

Materiály pro tlumení hluku na bázi polyuretanů a minerálních látek

David Svoboda

Bakalářská práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David SVOBODA**

Osobní číslo: **T09753**

Studijní program: **B 2808 Chemie a technologie materiálů**

Studijní obor: **Chemie a technologie materiálů**

Téma práce: **Materiály pro tlumení hluku na bázi polyuretanů
a minerálních látek**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracování teoretických základů zvuku, hlučnosti, veličin a jednotek.
 2. Vyhledání současných trendů pro výběr materiálů na bázi polyuretanů a minerálních látek.
 3. Popis struktur polyuretanů a minerálních látek.
 4. Metodika měření akustických veličin.
 5. Laboratorní měření.
 6. Praktická měření.
 7. Vyhodnocení a zpracování dat z akustických měření.
 8. Závěr a doporučení.
-

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. NOVÝ, R.: Hluk a chvění. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02246-3.
2. MIŠUN, V.: Vibrace a hluk. Brno: PC-DIR Real, spol. s r.o., 1998. ISBN 80-214-1262-3.
3. MADEJEWSKI, B.: Aeroakustika, základy teorie a aplikace na konstrukci letadel. Brno: VUT Brno, 1986. ISBN 55-587/1-86.
4. SMETANA, C. Hluk a vibrace - měření a hodnocení. Praha: Sděl. technika, 1998.
5. BERANEK, L. L.: Noise reduction. London: Mc Graw - Hill Book Company London, 1960. Bez ISBN.
6. ACOUSTIC FOAMS - Self-extinguishing. Sound Service Ltd. [online]. Technická univerzita v Liberci. [online]. [cit. 2007-05-30] Dostupné z <<http://www.soundservice.co.uk/Sound%20Absorption%20Data.htm>>.
7. Brüel and Kjaer. [online]. [cit. 2005-01-18] Dostupné z <<http://www.bksv.com/pdf/Bp1039.pdf>>.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Juříčka, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

13. února 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

7. května 2012

Ve Zlíně dne 13. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: DAVID SVABODIA


Obor: ČMFM-MI

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 18.5.2012



.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Cílem práce je získat informace o možnosti vylepšení vlastností polyuretanů pomocí skelných vláken a to jak ve formě tkaniny, tak skelné vaty. Oba tyto materiály mají vynikající akustické vlastnosti, ale odlišné vlastnosti vůči ohni. Tyto faktické vlastnosti materiálů nabízí kombinování různých typů polyuretanů a skelných vláken tak, aby bylo dosaženo maximálního akustického útlumu a odolnosti vůči teplu a ohni.

Klíčová slova: Koefficient zvukové pohltivosti, polyuretany, minerální látky, akustika, tlumení hluku, skelná vlna

ABSTRACT

The Aim of this research is obtained of information about properties of polyurethanes and glass wool and glass fabric. Both of these materials have excellent properties for the noise damping but different properties as thermo insulation panel. These properties provide interesting variation of polyurethanes and glass wool with fabric for the maximal sound absorption coefficient and thermal insulation.

Keywords: Sound absorption coefficient, polyurethanes, mineral materials, acoustics, noise damping, glass wool

Poděkování

Mé díky patří vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Martinu Juříčkovi Ph.D. za věnovaný čas, ochotu a pomoc při vzniku této práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné. Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu na konci této práce.

Ve Zlíně:

.....

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 10 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 11 |
| 1 AKUSTIKA | 12 |
| 1.1 ZÁKLADNÍ POJMY CHARAKTERIZUJÍCÍ ZVUK | 12 |
| 1.1.1 Zvuk a jeho vlastnosti | 12 |
| 1.1.2 Hluk | 13 |
| 1.1.3 Metody ochrany proti hluku | 13 |
| 1.1.4 Vliv zvuku na člověka | 14 |
| 1.2 VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ ZVUK | 14 |
| 1.2.1 Vlnová délka; λ [m] | 14 |
| 1.2.2 Akustický tlak; p [Pa] | 14 |
| 1.2.3 Rychlost šíření akustických vln; c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] | 15 |
| 1.2.4 Akustická rychlost; v_a [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] | 16 |
| 1.2.5 Frekvence; f [Hz] | 17 |
| 1.3 DECIBELOVÉ VELIČINY | 18 |
| 1.3.1 Hladina akustického výkonu; L_w [dB] | 18 |
| 1.3.2 Hladina akustického tlaku; L_p [dB] | 18 |
| 1.3.3 Hladina intenzity zvuku; L_I [dB] | 18 |
| 1.3.4 Ekvivalentní hladina akustického tlaku; $L_{Aeq,T}$ [dB] | 19 |
| 1.4 SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA | 19 |
| 1.4.1 Snímače hluku | 20 |
| 1.4.2 Intenzita hluku | 21 |
| 1.4.3 Relativní jednotky pro hluk a vibrace | 21 |
| 1.4.4 Analyzátor s konstantní absolutní šířkou pásma | 21 |
| 2 POLYURETANY | 23 |
| 2.1 VÝCHOZÍ SUROVINY | 23 |
| 2.1.1 Polyisokyanáty | 23 |
| 2.1.2 Polyoly | 24 |
| 2.1.3 Extendery | 25 |
| 2.1.4 Katalyzátory | 25 |
| 2.2 LEHČENÉ HMOTY | 25 |
| 2.2.1 Tvrdé pěny | 25 |
| 2.2.2 Měkké pěny | 26 |
| 2.2.3 Polotvrdé pěny | 26 |
| 2.2.4 Integrální pěny | 26 |
| 3 SKELNÁ VLÁKNA | 27 |
| II PRAKTICKÁ ČÁST | 28 |
| 4 ZAŘÍZENÍ A METODY MĚŘENÍ | 29 |
| 4.1 KUNDTOVA TRUBICE | 29 |
| 4.2 ANALYZÁTOR HLADINY AKUSTICKÉHO TLAKU | 29 |
| 4.3 OSTATNÍ MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ | 30 |
| 4.4 METODY MĚŘENÍ | 30 |
| 4.4.1 Měření koeficientu zvukové pohltivosti | 30 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | MATERIÁLY..... | 33 |
| 5.1 | POLYURETANY..... | 33 |
| 5.1.1 | Černý polyuretan – S 3535 F | 33 |
| 5.1.2 | Modrý polyuretan – N 2200..... | 34 |
| 5.2 | SKELNÉ TKANINY | 35 |
| 5.3 | SKELNÁ VATA | 37 |
| 6 | VÝSLEDKY MĚŘENÍ | 39 |
| 6.1 | LABORATORNÍ ČÁST..... | 39 |
| 6.1.1 | Charakteristika polyuretanů | 39 |
| 6.1.2 | Použité značení..... | 40 |
| 6.1.3 | Grafy a jejich zobrazení | 41 |
| 6.1.4 | Koeficient zvukové pohltivosti jednotlivých vzorků polyuretanů | 42 |
| 6.1.5 | Koeficient zvukové pohltivosti polyuretanů v kombinaci se skelnou tkaninou..... | 44 |
| 6.1.6 | Koeficient zvukové pohltivosti polyuretanů v kombinaci se skelnou vatou | 52 |
| 6.1.7 | NRC koeficient..... | 58 |
| 6.2 | PRAKTICKÁ ČÁST | 65 |
| 6.2.1 | Měření ekvivalentní hladiny akustického tlaku motoru auta | 65 |
| 6.2.2 | Frekvenční analýza | 67 |
| | ZÁVĚR | 69 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 71 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 73 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 75 |
| | SEZNAM TABULEK | 78 |

ÚVOD

Materiály a jejich využití v technické praxi a konečných aplikací byly od pradávna smyslem proč realizovat technologické a technické postupy, jejichž výsledkem by byl přínos pro lidstvo jako takové. V současnosti se vynakládají obrovské částky na nejrůznější výzkumy a projekty, jejichž smyslem je, a to zcela legitimně, vytvořit nové materiály a systémy, které by posunuly lidstvo blíže poznání světa lidí, zvířat, přírody a jejich zdrojů. V dnešním věku polymerů, lehkých materiálů, karbonu nebo uhlíku jsou stále oblasti, ve kterých tyto materiály nebyly nikdy použity a jejich využití není zdaleka tak hluboce prozkoumáno jak jsme si doposud mysleli. Tato práce nabízí pohled na oblast snižování hluku pomocí dvou zcela odlišných materiálů, jejichž kombinace poskytuje natolik zajímavé vlastnosti, že praktické využití na sebe nenechá dlouho čekat. Polymery na bázi polyuretanů mají vynikající akustické vlastnosti a skelná vlákna poskytují vysokou odolnost vůči ohni, plísni nebo vodě ale stejně tak poskytují dostatečnou akustickou pohltivost. Následující text je tedy úvodem do problematiky tvorby „kompozitu“ na bázi polyuretanu a skelného vlákna.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 AKUSTIKA

Akustika je z vědní obor zabývající se fyzikálními ději při vzniku zvuku, jeho šíření a následném vnímání zvuku. Spolu s mechanikou a optikou řadíme akustiku k nejstarším částem fyziky.

1.1 Základní pojmy charakterizující zvuk

1.1.1 Zvuk a jeho vlastnosti

Zvuk je přirozenou součástí projevů přírody a šíří se i do velkých vzdáleností. Vnímáme ho sluchovým ústrojím a poskytuje nám primární informace o našem okolí. Zvuk může působit na člověka příjemně nebo také jako rušivý element. Absolutní ticho nebo naopak vysoká intenzita zvuku může dokonce působit škodlivě na lidské zdraví.

Za zvuk považujeme mechanické vlnění, které se daným prostředím šíří od zdroje s určitou rychlostí a frekvencí. Zvuk vzniká elastickým pohybem částic, které na sebe vzájemně působí. Šíření zvuku je způsobeno kmitáním částic prostředí kolem jejich rovnovážných poloh a je spojeno s přenosem energie. Zvuk se šíří v plynných, kapalných i tuhých materiálech ve formě akustického vlnění. V plynech a kapalinách se zvuk šíří formou podélného vlnění. V pevných látkách se šíří jak podélným tak příčným vlněním. K šíření vlnění je zapotřebí interakce částic, ve vakuu se tedy zvuk nešíří [2].

V izotropním prostředí se zvuk šíří od zdroje všemi směry stejně rychle. Spojité plochy, do kterých vlnění dorazí ve stejný, čas nazýváme vlnoplochy. Každý bod vlnoplochy kmitá v daném okamžiku se stejnou fází. Obecně mohou mít vlnoplochy libovolný tvar. Každá překážka, na kterou vlnění narazí, se stává elementárním zdrojem dalších vlnoploch. Při šíření vlnění volným prostorem bez překážek vznikají vlnoplochy kulové nebo rovinné.

- *Kulové vlnoplochy* – vznikají při šíření vlnění z bodového zdroje, kdy je zdroj vlnění menší než vlnová délka vzniklého vlnění.
- *Plošné vlnoplochy* – vznikají při šíření vlnění z plošných zdrojů, je-li zdroj vlnění několikanásobně větší než vlnová délka vzniklého vlnění. Kulové vlnoplochy ve velké vzdálenosti od zdroje lze přibližně považovat za rovinné vlnoplochy [2].

1.1.2 Hluk

Za hluk lze považovat jakýkoliv nežádoucí zvuk. Může být způsoben jak působením lidského faktoru, tak i přirozenými přírodními pochody. Přesnější definice hluku není z fyzikálního hlediska možná. Každý člověk přistupuje k okolním zvukům individuálně, a co jeden může vnímat jako rušivý hluk, jiný vnímá jako příjemný tón. To, zda je zvuk rušivý nebo není, je závislé na jeho intenzitě a frekvenci [1] [2].

Hluk produkovaný lidskou činností a jeho negativní dopady považujeme za jistou formu znečištění životního prostředí. Dlouhodobé působení hluku může mít vážné dopady na lidský organismus, vystavení vysokým intenzitám může vést k částečné nebo úplné ztrátě sluchu. Dosažení akustické pohody je důležité jak při práci, tak i při odpočinku a relaxaci. Nepříznivé působení hluku snižuje pracovní výkony a kvalitu práce [2].

1.1.3 Metody ochrany proti hluku

Lidský organismus nemá dostatečné zabezpečení proti působení okolního hluku. Snížení intenzity hluku, který znepříjemňuje pobyt a práci člověka lze dosáhnout několika základními metodami:

- *Metoda redukce* – nejvýznamnější z protihlukových opatření je, buď úplné odstranění zdroje hluku, nebo snížení jeho hlučnosti již při konstrukci, výrobě a instalaci
- *Metoda dispozice* – vhodné situování zdrojů hluku do chráněných prostor
- *Metoda zvukové izolace* – oddělení zdroje hluku od okolního prostředí ohraničujícími prvky s vhodnými akusticky izolačními vlastnostmi
- *Metoda zvukové pohltivosti* – některé materiály jsou schopny pohlcovat akustickou energii a mění ji na jinou formu energie, např. v teplo
- *Metoda osobních ochranných pomůcek* – tato metoda by měla být uplatněna vždy až jako poslední pokud předchozí nebyly dostatečně účinné. Jedná se o použití osobních ochranných pomůcek (zátky do uší, sluchátkové chrániče, protihlukové přilby)

Vhodnou kombinací těchto metod lze dosáhnout značného snížení intenzity a škodlivého působení hluku a tak i zpříjemnění životního a pracovního prostředí [1] [2].

1.1.4 Vliv zvuku na člověka

V lidském organizmu sluchový orgán – ucho vnímá a zpracovává informace o našem okolí ve formě zvuků. Lidský sluch je schopný vnímat zvukové frekvence v rozsahu asi od 20 Hz do 20 kHz. Tento interval označujeme za slyšitelnou oblast. Hodnoty nižší než 20 Hz jsou infrazvuk a hodnoty přesahující práh slyšitelnosti 20 kHz jsou ultrazvuk. Ultrazvuk má značné využití v lékařství a při hledání defektů při kontrole kvality výrobků. Někteří živočichové mají značně posunutý práh slyšitelnosti a pomocí ultrazvuku se orientují v prostoru.

Účinky hluku na člověka lze vyjádřit pomocí intenzity. Nízké hladiny akustického výkonu pod 20 dB vnímáme jako hluboké ticho. Takto nízké hladiny můžou působit nepříznivě na lidský organismus. Pro akustickou pohodu je třeba dosáhnout alespoň 30 dB. Sluchový orgán je omezen horní hranicí akustického výkonu 130dB, kdy při těchto hodnotách pocítujeme bolest ve sluchovém orgánu. Vyšší intenzity mohou vést k nenávratnému poškození sluchu [1] [2].

1.2 Veličiny charakterizující zvuk

1.2.1 Vlnová délka; λ [m]

Jednou ze základních veličin charakterizujících zvuk je vlnová délka. Je to vzdálenost mezi dvěma body, kterou vlna urazí během jedné periody a platí pro ni vztah [1]:

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (1)$$

kde: λ – vlnová délka [m]

c – fázová rychlost šíření podélných vln [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

T – perioda, doba jednoho kmitu [s]

f – frekvence [Hz]

1.2.2 Akustický tlak; p [Pa]

Při šíření akustického vlnění kapalinou nebo plynem dochází v některých místech ke shlukování kmitajících částic a v některých místech k oddalování částic látky. Těmto místům potom odpovídají místa, kde vzniká přetlak nebo podtlak a celkově se tak mění statický tlak vzduchu. Celkový statický tlak vzduchu je dán součtem barometrického a akustického

tlaku, který je o několik řádů nižší. Akustický tlak lze interpretovat jako akustickou výchylku od barometrického tlaku [1].

$$p_s = p + p_b \quad (2)$$

kde: p_s – celkový statický tlak, [Pa]

p – okamžitý akustický tlak, [Pa]

p_b – barometrický tlak, [Pa].

1.2.3 Rychlost šíření akustických vln; c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Zvuk se šíří všemi látkami. V kapalinách a plynech se šíří formou podélného vlnění v tuhých látkách se šíří podélným a příčným vlněním. Při šíření podélnými tyčemi a deskami vzniká kombinace příčného a podélného vlnění, kterou označujeme jako ohybové vlnění.

Pro rychlost šíření podélných vln v kapalinách platí [1]:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (3)$$

kde: c – fázová rychlost šíření podélných vln, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

K – modul objemové pružnosti, [Pa]

ρ – hustota prostředí, [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

Pro rychlost šíření podélných vln v plynech platí:

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p_b}{\rho}} \quad (4)$$

kde: c – fázová rychlost šíření podélných vln, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

κ – Poissonova konstanta, [-]

p_b – barometrický tlak, [Pa]

ρ – hustota prostředí, [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

V pevných látkách se akustické vlnění šíří příčně a podélně. Pro rychlost šíření podélných vln v pevných látkách platí vztah:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

kde: c_L – rychlost šíření podélných vln, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

E – dynamický modul pružnosti v tahu, [Pa]

ρ – hustota prostředí, [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

Pro rychlost šíření příčného vlnění v pevných látkách platí vztah:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (6)$$

kde: c_T – rychlost šíření příčných vln, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

G – modul pružnosti ve smyku, [Pa]

ρ – hustota prostředí, [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

Tab. 1. Rychlost šíření zvuku v různých látkách [1]

| Látka | Rychlost zvuku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] |
|----------------|---|
| Vzduch 13,4 °C | 340 |
| Voda 25 °C | 1500 |
| Led | 3200 |
| Beton | 3100 |
| Hliník | 4800 |
| Ocel | 5000 |
| Sklo | 5200 |
| Polystyrén | 315 |

1.2.4 Akustická rychlost; v_a [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Při šíření zvuku prostředím kmitají částice s určitou rychlostí. Tuto rychlost nazýváme akustická rychlost a je funkcí akustické výchylky a času.

$$v_a = \frac{\partial u}{\partial t} = \omega u_0 \cos \omega \left(\tau \pm \frac{x}{c} \right) \quad (7)$$

- kde: v_a – akustická rychlost, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
 u – akustická výchylka, [m]
 u_0 – amplituda akustické výchylky, [m]
 ω – úhlová rychlost, $\omega = 2\pi f$ [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
 τ – čas, [s]
 x – posunutí od nulové hodnoty, [-]
 c – fázová rychlost šíření podélných vln, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Součinem amplitudy akustické výchylky a úhlové rychlosti dostaneme amplitudu akustické rychlosti [1].

$$v_0 = u_0 \cdot \omega \quad (8)$$

- kde: v_0 – amplituda akustické rychlosti, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
 u_0 – amplituda akustické výchylky, [m]
 ω – úhlová rychlost, [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]

1.2.5 Frekvence; f [Hz]

Další nedílnou veličinou je frekvence. Frekvence udává počet kmitů oscilujícího bodu za jednu sekundu. Přirozené zvuky okolo nás nelze většinou definovat pouze jednou frekvencí, ale jako akustické spektrum složené z různých frekvencí o různé intenzitě.

Pro frekvenci platí následující závislost na periodě:

$$f = \frac{1}{T} \quad (9)$$

- kde: f – frekvence [Hz]
 T – perioda [s]

Hluk bývá jen ojediněle tvořen jednou frekvencí. Ve většině případů je hluk tvořen spektrem frekvencí, které mezi sebou vzájemně interagují [1].

1.3 Decibelové veličiny

1.3.1 Hladina akustického výkonu; L_w [dB]

Rozpětí intenzit zvuků, které jsme schopni vnímat, je velmi široké. Od tichého šepotu, kterému odpovídá akustický výkon 10^{-9} W, až po motor raketoplánu, který v chodu vyzařuje akustický výkon 10^7 W. Weber – Fechnerův vztah nám aproximuje tuto škálu akustického výkonu pomocí logaritmické veličiny, tzv. hladiny akustického výkonu [1].

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

kde: L_w – hladina akustického výkonu, [dB]

W – sledovaný akustický výkon, [W]

W_0 – referenční akustický výkon, $W_0 = 10^{-12}$ W

1.3.2 Hladina akustického tlaku; L_p [dB]

Akustický tlak, vyjádřený v [Pa], nepoškozený lidský sluch vnímá také ve velmi široké škále. Už i velmi malá změna akustického tlaku $20 \mu\text{Pa}$, který je několikanásobně menší než barometrický tlak, vyvolá sluchový vjem. Byla tedy zavedena hladina akustického tlaku, pro kterou platí [1]:

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \quad (11)$$

kde: L_p – hladina akustického tlaku, [dB]

p – sledovaný akustický tlak, [Pa]

p_0 – referenční akustický tlak, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa (pro šíření zvuku ve vzduchu)

1.3.3 Hladina intenzity zvuku; L_I [dB]

Pro hladinu intenzity platí obdobné vztahy jako v předešlých případech [1].

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad (12)$$

kde: L_I – hladina intenzity zvuku, [dB]

I – sledovaná intenzita zvuku, [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

I_0 – referenční intenzita zvuku, $I_0 = 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

1.3.4 Ekvivalentní hladina akustického tlaku; $L_{Aeq,T}$ [dB]

Pokud se hladina akustického tlaku nemění o více než 5 dB, mluvíme o ustáleném hluku. Mnohem častěji se však v technické praxi setkáme s hluky proměnnými, jejichž intenzita v čase kolísá o více než 5 dB.

Pokud se v daném místě hladina intenzity akustického tlaku skokově mění, například při vypnutí hlučného přístroje, jedná se o hluk proměnný přerušovaný. Během chodu stroje může být hluk ustálený.

Ekvivalentní hladina akustického tlaku hodnotí proměnné akustické signály. Charakterizuje tedy hlukovou situaci hladiny akustického tlaku v čase. Lze ji definovat jako fiktivní ustálenou hladinu akustického tlaku, která má stejné účinky na člověka během časového intervalu, jako proměnlivá hladina akustického tlaku za stejný interval [1].

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1L_p} dT \right] \quad (13)$$

kde: $L_{Aeq,T}$ – Ekvivalentní hladina akustického tlaku, [dB]

L_p – hladina akustického tlaku, [dB]

T – časový interval, [s]

Pro měření rozložení hladin akustického tlaku se používá statistický hladinový analyzátor. Ekvivalentní hladina akustického tlaku byla původně určena pro hodnocení hluku dopravy. V dnešní době se však využívá pro hodnocení hlučnosti všech oblastí životního prostředí [1].

1.4 Spektrální analýza

Frekvenční složení hluku během určitého časového úseku lze vyšetřit pomocí frekvenční analýzy hlukového spektra. Detekované mechanické kmitání je transformováno do komplexního elektrického časového signálu. Jako detektory jsou využívány mikrofony nebo snímače vibrací. Frekvenční analýzou výsledného signálu získáme jednotlivé frekvenční složky hlukového spektra. Základ této frekvenční analýzy je Fourierova transformace. Pro výpočet jednotlivých frekvenčních složek neperiodických signálů lze použít Fourierovu transformaci ve formě dvou integrálů.

❖ *Inverzní transformace*

$$s(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (14)$$

kde: $s(\tau)$ – funkce (např. změna akustického tlaku)

$S(\omega)$ – spektrum funkce $s(\tau)$

ω – úhlová rychlost, [rad·s⁻¹]

τ – čas, [s]

❖ *Přímá transformace*

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (15)$$

kde: $S(\omega)$ – spektrum funkce $s(\tau)$

$s(\tau)$ – funkce (např. změna akustického tlaku)

ω – úhlová rychlost, [rad·s⁻¹]

τ – čas, [s]

Komplexní funkce $S(\omega)$ dává informace o amplitudách a fázích harmonických frekvencí obsažených ve funkci $s(\tau)$ [1] [2].

1.4.1 Snímače hluku

Hlukový signál vyvolává změny tlaku, které jsou měřitelné mikrofonom. Pro měření se používají převážně kondenzátorové mikrofony. Kolísání tlaku vyvolává vydutí membrány, což způsobí změnu kapacity, která se následně elektronicky vyhodnotí. Na kondenzátorový mikrofón je třeba přivést polarizační napětí a signál mikrofónu je třeba přímo u snímače zesílit předzesilovačem. Mikrofónní vstup tedy přivádí na předzesilovač napájecí a polarizační napětí. Frekvenční rozsah mikrofónů je od 4 Hz až do 20 kHz u běžných provedení při kolísání přenosu +/- 2 dB. Mikrofony snímají zvuky ze všech směrů. Umístění mikrofónu v prostoru se vybírá tak aby bylo reprodukovatelné při dalších měřeních. Při snímání zvukových polí se používá síť z více mikrofónů [3].

1.4.2 Intenzita hluku

Intenzita zvuku je vektorová veličina definovaná jako střední hodnota součinu tlaku v místě měření a vektoru rychlosti pohybu částic prostředí, které vlnění přenáší. Jednotka je $[W \cdot m^{-2}]$. Intenzitní sonda obsahuje dva mikrofony a je citlivá na směr šíření hluků, který je daný vektorem intenzity hluku. Podle počtu dvojic a orientace mikrofonů je intenzitní sonda schopna snímat jednu až tři složky vektoru intenzity [3].

1.4.3 Relativní jednotky pro hluk a vibrace

Akustické veličiny v oboru hluku a vibrací mají dynamický rozsah několik řádů, proto se pro zápis jejich efektivních hodnot a pro stupnice spekter využívají logaritmy jejich relativních hodnot. Fyziologický účinek akustických veličin je také úměrný logaritmu. Decibely jsou definovány pro efektivní hodnoty E (root mean square - RMS) akustických veličin podle vzorce [3]:

$$dB = 20 \log \frac{E_A}{E_{A0}} \quad (16)$$

kde: dB - decibel

E_A – efektivní hodnoty akustických veličin,

E_{A0} – referenční hodnota efektivní hodnoty akustické veličiny,

Decibely jsou definovány jak pro celkové efektivní hodnoty veličin vibrací nebo hluku, tak pro jejich jednotlivé složky RMS spektra.

Tab. 2. Referenční hodnoty pro výpočet dB [3]

| Akustická veličina | Akustický tlak | Vibrace/Zrychlení | Vibrace/Rychlost | Síla |
|--------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|
| Referenční hodnota | $2 \cdot 10^{-5}$ Pa | 10^{-6} m·s ⁻² | 10^{-9} m·s ⁻¹ | 10^{-6} N |

1.4.4 Analyzátor s konstantní absolutní šířkou pásma

Pro diagnostiku je výhodné, aby analyzátor pracoval v celém rozsahu frekvencí s konstantní a velmi malou šířkou propustného pásma. Pomocí rychlé Fourierovy transformace (FTT) lze toto spektrum s konstantní šířkou pásma vypočítat.

Prostředky pro frekvenční analýzu signálů můžeme rozdělit do dvou skupin [3].

- ❖ FFT analyzátor s úpravou vstupních signálů – filtrace, A/D převodník a jeho řízení
- ❖ software s FFT, který předpokládá záznam dat např. kartou A/D převodníku

2 POLYURETANY

Polyuretany, zkráceně PUR, mají široké průmyslové využití a tak i objem jejich výroby je ve světě značný. Polyuretany jsou syntetické polymery, vznikají reakcí vícefunkčních isokyanátů s polyalkoholy. Estery kyseliny karbamové – uretany vznikají reakcí izokyanátů s alkoholy.



Isokyanátová skupina je značně reaktivní a může reagovat s dalšími sloučeninami, které obsahují vodíkové atomy. Pro výrobu lineárních polyuretanů je třeba vycházet z polyisokyanátů a polyhydroxysloučenin. Polyadiční reakce probíhá asi při 20 °C, je silně exotermická a nevznikají při ní žádné vedlejší produkty. Výroba musí probíhat v absolutně bezvodém prostředí, izokyanáty s vodou tvoří aminy a uvolňuje se oxid uhličitý.

Použitím různých výchozích polyalkoholů a polyisokyanátů lze připravit různé produkty s požadovanými vlastnostmi [4].

2.1 Výchozí suroviny

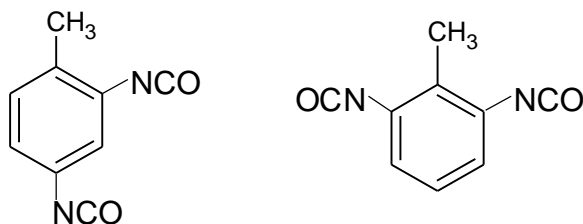
Mezi základní suroviny pro výrobu polyuretanů patří polyisokyanáty, polyoly, prodlužovače řetězců – extendery a katalyzátory.

2.1.1 Polyisokyanáty

Kvůli vysoké reaktivitě a nízké ceně se pro výrobu polyuretanů používají aromatické polyisokyanáty. Je na nich založeno přibližně 95% celkové produkce polyuretanů. Jediným jejich nedostatkem je, že vlivem působení záření a vzdušného kyslíku žloutnou. Pro nežloutnoucí elastomery se využívají alifatické a cykloalifatické diisokyanáty.

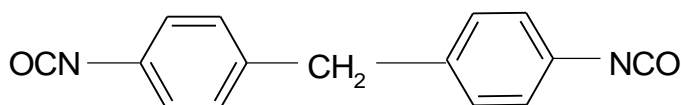
Technicky důležité polyisokyanáty:

- ❖ 2,4- a 2,6-diisokyanatotoulen, TDI – je převážně používán k výrobě měkkých pěn a elastomerů, lze jej také použít k výrobě netěkavých předpolymerů odstupňovanou adiční reakcí.



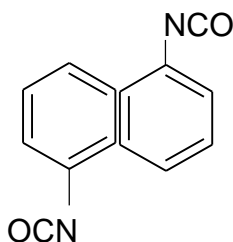
Obr. 1. 2,4- a 2,6-Diisokyanatotoulen

- ❖ 4,4-Diisokyanatodifenylmethan, MDI – se používá k přípravě tvrdých a polotvrdých integrálních pěn, elastomerů a licích pryskyřic.



Obr. 2. 4,4'-Diisokyanatodifenylmethan

- ❖ 1,5-Diisokyanatonaftalen – pro jeho vysokou reaktivitu je používán pro výrobu mechanicky náročných elastomerů.



Obr. 3. 1,5-Diisokyanatonaftalen

Některé isokyanáty, především ty s vysokým tlakem par, diisokyanatotoulen a hexametylendiisokyanát, jsou velmi jedovaté. Isokyanátové skupiny snadno reagují se sloučeninami, ve kterých se vyskytuje aktivní vodík. Dráždí tedy i lidskou tkáň. Při styku s pokožkou může dojít ke kožním alergiím a dermatozám. Nejvíce nebezpečné je vystavení se parám izokyanátů, kdy dochází k pálení očí, dráždění ke kašli, které může přejít až v otok plic. Koncentrace izokyanátů je přísně sledovaná, na pracovištích jsou nejvyšší přípustné koncentrace $0,05 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ [4].

2.1.2 Polyoly

Pro výrobu polyuretanů se v praxi používají hlavně polyesteralkoholy a polyetheralkoholy.

- ❖ Polyesteralkoholy – připravují se polyesterifikací dikarboxylových kyselin a diolů. Dioly jsou v přebytku, tak se dosáhne obsazení konců řetězců hydroxylovými sku-

pinami. Pokud požadujeme rozvětvený produkt, část diolu je nahrazena trioly. Polyuretany připravené z polyesterů mají vyšší tvrdost a odolnost vůči povětrnostním podmínkám a vyšším teplotám. Podléhají však vodě, snadno hydrolyzují.

- ❖ Polyetheralkoholy – jsou produktem polymerace propylenoxidu nebo směsi propylenoxidu s etylenoxidem. Iniciující látka má vliv na výslednou funkčnost produktů. Polyetheralkoholy dávají stabilnější polyuretanové výrobky, používají se i pro přípravu nátěrových hmot [4].

2.1.3 Extendery

Extendery, přestože jsou minoritní složkou, určují konečné vlastnosti polyuretanů. Ovlivňují povahu a hustotu chemického i fyzikálního zesílení. Používané extendery jsou aromatické diaminy, alifatické, cykloalifatické nebo aromatické hydroxysloučeniny. Reaktivnější diaminy se používají v kombinaci s předpolymery na bázi TDI, které jsou reaktivní méně než předpolymery na bázi MDI, které se používají v kombinaci s hydroxysloučeninami [4].

2.1.4 Katalyzátory

Katalyzátory ovlivňují rychlost růstové reakce polymeru. Mají vliv také na reakci, při které se uvolňuje CO_2 a vzniká tak pěnová struktura, a na síťovací reakce. Používají se triethylendiamin, tributylcínacetát a další [4].

2.2 Lehčené hmoty

Asi 80 % z celkového objemu výroby polyuretanů tvoří výroba lehčených hmot. Přidáním vody do reakční směsi vzniká CO_2 , který působí jako nadouvadlo. Výsledné vlastnosti produktu jsou ovlivněny jednotlivými složkami. Lehčené hmoty lze rozdělit podle podílu izokyanátu na měkké pěny, tvrdé pěny, polotvrdé pěny a integrální pěny [4].

2.2.1 Tvrdé pěny

Až 70 % celkové hmotnosti tvoří izokyanátová složka. Hydroxylová složka je silně rozvětvená. Příprava probíhá v otevřených nebo uzavřených formách. Výroba probíhá přímo nebo ve dvou stupních. Připraví se stabilní předpolymer, který je po určitou dobu skladovatelný a přidávkem vody nebo fluortrichlormetanu proběhne následné vypěnění vzniklým CO_2 [4].

2.2.2 Měkké pěny

Isokyanátová složka v měkkých pěnách tvoří maximálně 40 % z celkové hmotnosti, tím se dosáhne vzniku dlouhých a elastických řetězců mezi uzly polymerní sítě. Měkké pěny se vyrábí z 90% blokově. Pro potřeby nábytkářského a automobilového průmyslu se měkké pěny vyrábějí ve formách, k dosažení tvarů, které nejdou získat ořezáním. Výroba probíhá kontinuálně, smícháním výchozích složek a přidáním vody, která zajistí vypěnění na páse nebo ve formě [4].

2.2.3 Polotvrdé pěny

Výhradně se připravují v blocích a z polyesterů. Dosahují hustot 100 až 150 kg·m⁻³. Ve formě desek a bloků slouží pro izolační účely ve stavebnictví, izolace ledniček a potrubí [4].

2.2.4 Integrální pěny

Jejich strukturu tvoří nepórovité tvrdé kůry s pórovitým jádrem. Podle rozdělení gradientu teploty mezi teplotou hmoty a teplotou formy se hustota hmoty zvyšuje ze středu směrem k povrchu. Teplota formy určuje šířku kůry. Jako nadouvadlo se používá fluortrichlormethan. Integrální pěny se používají k výrobě některých podrážek bot, automobilových nárazníků, v nábytkářství a k výrobě jader lyží.

Přestože lehčené hmoty tvoří značnou část produkce polyuretanů, využívají se také k výrobě lepidel, vláken a filmů z lineárních PUR, licích pryskyřic, nátěrových hmot a dalších [4].

3 SKELNÁ VLÁKNA

Sklo se podle složení dělí do různých typů. Pro výrobu skleněných vláken se používá sklo typu E. Hlavní složkou E skla je soustava oxidů $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$. Výroba vláken probíhá kontinuálně. Na jednom konci pece se sází sklářský kmen a na druhém se z platinových vaniček vytahuje vlákno. Průměr vlákna se pohybuje podle potřeby od 3,5 do 20 μm . Najednou je možné táhnout 51 až 408 vláken, které se následně opatřují lubrikační a apreturou a navíjejí se na buben. Při použití vláken v kompozitech je lubrikační vrstva nevhodná, snižuje adhezi skla k polymerům. Proto jsou také opatřeny apretační vrstvou, která zlepšuje následnou vazbu mezi vláknem a pryskyřicí. Pro charakteristiku vláken se využívá délková hmotnost. Jednotka délkové hmotnosti je tex a vyjadřuje hmotnost jednoho kilometru vláken v gramech [5].

Další typy skelných vláken:

- Sklovina typu S je určena pro vojenské účely, komerční verze se nazývá S2 či R a jejím základem je soustava $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$. Tato skelná vlákna mají lepší mechanické vlastnosti než sklo typu E, jsou využívána v letecké a raketové technice. Jejich použití je omezeno teplotou 600°C, kdy dochází ke snížení pevnosti v tahu.
- Sklo typu D je díky nízké hodnotě své dielektrické konstanty využíváno v elektrotechnice, elektronice a energetice. Oproti sklu E má horší mechanické vlastnosti.
- Chemicky odolné sklo typu C tvoří $\text{SiO}_2 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{Na}_2\text{O}_2 \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Vykazuje vysokou odolnost vůči kyselinám.
- Sklo typu L obsahuje zvýšené množství oxidu olova. Díky nepropustnosti rentgenového záření je využíváno v lékařství a vědeckých přístrojích [5].

Tab. 3. Vybrané vlastnosti jednotlivých druhů skel [5]

| Sklo | E | S | D | C | L |
|---|------|------|------|------|------|
| Hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] | 2540 | 2490 | 2160 | 2490 | 4300 |
| Pevnost v tahu [GPa] | 3,50 | 4,65 | 2,45 | 2,80 | 1,68 |
| Modul pružnosti v tahu [GPa] | 73,5 | 86,8 | 52,5 | 70,0 | 51,1 |
| Poměrné prodloužení do meze pevnosti [%] | 4,8 | 5,4 | 4,7 | - | - |
| Dielektrická konstanta 20°C, 10 ⁶ Hz | 5,80 | 4,53 | 3,56 | 6,24 | 9,49 |

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 ZAŘÍZENÍ A METODY MĚŘENÍ

K naměření požadovaných akustických veličin byly během této práce použity následující přístroje.

4.1 Kundtova trubice

Pro měření koeficientu zvukové pohltivosti byla použita dvou-mikrofonová impedanční trubice. Rozsah frekvenční oblasti trubice je od 50 Hz až 6400 Hz. Trubice byla připojena ke zdroji zvuku, který snímaly při měření dva mikrofony.

Při měření byly použity dva nástavce pro různé frekvenční rozsahy.

- ❖ Velká měřicí trubice, pro měření nízkých frekvencí v rozsahu 50 Hz až 1600 Hz.
- ❖ Malá měřicí trubice, pro měření vysokých frekvencí v rozsahu 500 Hz až 6400 Hz.

Obě dvě trubice obsahovaly akusticky tvrdou desku spojenou s pístem, který umožňoval nastavení vzdálenosti desky od vzorků [12] [13].



Obr. 4. Dvou-mikrofonová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206 [12]

4.2 Analyzátor hladiny akustického tlaku

Pro analýzu hladiny akustického tlaku byl použit zvukoměr 2238 mediator. Je programovatelný pro hodnocení různých akustických veličin. Využívá se k hodnocení hluku, frek-

venční analýze, pro měření ekvivalentní hladiny akustického tlaku v oblasti životního a pracovního prostředí a další.

Dynamický rozsah zvukoměru je 80dB [11].



Obr. 5. Analyzátor hladiny akustického tlaku Brüel & Kjær 2238 Mediator

4.3 Ostatní měřicí zařízení

- Digitální váhy – RADWAG WTB 2000, s přesností vážení 0,01g
- Digitální fotoaparát – Canon PowerShot G10, tímto fotoaparátem byly pořízeny všechny uvedené snímky.
- Laboratorní tri-nokulární mikroskop LMI T
- Stereoskopický mikroskop STM 1561, 1562
- Digitální posuvné měřidlo a digitální mikrometr
- Software LabShop Pulse – pro zpracování dat naměřených na Kundtově trubici
- Software Terminal RS 232 – pro zpracování dat z analyzátoru BaK 2238

4.4 Metody měření

4.4.1 Měření koeficientu zvukové pohltivosti

Koeficient zvukové pohltivosti je dán poměrem intenzity zvuku, kterou těleso pohltí na určité ploše k intenzitě, která na danou plochu dopadá. Je to bezrozměrné číslo nabývající hodnot 0 až 1. Materiál, který na dané ploše pohltí zvuk úplně, má hodnotu pohltivosti 1.

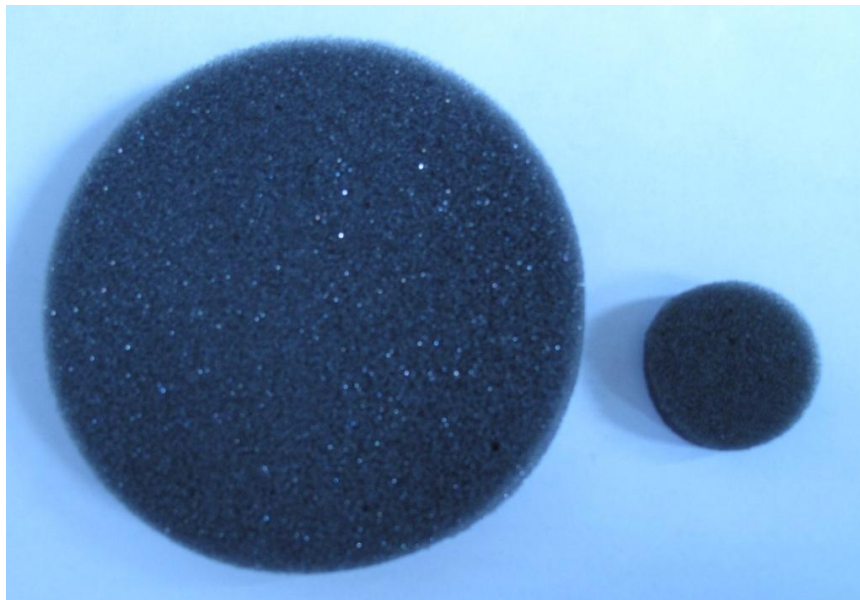
$$\alpha = \frac{I_2}{I_1} \quad (18)$$

kde: α – koeficient zvukové pohltivosti, [-]

I_1 – intenzita zvuku dopadající na povrch, [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

I_2 – intenzita zvuku pohlceného povrchem, [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

Měření probíhalo v Kundtově impedanční trubici. Byly měřeny vzorky polyuretanů a kombinace polyuretanů se skelnou tkaninou a skelnou vatou. Vždy byly naměřeny hodnoty ve velké trubici a následně v malé trubici. Výsledné naměřené hodnoty byly zkombinovány a zpracovány v programu LabShop Pulse.



Obr. 6. Vzorky černého polyuretanu S 3535 F pro měření koeficientu zvukové pohltivosti o velikosti 100 a 30 mm



Obr. 7. Vzorky modrého polyuretanu N 2200 pro měření koeficientu zvukové pohltivosti o velikosti 100 a 30 mm

5 MATERIÁLY

5.1 Polyuretany

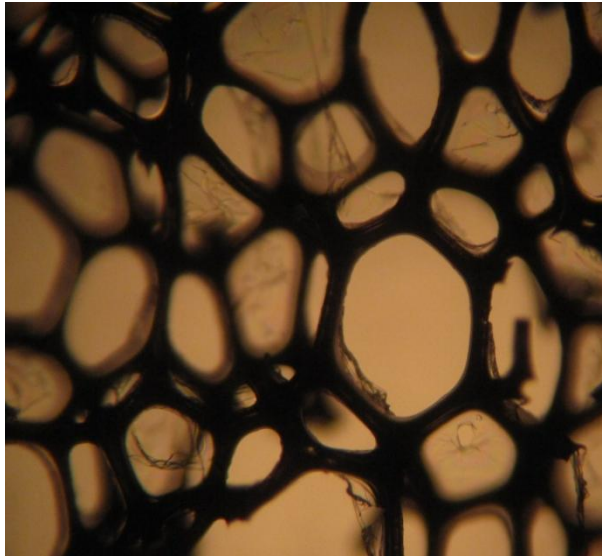
5.1.1 Černý polyuretan – S 3535 F

Obchodní označení – MOLITAN[®] S Polyether speciální typ

Používá se nařezaný na bloky, desky, přířezy, nebo se ořezává na tvarované výrobky pro automobilový průmysl a spotřební zboží. Hlavní využití je jako zvuková izolace, ke snížení hlučnosti a vytvoření požadovaných akustických vlastností prostoru.



*Obr. 8. Povrch černého polyuretanu S 3535 F,
zvětšeno 8×, horní osvit*

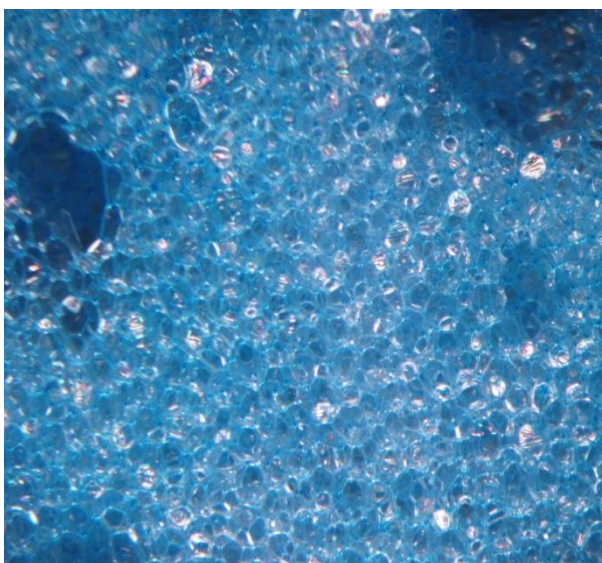


Obr. 9. Pórovitá struktura černého polyuretanu S 3535 F, zvětšení 40×, dolní osvit

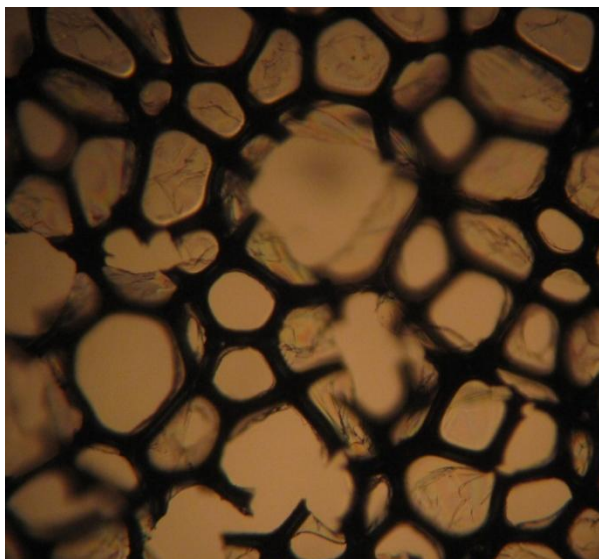
5.1.2 Modrý polyuretan – N 2200

Obchodní označení - MOLITAN[®] N Polyether standardní typ

Jeho využití je širší než u předchozího polyuretanu. Používá se na bloky, desky, přířezy, tvarované výrobky, slepované díly, pásy. Využívá se pro výrobu čalouněného nábytku, výrobu matrací, výplňových materiálů, zvukové izolace a obalové techniky.



Obr. 10. Povrch modrého polyuretanu N 2200, zvětšeno 12,5×, horní osvit



Obr. 11. Pórovitá struktura modrého polyuretanu N 2200, zvětšeno 40×, dolní osvit

Tab. 4. Vlastnosti použitých polyuretanů [6]

| Typ polyuretanu | Barva | Hustota [kg·m ⁻³] | Odpor při stlačení [kPa] | Pevnost v tahu [kPa] | Tažnost [%] | Trvalá deformace [%] |
|-----------------|-------|-------------------------------|--------------------------|----------------------|-------------|----------------------|
| S 3535 F | Šedá | 35 | 3,5 | 130 | 190 | 2 |
| N 2200 | Modrá | 22 | 3,5 | 100 | 200 | 7 |

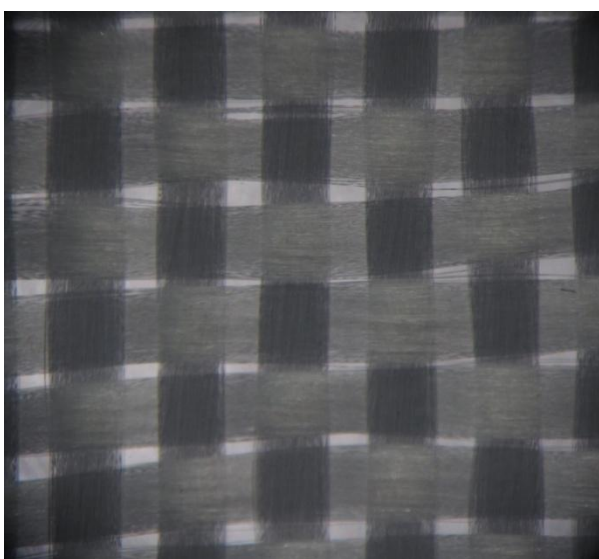
5.2 Skelné tkaniny

Pro výrobu tkanin ze skelného vlákna je použito sklo typu E. Tkané výztuže se vyrábí obdobným způsobem jako běžné textilie ze skleněných přízí. Sklotkaniny jsou používány k výrobě výztuží do kompozitů. Vyrábí se v různých gramážích od 80 g·m⁻² do 390 g·m⁻², ve standardní šířce 100 - 160 cm. Lze je používat v kombinacích s polyesterovými a epoxidovými pryskyřicemi [7].

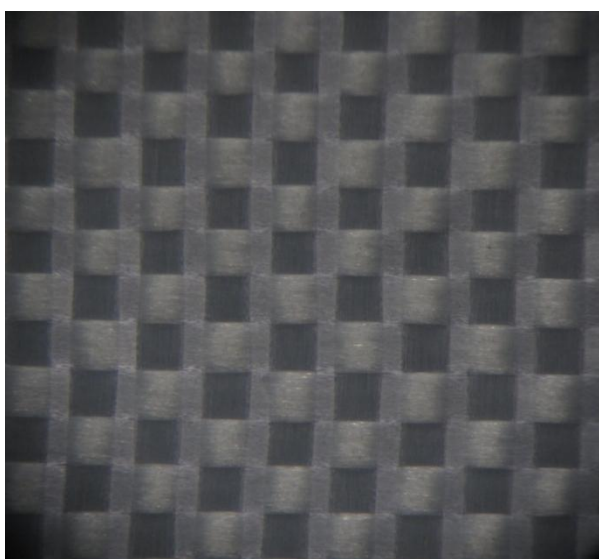
Pro měření byly použity tkaniny o dvou různých gramážích 140 g·m⁻² a 165 g·m⁻².

Tab. 5. Vlastnosti použitých skelných tkanin [7]

| Kód materiálu | Hmotnost [g·m ⁻²] | Dostava osnovy [cm ⁻¹] | Dostava útku [cm ⁻¹] | Materiál osnova [tex] | Materiál útek [tex] | Vazba |
|---------------|-------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------------|--------|
| UTE 140 P | 140 | 7,4 | 6,4 | EC 11-102 | EC 11-102 | Plátno |
| UTE 165 P | 165 | 14 | 9,8 | EC 9-68 | EC 9-68 | Plátno |



Obr. 12. Struktura tkaniny UTE 140 P, zvětšeno 16×, kombinace horní i dolní osvit



Obr. 13. Struktura tkaniny UTE 165 P, zvětšeno 16×, kombinace horní i dolní osvit

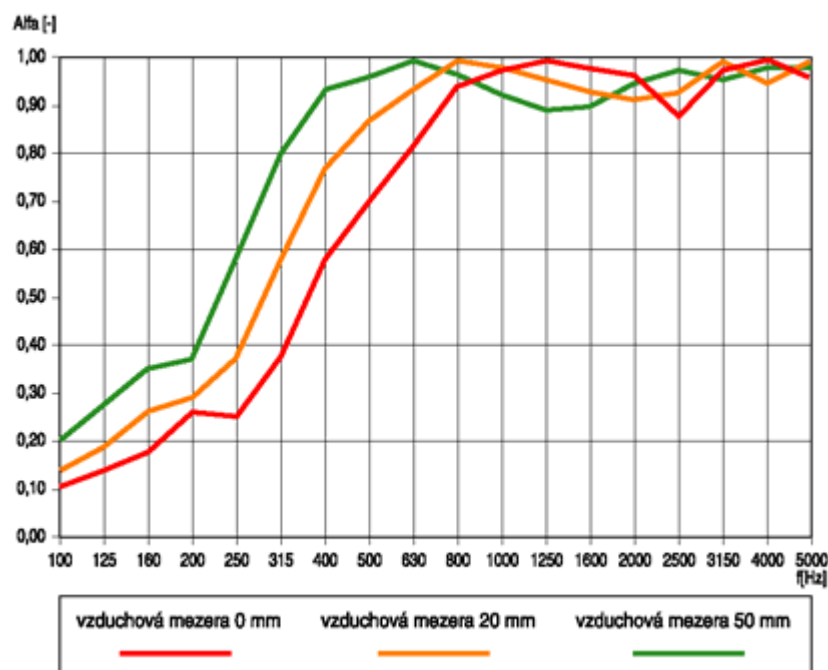
5.3 Skelná vata

Skelná vata se vyrábí lisováním směsi skelných vláken a vytvrzovací pryskyřice. Skelná vlákna tvoří 90 – 95 % z celkové hmotnosti. Na výrobu vláken se používá z velké části recyklované sklo. Pro dosažení konečných vlastností se směs skelných vláken a pryskyřice vytvrzuje ve vytvrzovací peci, kde dojde k polymeraci pryskyřice. Hotový výrobek je následně nařezán na požadovanou velikost. Skelná vata má dobré tepelně izolační vlastnosti a vyznačuje se vysokou zvukovou pohltivostí. Využívá se v kombinaci s děrovanými materiály jako izolace akustických stěn a stropů [8].

Pro měření byla použita část akustické desky AD 1 s netkanou rohoží.

Tab. 6. Vybrané vlastnosti skelné vaty [9] [10]

| Vlastnosti | Označení | Jednotka | Hodnota |
|---------------------------------------|------------------|-------------------------------|---------|
| Deklarovaná hodnota tepelné vodivosti | λ_D | $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ | 0,038 |
| Třída reakce na oheň | - | - | A1 |
| Koeficient zvukové pohltivosti | $\bar{\alpha}_n$ | - | 0,49 |
| Měrný odpor proti prod. vzduchu | r | $kPa \cdot m^{-2}$ | 6,6 |
| Deklarovaný tepelný odpor | R_D | $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ | 2,10 |
| Součinitel prostupu tepla | U | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ | 0,48 |



Obr. 14. Koeficient zvukové pohltivosti pro skelnou vatu [10]



Obr. 15. Povrch skelné vaty s netkanou rohoží, zvětšeno 16×, horní osvit



Obr. 16. Struktura skelné vaty s netkanou rohoží, zvětšeno 40×, dolní osvit

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

6.1 Laboratorní část

6.1.1 Charakteristika polyuretanů

Bylo provedeno měření rozměrů a vážení vzorků polyuretanů. Pro měření byly vytvořeny dva vzorky z každého polyuretanu. Ze získaných hodnot byla vypočtena hustota materiálu. Výsledky pro oba typy polyuretanů jsou uvedeny v následujících tabulkách.

- Černý polyuretan S 3535 F

Tab. 7. Naměřené rozměry vzorků černého PUR S 3535 F

| Vzorek č.1 | | | | Vzorek č.2 | | | |
|------------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|--------|
| č. m. | d [mm] | s [mm] | h [mm] | č. m. | d [mm] | s [mm] | h [mm] |
| 1 | 100,80 | 99,50 | 9,82 | 1 | 100,62 | 99,96 | 9,84 |
| 2 | 100,73 | 99,55 | 9,87 | 2 | 100,25 | 99,52 | 9,85 |
| 3 | 100,81 | 99,64 | 9,84 | 3 | 100,70 | 100,09 | 9,88 |
| 4 | 100,20 | 99,57 | 9,86 | 4 | 100,48 | 99,97 | 9,80 |
| 5 | 100,70 | 99,78 | 9,81 | 5 | 100,29 | 99,44 | 9,87 |
| Ø | 100,65 | 99,61 | 9,84 | Ø | 100,47 | 99,80 | 9,85 |

Tab. 8. Získané hodnoty hmotnosti, objemu a vypočtené hustoty černého PUR S 3535 F

| Vzorek č.1 | | | | Vzorek č.2 | | | |
|---------------|-------|----------------------|-------------------------|---------------|-------|----------------------|-------------------------|
| č. m. | m [g] | V [cm ³] | ρ [g·cm ⁻³] | č. m. | m [g] | V [cm ³] | ρ [g·cm ⁻³] |
| 1 | 3,30 | 98,4907 | 0,0335 | 1 | 3,25 | 98,9705 | 0,0328 |
| 2 | 3,31 | 98,9731 | 0,0334 | 2 | 3,26 | 98,2723 | 0,0332 |
| 3 | 3,31 | 98,8399 | 0,0335 | 3 | 3,25 | 99,5811 | 0,0326 |
| 4 | 3,31 | 98,3724 | 0,0336 | 4 | 3,25 | 98,4409 | 0,0330 |
| 5 | 3,31 | 98,5694 | 0,0336 | 5 | 3,26 | 98,4319 | 0,0331 |
| Ø | 3,31 | 98,6491 | 0,0335 | Ø | 3,25 | 98,7393 | 0,0330 |
| smodch | | | 0,0001 | smodch | | | 0,0002 |

- Modrý polyuretan N 2200

Tab. 9. Naměřené rozměry vzorků modrého PUR N 2200

| Vzorek č.1 | | | | Vzorek č.2 | | | |
|------------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|--------|
| č. m. | d [mm] | s [mm] | h [mm] | č. m. | d [mm] | s [mm] | h [mm] |
| 1 | 99,75 | 101,35 | 5,55 | 1 | 101,07 | 99,75 | 5,55 |
| 2 | 99,88 | 101,67 | 5,56 | 2 | 100,93 | 99,55 | 5,56 |
| 3 | 99,69 | 101,66 | 5,57 | 3 | 100,99 | 99,71 | 5,57 |
| 4 | 99,61 | 101,57 | 5,55 | 4 | 100,98 | 99,78 | 5,55 |
| 5 | 99,92 | 101,57 | 5,57 | 5 | 100,97 | 99,98 | 5,57 |
| Ø | 99,77 | 101,56 | 5,56 | Ø | 100,99 | 99,75 | 5,56 |

Tab. 10. Získané hodnoty hmotnosti, objemu a vypočtené hustoty modrého PUR N 2200

| Vzorek č.1 | | | | Vzorek č.2 | | | |
|------------|-------|----------------------|-------------------------|------------|-------|----------------------|-------------------------|
| č. m. | m [g] | V [cm ³] | ρ [g·cm ⁻³] | č. m. | m [g] | V [cm ³] | ρ [g·cm ⁻³] |
| 1 | 1,16 | 56,1086 | 0,0207 | 1 | 1,18 | 55,9536 | 0,0211 |
| 2 | 1,15 | 56,4607 | 0,0204 | 2 | 1,18 | 55,8646 | 0,0211 |
| 3 | 1,16 | 56,4491 | 0,0205 | 3 | 1,19 | 56,0883 | 0,0212 |
| 4 | 1,16 | 56,1515 | 0,0207 | 4 | 1,19 | 55,9206 | 0,0213 |
| 5 | 1,16 | 56,5292 | 0,0205 | 5 | 1,19 | 56,2290 | 0,0212 |
| Ø | 1,16 | 56,3398 | 0,0206 | Ø | 1,19 | 56,0112 | 0,0212 |
| smodch | | | 0,0001 | smodch | | | 0,0001 |

Získané hodnoty hustot v tabulkách (Tab. 8. a Tab. 10.) se jen minimálně lišili od hustot uvedených výrobcem (Tab. 4.). Nižší hodnoty hustoty mohou být způsobeny stářím materiálu a chybou vzniklou při měření, kdy se rozměry měkkého polyuretanu těžce měří.

6.1.2 Použité značení

V následujících grafech jsou zobrazeny hodnoty koeficientu akustické pohltivosti. Při popisování vzorků byla použita tato značení polyuretanů, skelných materiálů a pořadí vzorků ke zdroji zvuku.

Tab. 11. Značení vzorků použité v grafech

| Symbol | Vysvětlivka |
|-------------------|--|
| C, Cerny | PUR s označením S 3535 F – polyuretan se samo-zhášivostí |
| M, Modry | PUR s označením N 2200 - klasický komerční polyuretan |
| 0, 1, 2 3, | vzdálenost v centimetrech zadní stěny trubice od vzorků |
| JTk | Tkanina s označením UTE 165 P (tloušťka = 0,128 mm) |
| HTk | Tkanina s označením UTE 140 P (tloušťka = 0,130 mm) |
| SkV | Skelná vata s netkanou rohoží (tloušťka = 30 mm) |

Symbolika pro jednotlivé vzorky byla vytvořena následujícím způsobem:

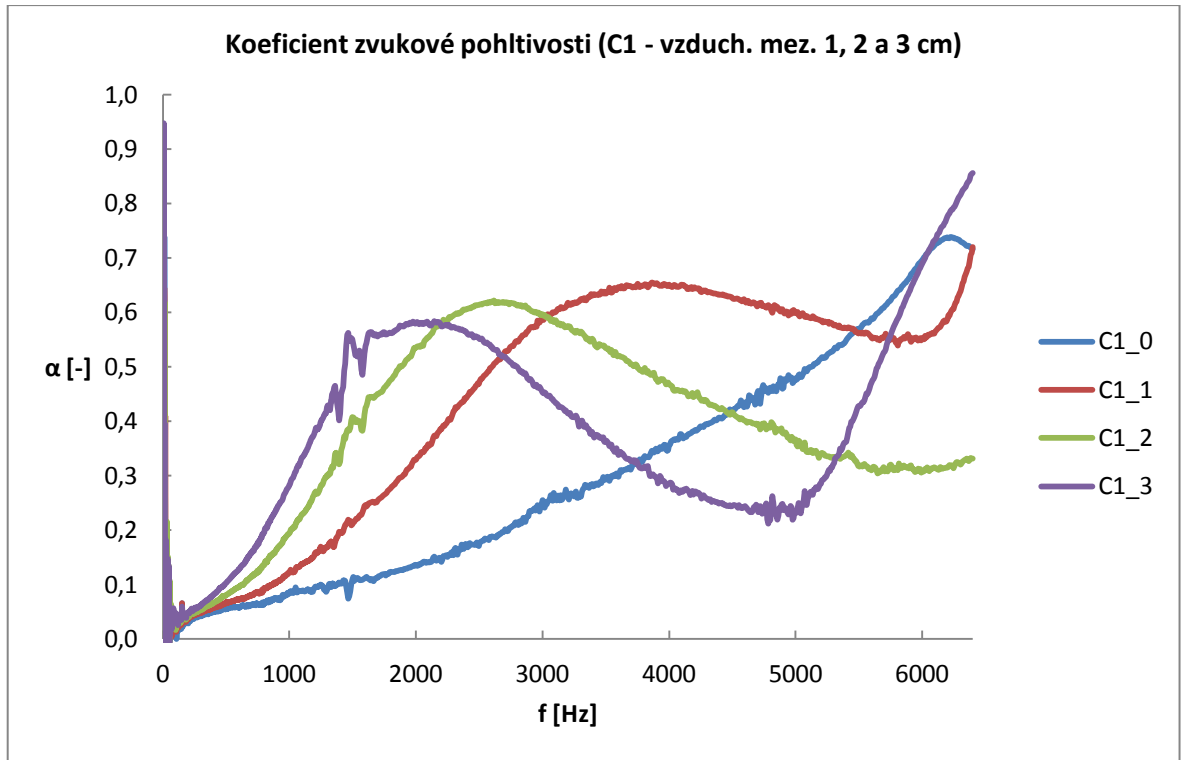
- Pro **C1_1** tedy platí: Černý polyuretan, vzorek číslo 1, vzdálenost od zadní stěny nástavce 1 cm (10 mm mezera vzduchu mezi pístem a vzorkem).
- Pro kombinace platí řazení materiálů směrem zleva a to tak, že první materiál byl nejbližší ke zdroji vlnění a poslední nejdál. Pro **JTk_Cerny_3** platí: Tkanina UTE 165 P, černý polyuretan, vzdálenost od zadní stěny nástavce 3 cm (30 mm vrstva vzduchu mezi pístem a vzorkem).

6.1.3 Grafy a jejich zobrazení

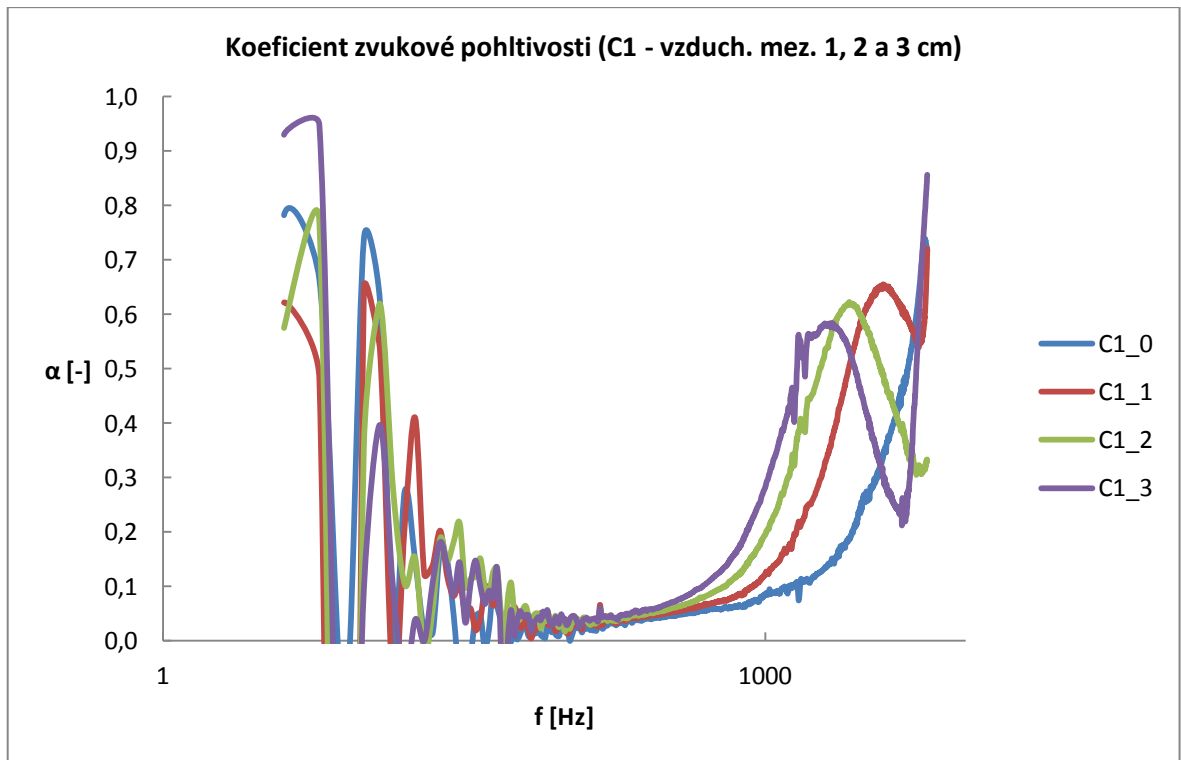
Bylo použito dvojí zobrazení získaných dat z laboratorního měření koeficientu zvukové pohltivosti. Lineární zobrazení závislosti koeficientu α na frekvenci, které poskytuje pohled na křivku SAC, tak jak byla naměřena v lineárním módu u hodnot frekvence. Takto je zobrazen lineárně celý frekvenční rozsah.

Naproti tomu druhé zobrazení, a to logaritmické, poskytuje pohled na závislost s logaritmickou stupnicí frekvence. Toto logaritmické zobrazení klade důraz především na nižší frekvenční hodnoty v oblasti do 1000 Hz.

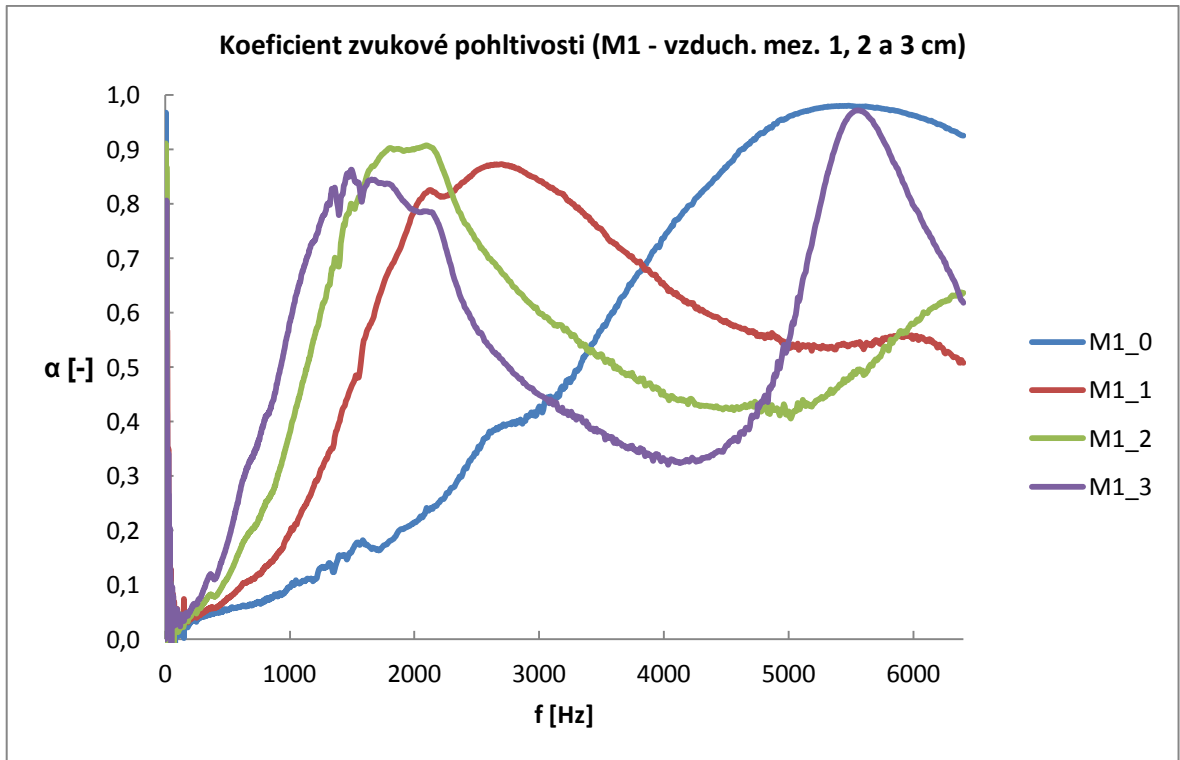
6.1.4 Koeficient zvukové pohltivosti jednotlivých vzorků polyuretanů



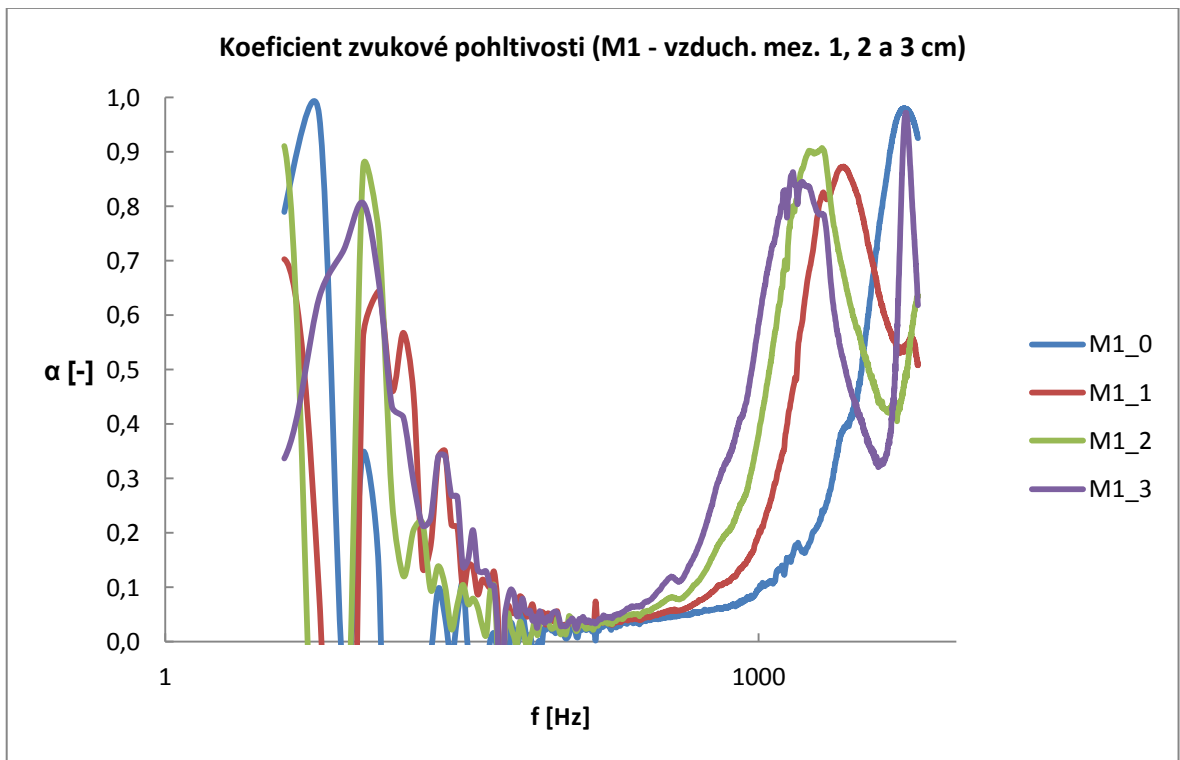
Obr. 17. Lineární graf koeficientů zvukové pohltivosti PUR S 3535 F vzorek č. 1



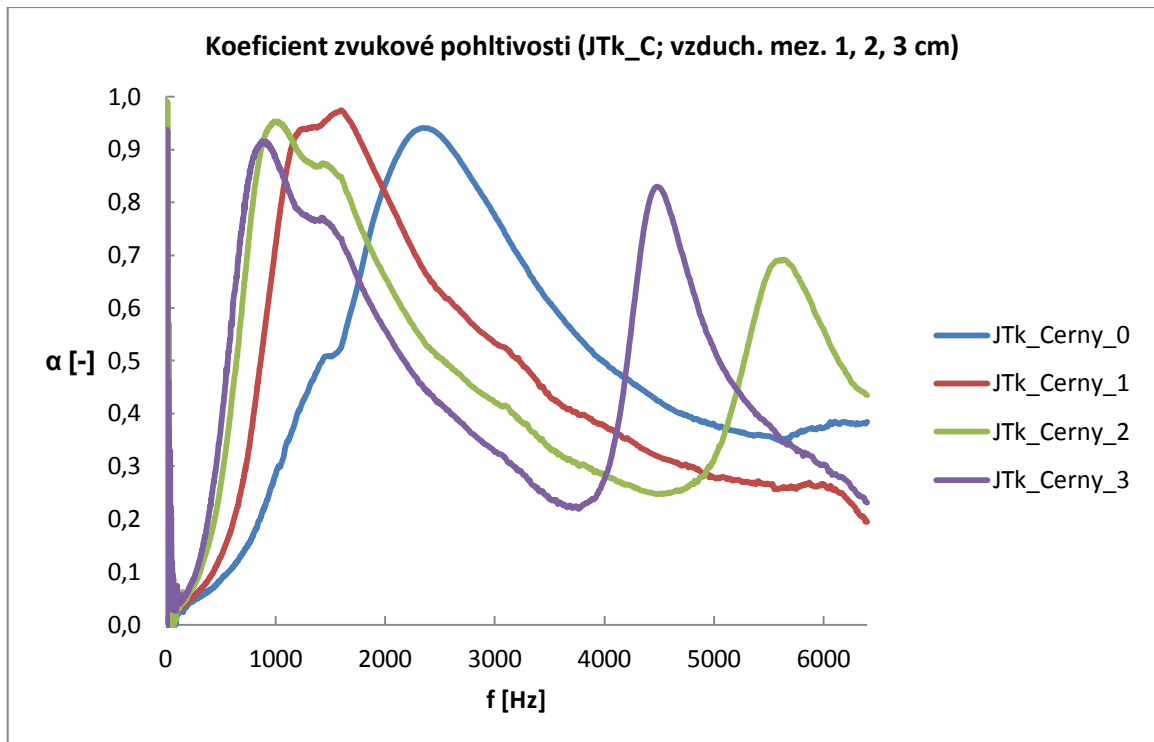
Obr. 18. Logaritmický graf zvukové pohltivosti PUR S 3535 F vzorek č. 1



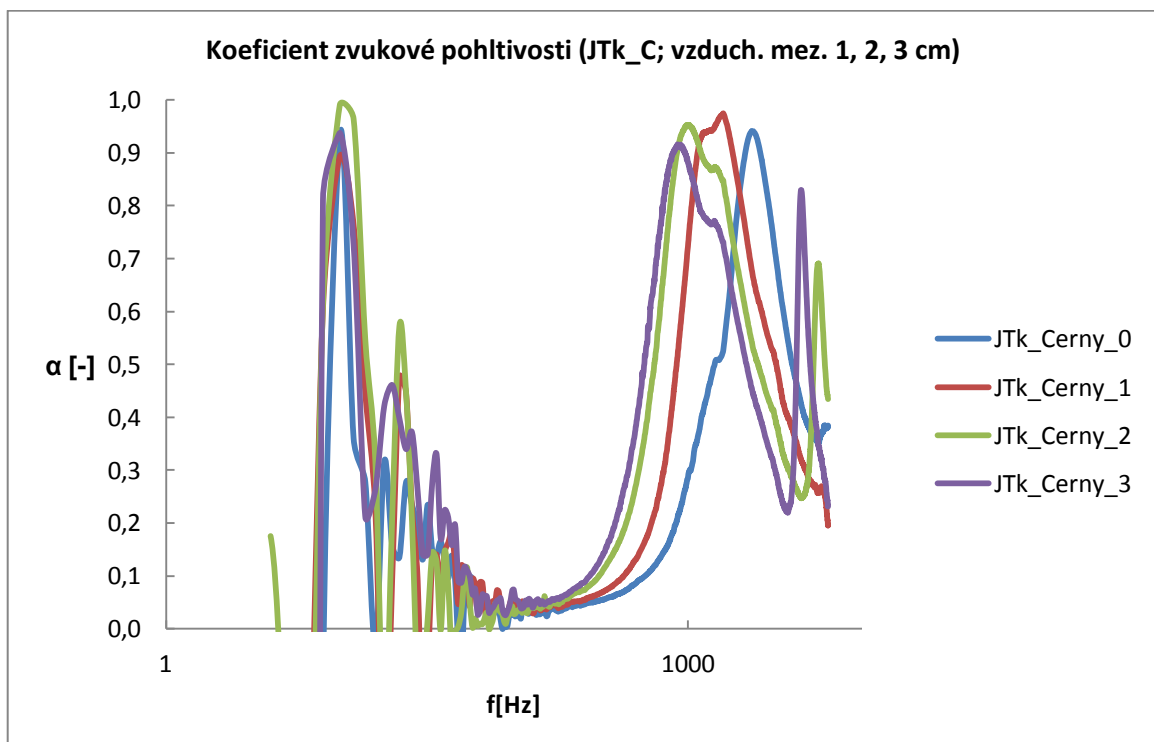
Obr. 19. Lineární graf koeficientů zvukové pohltivosti PUR N 2200 vzorek č. 1



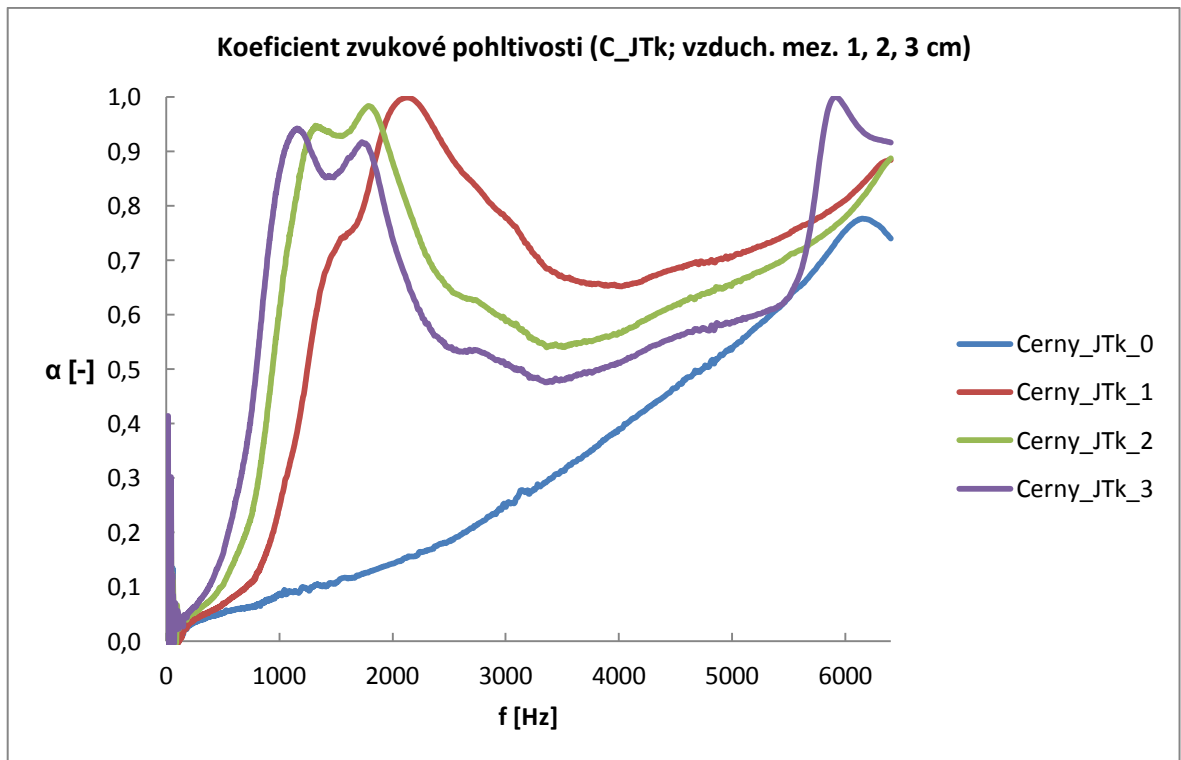
Obr. 20. Logaritmický graf zvukové pohltivosti PUR N 2200 vzorek č. 1

6.1.5 Koefficient zvukové pohltivosti polyuretanů v kombinaci se skelnou tkaninou

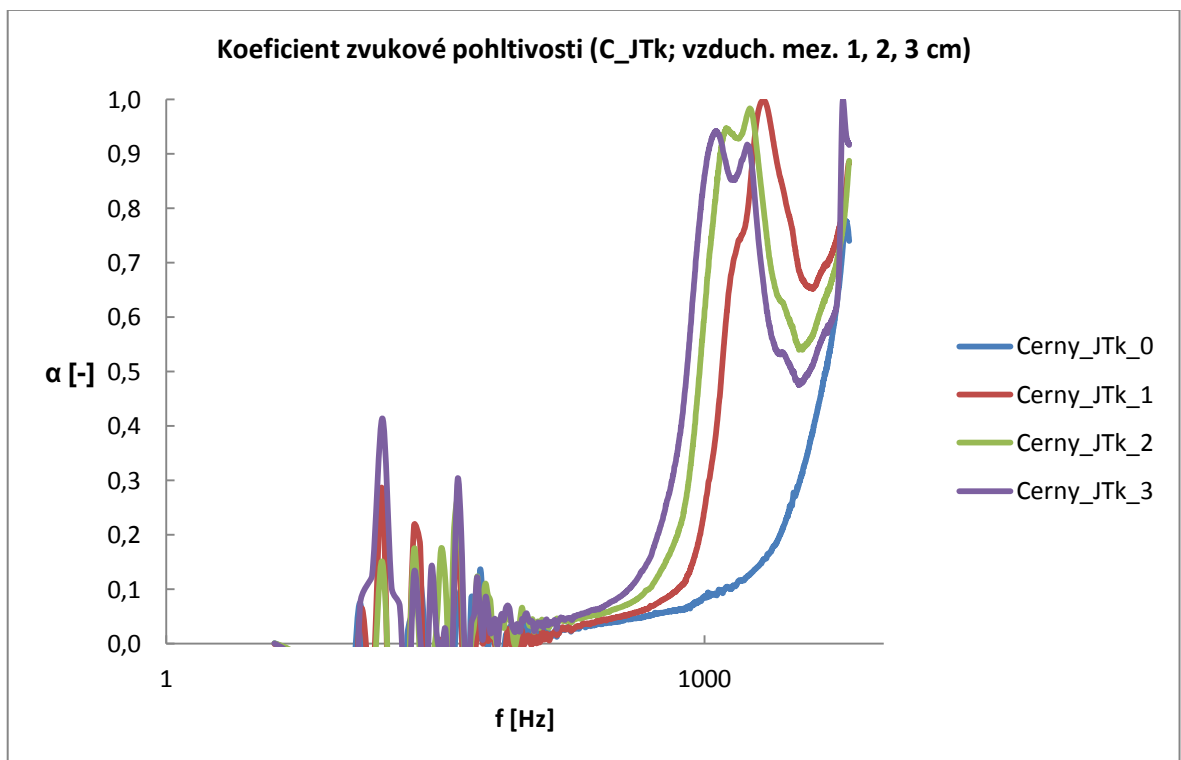
Obr. 21. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci s tkaninou UTE 165 P, v pořadí tkanina-polyuretan



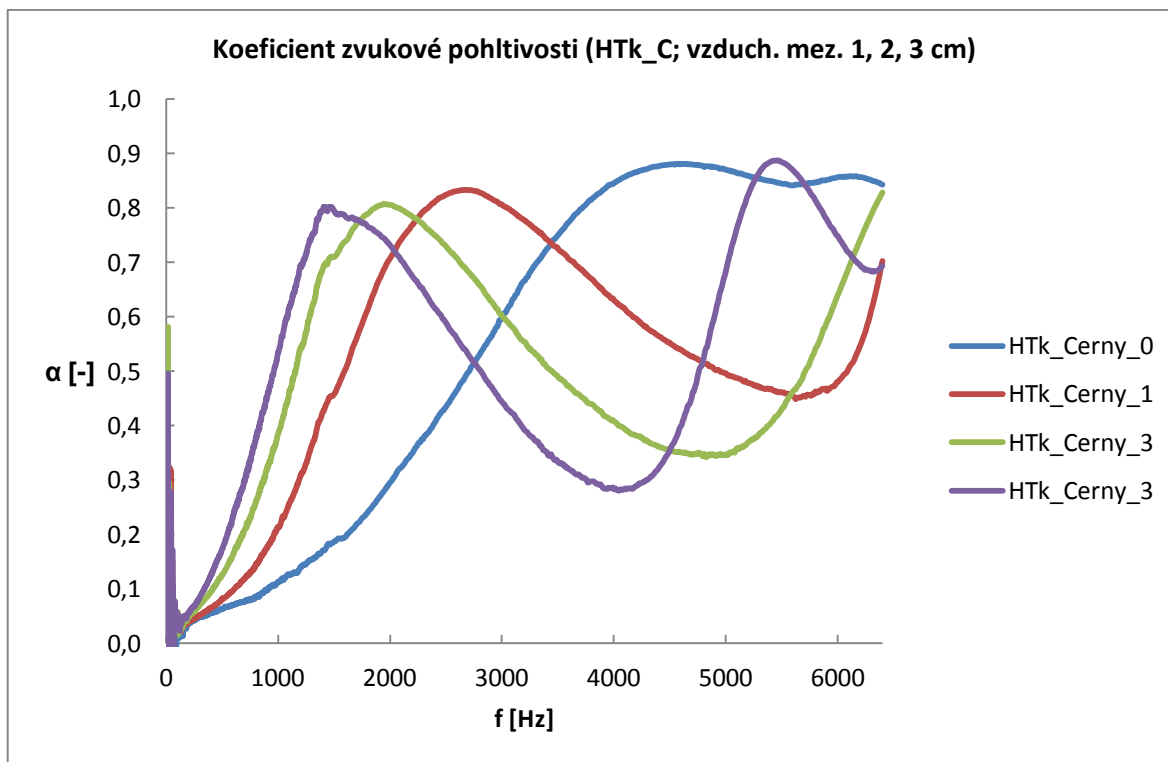
Obr. 22. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci s tkaninou UTE 165 P, v pořadí tkanina-polyuretan



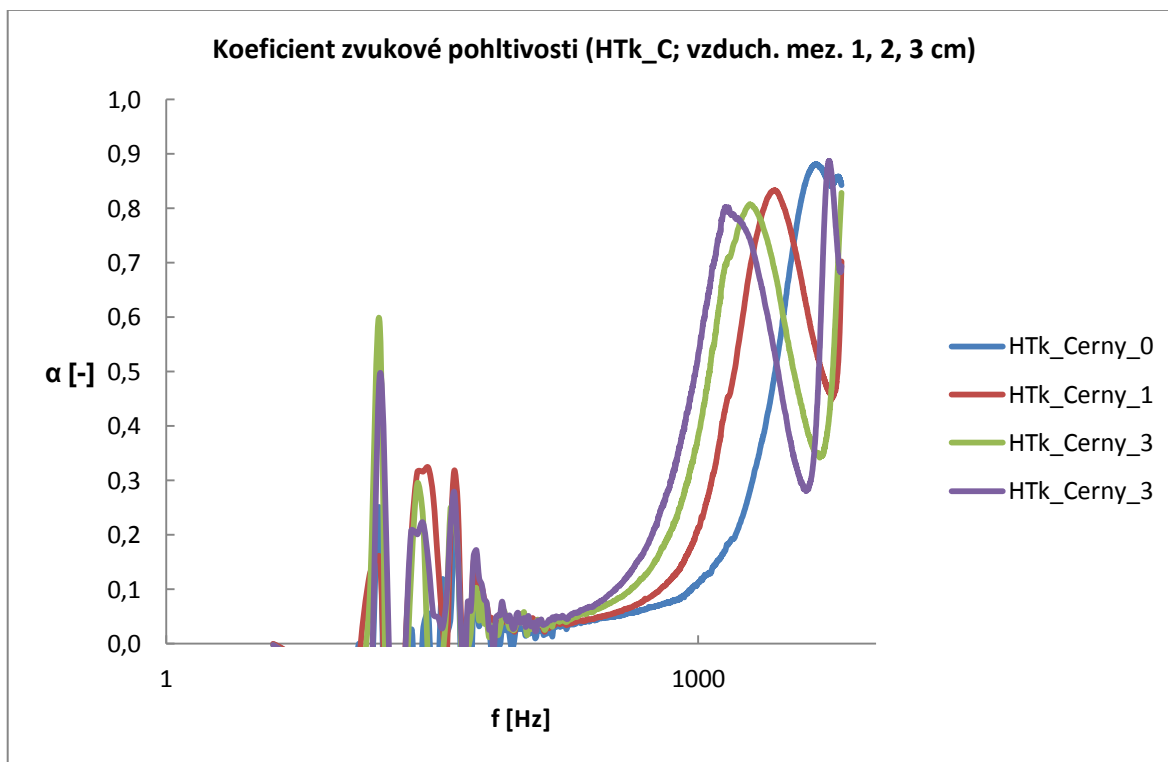
Obr. 23. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci s tkaninou UTE 165 P, v pořadí polyuretan-tkanina



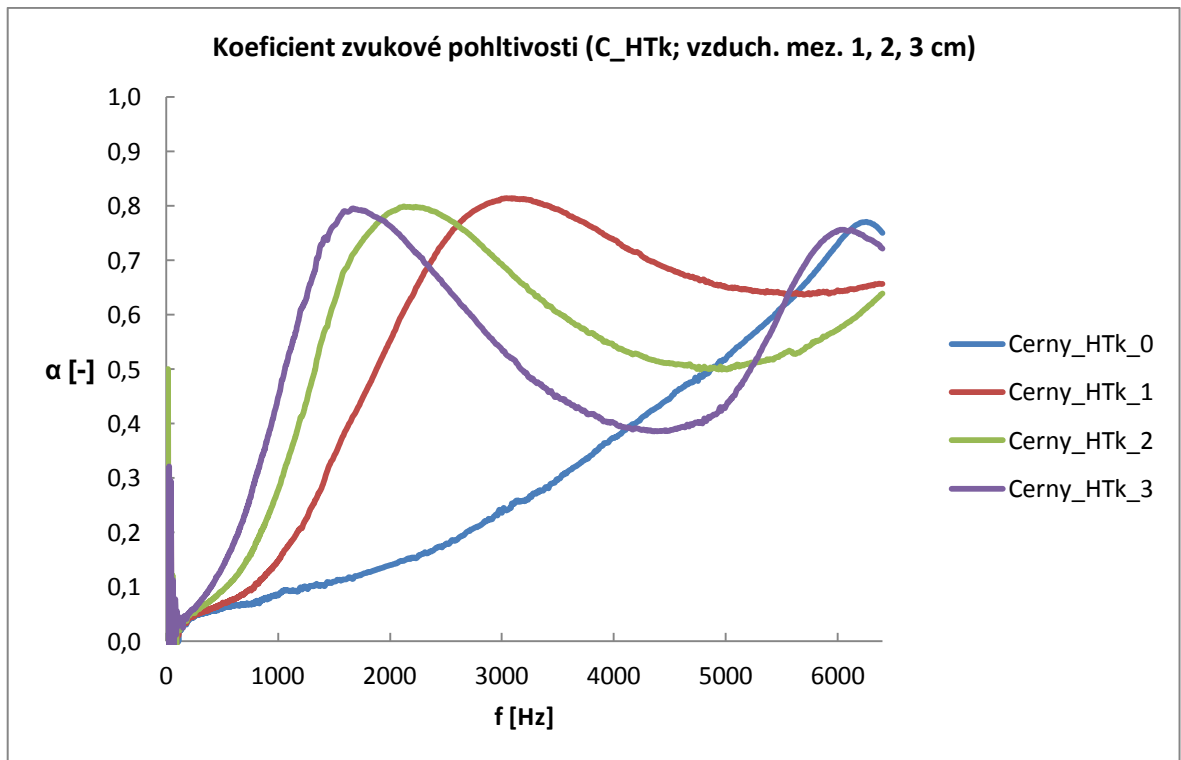
Obr. 24. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci s tkaninou UTE 165 P, v pořadí polyuretan-tkanina



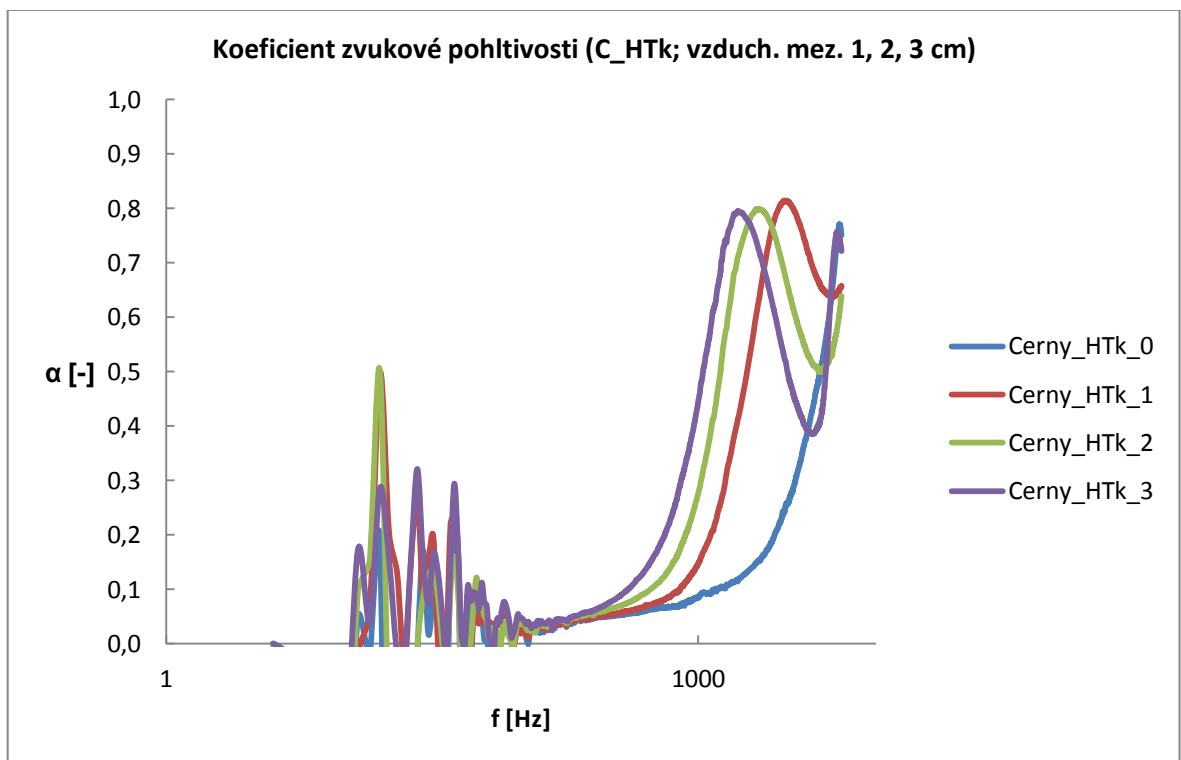
Obr. 25. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci s tkaninou UTE 140 P, v pořadí tkanina-polyuretan



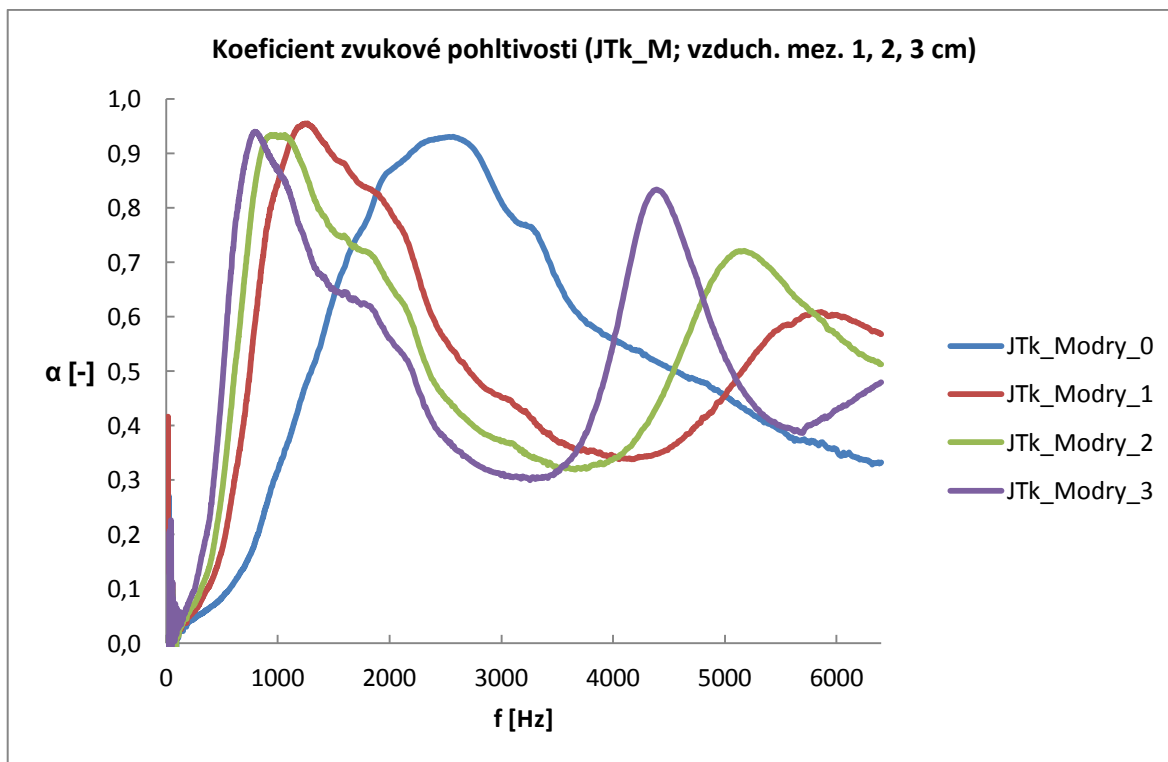
Obr. 26. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci s tkaninou UTE 140 P, v pořadí tkanina-polyuretan



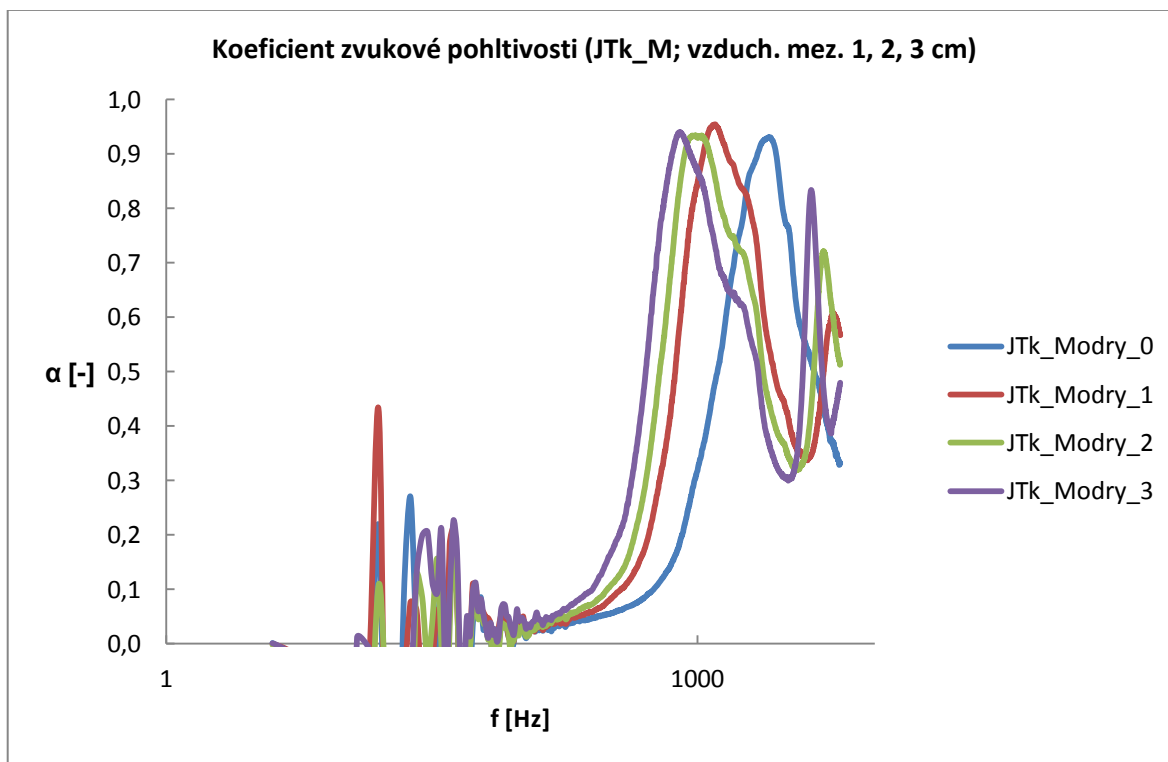
Obr. 27. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci s tkaninou UTE 140 P, v pořadí polyuretan-tkanina



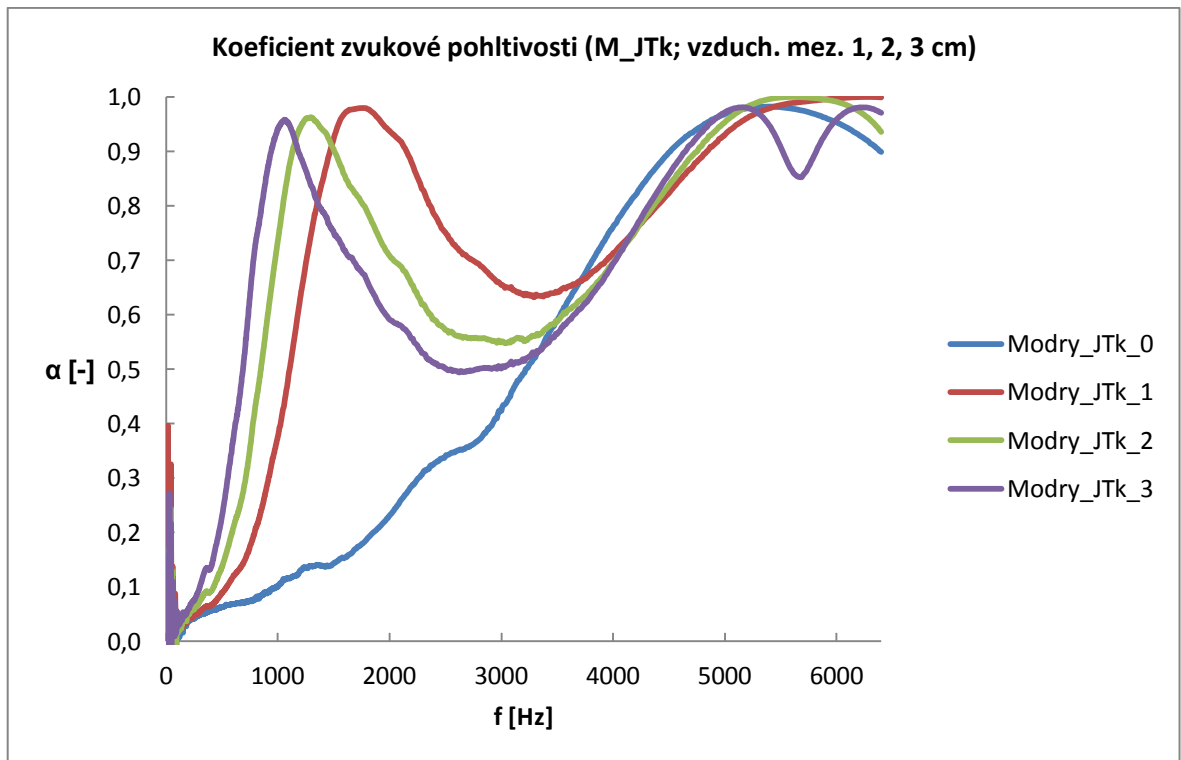
Obr. 28. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci s tkaninou UTE 140 P, v pořadí polyuretan-tkanina



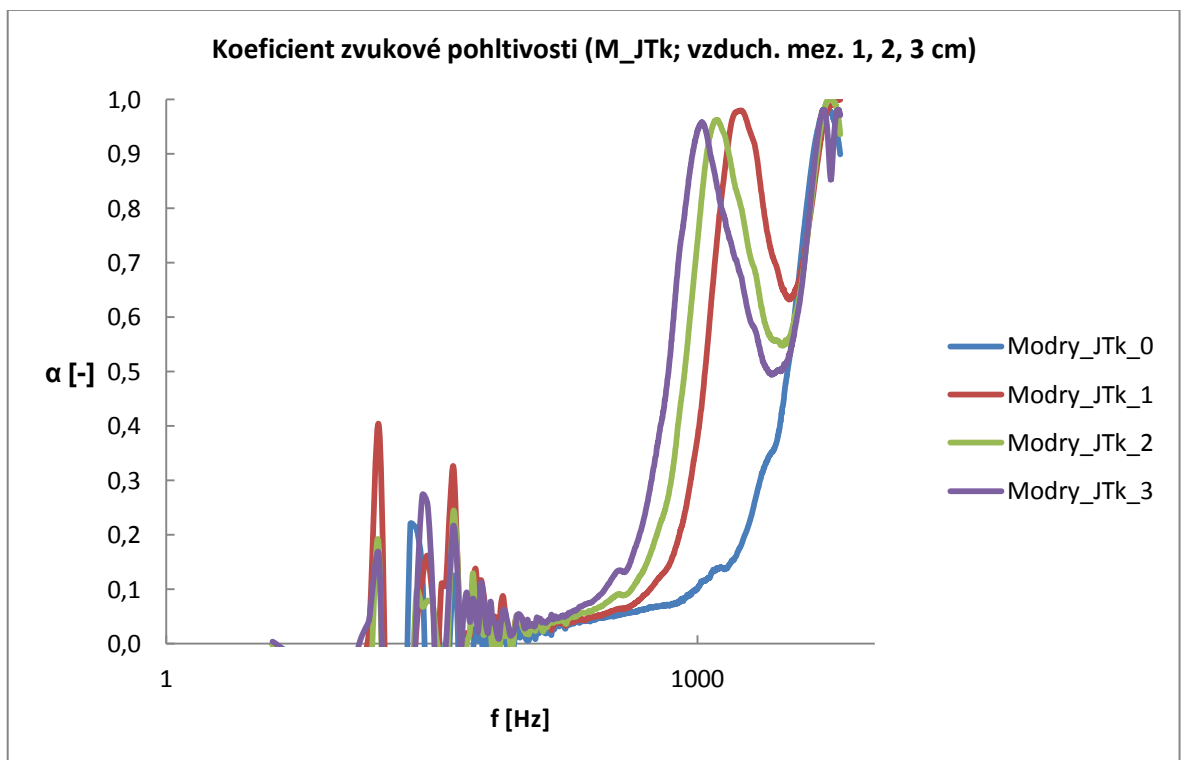
Obr. 29. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci s tkaninou UTE 165 P, v pořadí tkanina-polyuretan



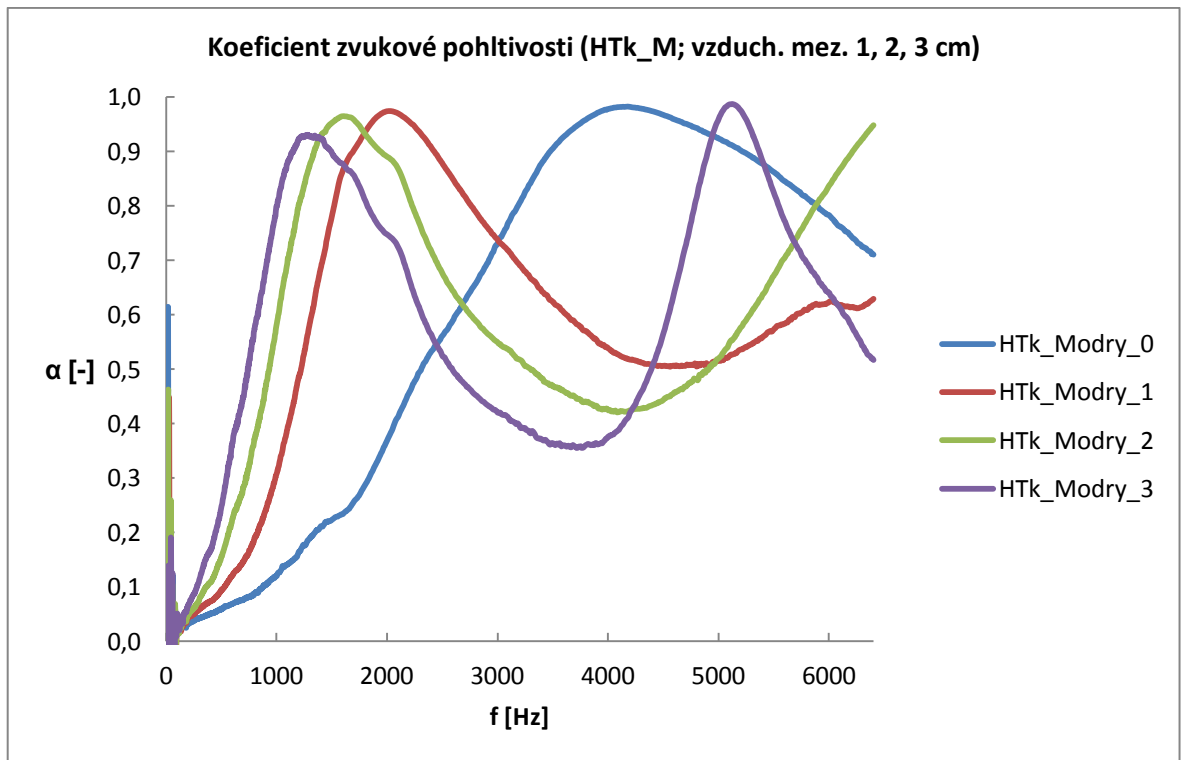
Obr. 30. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci s tkaninou UTE 165 P, v pořadí tkanina-polyuretan



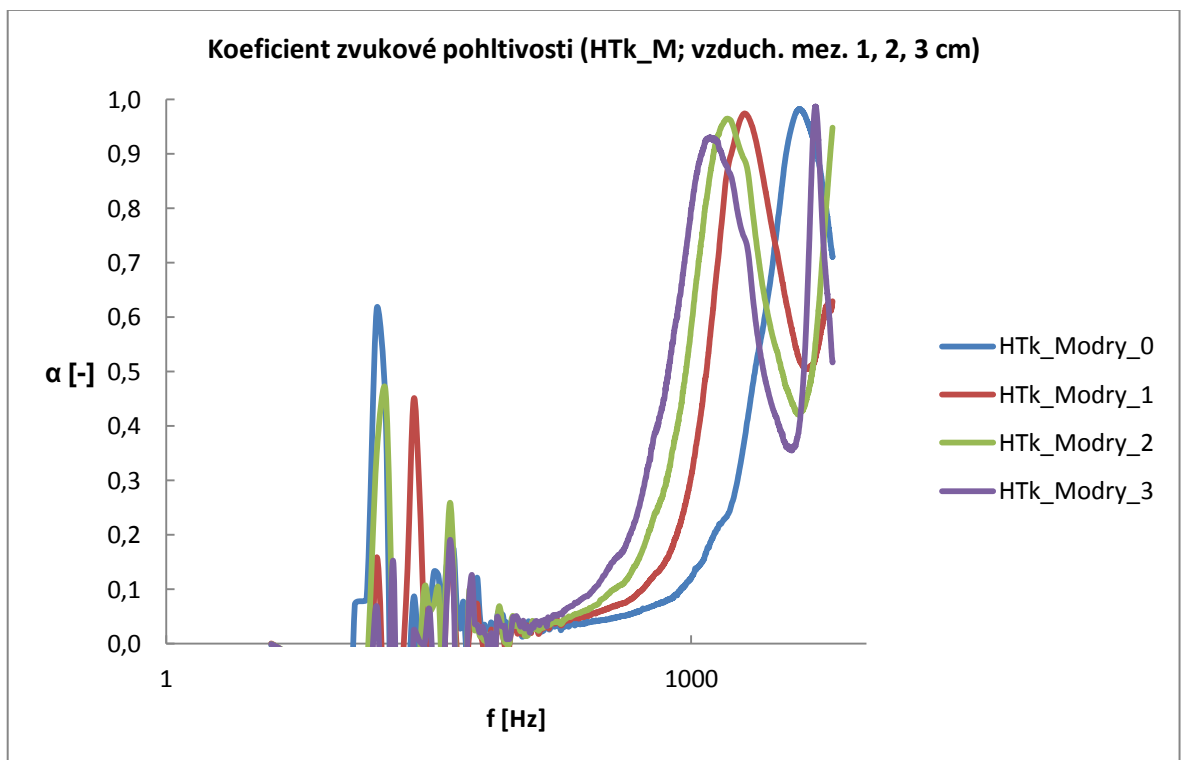
Obr. 31. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci s tkaninou UTE 165 P, v pořadí polyuretan-ťkanina



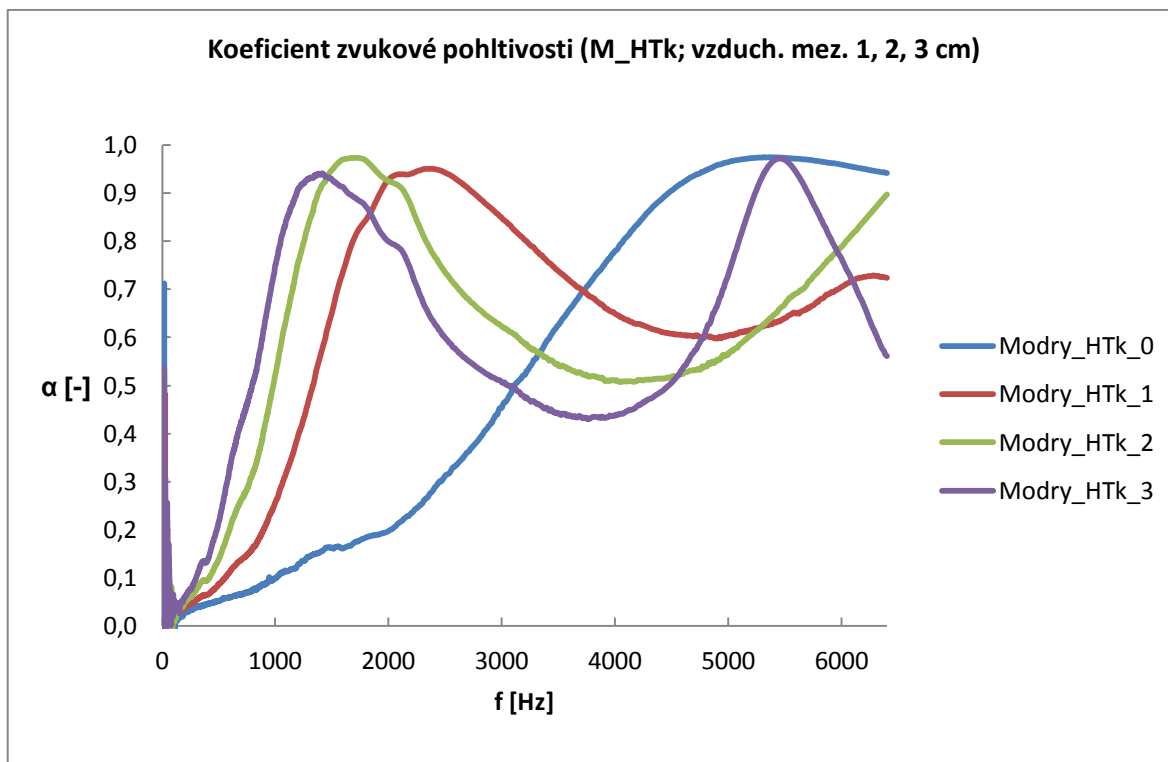
Obr. 32. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci s tkaninou UTE 165 P, v pořadí polyuretan-ťkanina



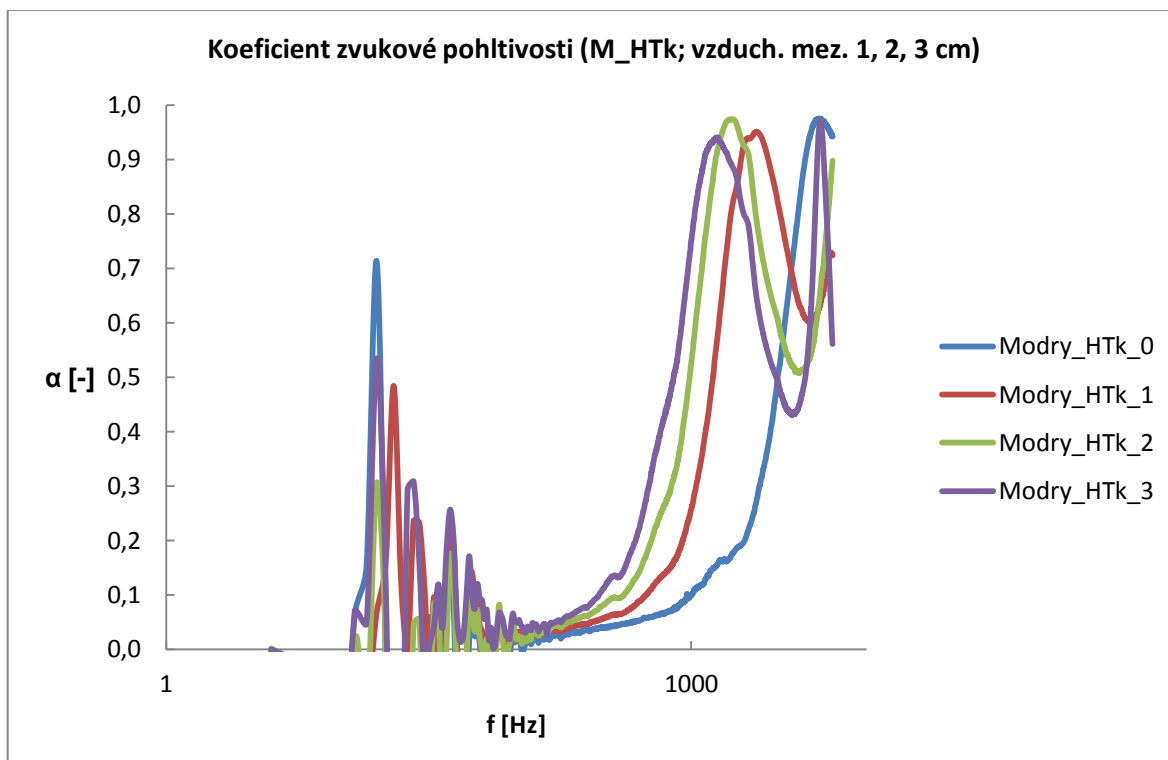
Obr. 33. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci s tkaninou UTE 140 P, v pořadí tkanina-polyuretan



Obr. 34. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci s tkaninou UTE 140 P, v pořadí tkanina-polyuretan

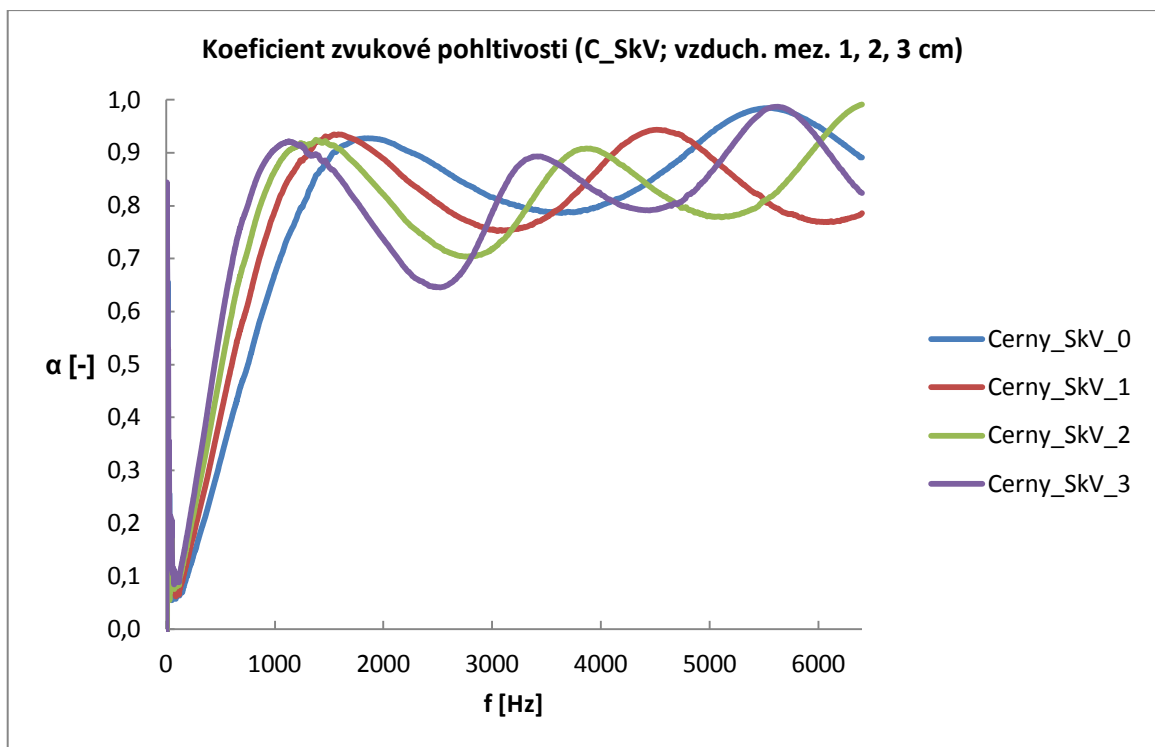


Obr. 35. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci s tkaninou UTE 140 P, v pořadí polyuretan-ťkanina

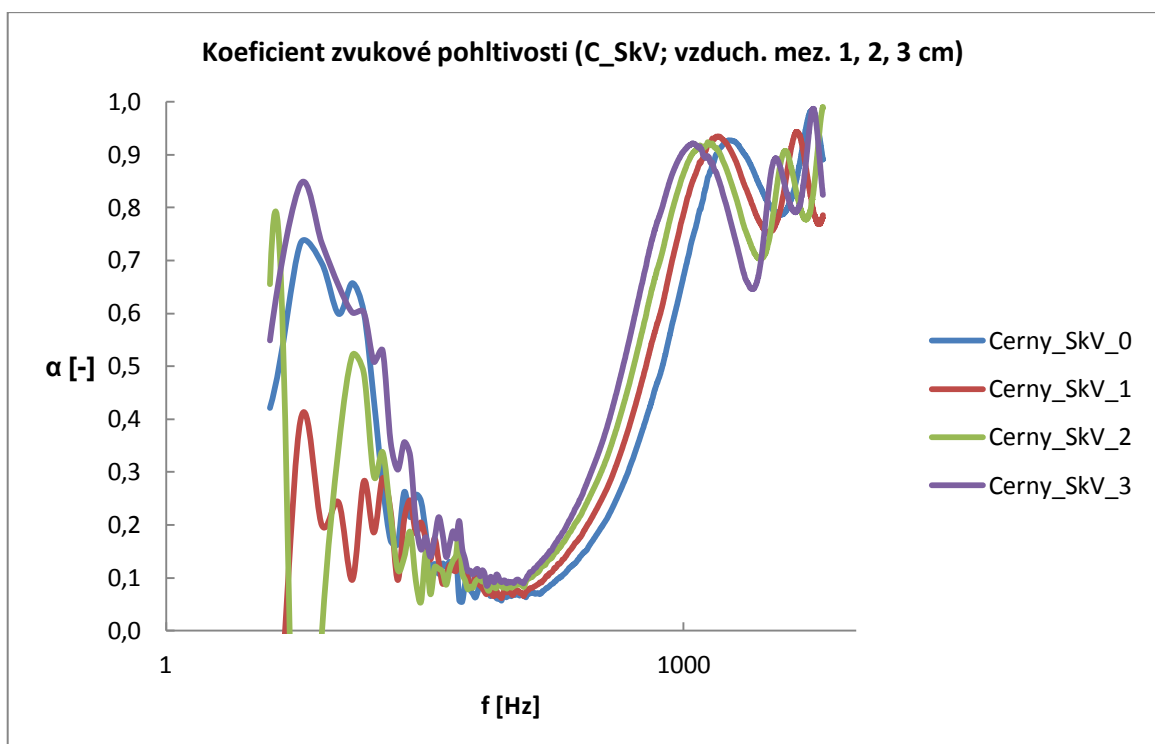


Obr. 36. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci s tkaninou UTE 140 P, v pořadí polyuretan-ťkanina

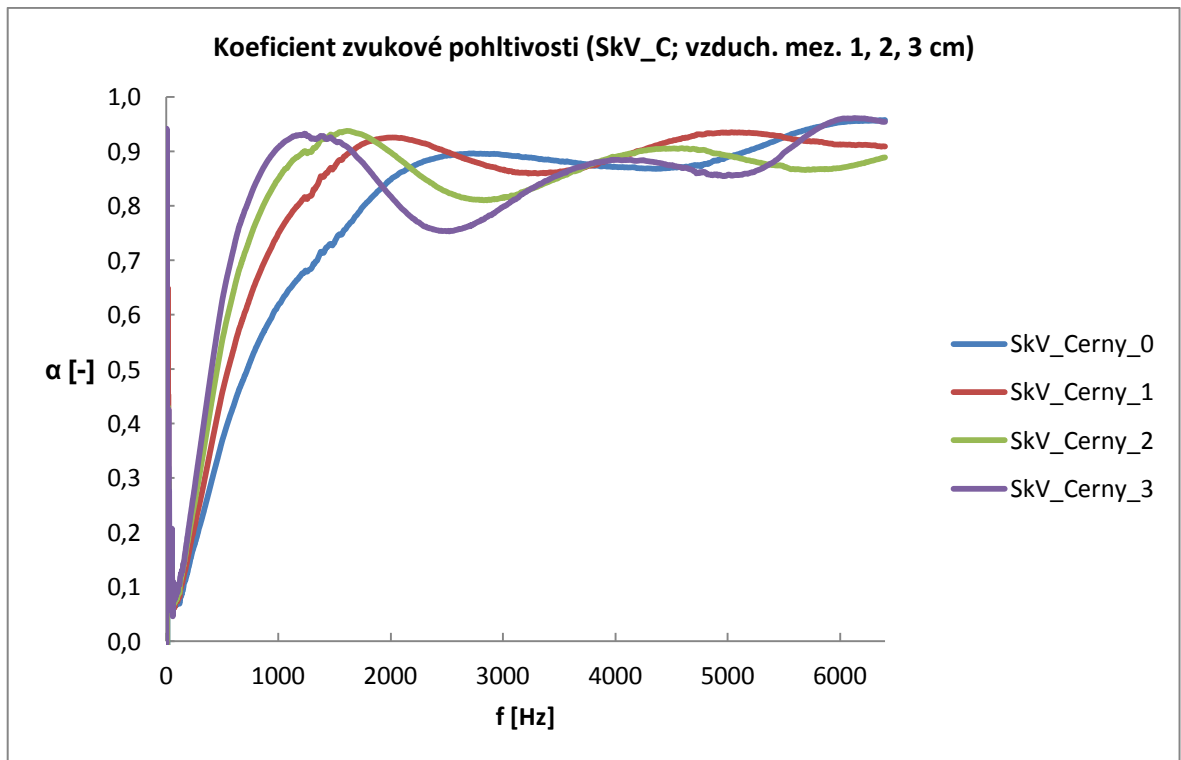
6.1.6 Koeficient zvukové pohltivosti polyuretanů v kombinaci se skelnou vatou



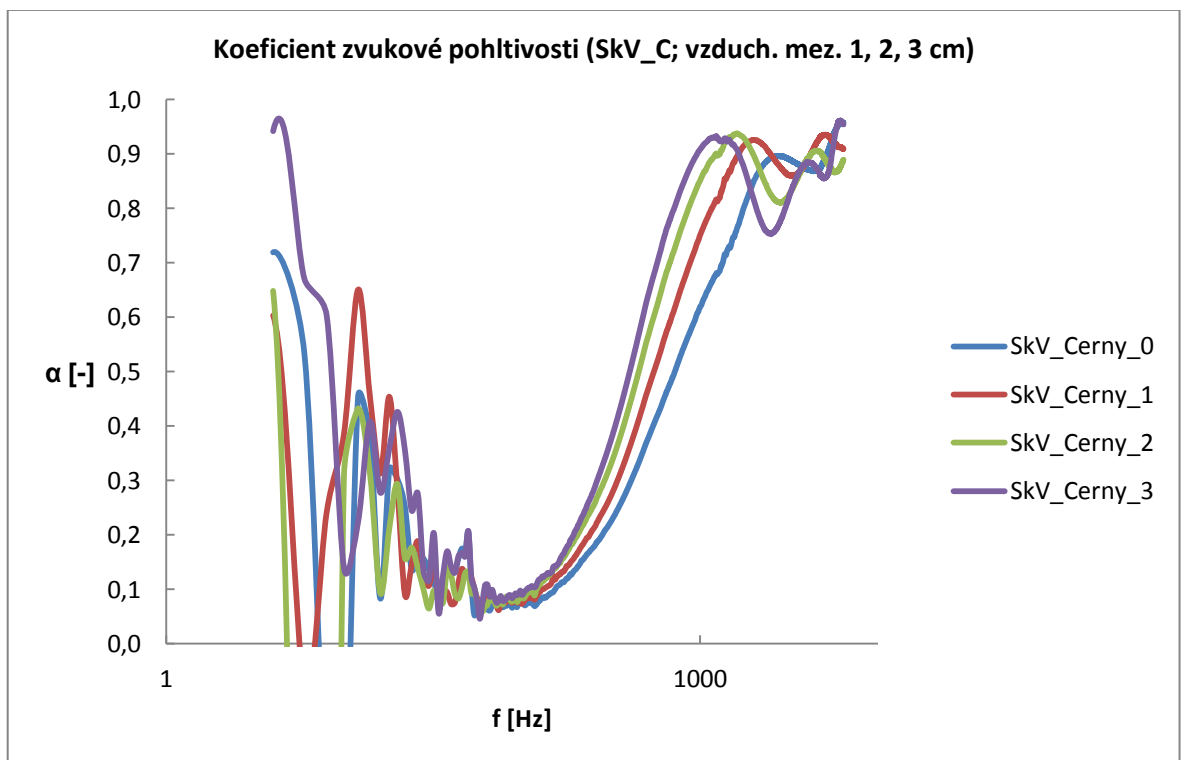
Obr. 37. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí polyuretan-vata



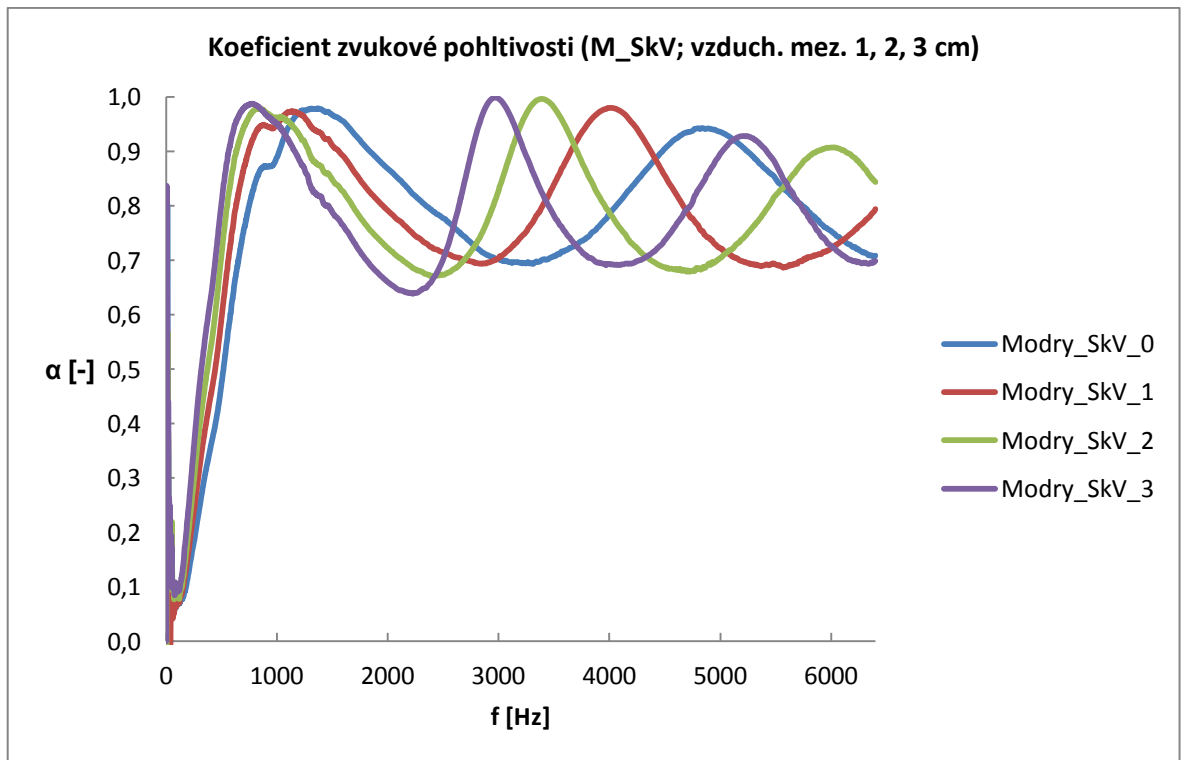
Obr. 38. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí polyuretan-vata



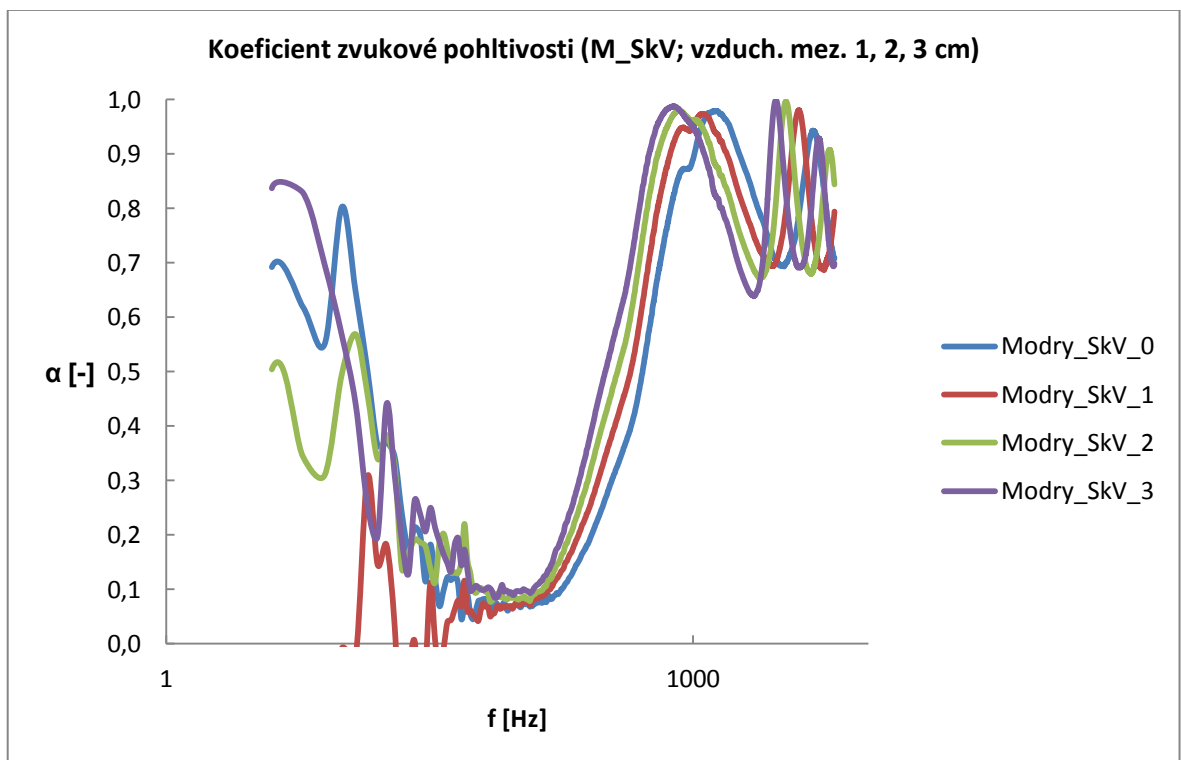
Obr. 39. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí vata-polyuretan



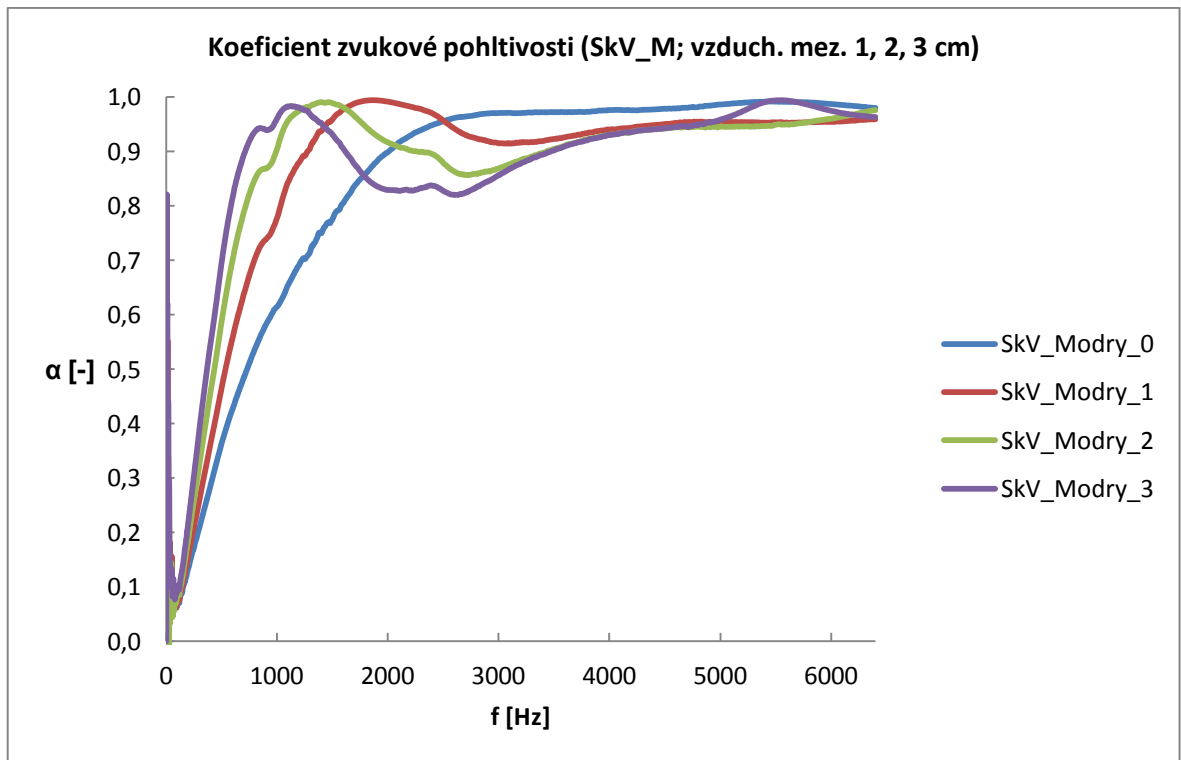
Obr. 40. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí vata-polyuretan



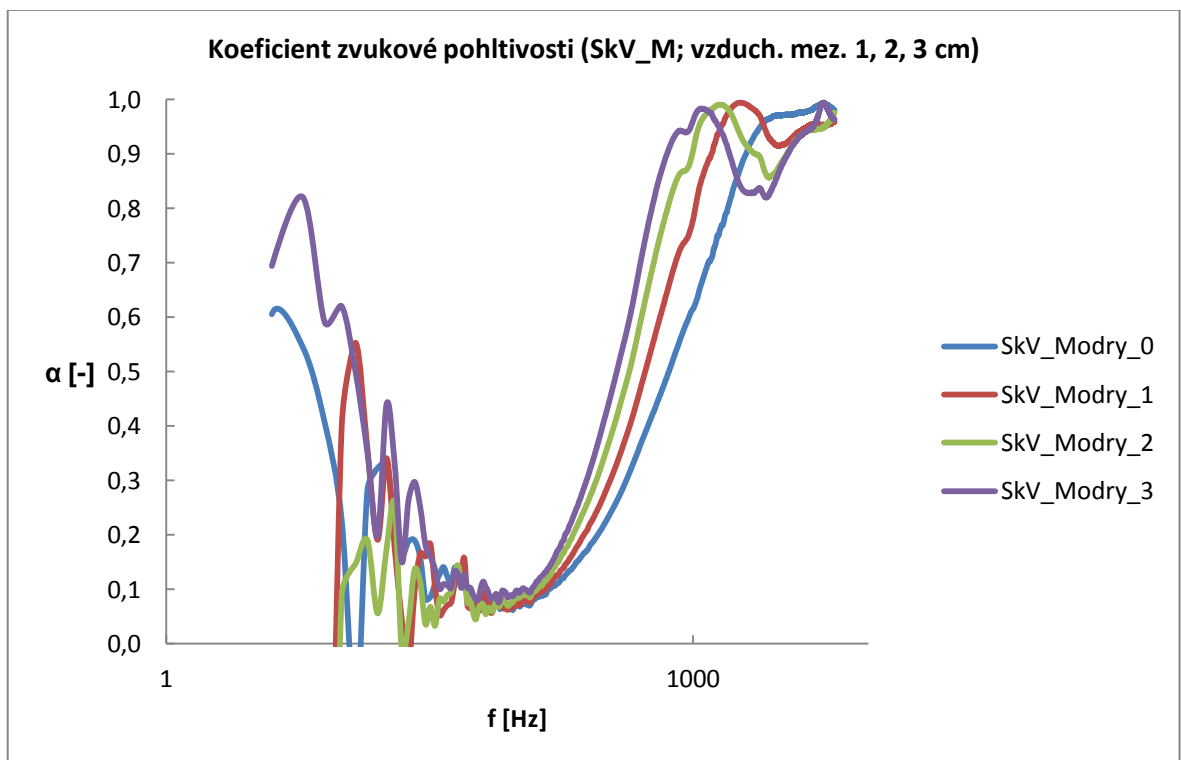
Obr. 41. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí polyuretan-vata



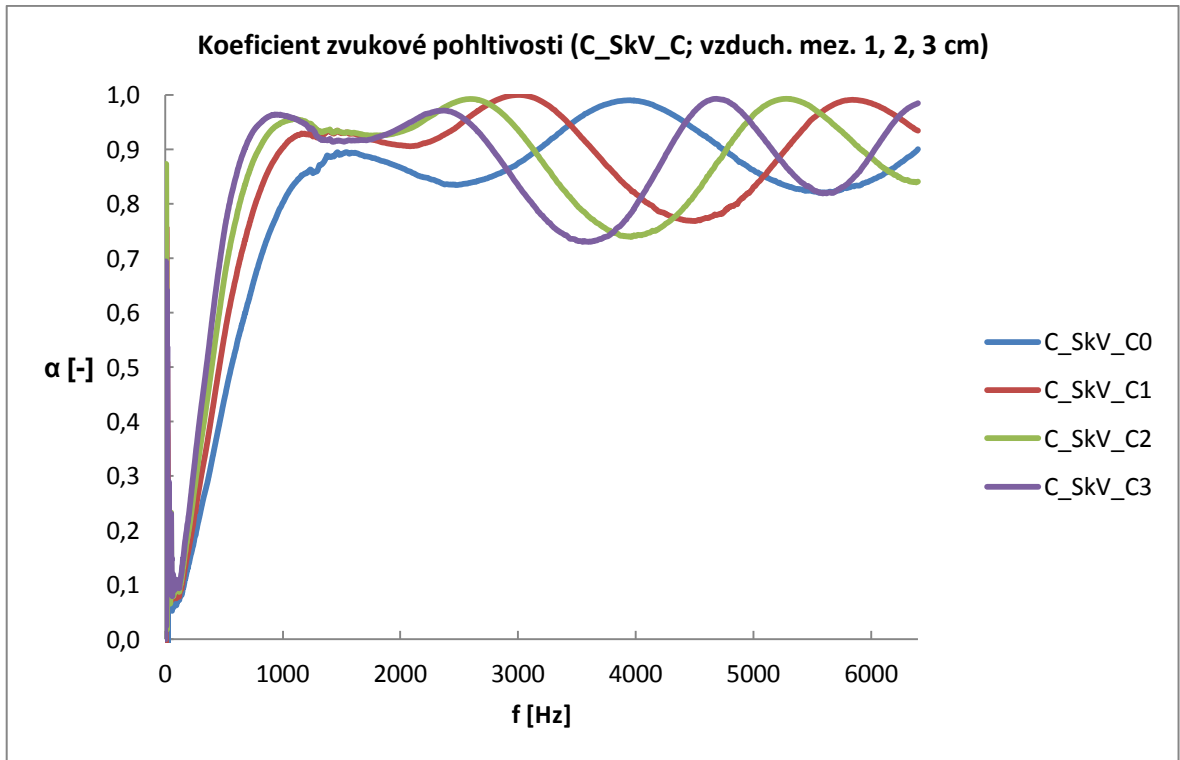
Obr. 42. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí polyuretan-vata



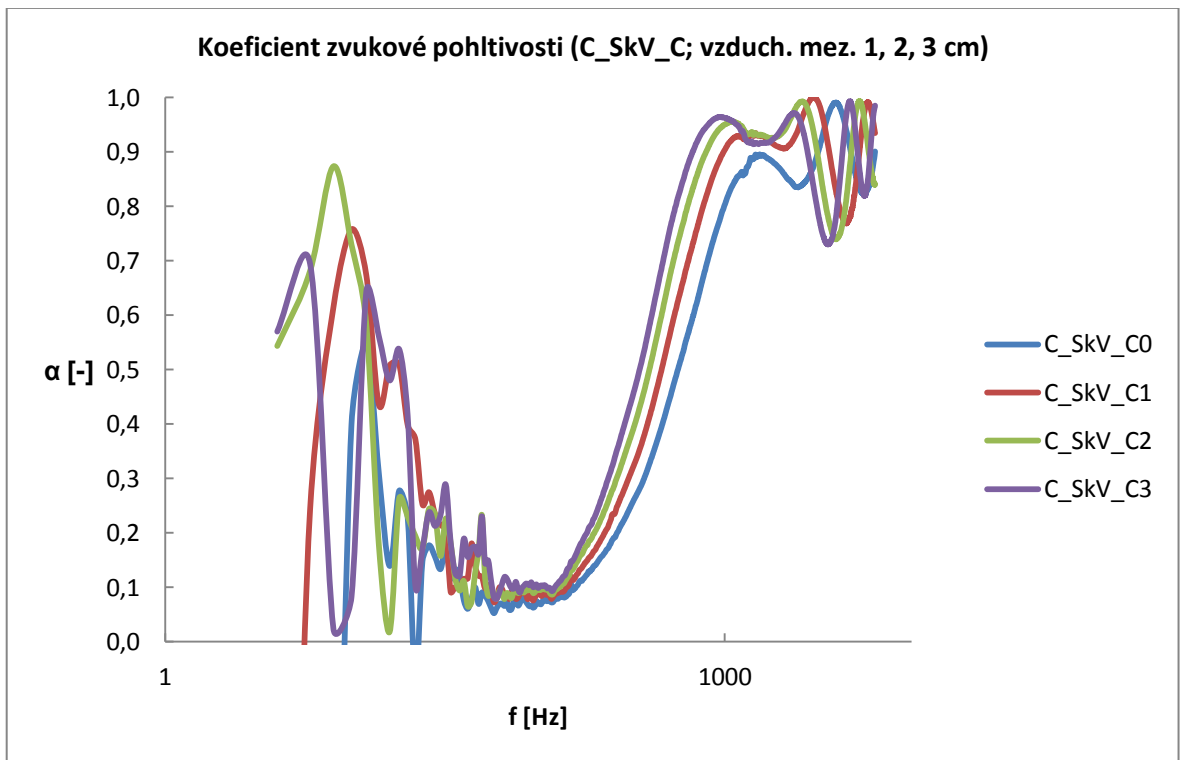
Obr. 43. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí vata-polyuretan



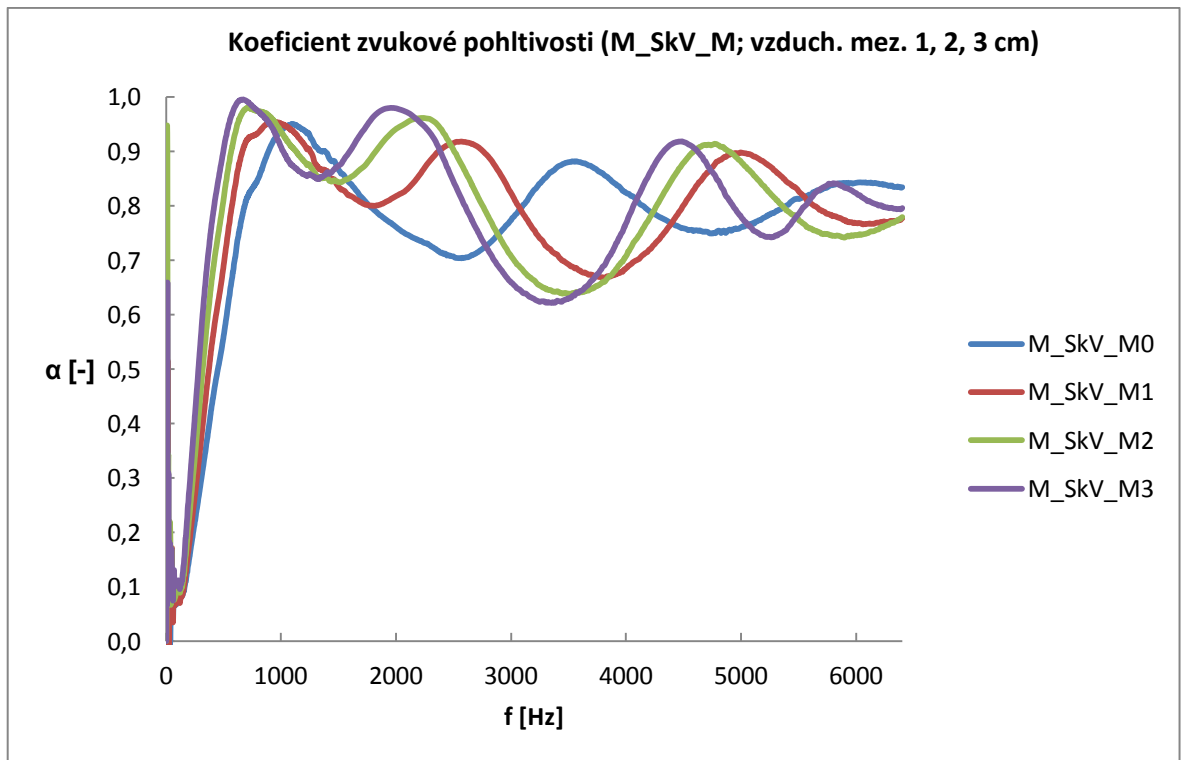
Obr. 44. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí vata-polyuretan



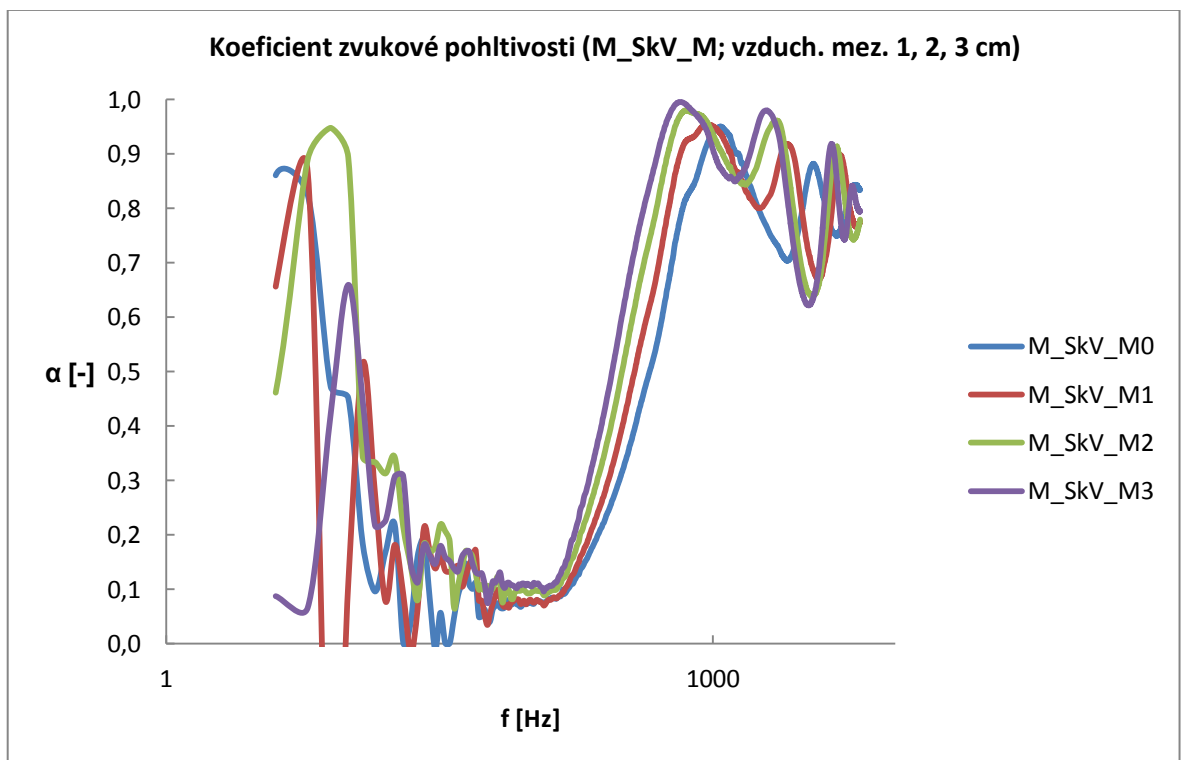
Obr. 45. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí polyuretan-vata-polyuretan



Obr. 46. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí polyuretan-vata-polyuretan



Obr. 47. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí polyuretan-vata-polyuretan



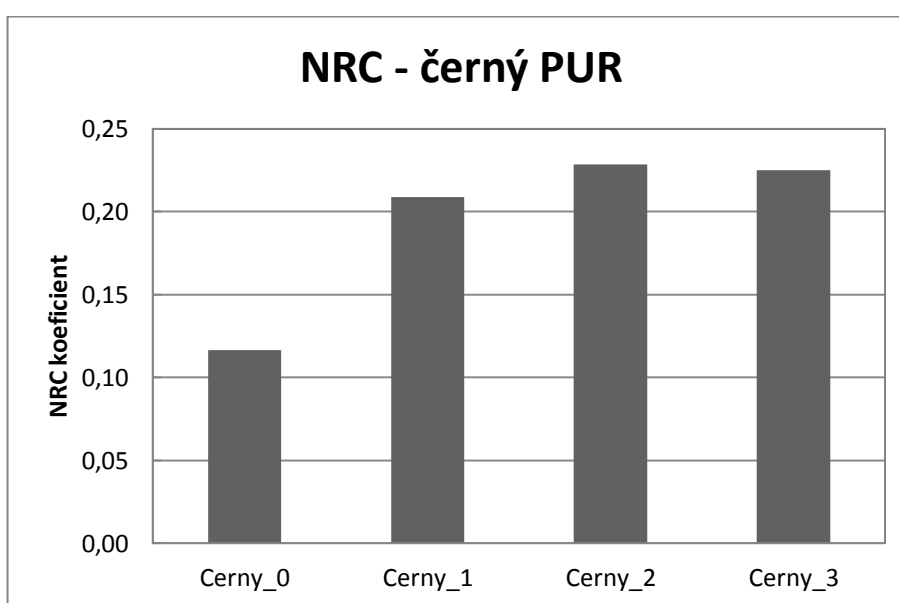
Obr. 48. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí polyuretan-vata-polyuretan

6.1.7 NRC koeficient

Noise reduction coefficient – NRC je materiálová veličina, která určuje schopnost materiálu pohlcovat hluk. Značí se $\bar{\alpha}_n$ a je daná průměrem koeficientů α pro dané frekvence 125, 250, 500, 1000, 2000 a 4000 Hz. Z následujících tabulek vyplývá, že kombinace polyuretanů se skelnou vatou je díky vysokým hodnotám $\bar{\alpha}_n$ vhodná pro akustickou izolaci. Kombinace skelných tkanin a polyuretanů také zvýšili hodnotu $\bar{\alpha}_n$. Tento koeficient je často využíván v komerční sféře, kde se k problematice pohltivosti vyjadřují firmy pouze jednou veličinou, která by měla charakterizovat ten či onen materiál v oblasti pohltivosti, respektive frekvence. Graf jako takový je vždy více vypovídající o vlastnostech materiálu ve frekvenčním rozsahu 20 – 6 400 Hz.

Tab. 12. Hodnoty NRC získané z měření koeficientu zvukové pohltivosti pro PUR S 3535 F

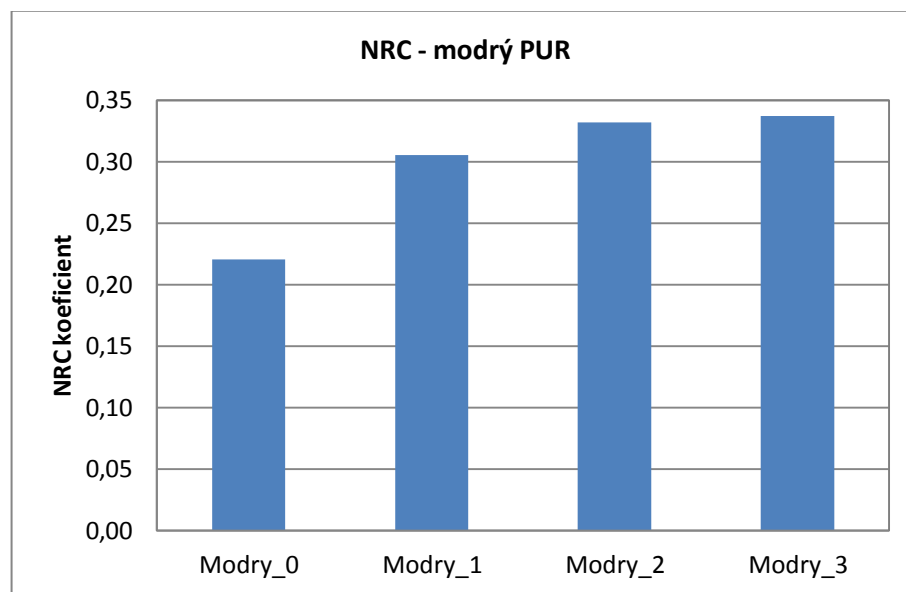
| | | f [Hz] | | | | | | $\bar{\alpha}_n$ [-] |
|--------------|----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|
| | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | |
| α [-] | Cerny_0 | 0,023 | 0,042 | 0,056 | 0,084 | 0,136 | 0,357 | 0,116 |
| | Cerny_1 | 0,036 | 0,046 | 0,068 | 0,123 | 0,329 | 0,651 | 0,209 |
| | Cerny_2 | 0,042 | 0,048 | 0,081 | 0,196 | 0,537 | 0,468 | 0,229 |
| | Cerny_3 | 0,040 | 0,056 | 0,103 | 0,284 | 0,580 | 0,286 | 0,225 |



Obr. 49. NRC koeficient naměřený pro PUR S 3535 F

Tab. 13. Hodnoty NRC získané z měření koeficientu zvukové pohltivosti pro PUR N 2200

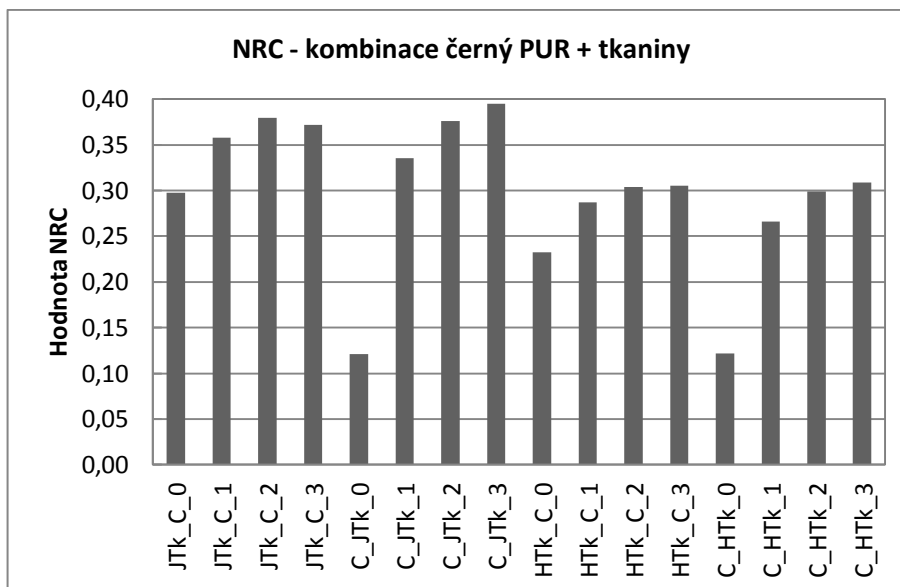
| | | f [Hz] | | | | | | $\bar{\alpha}_n$ [-] |
|--------------|----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|
| | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | |
| α [-] | Modry_0 | 0,034 | 0,040 | 0,059 | 0,108 | 0,237 | 0,845 | 0,220 |
| | Modry_1 | 0,022 | 0,041 | 0,081 | 0,223 | 0,847 | 0,621 | 0,306 |
| | Modry_2 | 0,029 | 0,052 | 0,123 | 0,432 | 0,903 | 0,453 | 0,332 |
| | Modry_3 | 0,023 | 0,069 | 0,187 | 0,641 | 0,774 | 0,331 | 0,338 |



Obr. 50. NRC koeficient naměřený pro PUR N 2200

Tab. 14. Hodnoty NRC získané z měření koeficientu zvukové pohltivosti pro PUR S 3535 F v kombinaci s tkaninami UTE 140 P a UTE 165 P

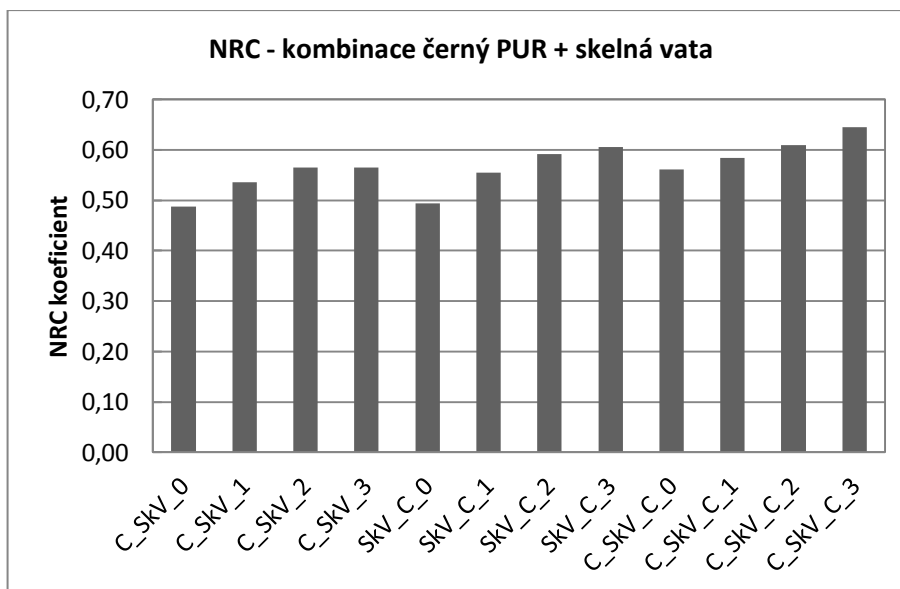
| | | f [Hz] | | | | | | $\bar{\alpha}_n$ [-] |
|--------------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|
| | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | |
| α [-] | JTk_C_0 | 0,038 | 0,046 | 0,086 | 0,284 | 0,835 | 0,497 | 0,298 |
| | JTk_C_1 | 0,048 | 0,053 | 0,131 | 0,720 | 0,818 | 0,376 | 0,358 |
| | JTk_C_2 | 0,046 | 0,072 | 0,268 | 0,951 | 0,657 | 0,285 | 0,380 |
| | JTk_C_3 | 0,053 | 0,087 | 0,376 | 0,882 | 0,559 | 0,275 | 0,372 |
| α [-] | C_JTk_0 | 0,016 | 0,036 | 0,052 | 0,087 | 0,143 | 0,391 | 0,121 |
| | C_JTk_1 | 0,019 | 0,042 | 0,070 | 0,248 | 0,980 | 0,652 | 0,335 |
| | C_JTk_2 | 0,040 | 0,053 | 0,103 | 0,612 | 0,881 | 0,568 | 0,376 |
| | C_JTk_3 | 0,035 | 0,063 | 0,159 | 0,861 | 0,739 | 0,511 | 0,395 |
| α [-] | HTk_C_0 | 0,032 | 0,045 | 0,064 | 0,113 | 0,296 | 0,846 | 0,233 |
| | HTk_C_1 | 0,041 | 0,045 | 0,083 | 0,214 | 0,707 | 0,631 | 0,287 |
| | HTk_C_2 | 0,040 | 0,058 | 0,127 | 0,385 | 0,806 | 0,408 | 0,304 |
| | HTk_C_3 | 0,040 | 0,067 | 0,174 | 0,535 | 0,732 | 0,283 | 0,305 |
| α [-] | C_HTk_0 | 0,027 | 0,046 | 0,060 | 0,084 | 0,140 | 0,373 | 0,122 |
| | C_HTk_1 | 0,038 | 0,049 | 0,070 | 0,148 | 0,552 | 0,738 | 0,266 |
| | C_HTk_2 | 0,037 | 0,055 | 0,093 | 0,278 | 0,788 | 0,543 | 0,299 |
| | C_HTk_3 | 0,040 | 0,061 | 0,136 | 0,449 | 0,763 | 0,402 | 0,308 |



Obr. 51. NRC koeficient naměřený pro PUR S 3535 F v kombinaci se skelnými tkaninami

Tab. 15. Hodnoty NRC získané z měření koeficientu zvukové pohltivosti pro PUR S 3535 F v kombinaci se skelnou vatou

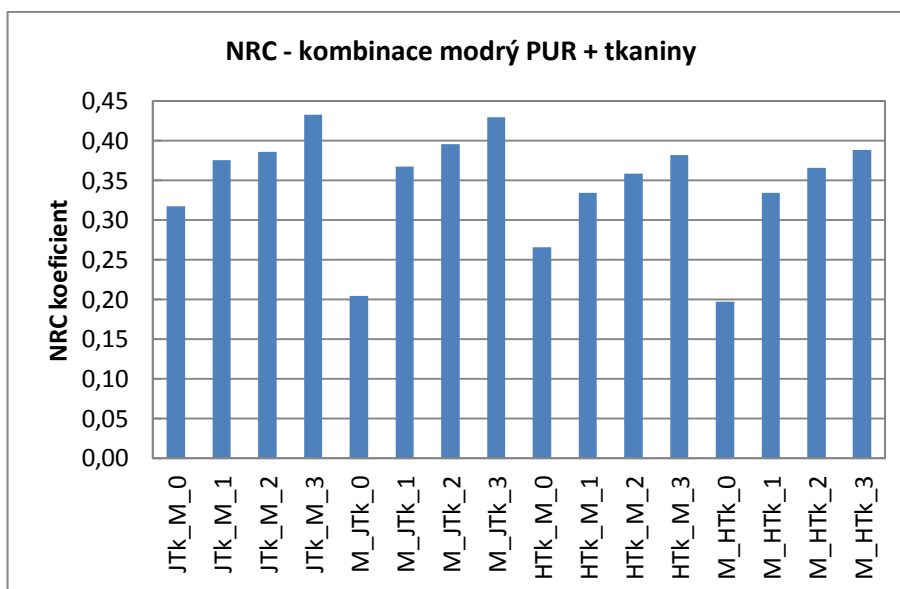
| | | f [Hz] | | | | | | $\bar{\alpha}_n$ [-] |
|--------------|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|
| | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | |
| α [-] | C_SkV_0 | 0,070 | 0,140 | 0,320 | 0,672 | 0,923 | 0,800 | 0,488 |
| | C_SkV_1 | 0,077 | 0,176 | 0,403 | 0,791 | 0,889 | 0,875 | 0,535 |
| | C_SkV_2 | 0,098 | 0,216 | 0,486 | 0,867 | 0,821 | 0,901 | 0,565 |
| | C_SkV_3 | 0,104 | 0,248 | 0,571 | 0,907 | 0,737 | 0,821 | 0,565 |
| α [-] | SkV_C_0 | 0,080 | 0,176 | 0,370 | 0,618 | 0,848 | 0,871 | 0,494 |
| | SkV_C_1 | 0,094 | 0,210 | 0,458 | 0,750 | 0,926 | 0,887 | 0,554 |
| | SkV_C_2 | 0,108 | 0,251 | 0,554 | 0,850 | 0,898 | 0,890 | 0,592 |
| | SkV_C_3 | 0,118 | 0,278 | 0,628 | 0,908 | 0,817 | 0,885 | 0,606 |
| α [-] | C_SkV_C_0 | 0,080 | 0,187 | 0,440 | 0,803 | 0,868 | 0,990 | 0,561 |
| | C_SkV_C_1 | 0,088 | 0,234 | 0,554 | 0,903 | 0,907 | 0,819 | 0,584 |
| | C_SkV_C_2 | 0,096 | 0,279 | 0,660 | 0,951 | 0,933 | 0,741 | 0,610 |
| | C_SkV_C_3 | 0,104 | 0,323 | 0,747 | 0,963 | 0,940 | 0,797 | 0,645 |



Obr. 52. NRC koeficient naměřený pro PUR S 3535 F v kombinaci se skelnou vatou

Tab. 16. Hodnoty NRC získané z měření koeficientu zvukové pohltivosti pro PUR N 2200 v kombinaci s tkaninami UTE 140 P a UTE 165 P

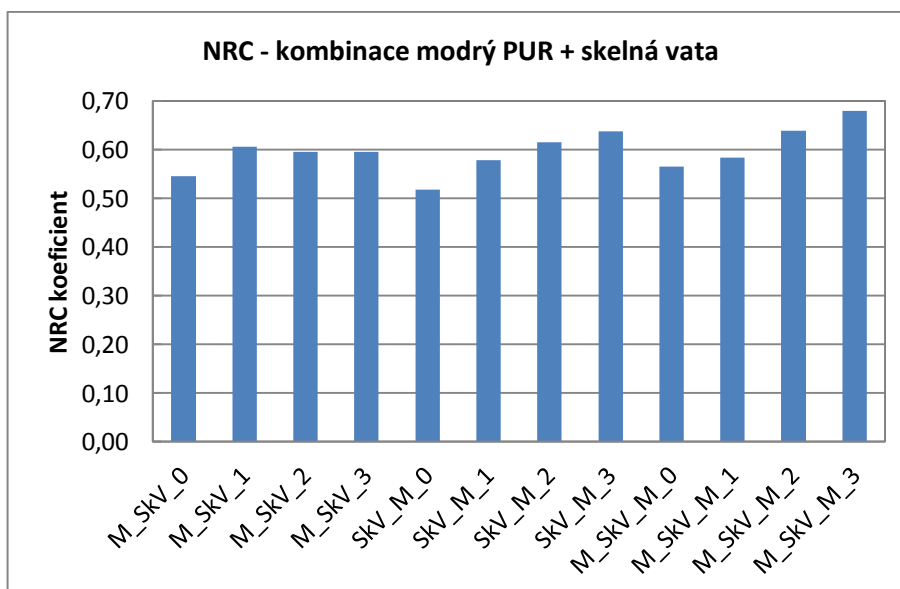
| | | f [Hz] | | | | | | $\bar{\alpha}_n$ [-] |
|--------------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|
| | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | |
| α [-] | JTk_M_0 | 0,031 | 0,046 | 0,084 | 0,317 | 0,868 | 0,559 | 0,318 |
| | JTk_M_1 | 0,038 | 0,059 | 0,171 | 0,846 | 0,796 | 0,342 | 0,376 |
| | JTk_M_2 | 0,035 | 0,072 | 0,280 | 0,930 | 0,660 | 0,338 | 0,386 |
| | JTk_M_3 | 0,054 | 0,097 | 0,470 | 0,868 | 0,561 | 0,548 | 0,433 |
| α [-] | M_JTk_0 | 0,026 | 0,042 | 0,063 | 0,101 | 0,231 | 0,762 | 0,204 |
| | M_JTk_1 | 0,038 | 0,048 | 0,090 | 0,377 | 0,938 | 0,713 | 0,367 |
| | M_JTk_2 | 0,037 | 0,058 | 0,137 | 0,737 | 0,708 | 0,695 | 0,396 |
| | M_JTk_3 | 0,047 | 0,075 | 0,231 | 0,941 | 0,591 | 0,693 | 0,430 |
| α [-] | HTk_M_0 | 0,030 | 0,039 | 0,060 | 0,120 | 0,370 | 0,978 | 0,266 |
| | HTk_M_1 | 0,036 | 0,053 | 0,096 | 0,309 | 0,974 | 0,539 | 0,334 |
| | HTk_M_2 | 0,035 | 0,061 | 0,156 | 0,584 | 0,891 | 0,425 | 0,359 |
| | HTk_M_3 | 0,032 | 0,087 | 0,248 | 0,799 | 0,747 | 0,376 | 0,382 |
| α [-] | M_HTk_0 | 0,019 | 0,035 | 0,052 | 0,099 | 0,198 | 0,780 | 0,197 |
| | M_HTk_1 | 0,036 | 0,047 | 0,089 | 0,258 | 0,928 | 0,649 | 0,335 |
| | M_HTk_2 | 0,034 | 0,061 | 0,140 | 0,526 | 0,925 | 0,510 | 0,366 |
| | M_HTk_3 | 0,045 | 0,077 | 0,219 | 0,751 | 0,799 | 0,438 | 0,388 |



Obr. 53. NRC koeficient naměřený pro PUR N 2200 v kombinaci se skelnými tkaninami

Tab. 17. Hodnoty NRC získané z měření koeficientu zvukové pohltivosti pro PUR N 2200 v kombinaci se skelnou vatou

| | | <i>f</i> [Hz] | | | | | | $\bar{\alpha}_n$ [-] |
|--------------|-----------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|
| | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | |
| α [-] | M_SkV_0 | 0,074 | 0,183 | 0,476 | 0,890 | 0,869 | 0,786 | 0,546 |
| | M_SkV_1 | 0,082 | 0,240 | 0,596 | 0,949 | 0,791 | 0,980 | 0,606 |
| | M_SkV_2 | 0,091 | 0,296 | 0,713 | 0,962 | 0,723 | 0,787 | 0,595 |
| | M_SkV_3 | 0,103 | 0,359 | 0,808 | 0,952 | 0,660 | 0,693 | 0,596 |
| α [-] | SkV_M_0 | 0,082 | 0,172 | 0,364 | 0,614 | 0,898 | 0,976 | 0,518 |
| | SkV_M_1 | 0,087 | 0,209 | 0,466 | 0,778 | 0,992 | 0,941 | 0,579 |
| | SkV_M_2 | 0,096 | 0,258 | 0,588 | 0,905 | 0,917 | 0,930 | 0,616 |
| | SkV_M_3 | 0,108 | 0,304 | 0,696 | 0,961 | 0,829 | 0,930 | 0,638 |
| α [-] | M_SkV_M_0 | 0,082 | 0,221 | 0,562 | 0,939 | 0,761 | 0,824 | 0,565 |
| | M_SkV_M_1 | 0,081 | 0,269 | 0,693 | 0,952 | 0,819 | 0,686 | 0,583 |
| | M_SkV_M_2 | 0,095 | 0,340 | 0,814 | 0,936 | 0,942 | 0,708 | 0,639 |
| | M_SkV_M_3 | 0,105 | 0,416 | 0,905 | 0,908 | 0,979 | 0,769 | 0,680 |



Obr. 54. NRC koeficient naměřený pro PUR N 2200 v kombinaci se skelnou vatou

6.2 Praktická část

6.2.1 Měření ekvivalentní hladiny akustického tlaku motoru auta

Pro praktické měření byla vybrána kombinace PUR S 3535 F a skelné tkaniny UTE 165 P. Bylo provedeno měření ekvivalentní hladiny akustického tlaku v různých režimech. Měření akustického pozadí při vypnutém motoru, měření při volnoběhu a při 2000 otáčkách za minutu. Akustická izolace byla umístěna na motor pod kapotu auta v pořadí skelná tkanina a polyuretan ve směru od motoru. Byly změřeny standardní hodnoty a hodnoty s použitím akustické izolace polyuretanu a skelné tkaniny.

Tab. 18. Rozměry tlumící vrstvy

| Šířka [cm] | Délka [cm] | Plocha [cm ²] |
|------------|------------|---------------------------|
| 78 | 98 | 7644 |

Tab. 19. Rozměry a hmotnost auta Opel Corsa 1,0 12V (2001) [14]

| Délka [mm] | Šířka [mm] | Výška [mm] | Provozní hmotnost [kg] |
|------------|------------|------------|------------------------|
| 3817 | 1646 | 1440 | 950 |

Tab. 20. Parametry motoru auta Opel Corsa 1,0 12V
(2001) [14]

| Objem [ccm] | Výkon [kW/ot·min ⁻¹] | Převodovka |
|-------------|-------------------------------------|------------|
| 973 | 43/5600 | 5 stupňová |

Tab. 21. Ekvivalentní hladina akustického tlaku pro různé režimy měření

| režim měření | pozadí na počátku | motor volnoběh | motor 2000 ot. /min | motor volnoběh + izolace | motor 2000 ot./min + izolace | pozadí na konci |
|---------------------------------------|-------------------|----------------|---------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------|
| L_{Aeq} [dB] | 40,7* | 55,9 | 68,6 | 54,3 | 67,7 | 32,3* |

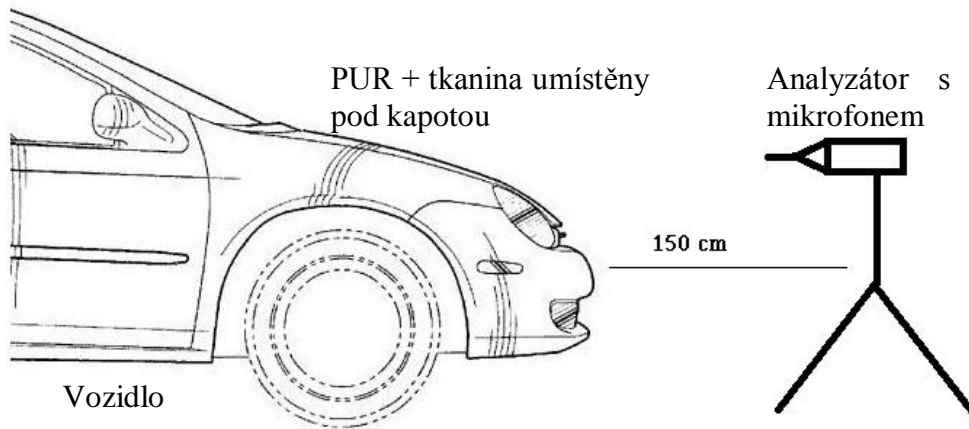
*měření proběhlo v prostorách, jejichž stěny byly hladké a místo mohlo být ovlivněno okolním hlukem, který generovala doprava v okolí.

Standardní hodnoty a hodnoty s použitím akustické izolace se liší asi o 1dB. Měření nebylo prováděno v dokonale odhlučněném prostředí. Ekvivalentní hladina akustického tlaku pozadí se pohybovala v rozmezí 32,3 – 40,7 dB a značně ovlivnila výsledné hodnoty měření.



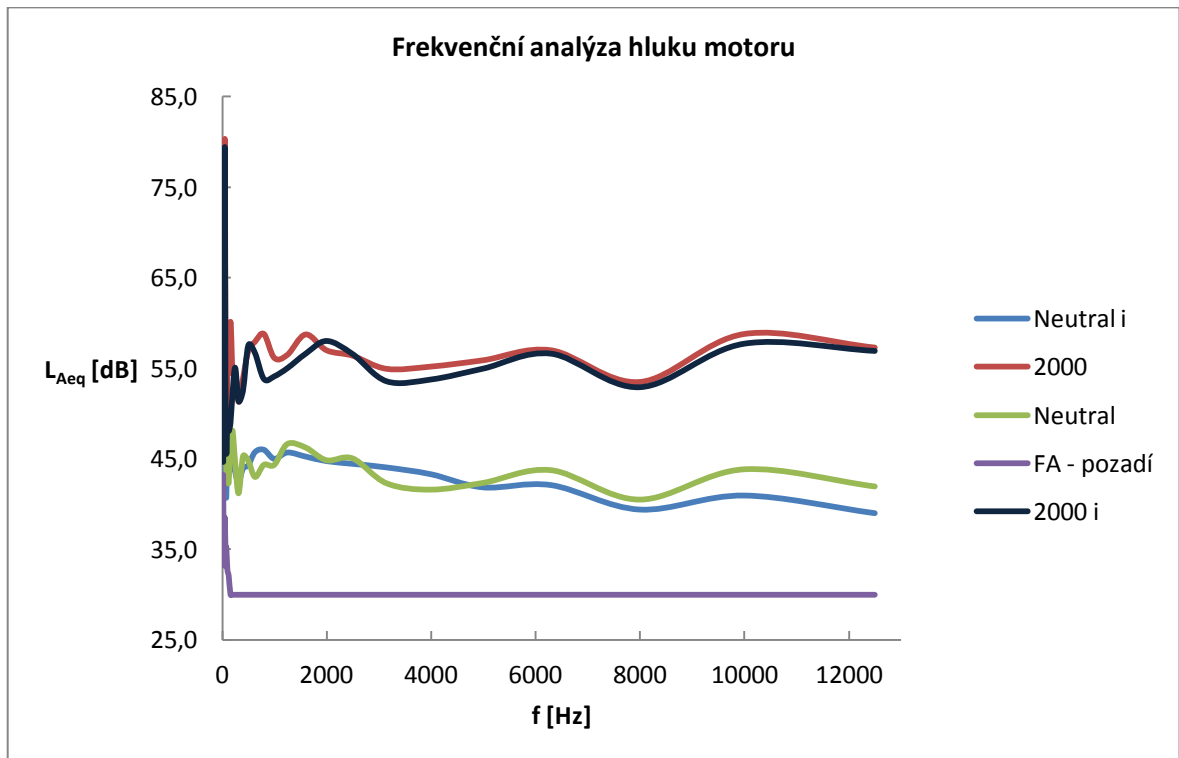
Obr. 55. Měřený motor vozidla Opel Corsa 1,0 12V (2001)

Nákres umístění mikrofonu před vozidlem zobrazuje následující obrázek (Obr. 56.)



Obr. 56. Nákres umístění mikrofonu před vozidlem

6.2.2 Frekvenční analýza



Obr. 57. Frekvenční analýza hluku motoru auta pro různé režimy měření

Tab. 22. Vysvětlení zkratk použitých v grafu frekvenční analýzy hluku motoru (Obr. 57.)

| Zkratka | Vysvětlivka |
|--------------------|---|
| Neutral | Motor běžel na volnoběh |
| 2000 | Motor běžel ve 2000 ot./min |
| FA - pozadí | Snímání hluku prostředí při vypnutém motoru |
| i | Použití akustické izolace motoru |

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo dokázat, že kombinace stávajících materiálů bude vždy mít požadovaný vypovídající charakter v oblasti pohltivosti hluku. Současné materiály poskytují dostačující možnosti, které mají jednak požadovaný stupeň zvukové pohltivosti a dostatečnou odolnost vůči teplu, ale oba tyto parametry nejsou v požadovaném poměru. Z výsledků, které byly získány jak v laboratorních a reálných podmínkách vyplynuly, že materiál na bázi polyuretanu a skelného vlákna má potenciál poskytnout v oblasti mechanismů dostatečně efektivní hodnoty akustického útlumu.

Laboratorní část ukázala, že oba materiály mají z pohledu akustické pohltivosti podobné konečné hodnoty NRC. Podrobný pohled ukazuje, že lépe vychází při přímém nastavení ke zvuku, ale také i se vzduchovou mezerou PUR modrý než PUR černý. V tomto ohledu je nutné konstatovat, že samozhášivý černý PUR, který byl pro technické aplikace blízko oblasti motorů výhodnější z bezpečnostního hlediska, neposkytuje tak vysoké hodnoty NRC jako PUR modrý. Obecně můžeme konstatovat, že parametr NRC vyjadřuje do jisté míry křivku koeficientu akustické pohltivosti, nicméně nedosáhne nikdy komplexního vyhodnocení v rámci celého frekvenčního spektra.

Černý PUR je typ polyuretanu, který vykazoval v průběhu měření nižších hodnot při obou parametrech (NRC, α koeficient). Přesto černý PUR má výhodu v komplexním povrchu bez zásadních změn vůči akustické emisi od zdroje. Hodnoty koeficientu α dosáhly maxima při vzduchové mezeře 3 cm u frekvence 6 100 Hz a to $\alpha = 0,74$. Bez použití vzduchové mezery bylo dosaženo maxima při frekvenci 2 000 Hz a hodnoty $\alpha = 0,58$. Při kombinacích s jemnou tkaninou a mezerou 3 cm vykazoval PUR C hodnotu NRC = 0,395. Se skelnou vatou se stejnou mezerou 3 cm, hodnotu NRC = 0,645, což je vynikající výsledek.

Komplexní vyhodnocení křivky pro PUR – M dosáhne nejefektivnější pohltivosti při frekvenci 1 450 Hz, kde je $\alpha = 0,85$ při 3 cm vzduchové mezeře mezi pístem a vzorkem. PUR samotný, usazený přímo na pístu bez vzduchové mezery vykazuje výrazný nárůst křivky kolem 1 550 Hz, a svého maxima dosáhne kolem hodnoty frekvence 5 000 Hz a $\alpha = 0,96$. Hodnoty, které byly získány, měly poměrně dobrý vypovídající charakter kritické frekvenční oblasti do 1 000 Hz a kolem 1 000 Hz, nicméně nevýhodou tohoto PUR je jeho hořlavost a povrchová nestálost, kdy povrch je pokryt většími bublinami vznikající při polymeraci. PUR M vykazoval při kombinaci se skelnou tkaninou hodnotu NRC = 0,43 při 3

cm vzduchové mezeře. Kombinace se skelnou vatou poskytla výsledek pro $NRC = 0,68$ a také při 3 cm vzduchové mezeře.

Praktická část byla provedena za působení akustické emise motoru vozidla Opel Corsa, při kterém byl použit PUR C s tkaninou z důvodu zahřívání, aby byla zabezpečena odolnost vůči teplu, které působilo z činnosti motoru. Bylo zjištěno, že při extrémních podmínkách, ve kterých bylo měřeno záměrně, se dosáhne rozdílu ve frekvenčním rozsahu 20 – 12 000 Hz přibližně 1 – 2 dB. Toto zjištění lze považovat za vynikající výsledek, protože v běžném provozu se expozice do okolí více rozptýlí a hluk jako takový, který je odražen zpět k vozidlu není již v takovém intenzitě jako při tomto měření.

Závěrem lze konstatovat jednoznačný přínos těchto dvou materiálů pro tlumení akustické emise v motorových vozidlech, ve kterých jsou v současné době instalovány pouze materiály s ohledem na tepelné sálání motoru, ale hlučnost jako takovou řeší minimálně.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1995, 389 s. ISBN 80-01-02246-3.
- [2] VAŇKOVÁ, Marie, Miroslav DOLOŽÍLEK, Jiří NOVÁK, Anna RYNNDOVÁ, Antonín HOUŠKA, Milan MACUR a Zbyněk ČURDA. *Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí*. 1. vyd. Brno: PC-DIR spol. s.r.o., 1995. ISBN 80-214-0659-X.
- [3] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997, 174 s. ISBN 80-901-9361-7.
- [4] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-859-2072-7.
- [5] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [6] HGSTYLE.CZ, Polyuretanové pěny, [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.hgstyle.cz/cs/pro-vyrobce-nabytku.html>>.
- [7] UNIQUE.CZ, Sklotkaniny, [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.unique.cz/cs/produkty/sklotkaniny/>>.
- [8] TEPELNA-IZOLACE.CZ, Výroba skelné vaty, [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.tepelna-izolace.cz/vyroba-skelne-vaty.html>>.
- [9] ROTAFLEX.CZ, Použití izolace, [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.rotaflex.cz/pouziti-izolace.htm>>.
- [10] ROTAFLEX.CZ, Akustické desky, [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.rotaflex.cz/akusticke-desky-ad-01.htm>>.
- [11] SPECTRIS.CZ, Měření a analýza signálu hluku a vibrací, [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://mereni-a-analyza-signalu-hluku-a-vibraci.spectris.cz/zvukomer-2238-mediator/>>.
- [12] FT.UTB.CZ, Přístrojové vybavení Ústavu fyziky a materiálového inženýrství, Fakulty technologické, Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.ft.utb.cz/czech/ufmi/vybaveni.html>>.
- [13] STRUHAŘOVÁ V., *Akustické vlastnosti polyuretanů a skelných tkanin v sendvičové struktuře*, Diplomová práce, UTB Zlín, Zlín 2010

- [14] AUTOROAD.CZ, Test opel corsa rok výroby 2001 vs 2007, [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://testy.autoroad.cz/24446-test-opel-corsa-r-v-2001-vs-2007/>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|--------------------|---|
| c | fázová rychlost šíření podélných vln, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] |
| c_L | rychlost šíření podélných vln, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] |
| c_T | rychlost šíření příčných vln, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] |
| dB | decibel |
| E | dynamický modul pružnosti v tahu, [Pa] |
| E_A | efektivní hodnota akustické veličiny, |
| E_{A0} | referenční hodnota efektivní hodnoty akustické veličiny, |
| f | frekvence, [Hz] |
| G | modul pružnosti ve smyku, [Pa] |
| I | sledovaná intenzita zvuku, [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] |
| I_0 | referenční intenzita zvuku, [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] |
| I_1 | intenzita zvuku dopadající na povrch, [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] |
| I_2 | intenzita zvuku odraženého od povrchu, [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] |
| K | modul objemové pružnosti, [Pa] |
| $L_{\text{Aeq,T}}$ | Ekvivalentní hladina akustického tlaku, [dB] |
| L_I | hladina intenzity zvuku, [dB] |
| L_p | hladina akustického tlaku, [dB] |
| L_w | hladina akustického výkonu, [dB] |
| p | akustický tlak, [Pa] |
| p_0 | referenční akustický tlak, [Pa] |
| p_b | barometrický tlak, [Pa] |
| p_s | celkový statický tlak, [Pa] |
| $s(\tau)$ | funkce |
| $S(\omega)$ | spektrum funkce $s(\tau)$ |

| | |
|------------------|---|
| T | perioda, [s] |
| u | akustická výchylka, [m] |
| u_0 | amplituda akustické výchylky, [m] |
| v_0 | amplituda akustické rychlosti, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] |
| v_a | akustická rychlost, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] |
| W | sledovaný akustický výkon, [W] |
| W_0 | referenční akustický výkon, [W] |
| x | posunutí od nulové hodnoty, [-] |
| α | koeficient zvukové pohltivosti, [-] |
| $\bar{\alpha}_n$ | NRC koeficient zvukové pohltivosti, [-] |
| κ | Poissonova konstanta, [-] |
| λ | Vlnová délka, [nm] |
| ρ | hustota prostředí, [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] |
| τ | čas, [s] |
| ω | úhlová rychlost, [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$] |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obr. 1. 2,4- a 2,6-Diisokyanatotoulen | 24 |
| Obr. 2. 4,4-Diisokyanatodifenylmethan | 24 |
| Obr. 3. 1,5-Diisokyanatonaftalen | 24 |
| Obr. 4. Dvou-mikrofonová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206 [12]..... | 29 |
| Obr. 5. Analyzátor hladiny akustického tlaku Brüel & Kjaer 2238 Mediator..... | 30 |
| Obr. 6. Vzorky černého polyuretanu S 3535 F pro měření koeficientu zvukové pohltivosti o velikosti 100 a 30 mm | 31 |
| Obr. 7. Vzorky modrého polyuretanu N 2200 pro měření koeficientu zvukové pohltivosti o velikosti 100 a 30 mm | 32 |
| Obr. 8. Povrch černého polyuretanu S 3535 F, zvětšeno 8×, horní osvit | 33 |
| Obr. 9. Pórovitá struktura černého polyuretanu S 3535 F, zvětšení 40×, dolní osvit | 34 |
| Obr. 10. Povrch modrého polyuretanu N 2200, zvětšeno 12,5×, horní osvit | 34 |
| Obr. 11. Pórovitá struktura modrého polyuretanu N 2200, zvětšeno 40×, dolní osvit | 35 |
| Obr. 12. Struktura tkaniny UTE 140 P, zvětšeno 16×, kombinace horní i dolní osvit | 36 |
| Obr. 13. Struktura tkaniny UTE 165 P, zvětšeno 16×, kombinace horní i dolní osvit | 36 |
| Obr. 14. Koeficient zvukové pohltivosti pro skelnou vatu [10] | 37 |
| Obr. 15. Povrch skelné vaty s netkanou rohoží, zvětšeno 16×, horní osvit..... | 38 |
| Obr. 16. Struktura skelné vaty s netkanou rohoží, zvětšeno 40×, dolní osvit | 38 |
| Obr. 17. Lineární graf koeficientů zvukové pohltivosti PUR S 3535 F vzorek č. 1 | 42 |
| Obr. 18. Logaritmický graf zvukové pohltivosti PUR S 3535 F vzorek č. 1 | 42 |
| Obr. 19. Lineární graf koeficientů zvukové pohltivosti PUR N 2200 vzorek č. 1 | 43 |
| Obr. 20. Logaritmický graf zvukové pohltivosti PUR N 2200 vzorek č. 1 | 43 |
| Obr. 21. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci s tkaninou UTE 165 P, v pořadí tkanina-polyuretan..... | 44 |
| Obr. 22. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci s tkaninou UTE 165 P, v pořadí tkanina-polyuretan..... | 44 |
| Obr. 23. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci s tkaninou UTE 165 P, v pořadí polyuretan-tkanina..... | 45 |
| Obr. 24. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci s tkaninou UTE 165 P, v pořadí polyuretan-tkanina..... | 45 |
| Obr. 25. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci s tkaninou UTE 140 P, v pořadí tkanina-polyuretan..... | 46 |

| | |
|---|----|
| Obr. 26. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci s tkaninou UTE 140 P, v pořadí tkanina-polyuretan..... | 46 |
| Obr. 27. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci s tkaninou UTE 140 P, v pořadí polyuretan-tkanina..... | 47 |
| Obr. 28. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci s tkaninou UTE 140 P, v pořadí polyuretan-tkanina..... | 47 |
| Obr. 29. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci s tkaninou UTE 165 P, v pořadí tkanina-polyuretan..... | 48 |
| Obr. 30. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci s tkaninou UTE 165 P, v pořadí tkanina-polyuretan..... | 48 |
| Obr. 31. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci s tkaninou UTE 165 P, v pořadí polyuretan-tkanina..... | 49 |
| Obr. 32. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci s tkaninou UTE 165 P, v pořadí polyuretan-tkanina..... | 49 |
| Obr. 33. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci s tkaninou UTE 140 P, v pořadí tkanina-polyuretan..... | 50 |
| Obr. 34. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci s tkaninou UTE 140 P, v pořadí tkanina-polyuretan..... | 50 |
| Obr. 35. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci s tkaninou UTE 140 P, v pořadí polyuretan-tkanina..... | 51 |
| Obr. 36. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci s tkaninou UTE 140 P, v pořadí polyuretan-tkanina..... | 51 |
| Obr. 37. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí polyuretan-vata | 52 |
| Obr. 38. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí polyuretan-vata | 52 |
| Obr. 39. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí vata-polyuretan | 53 |
| Obr. 40. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí vata-polyuretan | 53 |
| Obr. 41. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí polyuretan-vata | 54 |

| | |
|--|----|
| Obr. 42. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí polyuretan-vata | 54 |
| Obr. 43. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí vata-polyuretan | 55 |
| Obr. 44. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí vata-polyuretan | 55 |
| Obr. 45. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí polyuretan-vata-polyuretan | 56 |
| Obr. 46. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S 3535 F v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí polyuretan-vata-polyuretan | 56 |
| Obr. 47. Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí polyuretan-vata-polyuretan | 57 |
| Obr. 48. Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu N 2200 v kombinaci se skelnou vatou, v pořadí polyuretan-vata-polyuretan | 57 |
| Obr. 49. NRC koeficient naměřený pro PUR S 3535 F | 58 |
| Obr. 50. NRC koeficient naměřený pro PUR N 2200 | 59 |
| Obr. 51. NRC koeficient naměřený pro PUR S 3535 F v kombinaci se skelnými tkaninami | 61 |
| Obr. 52. NRC koeficient naměřený pro PUR S 3535 F v kombinaci se skelnou vatou..... | 62 |
| Obr. 53. NRC koeficient naměřený pro PUR N 2200 v kombinaci se skelnými tkaninami | 64 |
| Obr. 54. NRC koeficient naměřený pro PUR N 2200 v kombinaci se skelnou vatou | 65 |
| Obr. 55. Měřený motor vozidla Opel Corsa 1,0 12V (2001)..... | 66 |
| Obr. 56. Nákres umístění mikrofonu před vozidlem..... | 67 |
| Obr. 57. Frekvenční analýza hluku motoru auta pro různé režimy měření | 67 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tab. 1. Rychlost šíření zvuku v různých látkách [1] | 16 |
| Tab. 2. Referenční hodnoty pro výpočet dB [3] | 21 |
| Tab. 3. Vybrané vlastnosti jednotlivých druhů skel [5] | 27 |
| Tab. 4. Vlastnosti použitých polyuretanů [6] | 35 |
| Tab. 5. Vlastnosti použitých skelných tkanin [7]..... | 36 |
| Tab. 6. Vybrané vlastnosti skelné vaty [9] [10]..... | 37 |
| Tab. 7. Naměřené rozměry vzorků černého PUR S 3535 F | 39 |
| Tab. 8. Získané hodnoty hmotnosti, objemu a vypočtené hustoty černého PUR S 3535 F..... | 39 |
| Tab. 9. Naměřené rozměry vzorků modrého PUR N 2200 | 40 |
| Tab. 10. Získané hodnoty hmotnosti, objemu a vypočtené hustoty modrého PUR N 2200 | 40 |
| Tab. 11. Značení vzorků použité v grafech | 41 |
| Tab. 12. Hodnoty NRC získané z měření koeficientu zvukové pohltivosti pro PUR S 3535 F..... | 58 |
| Tab. 13. Hodnoty NRC získané z měření koeficientu zvukové pohltivosti pro PUR N 2200..... | 59 |
| Tab. 14. Hodnoty NRC získané z měření koeficientu zvukové pohltivosti pro PUR S 3535 F v kombinaci s tkaninami UTE 140 P a UTE 165 P..... | 60 |
| Tab. 15. Hodnoty NRC získané z měření koeficientu zvukové pohltivosti pro PUR S 3535 F v kombinaci se skelnou vatou | 61 |
| Tab. 16. Hodnoty NRC získané z měření koeficientu zvukové pohltivosti pro PUR N 2200 v kombinaci s tkaninami UTE 140 P a UTE 165 P..... | 63 |
| Tab. 17. Hodnoty NRC získané z měření koeficientu zvukové pohltivosti pro PUR N 2200 v kombinaci se skelnou vatou | 64 |
| Tab. 18. Rozměry tlumící vrstvy | 65 |
| Tab. 19. Rozměry a hmotnost auta Opel Corsa 1,0 12V (2001) [14] | 65 |
| Tab. 20. Parametry motoru auta Opel Corsa 1,0 12V (2001) [14] | 66 |
| Tab. 21. Ekvivalentní hladina akustického tlaku pro různé režimy měření | 66 |
| Tab. 22. Vysvětlení zkratk použitých v grafu frekvenční analýzy hluku motoru (Obr. 57.) | 68 |