot.

Z výše popsaných důvodů bylo zvoleno přístupu, kdy se numericky zjištěná data akustického tlaku v okolí jeho minima zprůměrují, čímž bude vliv prudkého poklesu snížen. Pro každý materiál byly vyzkoušeny dva přístupy, z nichž v prvním byly ve všech případech průměrovány hodnoty ve vzdálenosti ± 5 mm od minima akustického tlaku, a v druhém se tato vzdálenost zvětšovala dle konkrétní frekvence a dle konkrétního materiálu (větší vzdálenost pro vyšší frekvence a pro absorpčně vhodnější materiály, rozmezí ± 1 -20 mm). Pomocí tohoto průměru minim a nalezeného maxima byl vypočítán rozdíl mezi nimi, při jehož znalosti byl pro každý materiál a každou frekvenci vypočítán činitel zvukové absorpce.

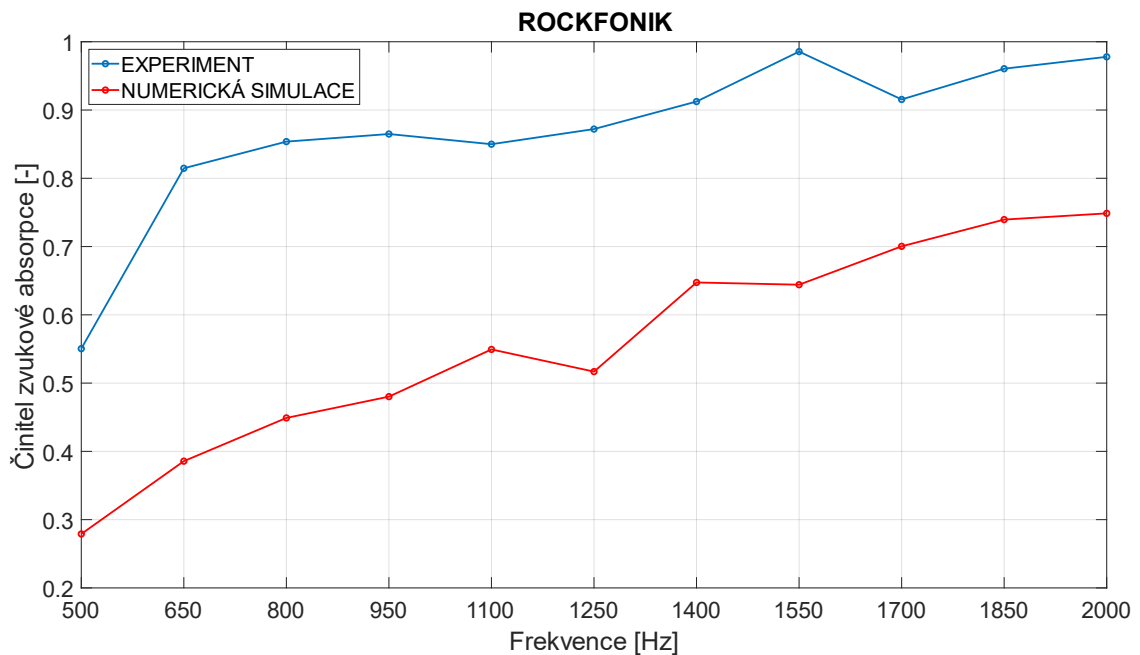
AKUSTICKÁ PĚNA – ROCKFONIK

- průměrování hodnot v oblasti ± 5 mm (viz Obr. 7.14)



Obr. 7.14 Porovnání výsledků jednotlivých přístupů pro pěnu ROCKFONIK s průměrováním hodnot zjištěných numerickou simulací v oblasti ± 5 mm

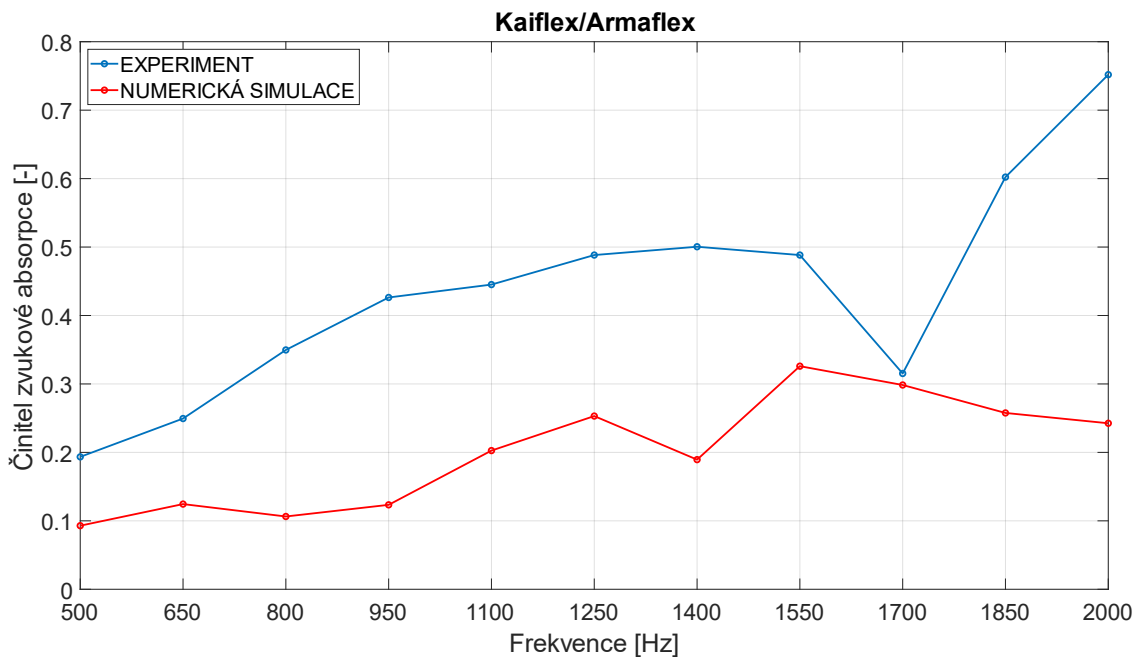
- průměrování hodnot v oblasti s variabilní šířkou ($\pm 15-20$ mm) (viz Obr. 7.15)



Obr. 7.15 Porovnání výsledků jednotlivých přístupů pro pěnu ROCKFONIK s průměrováním hodnot zjištěných numerickou simulací v oblasti s variabilní šířkou

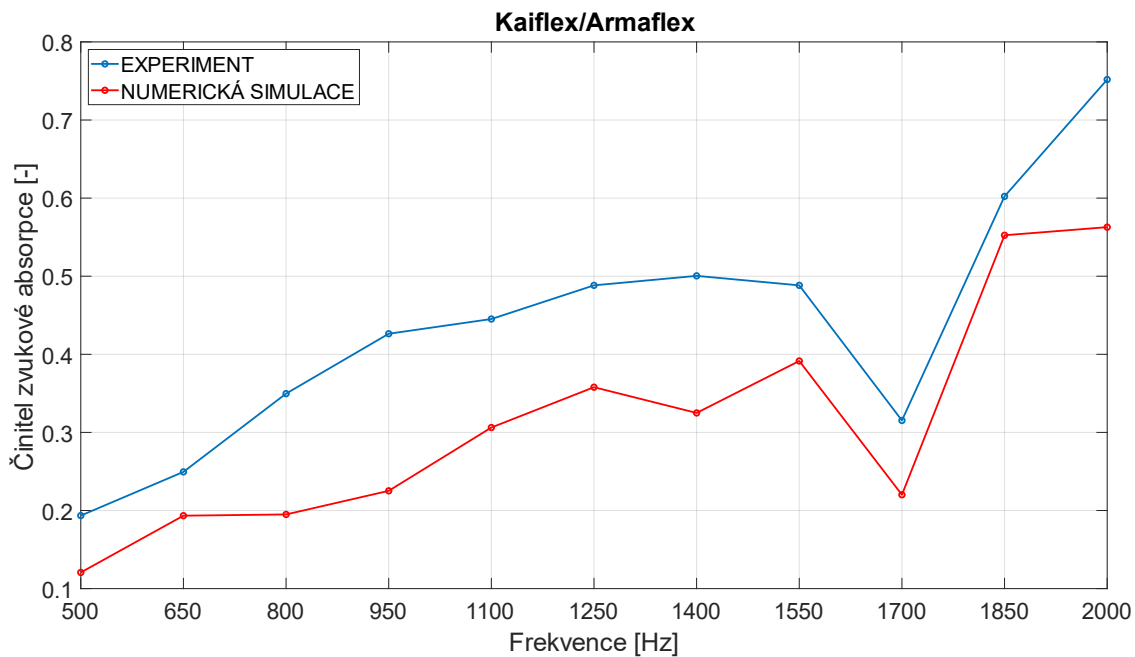
IZOLAČNÍ PĚNA – KAIFLEX/ARMAFLEX

- průměrování hodnot v oblasti ± 5 mm (viz Obr. 7.17)



Obr. 7.16 Porovnání výsledků jednotlivých přístupů pro pěnu Kaiflex/Armaflex s průměrováním hodnot zjištěných numerickou simulací v oblasti ± 5 mm

- průměrování hodnot v oblasti s variabilní šířkou ($\pm 1-13$ mm) (viz Obr. 7.17)



Obr. 7.17 Porovnání výsledků jednotlivých přístupů pro pěnu Kaiflex/Armaflex s průměrováním hodnot zjištěných numerickou simulací v oblasti s variabilní šířkou

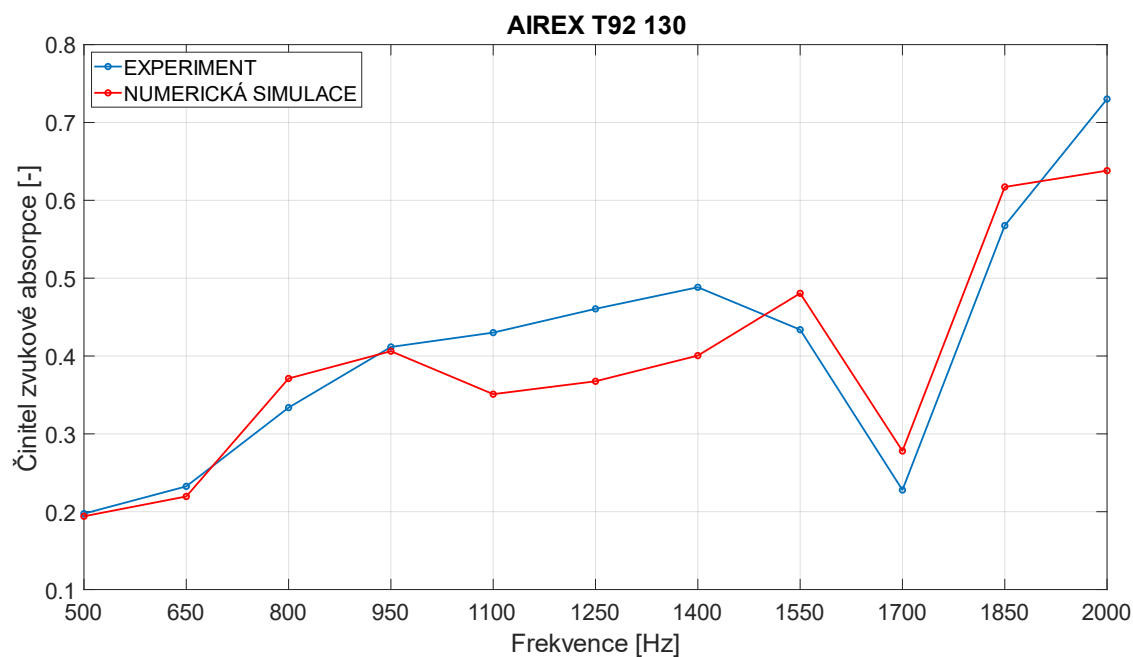
POLYMEROVÁ PĚNA – AIREX T92 130

- průměrování hodnot v oblasti ± 5 mm (viz Obr. 7.18)



Obr. 7.18 Porovnání výsledků jednotlivých přístupů pro pěnu AIREX T92 130 s průměrováním hodnot zjištěných numerickou simulací v oblasti ± 5 mm

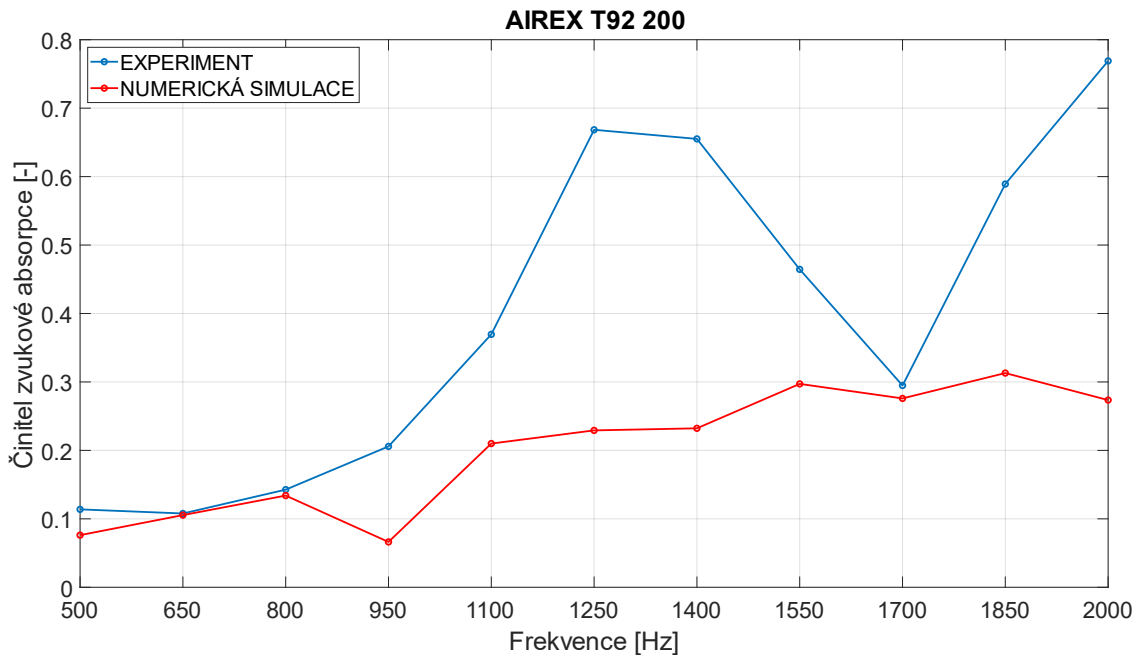
- průměrování hodnot v oblasti s variabilní šířkou ($\pm 1-13$ mm) (viz Obr. 7.19)



Obr. 7.19 Porovnání výsledků jednotlivých přístupů pro pěnu AIREX T92 130 s průměrováním hodnot zjištěných numerickou simulací v oblasti s variabilní šířkou

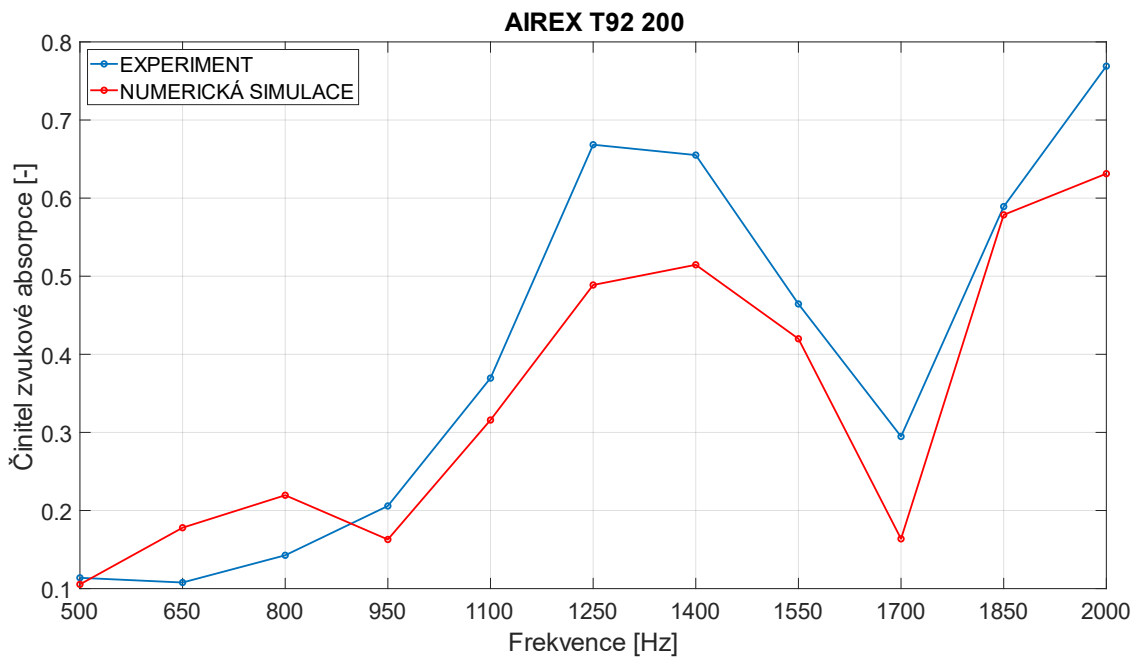
POLYMEROVÁ PĚNA – AIREX T92 200

- průměrování hodnot v oblasti ± 5 mm (viz Obr. 7.20)



Obr. 7.20 Porovnání výsledků jednotlivých přístupů pro pěnu AIREX T92 200 s průměrováním hodnot zjištěných numerickou simulací v oblasti ± 5 mm

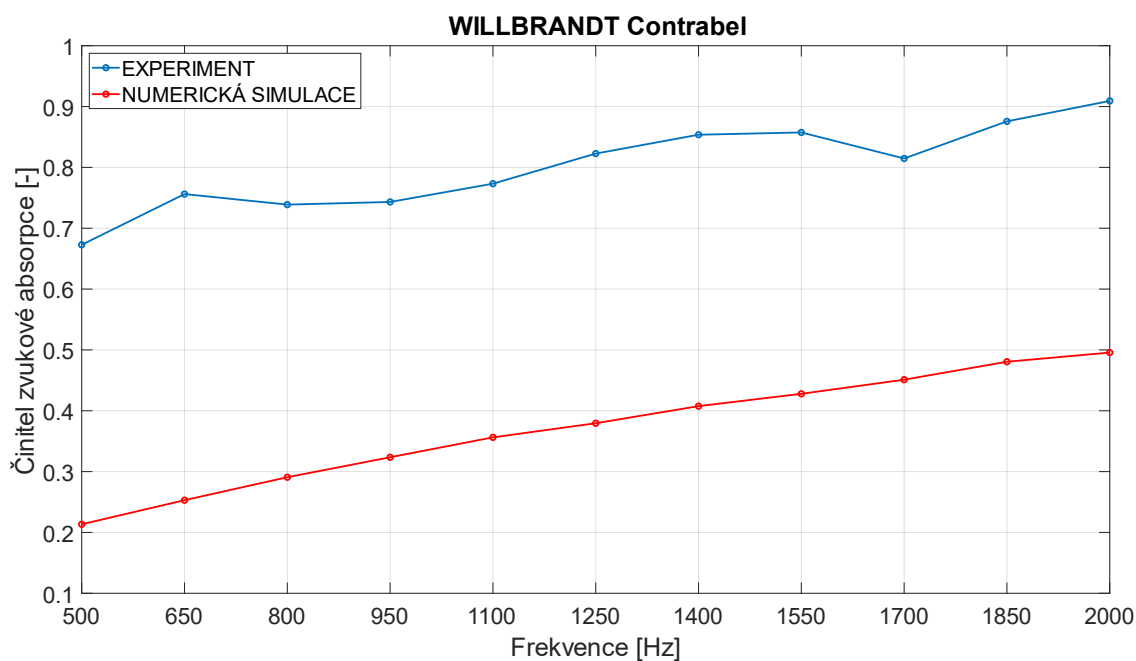
- průměrování hodnot v oblasti s variabilní šířkou ($\pm 1-15$ mm) (viz Obr. 7.21)



Obr. 7.21 Porovnání výsledků jednotlivých přístupů pro pěnu AIREX T92 200 s průměrováním hodnot zjištěných numerickou simulací v oblasti s variabilní šířkou

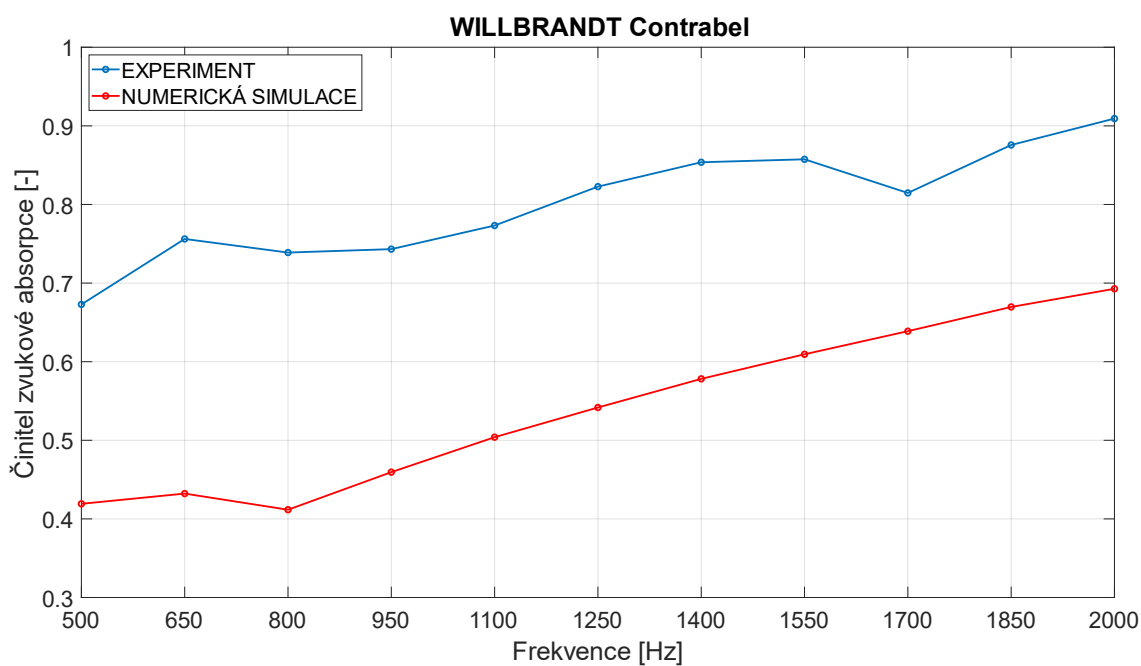
SENDVIČOVÝ PANEL – WILLBRANDT CONTRABEL

- průměrování hodnot v oblasti ± 5 mm (viz Obr. 7.22)



Obr. 7.22 Porovnání výsledků jednotlivých přístupů pro sendvičový panel WILLBRANDT Contrabel s průměrováním hodnot zjištěných numerickou simulací v oblasti ± 5 mm

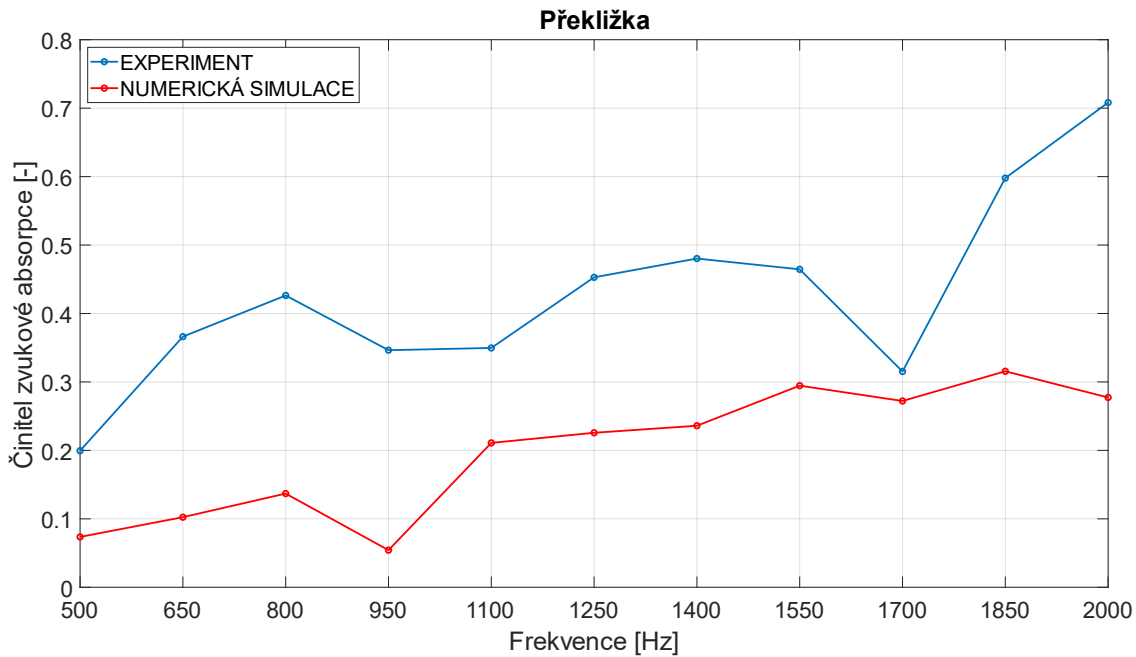
- průměrování hodnot v oblasti s variabilní šířkou (± 11 -13 mm) (viz Obr. 7.23)



Obr. 7.23 Porovnání výsledků jednotlivých přístupů pro sendvičový panel WILLBRANDT Contrabel s průměrováním hodnot zjištěných numerickou simulací v oblasti s variabilní šířkou

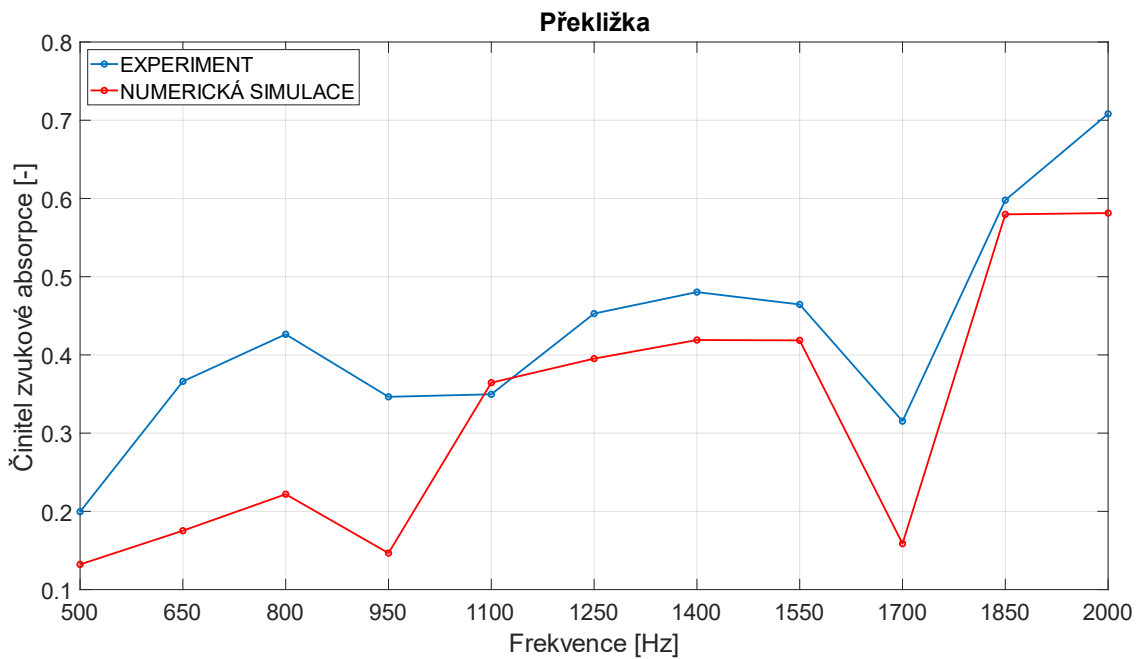
PŘEKLIŽKA (DLE ČSN EN 13986)

- průměrování hodnot v oblasti ± 5 mm (viz Obr. 7.24)



Obr. 7.24 Porovnání výsledků jednotlivých přístupů pro překližku (dle ČSN EN 13986) s průměrováním hodnot zjištěných numerickou simulací v oblasti ± 5 mm

- průměrování hodnot v oblasti s variabilní šířkou ($\pm 1-13$ mm) (viz Obr. 7.25)



Obr. 7.25 Porovnání výsledků jednotlivých přístupů pro překližku (dle ČSN EN 13986) s průměrováním hodnot zjištěných numerickou simulací v oblasti s variabilní šířkou

7.2.5 DISKUZE

Z porovnání výsledků jednotlivých přístupů je patrné, že vytvořený model není vhodný k přesnému zjišťování zvuk pohltivých vlastností různých vzorků materiálu. Model sice téměř dokonale simuluje polohy minim a maxim akustického tlaku uvnitř impedanční trubice, ale nevyhovuje z hlediska hodnot nalezených minim akustického tlaku, a to zejména kvůli prudkým poklesům v jejich okolí.

Z citlivostní studie je zřejmé, že žádná ze vstupních materiálových vlastností vzorků nemá na tyto prudké výkyvy hladiny akustického tlaku vliv, a tudíž změny těchto parametrů nevedou k výrazným změnám rozkmitu hladiny akustického tlaku, tedy ke snížení rozdílu mezi jeho minimem a maximem, který má nejpodstatnější vliv na vypočítané absorpční vlastnosti daných materiálů.

Kromě disipačního modelu Delany-Bazley nabízí ANSYS k výběru i další dva disipační modely. Jedná se o modely Miki a Johnson-Champoux-Allard (dále jen JCA). Pro porézní médium byly vyzkoušeny i tyto modely, ale výsledky stále neodpovídaly datům experimentálním.

Model Miki vyžaduje stejnou vstupní veličinu jako model Delany-Bazley. Liší se pouze oblastí jeho použití (viz dále). Při stejné hodnotě vstupního parametru se výsledky těchto modelů lišily pouze v desetínách dB, rozdíl minima a maxima hladiny akustického tlaku byl stále větší než v případě experimentálního přístupu, a tedy výsledky stále neodpovídaly realitě.

Model JCA vyžaduje kromě parametru Fluid Resistivity (stejně jako oba předchozí modely) i další parametry – pórovitost (podíl objemu pórů v celkovém objemu tělesa), tortuozitu (vlastnost porézního média vyjadřující „zakřivenost“ jeho struktury), viskózní charakteristickou délku a termální charakteristickou délku. Při dodržení stejné hodnoty parametru Fluid Resistivity a při zadání řádově logických hodnot ostatních parametrů lze na výsledcích vidět, že tento model snižuje rozdíl mezi minimem a maximem akustického tlaku uvnitř impedanční trubice, výsledky tedy vykazují lepší absorpční vlastnosti použitých materiálů, a model tedy přibližuje numerické řešení tomu experimentálnímu. Na rozdíl od předchozích modelů je zde však problém s polohou minim a maxim akustického tlaku podél trubice, které se v případě modelu JCA liší od experimentálního řešení.

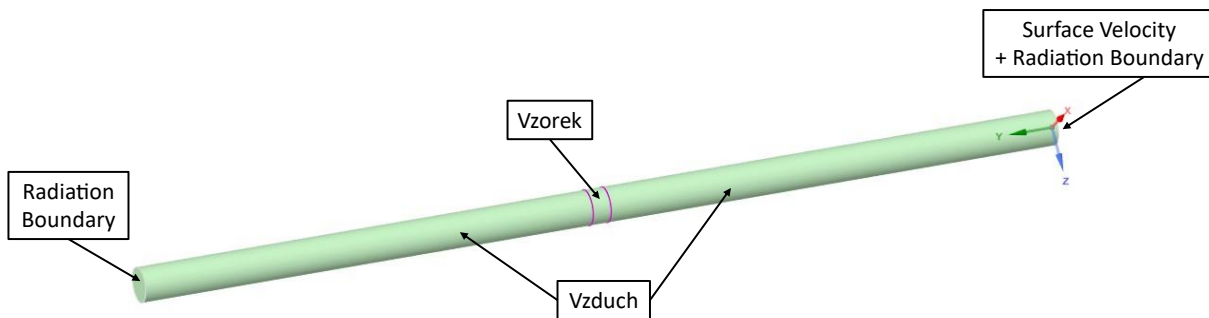
V případě použití modelu JCA je však problémem samotné zjištění zbylých vstupních parametrů. Čtyři zkoumané materiály (Kaiflex/Armaflex, AIREX T92 130, AIREX T92 200, překližka) nejsou primárně určeny pro akusticky pohltivé aplikace a vstupní parametry disipačních modelů jsou u takových materiálů téměř nezjistitelné. I v případě materiálu určených pro akusticky pohltivé aplikace je zjišťování těchto parametrů obtížné, protože se v datových listech materiálů zpravidla nenacházejí. Z těchto důvodů tedy model JCA není pro tuto aplikaci vhodný a nebyl použit, i když by teoreticky mohl vést k lepším výsledkům, a tedy k přiblížení numerických dat těm experimentálním.

OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI DISIPAČNÍCH MODELŮ

Vzhledem k tomu, že jediný vstupní parametr vyžadovaný použitým disipačním modelem měl téměř nulový vliv na rozdíl mezi minimem a maximem akustického tlaku; a tím tedy na zjišťovaný činitel zvukové absorpce, bylo nutné ověřit funkčnost tohoto i dalších disipačních modelů.

Byl vytvořen model s jednoduchou geometrií, která sestávala ze dvou na sebe navazujících válcových prostorů vyplněných vzduchem, mezi kterými byl vzorek akusticky pohltivého materiálu.

Na čelní plochu jednoho prostoru byl pomocí okrajové podmínky Surface Velocity zadán zdroj akustického vlnění. Na čelní plochu druhého prostoru i na plochu zdroje byla zadána okrajová podmínka Radiation Boundary, díky které se vlnění od těchto stěn neodráželo, ale pronikalo dál do prostoru (viz Obr. 7.26). Materiálu, který byl přiřazen tělesu představující vzorek, byl postupně nastaven disipační model Delany-Bazley, Miki a JCA. Cílem bylo sledování hladiny akustického tlaku za vzorkem v závislosti na změně disipačního modelu a na změně hodnoty jejich hlavního vstupního parametru – veličiny Fluid Resistivity.



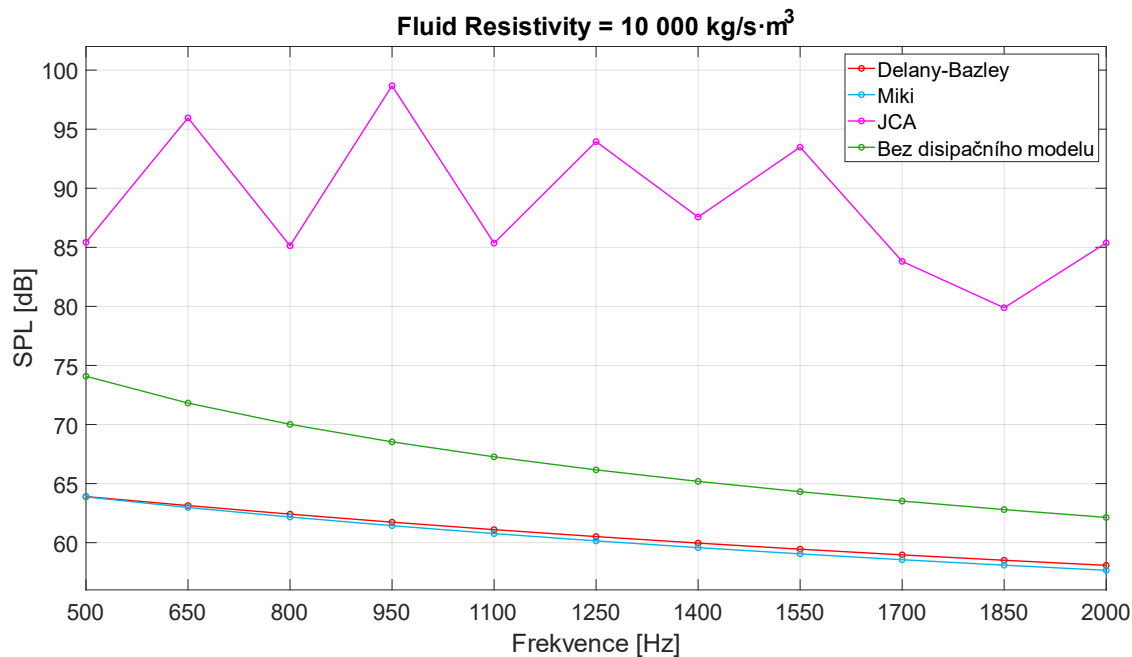
Obr. 7.26 Okrajové podmínky modelu pro ověření funkčnosti disipačních modelů

Dle manuálu pro práci v softwaru ANSYS (viz [36]) jsou pro disipační modely určené oblasti poměru f/σ (kde f je frekvence [Hz] a σ je parametr Fluid Resistivity [$\text{kg/s}\cdot\text{m}^3$]), ve kterých je funkčnost daného modelu zaručena. Pro model Delany-Bazley je tento interval určen jako 0,01 – 1, pro model Miki je to $>0,01$. Interval f/σ funkčnosti modelu JCA manuál neuvádí.

Tato analýza respektuje frekvenční rozsah původního experimentu, tedy 500 – 2000 Hz. Z nejvyšší uvažované frekvence opět vychází i velikost prvků sítě, která je zde stejná jako v případě původní analýzy (viz kap. 7.2.2). Velikost parametru Fluid Resistivity se běžně pohybuje v řádech desítek tisíc $\text{kg/s}\cdot\text{m}^3$, v tomto případě analýza probíhala pro 10 000, 30 000 a 50 000 $\text{kg/s}\cdot\text{m}^3$. Poměr f/σ tedy nabýval hodnot 0,01 – 0,2 a tedy modely Delany-Bazley i model Miki by měly být funkční.

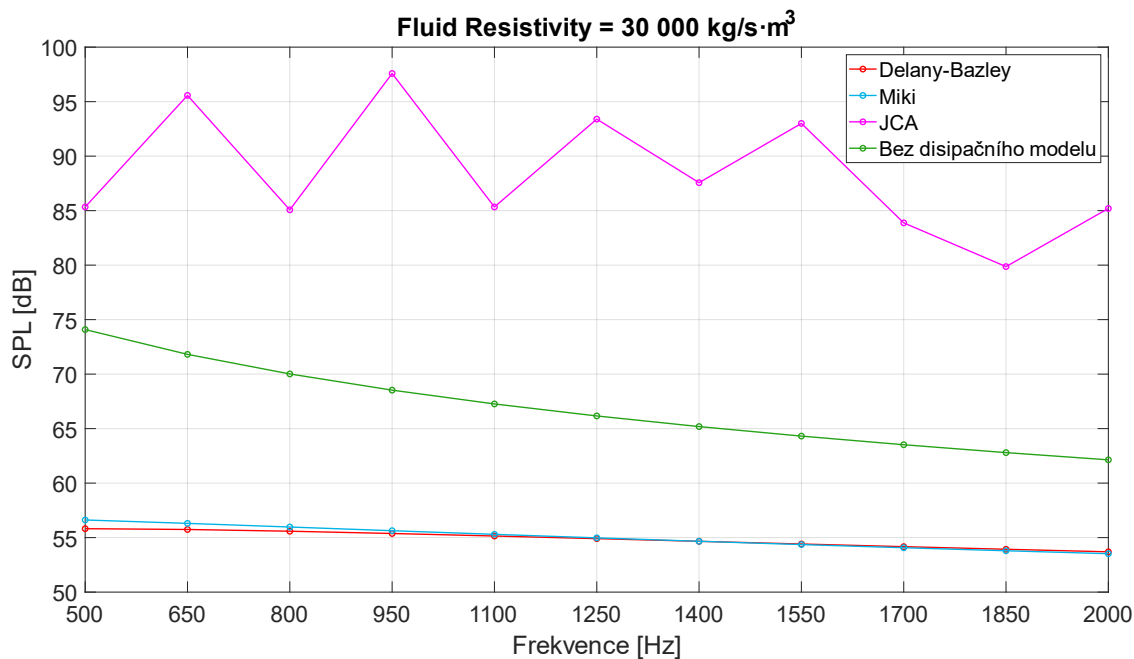
Pro porovnatelnost jednotlivých modelů byla amplituda akustického tlaku zdroje pro všechny případy stejná (5 Pa). Ta byla z důvodů zmiňovaných v kap. 7.2.3 přepočítána na hodnotu amplitudy povrchové rychlosti (Surface Velocity). Výsledkem je tedy buzení povrchovou rychlostí o hodnotě 0,0118 m/s. Po nastavení modelu se při konstantním buzení sledovala hladina akustického tlaku ve výstupním prostoru modelu (za vzorkem) v závislosti na změně disipačního modelu a na změně parametru Fluid Resistivity.

- Fluid Resistivity = $10\,000\text{ kg/s}\cdot\text{m}^3$ (viz Obr. 7.27)



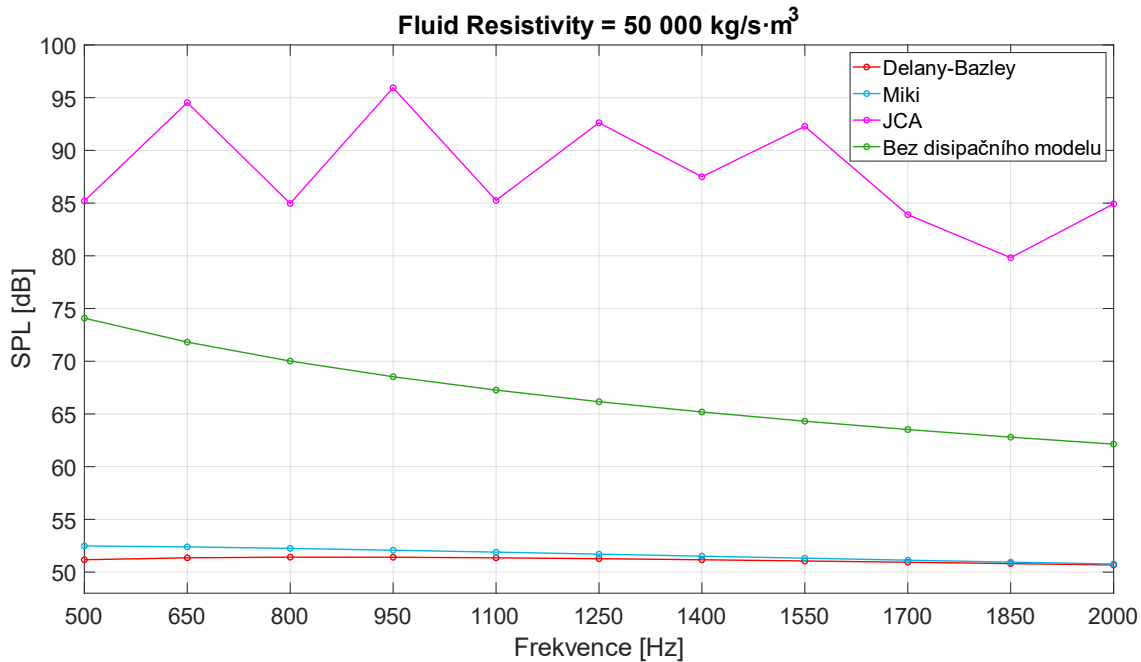
Obr. 7.27 Porovnání disipačních modelů pro parametr Fluid Resistivity = $10\,000\text{ kg/s}\cdot\text{m}^3$

- Fluid Resistivity = $30\,000\text{ kg/s}\cdot\text{m}^3$ (viz Obr. 7.28)



Obr. 7.28 Porovnání disipačních modelů pro parametr Fluid Resistivity = $30\,000\text{ kg/s}\cdot\text{m}^3$

- Fluid Resistivity = $50\,000\text{ kg/s}\cdot\text{m}^3$ (viz Obr. 7.29)



Obr. 7.29 Porovnání disipačních modelů pro parametr Fluid Resistivity = $50\,000\text{ kg/s}\cdot\text{m}^3$

Z porovnání výsledků jednotlivých modelů s případem bez disipačního modelu je patrné, že hlavní parametr těchto modelů, tedy parametr Fluid Resistivity, má velice podstatný vliv na hodnotu hladiny akustického tlaku za zkoumaným vzorkem.

Modely Delany-Bazley a Miki vykazují velice podobné výsledky a v použitém rozmezí parametru Fluid Resistivity a v použitém frekvenčním rozsahu je jejich vliv na výsledky téměř totožný. Oba tyto modely vykazují snížení hladiny akustického tlaku za zkoumaným vzorkem, tedy počítají s určitou absorpcí akustické energie (uvažují disipaci – přeměnu energie akustické na tepelnou). Podíl absorbované energie dle předpokladu roste s rostoucí hodnotou parametru Fluid Resistivity.

Na druhé straně model JCA vykazuje nelogické výsledky, které jsou z hlediska absorpce akustické energie horší než v případě nepoužití žádného disipačního modelu. Tento model taktéž vykazuje nestálou závislost absorbované akustické energie na frekvenci, na rozdíl od předchozích dvou modelů. Toto chování modelu JCA však mohlo být způsobeno nesprávnými hodnotami zbylých vstupních veličin, které tento model vyžaduje.

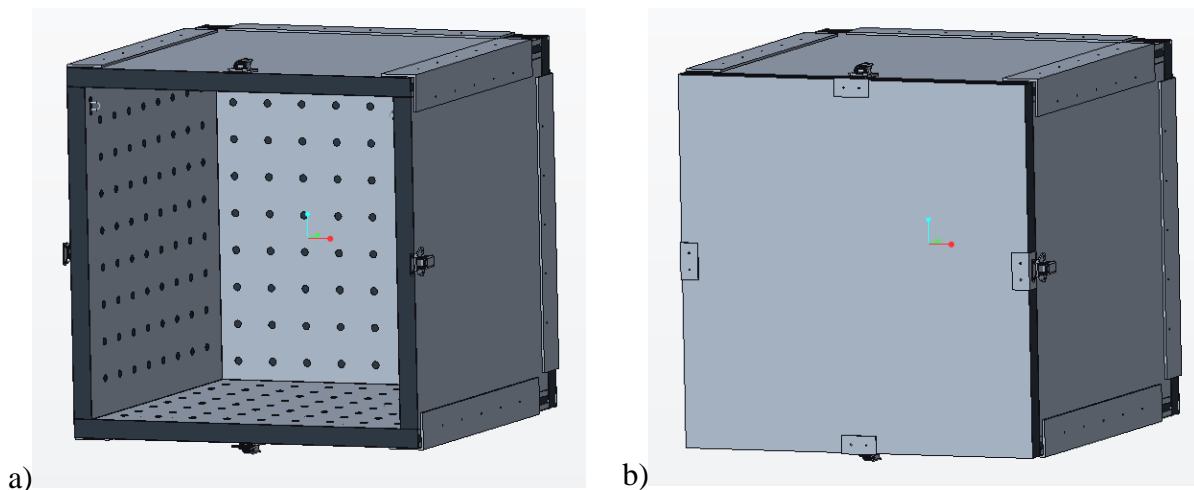
Z uvedeného je patrné, že modely Delany-Bazley a Miki vykazují absorpci (disipaci) akustické energie v závislosti na parametru Fluid Resistivity, a snižují tak hladinu akustického tlaku při průchodu akustického vlnění zkoumaným vzorkem. Z tohoto lze usoudit, že tyto dva modely fungují správně, ale pouze pro klasické aplikace akustických analýz, kdy je zkoumán rozdíl akustického tlaku před a za vzorkem, nikoliv pro případ impedanční trubice. Zajímavým případem je zde model JCA, který vykazuje velice odlišné výsledky než předchozí dva modely, ale je silně závislý na vstupních parametrech, které je velice obtížné pro většinu materiálů zjistit. Také není kvůli absenci informací v manuálu ANSYSU zaručeno, zda je při tomto nastavení model JCA funkční.

8 EXPERIMENT S VYUŽITÍM BEZDOZVUKOVÉ KOMORY

Po experimentu v impedanční trubici přišel na řadu experiment uvnitř bezdozvukové komory. Pro tento experiment bylo potřeba navrhnout a postavit experimentální zařízení, jak bylo avizováno v kap. 5.

Experimentální zařízení sestává z duté krabice, jejíž stěny jsou tvořeny panely z akusticky pohltivých sendvičových panelů Willbrandt Contrabel (stejný materiál, z kterého byl vytvořen vzorek č. 5 do impedanční trubice), které byly opět dodány společností AVL Moravia s.r.o. v požadovaných rozměrech. Jedna ze stěn je navržena jako výměnná pomocí bednových uzávěrů z důvodu možnosti výměny této stěny za stěnu z jiného materiálu, a tím pádem lepší využitelnosti zařízení pro budoucí účely. Ostatní stěny jsou pevně spojeny k sobě pomocí sešroubovaných L-profilů. Uvnitř krabice se v horní části nachází našroubovaná oka, která slouží k zavěšení všesměrového zdroje zvuku (tzv. omnisource), který generuje všesměrové sférické akustické vlny. Rozměry vnitřního objemu zařízení činí 900x900x900 mm a tloušťka každého panelu je 49 mm. Návrhový model experimentálního zařízení lze vidět na Obr. 8.1.

Podstatou experimentu bylo měření rozdílu v hladině akustického tlaku ($SPL [dB]$) uvnitř a vně experimentálního zařízení. Tento rozdíl charakterizuje absorpční vlastnosti jednotlivých panelů. Výhodou oproti experimentu s využitím impedanční trubice je přiblížení experimentu reálnému použití. Byly zkoumány zvuk pohltivé vlastnosti ve všech směrech, což je praktičtější a reálnému použití bližší než kolmý dopad akustické vlny, jako tomu bylo v případě impedanční trubice. Celé zařízení bylo proto ještě umístěno do bezdozvukové komory, aby se eliminoval vnější hluk, popř. hluk vznikající odrazem akustických vln od stěn místnosti, což by do měření mohlo vnášet rušení.



Obr. 8.1 Návrh experimentálního zařízení: a) s otevřenou výměnnou stěnou, b) se zavřenou výměnnou stěnou

8.1 SESTAVENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ

Experimentální zařízení bylo až na několik malých odchylek sestaveno dle návrhového modelu. První odlišností bylo použití montážních úhelníků ke spojení jednotlivých stěn, namísto dříve navrhovaných L-profilů, a to z důvodu příznivější ceny. Dalším rozdílem od návrhu bylo použití šroubů namísto samořezných vrtů, a to z důvodu vysoké hmotnosti jednotlivých stěn. Po sestavení vznikly na plochách, kde na sebe stěny dosedají, velké vůle (netěsnosti). Tyto netěsnosti by mohly mít za příčinu únik akustického vlnění zevnitř zařízení, a tedy zkreslení naměřených výsledků. Z tohoto důvodu byly dosedací plochy utěsněny sanitárním silikonem. Sestavené experimentální zařízení připravené na umístění do bezdozvukové komory lze vidět na Obr. 8.2.

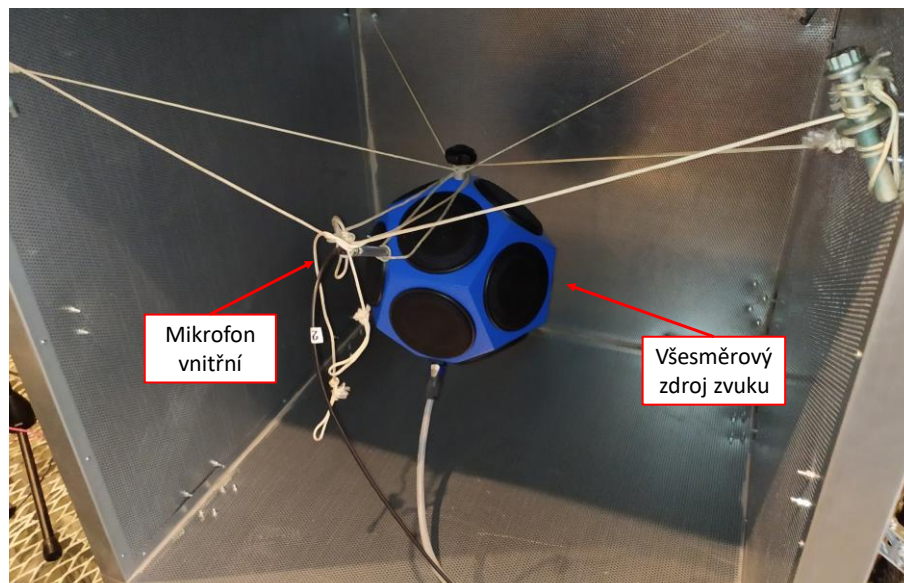


Obr. 8.2 Sestavené experimentální zařízení

8.2 PŘÍPRAVA MĚŘICÍ APARATURY

Experimentální zařízení bylo umístěno do bezdozvukové komory a postaveno na čtyři dřevěné špalky. Na háčky uvnitř experimentálního zařízení byl pomocí provazů zavěšen všesměrový zdroj akustického signálu. Jeho kabel byl vyveden vyříznutou drážkou v boční stěně zařízení, která byla následně utěsněna pomocí akustické pěny. Zdroj byl ustaven tak, aby byl zhruba uprostřed vnitřního prostoru zařízení.

Pro měření hladiny akustického tlaku byly použity mikrofony společnosti Brüel & Kjær. První mikrofón byl umístěn uvnitř experimentálního zařízení. Byl taktéž zavěšen pomocí provazů a ustaven do dostatečné vzdálenosti od membrán všesměrového zdroje. Bylo důležité neumístit jej příliš blízko membrány, aby bylo zajištěno chování zdroje jako zdroje bodového, nikoliv jako několik jednotlivých reproduktorů; a tedy aby byla snímána hladina akustického tlaku vytvářených sférických akustických vln. Ustavení všesměrového zdroje i vnitřního mikrofónu snímajícího hladinu akustického tlaku sférických vln zdroje lze vidět na Obr. 8.3.



Obr. 8.3 Ustavení všesměrového zdroje a vnitřního mikrofonu uvnitř experimentálního zařízení

Další mikrofony byly umístěny na stojanech; a to tak, aby byla snímána hladina akustického tlaku ve vzdálenosti 30 cm od středu přední, levé a horní stěny experimentálního zařízení. Jejich ustavení okolo zařízení umístěného v bezdozvukové komoře lze vidět na Obr. 8.4.



Obr. 8.4 Ustavení mikrofonů před jednotlivé stěny experimentálního zařízení

8.3 MĚŘENÍ

Po zapojení a zprovoznění aparatury mohlo začít samotné měření. Ke generování akustického signálu bylo využito softwaru m+p Analyzer, pomocí kterého bylo generováno sinusové akustické vlnění vždy o požadované frekvenci, popř. signál bílého šumu (viz dále). K vyhodnocování hladiny akustického tlaku v jednotlivých místech okolo experimentálního zařízení bylo využito softwaru BK Connect, pomocí kterého bylo možné zprůměrovat hodnotu hladiny akustického tlaku během celého působení akustického signálu, který trval vždy 30 s.

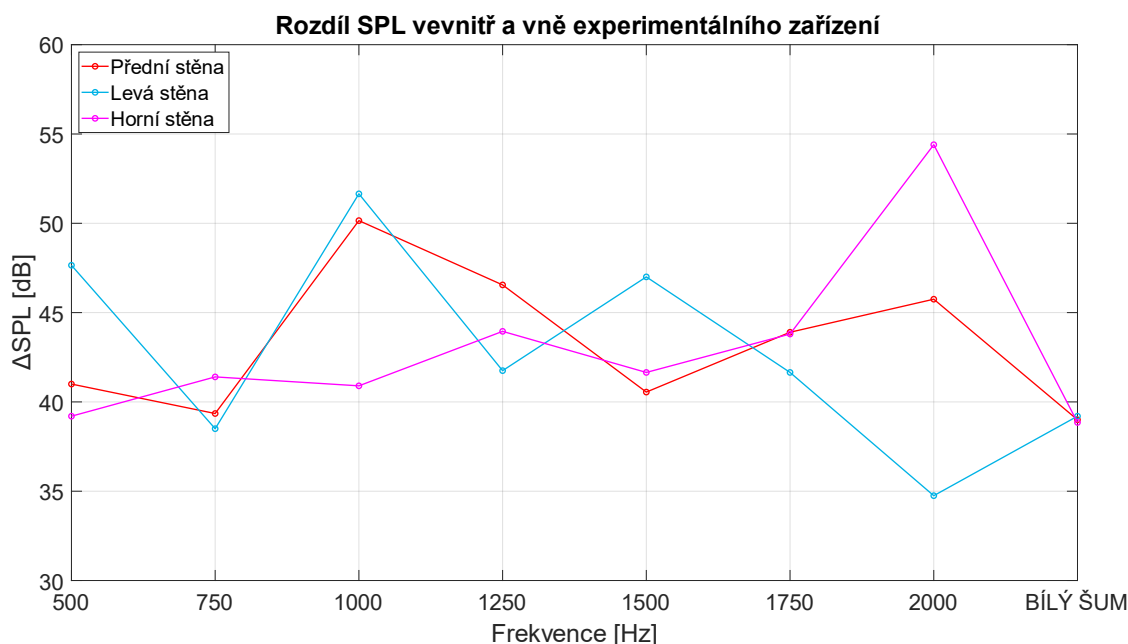
Experiment probíhal pro stejný frekvenční rozsah jako experiment v impedanční trubici, tedy 500 – 2000 Hz. Rozdílem byla však velikost kroku, která zde byla z důvodu časové náročnosti (zejména následující numerické analýzy) navýšena, a to na 250 Hz. Po měření na všech požadovaných frekvencích následovalo ještě buzení tzv. bílým šumem, tedy signálem s rovnoměrným výkonem v jakémkoliv frekvenčním pásmu.

Použitý zesilovač umožňoval variabilní hodnotu zesílení, které bylo nastaveno tak, aby rozdíl v hladině akustického tlaku s vypnutým a zapnutým zdrojem akustického signálu byl cca 10 dB. Tohoto se dosáhlo nastavením zesílení asi na 75 %. Pouze v případě bílého šumu stačilo asi 50 %, protože signál byl hlasitější než předchozí signály sinusové. Pro všechny frekvence proběhly dvě po sobě jdoucí měření, jejichž výsledky se lišily pouze v jednotkách desetín dB. Průměry výsledků obou měření, tedy hladiny akustického tlaku za přední, levou a horní stěnou; a uvnitř experimentálního zařízení závislé na frekvenci, lze vidět v Tab. 8.1.

Tab. 8.1 Výsledky experimentu s využitím bezdozvukové komory

f [Hz]	SPL [dB]			
	ZA PŘEDNÍ STĚNOU	ZA LEVOU STĚNOU	ZA HORNÍ STĚNOU	UVNITŘ
500	60,5	53,9	62,3	101,5
750	60,2	61,1	58,2	99,6
1000	47,9	46,4	57,2	98,1
1250	53,0	57,8	55,6	99,6
1500	55,8	49,4	54,7	96,4
1750	59,1	61,4	59,2	103,0
2000	57,8	68,8	49,1	103,5
BÍLÝ ŠUM	67,5	67,3	67,7	106,5

Hlavním ukazatelem zvukové absorpce použitých sendvičových panelů je rozdíl hladiny akustického tlaku před a za použitým panelem v příslušném směru. Naměřené hodnoty hladiny akustického tlaku v příslušných směrech byly odečteny od hodnot hladiny akustického tlaku naměřeného uvnitř experimentálního zařízení a výsledky byly vyneseny do frekvenční závislosti. Jejich grafické znázornění lze vidět na Obr. 8.5.



Obr. 8.5 Rozdíly hladiny akustického tlaku vevnitř a vně experimentálního zařízení

Z Obr. 8.5 je patrné, že rozdíly hladiny akustického tlaku se pro sinusové signály liší v závislosti na konkrétním směru. Nejvíce je tomu tak u signálu o frekvenci 2000 Hz.

Tyto rozdíly mohly být způsobeny nesouměrným ustavením experimentálního zařízení uvnitř bezdozvukové komory. Z důvodu malých rozměrů bezdozvukové komory a z důvodu přítomnosti jiné měřené sestavy uvnitř komory bylo experimentální zařízení umístěno do jednoho z jejích rohů. Levá a horní stěna experimentálního zařízení tak byly z jedné strany v kontaktu s absorpční stěnou bezdozvukové komory, a tudíž část akustické energie těmito stěnami procházející byla absorbována a neovlivňovala tak hladinu akustického tlaku naměřenou před ostatními stěnami.

Dalším důvodem těchto rozdílů mohlo být nesymetrické umístění (zavěšení) všesměrového zdroje akustického signálu. Amplituda akustického tlaku generované sférické sinusové vlny byla závislá na poloze, tudíž v každém směru mohla mít tato amplituda v místě dopadu na stěnu akustického panelu jinou hodnotu.

Největší shodu výsledků pro všechny směry lze pozorovat v případě bílého šumu, který nejlépe vystihuje buzení v reálných praktických aplikacích použitých absorpčních akustických panelů, kde je výsledné buzení součtem několika různých zdrojů, z nichž každý působí jinou frekvencí.

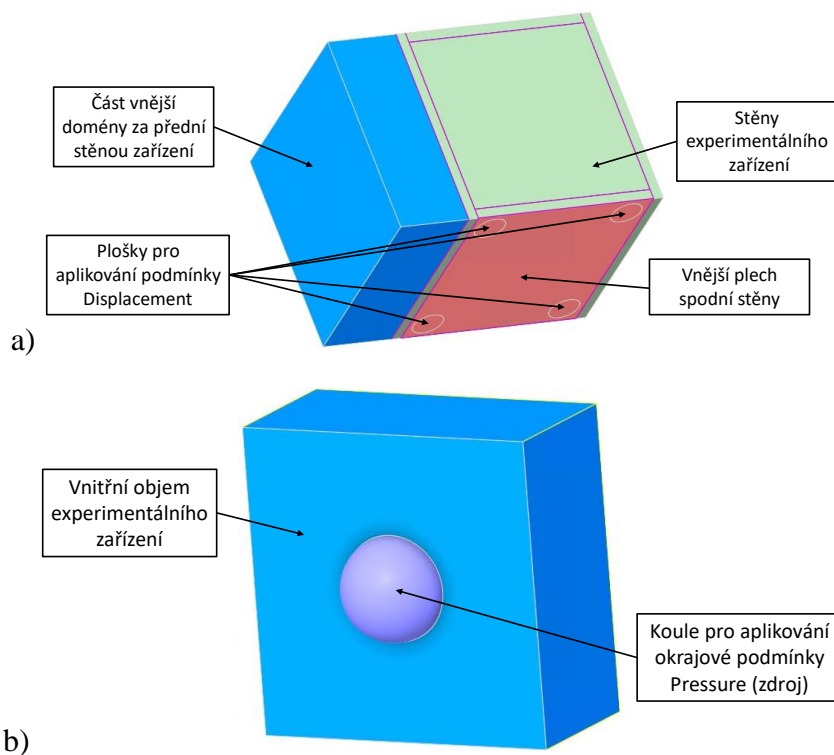
8.4 NUMERICKÁ SIMULACE

Vzhledem k tomu, že ANSYS uvažuje všechny tělesa strukturální domény (tedy vnější plné plechy sendvičového panelu) jako plně odrazivé, bylo zvoleno přístupu, kdy celá stěna sendvičového panelu sestávala z jednoho kusu, namísto třech vrstev, které ve skutečnosti použité panely obsahovaly. Prvky strukturální domény ANSYS neumí považovat za akusticky absorpční, tudíž nemohly být v analýze obsaženy.

8.4.1 GEOMETRIE

Geometrie této analýzy vychází z geometrie navrženého experimentálního zařízení (viz Obr. 8.1). Pro MKP analýzu byla geometrie značně zjednodušena – byl odstraněn spojovací materiál, L-profil, oka pro zavěšení zdroje a uzávěry výměnné stěny. Jak již zaznělo v úvodu této kapitoly, panely v analýze nemohly obsahovat geometrii samotných nosných plechů, proto byly stěny uvažovány pouze jako jeden kus. Pouze spodní stěna experimentálního zařízení byla rozdělena na dvě části, z nichž jedna tvořila výplň stěny a druhá vnější plech; a to z důvodu pozdějšího zadání okrajových podmínek zabráňujících pohybu celého zařízení, které nelze zadat na plochy akustické domény. Na ploše spodního plechu byly vytvořeny čtyři menší plošky, které představovaly plochu špalků, na kterých zařízení při experimentu stálo.

Vnitřní objem byl z důvodu zadání buzení (viz dále) rozdělen na dva dílčí objemy. Ve středu byl tvořen koulí, jejíž průměr odpovídal vnějším rozměrům použitého všesměrového zdroje zvuku. Kouli obklopoval zbytek vnitřního objemu. Mimo objem samotného zařízení byla vymodelována ještě část vnějšího objemu obklopujícího zařízení. Pro každý směr byla z důvodu velkého počtu prvků síť později vedena separátní analýza, proto byla tato vnější doména vždy vymodelována zvlášť pro každý směr. Výsledný model pro vstup do MKP analýzy řešící přední stěnu zařízení lze vidět na Obr. 8.6.



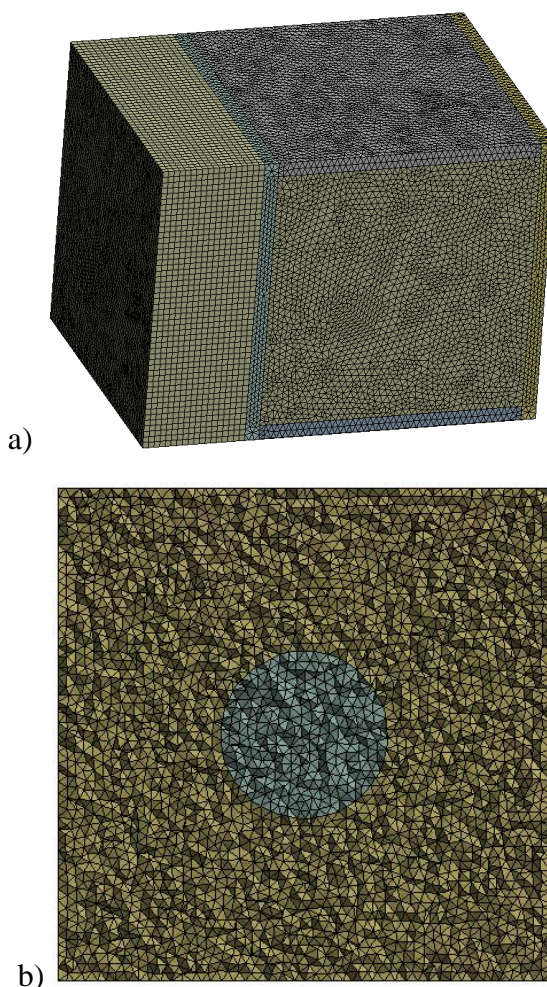
Obr. 8.6 Zjednodušený model geometrie experimentálního zařízení pro vstup do MKP analýzy: a) pohled z vnějšku, b) řez vnitřním objemem

Modelu byla nastavena sdílená topologie všech prvků. Tímto nastavením se ze vzniklých objemů stalo jedno těleso složené z více částí, díky čemuž bylo možné provázat síť jednotlivých částí při následném sítování. Díky tomuto nastavení také nemusely být nijak řešeny kontakty mezi jednotlivými objemy. Vnitřnímu a vnějšímu objemu zařízení byl jako materiál přiřazen vzduch o teplotě 22°C. Objemu sendviče byla jako materiál přiřazena minerální vata a spodnímu vnějšímu plechu byla přiřazena konstrukční ocel.

8.4.2 Síť

Síť opět musela respektovat nejvyšší uvažovanou frekvenci analýzy, a tedy nejkratší vlnovou délku. Frekvenční rozsah byl stejný jako u experimentu v impedanční trubici, proto lze opět vycházet z výpočtu v kap. 7.2.2 Z důvodu velkého objemu a velice objemné sítě, byl počet prvků na nejkratší akustickou vlnu redukován na 8. Toto nastavení sice do jisté míry snižuje přesnost výpočtu, ale umožňuje celkový počet prvků (cca 1,4 mil.) a tím i dobu výpočetního času udržet na přijatelné hodnotě.

Všem částem geometrie byla tedy pomocí nástroje Body Sizing nastavena největší možná velikost prvku jako 20 mm. Kvůli nepravidelnosti tvaru vzniklých objemů byly všechny vzniklé objemy vysítovány tetragonálními prvky, čímž vznikla nestrukturovaná síť. Jediný pravidelný tvar měl objem představující část vnější domény (kvádr), ten byl automaticky vysítován prvky hexagonálními. Výslednou síť lze vidět na Obr. 8.7.



Obr. 8.7 Výsledná MKP síť: a) pohled z vnějšku, b) řez vnitřním objemem

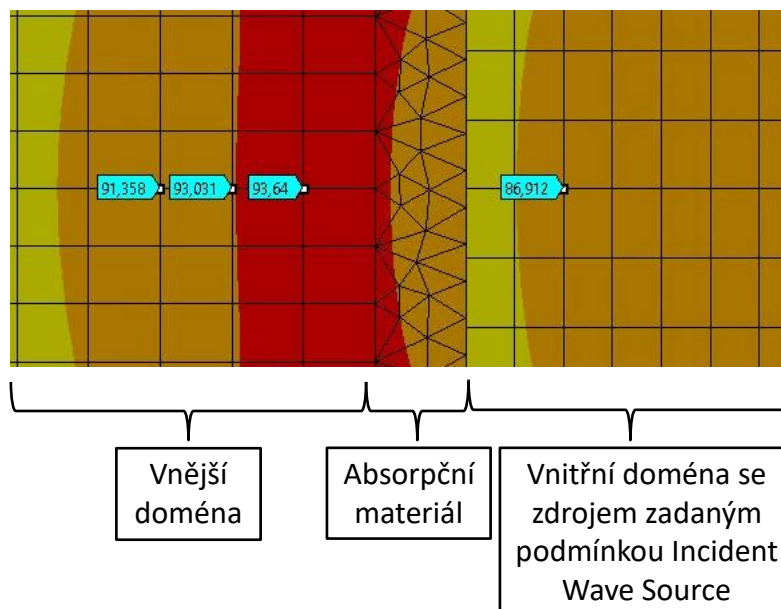
8.4.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Jako první bylo potřeba natavit frekvenční rozsah analýzy a počet jejich kroků. Z důvodu dlouhého výpočetního času a počtu provedených analýz (pro každou frekvenci jeden a pro každý směr jeden) byla analýza provedena pro oblast 500 – 2000 Hz s krokem 250 Hz.

Následně bylo potřeba nastavit objemy akustické domény. Ty byly zvoleny jako všechny objemy vnitřní domény, všechny objemy představující stěny zařízení a také objem představující část vnější domény. Pro stěny zařízení byl opět použit model Delany-Bazley, tedy model uvažující disipaci akustické energie v porézním médiu. Jako doména strukturální byl zadán objem představující vnější plech spodního stěny zařízení (viz kap. 8.4.1).

Na čtyři menší plošky vytvořené na tělese plechu spodní stěny zařízení (viz kap. 8.4.1) byla zadána okrajová podmínka Displacement – nulový posun ve svislém směru (Z). Stejná podmínka byla zadána na jednu z nich, tentokrát zabraňující pohybu ve směru X a Y. Poslední podmínkou byla okrajová podmínka Displacement zabraňující pohyb ve směru osy X na jednu z dalších plošek. Tímto nastavením se docílilo toho, že celému zařízení byla odebrána možnost pohybovat se v jakémkoliv směru a rotovat kolem jakékoliv osy.

Následně bylo nutno zadat buzení. Bylo vyzkoušeno více typů zdrojů akustických signálů: Mass Source, Incident Wave Source a Surface Velocity (popř. Pressure). Nejjednodušší pro zadání bylo buzení pomocí podmínky Incident Wave Source. Tato okrajová podmínka dokáže simulovat sférické vlny pomocí tzv. monopólu (pulsující koule), přičemž lze zadat průměr pulsující koule a sílu zdroje (ve formě tlaku nebo rychlosti). Problémem je zde však to, že při průchodu absorpčním materiálem je tato vlna ignoruje a její energie neklesá, viz Obr. 8.8.

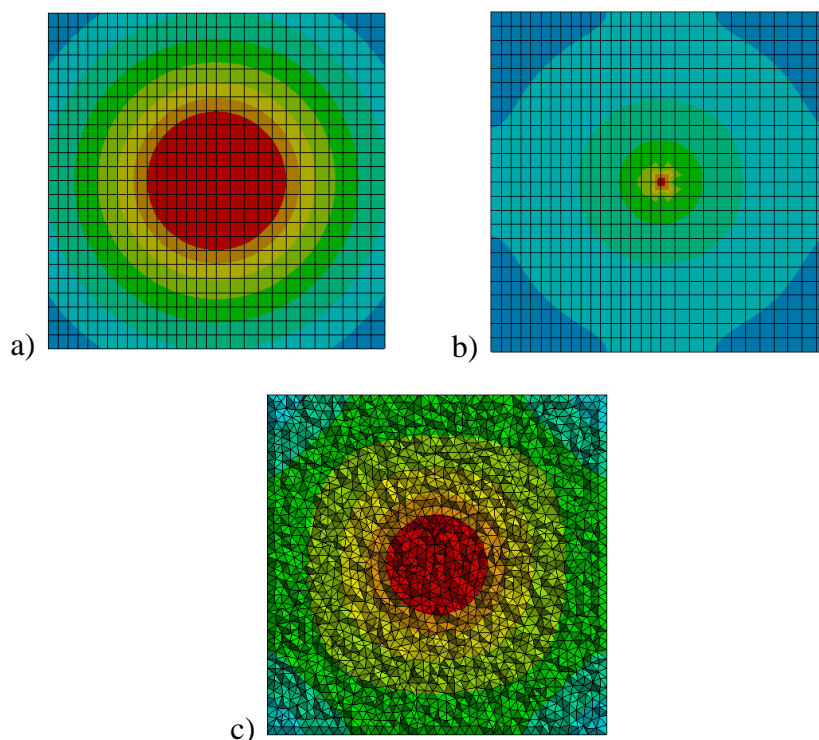


Obr. 8.8 Neuvažování absorpčních vlastností materiálu při průchodu vlny zadané podmínkou Incident Wave Source – vyhodnocení hladiny akustického tlaku [dB]

Druhou možností byla sférická vlna generovaná podmínkou Mass Source zadanou na střed vnitřního objemu, která opět budí sférické vlny. Při průchodu absorpčním materiálem zde vzniká pokles akustické energie, ale při zadání na bod (Vertex) tato okrajová podmínka vyžaduje zadání amplitudy v netypických jednotkách ([kg/s]).

Kvůli výše zmíněnému se přešlo k buzení pomocí okrajové podmínky Surface Velocity, která byla zadána na vnější plochu koule uprostřed vnitřního objemu zařízení (viz kap 8.4.1). Naměřený akustický tlak uvnitř zařízení byl tedy opět pomocí vzorce (42) přepočítán na povrchovou rychlost a zadán do této okrajové podmínky. Výsledkem však byl nulový akustický tlak v celé akustické doméně, což bylo zřejmě způsobeno neschopností této podmínky fungovat na zakřivené ploše (povrch koule).

Přešlo se tedy k buzení okrajovou podmínkou Pressure. Tato podmínka sice ubrala jeden stupeň volnosti (viz kap. 7.2.3), ale vzhledem k důvodům popsaných výše bylo toto nastavení jedinou (zároveň však pořád dostatečně přesnou) možností. Grafickou vizualizaci akustických vln generovaných jednotlivými typy okrajových podmínek lze vidět na Obr. 8.9.



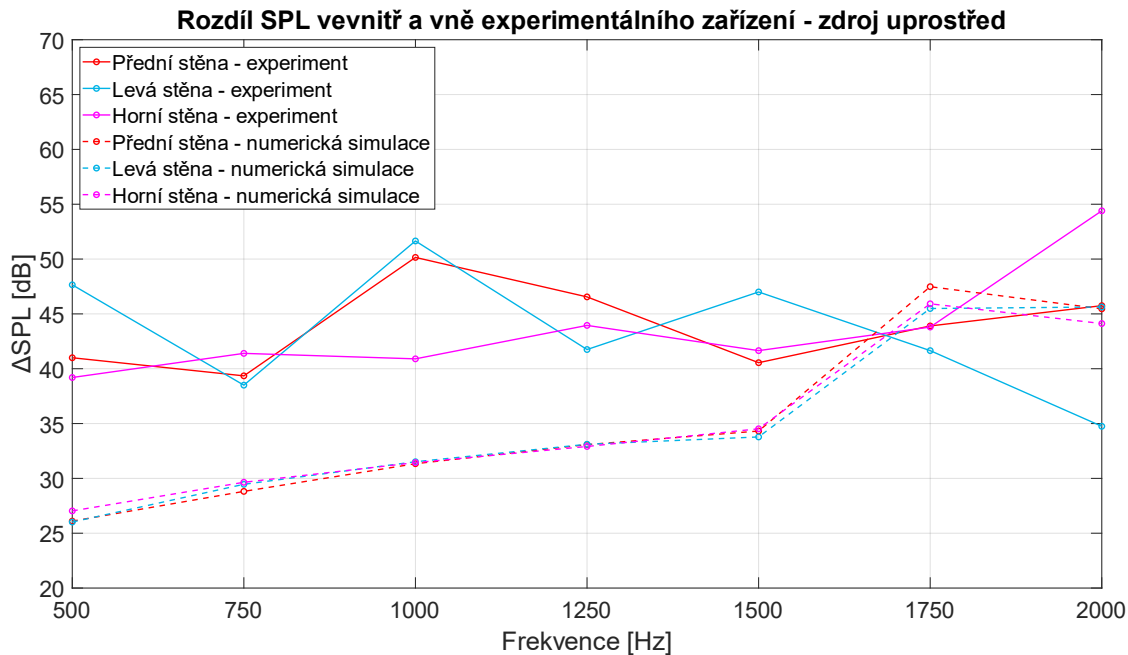
Obr. 8.9 Vizualizace sférických akustických vln generovaných různými typy okrajových podmínek: a) Incident Wave Source (Monopole), b) Mass Source (zadáno na bod – Vertex), c) Pressure (zadáno na povrch koule)

Dále byla zadána radiační okrajová podmínka, tedy plochy modelu, které vyzařují akustickou energii. Tato podmínka tedy byla zadána na vnější plochy experimentálního zařízení, aby bylo docíleno propagace akustických vln přes stěny zařízení do vnější domény. Dále byla tato podmínka zadána na vnější plochy části vnější domény, což mělo za cíl propagaci akustického vlnění z vnější domény dál do prostoru bezdozvukové komory.

Další okrajovou podmínkou byla podmínka Absorption Surface, jejíž použití má za následek absorpci určité části akustické energie na tuto plochu dopadající. Tato okrajová podmínka byla zadána na vnější plochy vnějších domén, které byly v bezprostředním kontaktu se stěnou bezdozvukové komory, tedy na jednu ze stěn vnější domény za levou stěnou zařízení a na jednu ze stěn vnější domény za horní stěnou zařízení. Hodnota absorpčního koeficientu byla zvolena jako 1, tedy 100 % přichodící akustické energie bylo touto plochou absorbováno, což (teoreticky) simuluje stěnu bezdozvukové komory.

8.4.4 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH PŘÍSTUPŮ

Výsledky numerické simulace byly vyhodnocovány stejným způsobem jako výsledky experimentu, byl tedy vyhodnocován rozdíl hladiny akustického tlaku vně (vždy v příslušném směru a v poloze kde byly během experimentu umístěny mikrofony) a uvnitř zařízení. Tyto rozdíly hladiny akustického tlaku byly vyneseny do frekvenční závislosti spolu s výsledky experimentálními pro lepší porovnatelnost obou metod (viz Obr. 8.10).

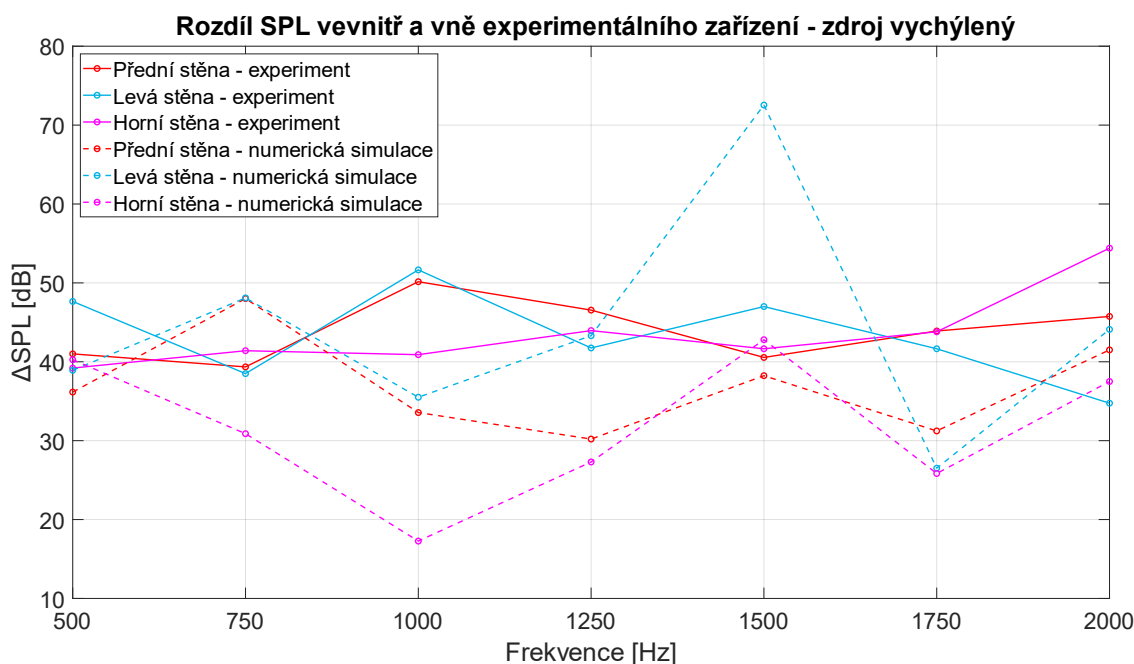


Obr. 8.10 Porovnání rozdílu SPL vevnitř a vně experimentálního zařízení pro oba přístupy – analýza 1

Z porovnání výsledků obou přístupů je patrné, že rozdíl hladiny akustického tlaku vně a vevnitř experimentálního zařízení zjištěný numericky není téměř závislý na směru, kterým se akustické vlny šíří (X, Y, Z). Tato skutečnost byla s největší pravděpodobností způsobena uvažováním dokonalé symetrie jak umístění akustického zdroje, tak umístěním bodů, ve kterých se hladina akustického tlaku vně zařízení vyhodnocovala. Ve skutečném případě však s velkou pravděpodobností vznikly od této dokonalé symetrie odchylky, proto bylo potřeba je uvažovat a analýzu provést znovu.

Zdroj akustické energie (tedy koule s aplikovanou okrajovou podmínkou Pressure) byl vychýlen ze středu vnitřního prostoru: 100 mm ke spodní stěně zařízení (tato odchylka vznikla zejména z důvodu prověšení zdroje na kotvících provazech vlastní vahou) a 50 mm k přední výměnné stěně zařízení (tato odchylka vznikla z důvodu většího propnutí provazů na lépe dostupné straně, což vedlo k přiblížení zdroje této straně).

Všechny typy okrajových podmínek, stejně jako síť, byly použity stejné jako v analýze předchozí. Opět byl vyhodnocován rozdíl v hladině akustického tlaku vně (30 cm od středu stěny) a uvnitř (v místě kde byl během experimentu vnitřní mikrofón) zařízení. Frekvenční závislost lze vidět na Obr. 8.11.



Obr. 8.11 Porovnání rozdílu SPL vevnitř a vně experimentálního zařízení pro oba přístupy – analýza 2

8.4.5 DISKUZE

Z porovnání výsledků obou numerických analýz, je na první pohled patrné, že výsledky vypočítaných hladin akustického tlaku v jednotlivých směrech jsou silně závislé na poloze zdroje akustického vlnění.

V případě uvažování dokonalé symetrie (analýza 1), tedy umístění akustického zdroje přesně do středu vnitřní domény je patrné, že ve všech směrech je naměřena téměř stejná hodnota hladiny akustického tlaku, a tedy při tomto nastavení mají panely experimentálního zařízení ve všech směrech totožné absorpční vlastnosti.

V druhém případě (analýza 2), kde bylo snahou přiblížit umístění akustického zdroje více reálnému případu, lze sledovat přiblížení výsledků numerické analýzy k těm experimentálním. Až na případ 1000 Hz, resp. 1500 Hz, kde rozdíl hladiny akustického tlaku vně a vevnitř zařízení prudce klesne, resp. vzroste; lze vidět značné přiblížení numerických dat těm experimentálním. Tyto velké odchylky mohly být způsobeny např. vlastními frekvencemi vnitřního objemu vzduchu.

Lze tedy předpokládat, že při snaze přiblížit nastavení numerické analýzy proběhnutému experimentu, popř. při snaze docílit dokonalé symetrie zavěšení zdroje akustického signálu během experimentu, by rozdíly mezi výsledky obou metod byly ještě nižší a numerická analýza by se tak ještě víc přiblížila proběhnutému experimentu.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala stanovením akusticky pohltivých vlastností vzorků konkrétních materiálů, a to jak experimentálním, tak numerickým přístupem. Mimo jiné byla v teoretické části této práce provedena rešerše, která čtenáře seznamuje jak s druhy používaných zvuk pohltivých materiálů a možnostmi zkoumání jejich vlastností, tak se základními pravidly a poznatky ke tvorbě numerických konečněprvkových modelů analýz z oblasti akustiky.

Jako první bylo zkoumáno 6 vzorků různých materiálů pomocí impedanční trubice. Při měření byl dodržen postup stanovený normou ČSN ISO 10534-1. Nejvhodnějším akusticky pohltivým materiálem z šesti zkoumaných je dle výsledků akustická pěna ROCKFONIK, a to na téměř všech měřených frekvencích, kromě té nejnižší, kde má lepší absorpční vlastnosti vzorek ze sendvičového panelu WILLBRANDT Contrabel. Kromě nejnižší frekvence činitele zvukové absorpce pěny ROCKFONIK neklesl pod 0,8; v případě vzorku z panelu WILLBRANDT Contrabel neklesl pod 0,7. Tyto dva materiály byly z šesti zkoumaných jediné, které jsou primárně určeny pro akustické aplikace. Ostatní materiály mají jiné primární využití, proto jsou jejich absorpční vlastnosti dle očekávání horší. Přibližně lze říci, že tyto materiály dosahují asi 40-50 % absorpčních vlastností materiálů ROCKFONIK a WILLBRANDT Contrabel, a to na naprosté většině měřených frekvencí. Lepších absorpčních vlastností materiály dosahují zpravidla na vyšších frekvencích, pouze u frekvence 1700 Hz lze u více materiálů sledovat pokles hodnoty činitele zvukové absorpce. Tento pokles nebyl způsoben rezonancí na vlastních frekvencích vnitřního objemu impedanční trubice, neboť měření bylo znovu provedeno i se změněnou velikostí vnitřního objemu, přičemž pokles činitele zvukové absorpce se na této frekvenci stále nacházel.

Při měření se přišlo na hlavní nedostatky současné konstrukce použité impedanční trubice. Hlavním problémem je to, že při maximálním vysunutí mikrofonu se mikrofon nachází asi 120 mm od povrchu vzorku, a tudíž není zaručeno, že bude nalezeno první tlakové minimum, obzvláště pak u vlnění o vyšších frekvencích (a tedy kratších vlnách). Toto první tlakové minimum je stěžejní pro výpočet činitele zvukové absorpce. I toto mohlo být důvodem velkých rozdílů (v případě vyšších frekvencí) činitele zvukové absorpce mezi naměřenými daty a daty dodanými dodavatelem, které byly porovnávány v diplomové práci [26], jež se zabývala konstrukcí této použité impedanční trubice. Tento nedostatek lze vyřešit výměnou trubky sondy mikrofonu za delší. Dalším nedostatkem bylo řešení pojezdu trubky se sondou mikrofonu. Uložení mechanismu není dostatečně tuhé. Stejně tak zde bylo velkým nedostatkem odečítání polohy sondy na číselné stupnici, což v kombinaci s nedokonalým pojezdovým mechanismem mělo za příčinu nepřesnosti, obzvláště při hledání tlakových minim u vyšších frekvencí. Tento nedostatek by šel vyřešit přepracováním mechanismu pojezdu trubky sondy a použitím digitálního snímače polohy namísto číselné stupnice. V neposlední řadě by bylo také vhodné lépe řešit mechanismus umožňující změnu vnitřního objemu impedanční trubice. Současný stav se šroubem je při častějších nastavování velice zdoluhavý, proto by bylo vhodné šroub vyměnit za jiný s větším stoupáním, popř. pro posuvný pohyb pístu volit úplně jiný druh mechanismu, např. šroub úplně odstranit a posuvný pohyb pístu řešit pouze posunem táhla spojeného s pístem.

Numerickou simulací proběhnutého experimentu se dosáhlo téměř dokonalého nasimulování poloh minim a maxim akustického tlaku podél impedanční trubice. Citlivostní studií bylo však prokázáno, že žádný ze vstupních parametrů absorpčních materiálů nemá téměř žádný vliv na rozdíl mezi minimem a maximem hladiny akustického tlaku stojaté vlny uvnitř

impedanční trubice, a tedy na výsledný činitel zvukové absorpce. Problémem byly prudké propady hladiny akustického tlaku v minimech stojaté vlny, které negativně ovlivňovaly vypočítaný činitel zvukové absorpce. Bylo proto zvoleno přístupu průměrování hodnot v okolí těchto minim, což částečně pomohlo k přiblížení výsledků numerické analýzy k výsledkům experimentálním. Z uvedeného je však patrné, že vytvořený numerický model nedosahuje požadované přesnosti kladené na současné numerické simulace a není tedy vhodný k přesnému zjišťování absorpčních vlastností materiálů.

Z výše uvedených důvodů bylo nutné ověřit funkčnost disipačních modelů, které uvažují absorpci akustické energie. Byl vytvořen jednoduchý model, na kterém byla provedena citlivostní studie zkoumající funkčnost jednotlivých disipačních modelů nabízených softwarem ANSYS. Z výsledků této studie je patrné, že disipační modely fungují dle předpokladů, a že jejich hlavní vstupní parametr výrazně ovlivňuje absorpční vlastnosti materiálů, kterým je tento model přiřazen. Je také patrné, že tyto modely jsou velice citlivé na vstupní parametry, obzvláště pak disipační model JCA. Tyto vstupní parametry jsou veličiny spojené s odporem proti šíření akustických vln daného materiálu (Fluid Resistivity), popř. jsou to veličiny spojené s geometrií daného materiálu (pórovitost, tortuozita). Zjištění těchto vstupních parametrů je často otázkou rozsáhlejších studií a výzkumů. Zjistit pak přesné hodnoty těchto parametrů pro konkrétní materiály se ukázalo jako velice komplikovaný úkol, obzvláště pak u materiálů, u kterých výrobce nepředpokládá jejich použití ve zvuk pohltivých aplikacích. Na základě dosažených výsledků z této citlivostní studie vzniká požadavek na detailní zaměření a odladění výpočtového modelu korespondujícího s technickým experimentem s impedanční trubicí.

Z výsledků experimentu uvnitř bezdozvukové komory je patrné, že velikost akustické energie absorbované při průchodu sendvičovým panelem WILLBRANDT Contrabel je silně závislá na frekvenci. Nejlepší absorpční vlastnosti byly naměřeny při průchodu akustického vlnění o frekvenci 2000 Hz horní stěnou, kdy byl naměřen útlum 54,4 dB. Nejnižší útlum byl potom naměřen při vlnění o stejné frekvenci při průchodu levou stěnou zařízení, a to 34,8 dB. Nejlepší shodu výsledků útlumu napříč všemi mikrofony (všemi stěnami) lze pozorovat v případě bílého šumu, a to 39 dB (přední stěna); 39,2 dB (levá stěna) a 38,9 dB (horní stěna). Pro budoucí měření by bylo výhodné rozmístit uvnitř zařízení mikrofón zvláště před každou stěnou, aby bylo zaručeno, že bude vyhodnocován vždy rozdíl v hladině akustického tlaku před a za konkrétní stěnou. Vzhledem k tomu, že použitý všesměrový akustický zdroj negeneruje přesně symetrické sférické vlny, a taky vzhledem k tomu, že nebyl přesně symetricky zavěšen a ustaven; nebylo při měření zaručeno, že ve všech směrech byla hladina akustického tlaku před stěnou totožná. Současně by bylo vhodné využít většího počtu mikrofónů vně experimentálního zařízení, které by mohly být umístěny i mimo středy jednotlivých stěn. Navržené a sestavené experimentální zařízení plní svůj účel dle předpokladů. Z výše zmíněných důvodů by však pro budoucí účely experimentálního zařízení bylo vhodné konstrukčně navrhnout a zhotovit úchyty vnitřních mikrofónů, které by zaručovaly jejich ustavení vždy ve stejné poloze při každém měření. Dále by také bylo vhodné navrhnout systém, jehož použitím se docílí symetrického zavěšení všesměrového zdroje, tedy jeho umístění přesně do středu vnitřního prostoru. V neposlední řadě by pro jednodušší užívání bylo vhodné přemístit oka pro zavěšení všesměrového zdroje tak, aby výměnná stěna mohla být řešena jako ta horní, což by usnadnilo manipulaci s touto stěnou, obzvláště pak zavírání bednových uzávěrů. Popřípadě by toto mohlo být uvažováno už při návrhu nového systému ustavení všesměrového zdroje.

První numerickou simulací proběhnutého experimentu se dosáhlo téměř totožných výsledků útlumu pro všechny směry (všechny tři stěny). Z výsledků je patrné, že symetrické zavěšení všesměrového zdroje vede k téměř naprosto symetrickým výsledkům, a že tedy nesouhlasí s výsledky zjištěnými experimentálně. Proto byla analýza provedena znovu, tentokrát s akustickým zdrojem vychýleným ze středu vnitřního objemu, a to směrem ke spodní a přední stěně. Tímto nastavením bylo z výsledků zřejmé, že umístění akustického zdroje, popř. jeho vychýlení ze středu vnitřního objemu, byť jen o několik jednotek cm, má zásadní vliv na výsledky, tedy na naměřenou hladinu akustického tlaku za jednotlivými stěnami experimentálního zařízení. Nejlepší shody výsledků numerické analýzy s výsledky experimentálními lze potom sledovat např. na frekvenci 500 Hz a 1500 Hz (pro přední a horní stěnu) nebo na frekvenci 1250 Hz (pro levou stěnu). Je tedy zřejmé, že přesnější přiblížení nastavení numerické analýzy experimentálnímu řešení může vést k ještě větším shodám výsledků obou metod. Toto však vyžaduje přesnější odměření polohy akustického zdroje během experimentu (což u proběhnutého experimentu nenastalo), popř. úpravu stávajícího experimentálního zařízení, která by vedla k ustavení zdroje signálu v jasně definované poloze (střed vnitřního objemu). Z výsledků analýzy je také patrné, že dle předpokladů použitý disipační model funguje pro tuto konkrétní aplikaci správně, tedy snižuje hladinu akustického tlaku průchodem akustické vlny absorpčním materiálem, kterému je takový model přiřazen.

Z výše uvedeného vyplývá, že všechny dílčí cíle této práce byly splněny. Kromě konkrétních výsledků z obou měření a obou numerických analýz tato práce poskytuje podrobný popis nejen z problematiky zvuk pohltivých materiálů a jejich testování, ale zejména z oblasti numerických analýz spojených s problematikou akustiky. Tyto analýzy nejsou v praxi tolik rozšířené jako např. analýzy strukturální, neexistuje pro ně tolik návodů či manuálů, a proto tato diplomová práce může sloužit mimo jiné jako zdroj informací pro čtenáře začínajícího se touto problematikou zabývat. Obzvláště přínosné potom mohou být studie ověření funkčnosti disipačních modelů, či studie vlivu polohy zdroje akustického signálu na výslednou hladinu akustického tlaku, jejichž výsledky a závěry by mohly čtenáři ušetřit spoustu času.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Ticho a klid? To máme v Akustice nejradši! - ŠKODA Kariéra. ŠKODA Kariéra - Za kterou inovací budete vidět vy? [online]. Copyright © ŠKODA AUTO a.s. 2022 [cit. 27.02.2022]. Dostupné z: <https://www.skoda-kariera.cz/blog/2019-11-20-ticho-a-klid-to-mame-v-akustice-nejradsi>
- [2] Akustika, základní pojmy a veličiny v akustice. [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_02.pdf.
- [3] Longitudinal & Transverse Waves | A Level Physics Revision Notes. A-Level Physics - Physics A-Level Resources for AQA, OCR and Edexcel [online]. Copyright © A [cit. 15.09.2021]. Dostupné z: <https://alevelphysics.co.uk/notes/longitudinal-transverse-waves/>
- [4] Physics of Musical Sounds. Von John Askill, D. van Nostrand Reinhold Company Ltd., Berkshire, England, £ 11.95. Physik in unserer Zeit [online]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 1980, 11(4), 127-127 [cit. 2021-9-15]. ISSN 0031-9252. Dostupné z: [doi:10.1002/piuz.19800110408](https://doi.org/10.1002/piuz.19800110408)
- [5] Ústav fyziky a materiálového inženýrství [online]. Copyright © [cit. 16.09.2021]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_03.pdf
- [6] Acoustic impedance | Radiology Reference Article | Radiopaedia.org. Radiopaedia.org, the wiki-based collaborative Radiology resource [online]. Copyright © 2005 [cit. 16.09.2021]. Dostupné z: <https://radiopaedia.org/articles/acoustic-impedance>
- [7] SMETANA, Ctirad. Hluk a vibrace: měření a hodnocení. Praha: Sdělovací technika, 1998, 188 s. : il., čb. fot., tabulky, grafy. ISBN 80-901936-2-5.
- [8] NOVÝ, Richard. Hluk a chvění. 4. přepracované vydání. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2019, 401 stran : ilustrace. ISBN 978-80-01-06554-9.
- [9] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. Prostorová akustika. Praha: SNTL, 1980, 244 s. ; 8°.
- [10] 30 Types of Soundproofing Materials Explained. Soundproofing Materials Supplier | Sound Insulation | Acoustiblok UK [online]. Dostupné z: <https://www.acoustiblok.co.uk/soundproofing-materials/#Absorption>
- [11] Sound Absorbing Materials | 2bResine.2bResine | Soluzioni per l'isolamento acustico [online]. Dostupné z: <http://2bresine.it/EN/prodotti-fonoassorbentiEN.php>
- [12] STUDZIŃSKI, Robert a Zbigniew POZORSKI. Experimental and numerical analysis of sandwich panels with hybrid core. Journal of Sandwich Structures & Materials [online]. 2018, 20(3), 271-286 [cit. 2022-02-11]. ISSN 1099-6362. Dostupné z: [doi:10.1177/1099636216646789](https://doi.org/10.1177/1099636216646789)
- [13] LI, Fenglian, Wenhao YUAN a Chuanzeng ZHANG. Free vibration and sound insulation of functionally graded honeycomb sandwich plates. Journal of Sandwich

- Structures & Materials [online]. 2022, 24(1), 565-600 [cit. 2022-02-11]. ISSN 1099-6362. Dostupné z: doi:10.1177/10996362211020440
- [14] WANG, Dong-Wei, Li MA, Xin-Tao WANG a Ge QI. Sound transmission loss of sandwich plate with pyramidal truss cores. *Journal of Sandwich Structures & Materials* [online]. 2020, 22(3), 551-571 [cit. 2022-02-11]. ISSN 1099-6362. Dostupné z: doi:10.1177/1099636218759683
- [15] WEN, Guilin, Yonghui ZHANG a Jie LIU. Sound insulation properties of sandwich structure with hemispheric shell cores: Numerical and experimental studies. *Applied Acoustics* [online]. 2020, 162 [cit. 2022-01-18]. ISSN 0003682X. Dostupné z: doi:10.1016/j.apacoust.2020.107209
- [16] CHEN, Yu-xin, Feng-lian LI a Yu-xin HAO. Analysis of vibration and sound insulation characteristics of functionally graded sandwich plates. *Composite Structures* [online]. 2020, 249 [cit. 2022-02-11]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2020.112515
- [17] Soundproofing sandwich panel - AYRLITE® 2071 - Ayres Composite Panels - aluminum honeycomb / aluminum. NauticExpo - The B2B marketplace for the boating and maritime sectors: powerboats, sailboats, yachts, fittings, sailing dinghies, commercial vessels, etc. [online]. Dostupné z: <https://www.nauticexpo.com/prod/ayres-composite-panels/product-28043-471414.html>
- [18] Odraz zvuku, pohlcování zvuku :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 21.09.2021]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/197-odraz-zvuku-pohlcovani-zvuku>
- [19] Pohlcování zvuku - Paroc.cz. Paroc stone wool insulation solutions and products - Paroc.cz [online]. Copyright © Paroc Group 2021 [cit. 21.09.2021]. Dostupné z: <https://www.paroc.cz/knowhow/zvuk/pohlcovani-zvuku>
- [20] Ekosoftware - pohlcování akustické energie. Ekosoftware s.r.o., nejen software pro hluk a vibrace [online]. Copyright © [cit. 21.09.2021]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/pohlcovani-akusticke-energie>
- [21] Siemens DISW. [online]. Dostupné z: <https://community.sw.siemens.com/s/article/sound-transmission-loss>
- [22] ZARASTVAND, MR, M GHASSABI a R TALEBITOOTI. Prediction of acoustic wave transmission features of the multilayered plate constructions: A review. *Journal of Sandwich Structures & Materials* [online]. [cit. 2021-9-21]. ISSN 1099-6362. Dostupné z: doi:10.1177/1099636221993891
- [23] Ekosoftware - měření akustické pohltivosti. Ekosoftware s.r.o., nejen software pro hluk a vibrace [online]. Copyright © [cit. 28.09.2021]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/mereni-akusticke-pohltivosti>
- [24] ČSN ISO 10534-1. Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubcích - Část 1: Metoda poměru stojaté vlny. Z1. Český normalizační institut, 2001.

- [25] ČSN ISO 10534-2. Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích - Část 2: Metoda přenosové funkce. Z1. Český normalizační institut, 2001.
- [26] VOZÁROVÁ, Juliana. Stanovení akustické pohltivosti materiálu. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129736>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 62 s. Vedoucí práce Aleš Prokop.
- [27] Product data. [online]. [cit. 2021-10-04]. Dostupné z: http://www.isemcon.com/datasheets/iSEMcon_ACOUSTIC_data_ECM_7101_CHTB_US.pdf.
- [28] SPH-75/8 - stredo-basové - MONACOR SLOVAKIA, spol. s r.o. [online]. Copyright © 2019 MONACOR SLOVAKIA, spol. s r.o. [cit. 04.10.2021]. Dostupné z: <https://monacor.sk/product/sph-75-8>
- [29] ČSN EN ISO 354. Akustika –Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti. Český normalizační institut, 2003.
- [30] Technická data - bezodrazové (bezdozvukové) komory. Bezodrazové (bezdozvukové) komory - bezodrazove-komory.cz [online]. Copyright © 2013, [cit. 28.03.2022]. Dostupné z: <http://www.bezodrazove-komory.cz/technicka-data-bezodrazovych-komor.php>
- [31] Bezdozvukové komory | AVM Vision, Akustika, Vibrace, Zkušebnictví. [online]. Dostupné z: <https://www.avmvision.eu/cs/bezdozvukove-komory/>
- [32] PLESHKOVA, Snezhana Georgieva a Nedkov Ts. Modeling of 3D Impedance Tube with a Complex Termination Impedance using Finite Element Method. 2015.
- [33] SANCHIS, E.J., J.S. ALCARAZ, J.M.G. BORRELL a J.A. FERNÁNDEZ. Experimental Investigation and Numerical Simulation of the Acoustic Waves Propagation in a Standing Wave Tube: Testing with a Sample of Rockwool. *Experimental Techniques* [online]. 2013, **37**(4), 74-80 [cit. 2022-01-17]. ISSN 07328818. Dostupné z: doi:10.1111/j.1747-1567.2011.00728.x
- [34] YUVARAJ, L., G. VIJAY a S. JEYANTHI. Study of Sound Absorption Properties on Rigid Polyurethane Foams using FEA. *Indian Journal of Science and Technology* [online]. 2016, **9**(33) [cit. 2022-01-17]. ISSN 0974-5645. Dostupné z: doi:10.17485/ijst/2016/v9i33/101342
- [35] PATIL, Vishalagoud S., Farheen BANO, R.V. KURAHATTI, et al. A study of sound pressure level (SPL) inside the truck cabin for new acoustic materials: An experimental and FEA approach. *Alexandria Engineering Journal* [online]. 2021, **60**(6), 5949-5976 [cit. 2022-01-18]. ISSN 11100168. Dostupné z: doi:10.1016/j.aej.2021.03.074
- [36] ANSYS Mechanical APDL Theory Reference: Release 15.0 [online]. Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, 2013 [cit. 2022-04-23].

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A_1	$[m^2]$	Ekvivalentní pohltivá plocha prázdné dozvukové místnosti
A_2	$[m^2]$	Ekvivalentní pohltivá plocha dozvukové místnosti se zkušebním vzorkem
A_T	$[m^2]$	Ekvivalentní pohltivá plocha
c	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku
c_L	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku v tyči v podélném směru
c_T	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku v tyči v příčném směru
c_{vz-22}	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku ve vzduchu o teplotě 22 °C
d	$[m]$	Velikost otvoru v překážce akustické vlny
E	$[Pa]$	Modul pružnosti v tahu
E_a	$[J]$	Akustická energie
e_{lmin}	$[m]$	Maximální přípustná velikost prvku
f	$[Hz]$	Frekvence kmitu
F	$[N]$	Síla akustické vlny
f_1	$[Hz]$	Horní mez frekvenčního pásma
f_2	$[Hz]$	Spodní mez frekvenčního pásma
f_3	$[Hz]$	Spodní frekvence třetinové oktávy
f_4	$[Hz]$	Horní frekvence třetinové oktávy
f_m	$[Hz]$	Střední frekvence frekvenčního pásma
f_{max}	$[Hz]$	Nejvyšší uvažovaná frekvence
I	$[W \cdot m^{-2}]$	Akustická intenzita
I_0	$[W \cdot m^{-2}]$	Referenční hodnota akustické intenzity
l	$[m]$	Rozměr překážky akustické vlny
L_I	$[dB]$	Hladina akustické intenzity
L_p	$[dB]$	Hladina akustického tlaku
L_{pmax}	$[dB]$	Hladina akustického tlaku v tlakovém maximu
L_{pmin}	$[dB]$	Hladina akustického tlaku v tlakovém minimu
$L_{pn(t)}$	$[dB]$	Hladina akustického tlaku n-tého poklesu v čase t
L_W	$[dB]$	hladina akustického výkonu
m_1	$[m^{-1}]$	Součinitel útlumu ve vzduchu pro podmínky při měření bez vzorku
m_2	$[m^{-1}]$	Součinitel útlumu ve vzduchu pro podmínky při měření s vloženým vzorkem
p	$[Pa]$	Akustický tlak
P	$[W]$	Akustický výkon
P_0	$[W]$	Referenční hodnota akustického výkonu
p_0	$[Pa]$	Referenční hodnota akustického tlaku
p_a	$[Pa]$	amplituda akustického tlaku
p_{max}	$[Pa]$	Amplituda akustického tlaku v tlakovém maximu
p_{min}	$[Pa]$	Amplituda akustického tlaku v tlakovém minimu
p_p	$[Pa]$	Tlak v prostředí
r	$[-]$	Činitel odrazu
R	$[J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}]$	Molární plynová konstanta
r_i	$[-]$	Imaginární složka činitele odrazu
r_r	$[-]$	Reálná složka činitele odrazu

S	$[m^2]$	Plocha, na kterou dopadá akustická vlna
S_z	$[m^2]$	Plocha pokrytá zkušebním vzorkem
s	$[-]$	Poměr stojaté vlny
SPL	$[dB]$	Zkratka pro hladinu akustického tlaku (z ang. Sound Pressure Level)
t	$[s]$	Čas
T	$[K]$	Termodynamický teplota prostředí
T_1	$[s]$	Doba dozvuku prázdné dozvukové místnosti
T_2	$[s]$	Doba dozvuku dozvukové místnosti s vloženým vzorkem
u	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost pohybu kmitajících částic vlny
V	$[m^3]$	Objem prázdné dozvukové místnosti
v	$[m \cdot s^{-1}]$	Povrchová rychlost
Y	$[m \cdot Pa^{-1} \cdot s^{-1}]$	Akustická admitance
Z	$[Pa \cdot s \cdot m^{-1}]$	Akustická impedance
α	$[-]$	Činitel zvukové absorpce
α_v	$[m^{-1}]$	Součinitel útlumu způsobeného pohlcováním v atmosféře pro čisté tóny
β	$[-]$	Činitel zvukové odrazivosti
ΔL	$[dB]$	Rozdíl hladin mezi tlakovým minimem a maximem
λ	$[m]$	Vlnová délka
λ_{min}	$[m]$	Délka nejkratší uvažovaného vlny
μ	$[-]$	Poissonův poměr
ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota prostředí
σ	$[kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-3}]$	Fluid Resistivity
φ	$[^\circ]$	Úhel mezi vektorem akustické intenzity a směrem akustické vlny
κ	$[-]$	Poissonova konstanta